

ESTIMATION DE LA REPONSE STATIQUE EN POINTE A PARTIR D'ESSAIS DYNAMIQUES ET DES MODELES ANALYTIQUES D'INTERACTION SOL-POINTE

STATIC TIP REACTION ESTIMATION THROUGH DYNAMIC PENETRATION TEST AND SOIL-TIP ANALYTICAL INTERACTION MODELS

Caroline FORESTTI OLIVEIRA^{1,2}, Miguel BENZ-NAVARRETE¹, Pierre BREUL², Bastien CHEVALIER²

¹ Sol Solution, Bureau d'études Géotechnique et Géophysique, Riom, France

² Institut Pascal, Université Clermont-Auvergne, Clermont-Ferrand, France

RÉSUMÉ – Des essais pénétrométriques de chargement en pointe (dynamiques DCLT et statiques CLT) ont été réalisés en chambre de calibration sur des sables de référence. En exploitant les courbes DCLT, on estime les courbes CLT. Celles-ci présentent une bonne correspondance avec les courbes expérimentales. Cette analyse permet de dissocier l'effet statique de l'effet dynamique et ouvre la voie à une meilleure interprétation de l'essai DCLT.

ABSTRACT – Cone loading penetrometer tests (dynamic: DCLT, and static: CLT) were carried out with reference sands. By interpreting the DCLT curves with interaction models, it is possible to estimate the static loading curves which showed a good correspondence with the experimental CLT curves. The analysis enables to dissociate the static effect from the dynamic effect during penetration paving the way for a better interpretation of DCLT.

1 Introduction

La caractérisation de sols est une condition indispensable pour le dimensionnement des fondations. Pour ce faire, les essais de pénétration dynamique (DPT : Dynamic Probing Test) sont une des techniques les plus utilisées à travers le monde. Ils permettent d'ausculter aisément, rapidement et à faible coût le sol dans son état de contrainte naturel. Toutefois, à l'état actuel de la pratique, les DPT ne fournissent qu'une mesure reliée à la rupture du sol. En effet, l'essai de pénétration classiquement connu ne permet pas d'établir une relation effort-déplacement en pointe au cours de l'essai facilitant la détermination des paramètres de déformation du sol. L'essai CLT (CLT : Cone Loading Test) consiste à coupler un essai de chargement statique avec l'essai pénétrométrique (statique ou dynamique) (Arbaoui, 2003). L'essai de chargement dynamique en pointe pénétrométrique (DCLT) récemment proposé en France permet d'obtenir, pour chaque impact, une courbe de chargement dynamique (courbe DCLT : Dynamic Cone Loading Test) exprimant la contrainte en pointe en fonction de l'enfoncement (Benz Navarrete et al., 2021). La courbe DCLT est qualitativement comparable à la courbe de chargement statique. A partir de l'utilisation de modèles d'interaction, inspirés des essais de chargement de pieux, il est possible d'obtenir une courbe de chargement en pointe (CLT) et d'autre part d'étudier la déformabilité des sols in situ.

2 L'essai de chargement dynamique en pointe pénétrométrique (DCLT)

L'essai DCLT, réalisé à l'aide du pénétromètre PANDA 3®, consiste à enfoncer par battage dynamique une tige munie d'une pointe conique (section transversale de 4 cm²) dans le sol (Figure 1a). Pour chaque impact, les capteurs de déformation, d'accélération et de déplacement permettent d'obtenir des enregistrements de : force $F(t)$, vitesse $v(t)$ et

enfoncement $s(t)$ (Figure 1b). Une analyse des enregistrements qui se base sur la résolution de l'équation de l'onde, le découplage et la reconstruction des ondes élémentaires permet d'obtenir en pointe : force $F_p(t)$, vitesse $V_p(t)$ et enfoncement $s_p(t)$. On trace ainsi la contrainte en fonction de l'enfoncement pour obtenir la courbe DCLT (Figure 1c). Une description complète de l'appareil, du principe de mesure ainsi que des résultats obtenus sont fournis par (Benz Navarrete et al., 2021).

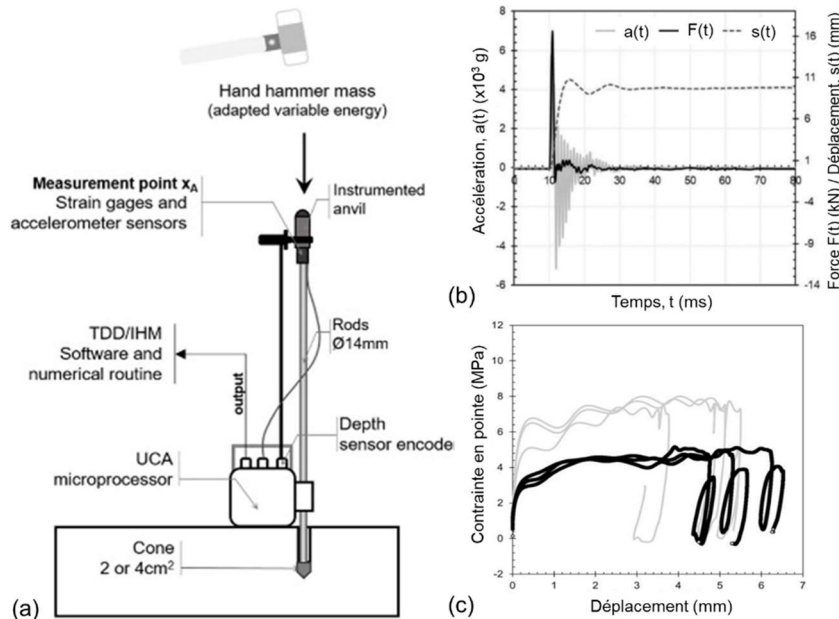


Figure 1. (a) Schéma de l'appareil, (b) signaux $F(t)$, $v(t)$ et $s(t)$ mesurés et (c) exemple de courbes DCLT de trois impacts consécutifs pour un sable testé à deux profondeurs 30 cm (courbe noires) et 70 cm (courbes grises) (Benz Navarrete et al., 2021)

3 Modèles analytiques d'interaction sol-pointe

Différents travaux se sont intéressés à l'interprétation des courbes issues des essais de chargement, statique ou dynamique, des pieux et pénétromètres. Originellement, l'interprétation de ces essais était basée sur des relations empiriques nommées formules « de battage » (e.g. formule des Hollandais). Ces relations découlaient souvent d'une analyse newtonienne (théorie des chocs) et de la prise en compte de quelques hypothèses simplificatrices, car la plupart de ces essais ne permettaient pas d'établir la relation effort-enfoncement au cours d'essai.

Certains chercheurs ont constaté les limitations de ces relations et la nécessité d'intégrer l'analyse de la propagation des ondes afin de mieux comprendre le phénomène du battage pénétrométrique. En plus de réduire le niveau d'empirisme de la technique, l'instrumentation et l'application de l'équation d'ondes a permis d'obtenir la courbe de chargement dynamique. Différents modèles ont été proposés afin d'exploiter cette courbe (Lysmer, 1965). Souvent appliqués aux essais de chargement de pieux, ceux-ci modélisent la réaction en pointe R_t comme un système de ressorts et d'amortisseurs (Eq. 1). Les coefficients de ces modèles (M_b , C_b , K_b) sont reliés aux paramètres rhéologiques du sol. Considérant que le pénétromètre est assimilable à un pieu à échelle réduite travaillant en pointe, il est possible d'exploiter la courbe DCLT à l'aide des modèles proposés pour les pieux. La masse du pénétromètre utilisée étant largement plus petite que celle d'un pieu, la première composante (M_b) est donc négligeable.

Sur la base de cette équation, différents modèles d'interaction en pointe existent. Le plus célèbre dans la pratique des pieux est le celui proposé par Smith (1960). Malgré son importance, c'est un modèle assez simpliste qui est alimenté par des paramètres très peu utilisés dans les dimensionnements courants (quake Q , amortissement J_b). D'autres modèles plus intéressants, comme celui de Lysmer (1965) ont été proposés par la suite.

Ceux-ci sont alimentés par des paramètres caractérisant le comportement en déformation du sol (e.g. module de cisaillement G , vitesse d'ondes de cisaillement v_s , coefficient de Poisson ν). Toutefois, ces modèles n'intègrent pas des concepts tels que la non-linéarité de la réponse du sol en pointe ou l'effet de l'encastrement. Récemment, (Loukidis et al., 2008) proposent un modèle intégrant l'effet de la non-linéarité du comportement à l'interaction pointe/sol et l'effet de la profondeur d'essai. Dans ce travail, on s'intéresse à évaluer dans quelle mesure le modèle proposé par (Loukidis et al. 2008), dorénavant nommé modèle DCLT, permettrait d'exploiter au mieux les courbes obtenues à l'aide de l'essai DCLT. Pour ce faire, on applique ce modèle à des essais DCLT et on compare les courbes CLT estimées au courbes obtenues expérimentalement.

$$M_b a(t) + C_b v(t) + K_b s(t) = R_t(t) \quad (1)$$

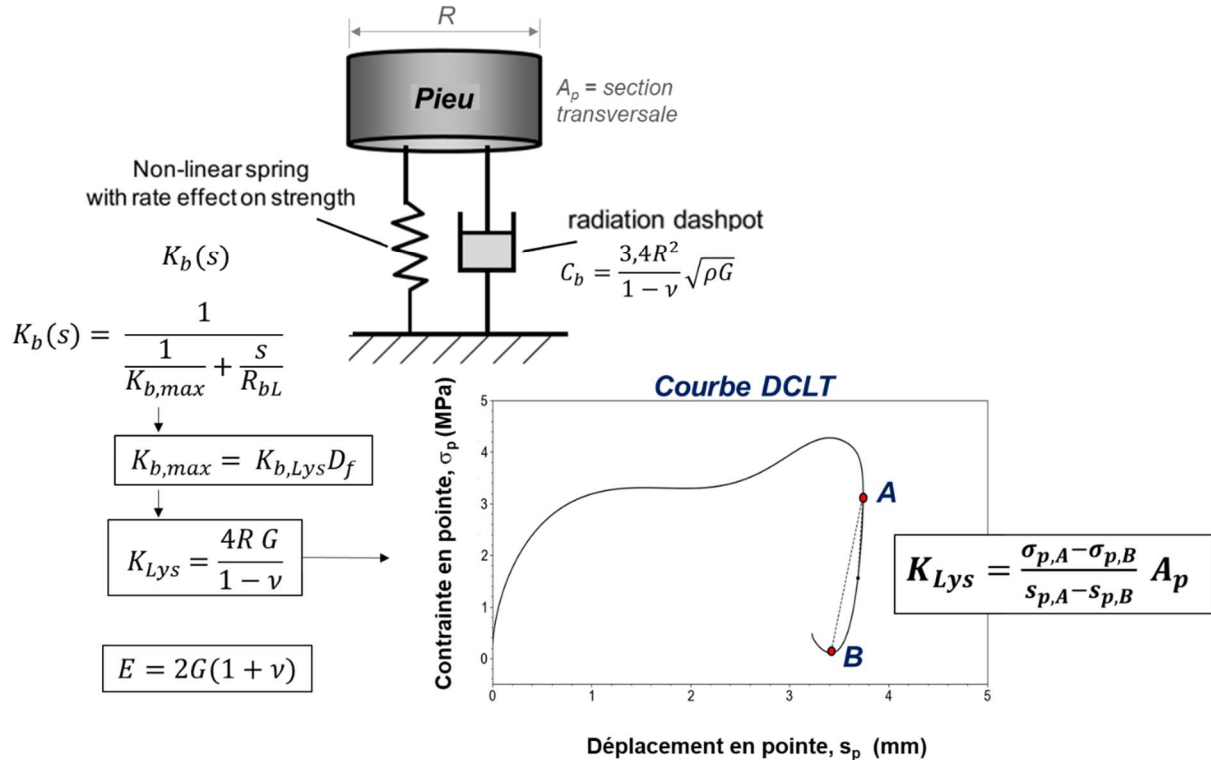


Figure 2. Modèles d'interaction sol-pointe proposé (modifié de Loukidis et al., 2008)

Pour son application pratique, on peut constater que ce modèle d'interaction est alimenté par des paramètres de résistance (R_{bL}) et de déformation (G , ν) (Figure 2). Les coefficients K_b et C_b sont obtenus à partir des paramètres de déformabilité du sol (e.g. G , v_s , E , ν_p). On adopte le coefficient de Poisson ν égale à 0,33. La profondeur z d'essai étant très supérieure au diamètre D de la pointe ($z > 8D$), on applique un coefficient d'encastrement qui vaut 1,8 (Loukidis et al., 2008). En outre, en phase de chargement, la raideur K_b considérée est non-linéaire et on suppose une valeur maximale comme celle proposée par Lysmer ($K_{b,max} = K_{b,Lys} D_f$). Celle-ci décroît en fonction du déplacement en suivant une loi hyperbolique simple. La raideur $K_{b,Lys}$ est obtenue à partir de l'exploitation de la courbe DCLT en phase de déchargement. Comme dans les modèles (Lysmer, 1966 ; Loukidis et al. 2008), l'exploitation de la courbe de chargement dynamique permet de remonter au module de déformation E du sol ausculté (Figure 2). Pour l'adaptation de ce modèle, il s'avère nécessaire de définir expérimentalement la valeur de résistance ultime R_{BL} . Pour ce faire, il faut définir le critère de rupture qui s'adapte le mieux à l'essai DCLT. Dans ce travail, nous avons appliqué et comparé cinq méthodes couramment utilisées des essais de chargement dynamique instrumentés (pieux, SPT, essai de choc) (Tableau 1).

Tableau 1. Méthodes appliquées aux essais de chargement dynamique pour la détermination de la résistance ultime

Méthode de (Paikowsky & Chernauskas, 1992)	$\frac{\int F(t)V(t) dt}{\frac{s_{max} - s_f}{2} + s_f} \cdot \frac{1}{A_p}$	(2)
Méthode de (Schnaid et al., 2007)	$\frac{\int F(t)V(t) dt}{s_f} \cdot \frac{1}{A_p}$	(3)
Méthode de l'intégration de la courbe DCLT	$\int_0^{s_{max}} \frac{\sigma_p(t) ds_p}{s_{max}}$	(4)
Méthode du point de déchargement (<i>Unloading Point Method</i> , UPM) (Middendorp et al., 1992)	$F_p(t_1)$ avec $V_p(t_1) \approx 0$ m/s	(5)
Méthode d'(Aussedat, 1970)	$F_p(t_2)$ avec $V_p(t_2) = \max(V_p)$	(6)

4 Etude expérimentale : essais DCLT et CLT en chambre d'étalonnage

Une série d'essais de chargement dynamique (DCLT) et statique (CLT) en pointe pénétrométrique a été réalisée en laboratoire. L'objectif de ces essais est d'une part de comparer les courbes de chargement en pointe issues de deux techniques et d'évaluer la pertinence du modèle proposé. Les sols étudiés sont des sables propres de référence, à savoir : sable d'Hostun HN31 (SH) et le sable de Fontainebleau NE34 (SF). Chaque échantillon testé a été reconstitué à différents états de densité (Tableau 2).

Tableau 2. Caractéristiques des éprouvettes

Eprouvette	Sable	Densité sèche initiale (kg/m ³)	Teneur en eau (%)	Densité relative initiale (%)
SFM1	SF	1490	1,80	46
SFM2	SF	1573	1,90	71
SHM1	SH	1482	0,80	51
SHM2	SH	1527	1,80	67

Les éprouvettes ont été reconstituées dans une chambre de calibration métallique de 372 mm de diamètre et 805 mm de hauteur (Figure 3a). Les conditions aux limites de la chambre d'étalonnage sont : déplacements empêchés radialement (condition oedométrique) et contrainte verticale nulle en surface. Par ailleurs, afin de minimiser le frottement latéral, une membrane plastique a été collée aux parois latérales intérieures de la chambre d'étalonnage. De même, un système de guidage est fixé à la chambre d'étalonnage afin de garantir la verticalité du pénétromètre et de minimiser le possible flambement des barres au cours des chargements. Le compactage a été effectué par damage dynamique. Chaque échantillon a été confectionné en huit couches d'environ 10 cm d'épaisseur afin de garantir l'homogénéité du massif. A la fin des essais de chargements, trois échantillons sont prélevés afin de déterminer la teneur en eau de chaque éprouvette.

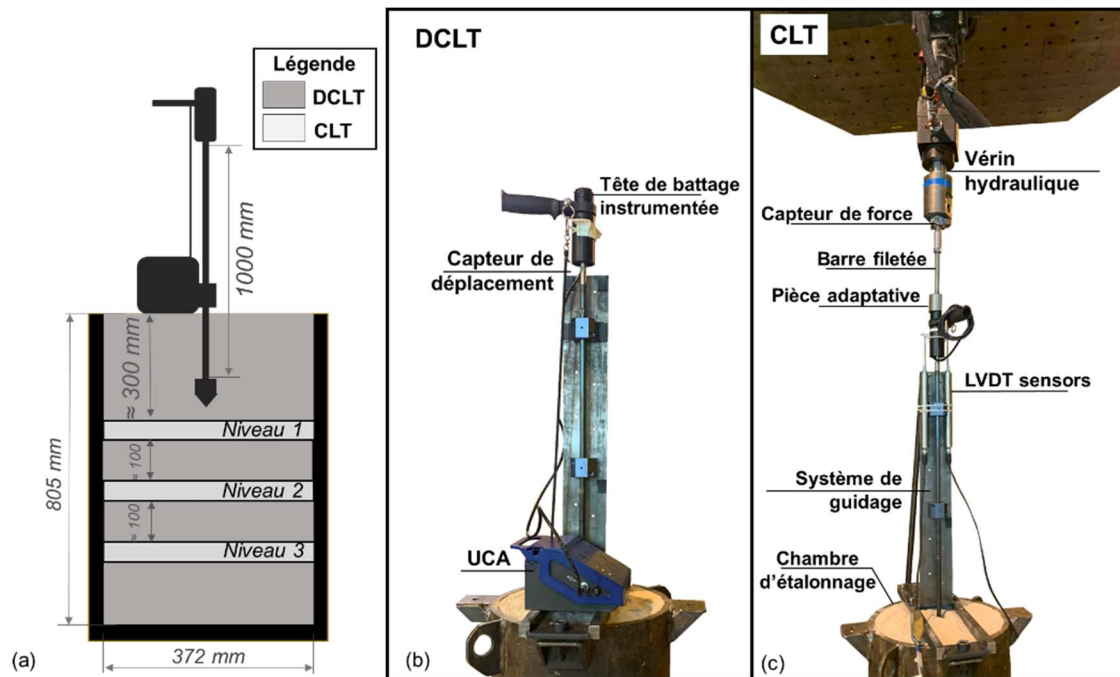


Figure 3. (a) Schéma de la chambre d'étalonnage montrant l'emplacement des essais en profondeur et l'appareillage mis au point pour la réalisation des essais (b) DCLT et (c) CLT

Pour chacune des éprouvettes et une fois que le compactage a été finalisé, les essais de chargement ont été exécutés dans l'axe de l'échantillon. Le pénétromètre est battu manuellement jusqu'à différentes profondeurs. Chaque impact est enregistré et une courbe DCLT est obtenue. Une fois la profondeur voulue atteinte, le battage est arrêté et le bâti pour les essais CLT est installé. Le matériel de chargement statique est constitué (Figure 3) :

- d'un vérin hydraulique de 10 T fixé à une structure de réaction (portique métallique) relié à une centrale hydraulique. Une barre filetée et une pièce adaptative permettent d'associer le pénétromètre à la structure de réaction (portique en métal fixé au dallage) ;
- de capteurs de mesure des déplacements et capteur d'efforts correspondants. On utilise un capteur de force de 10 kN à 0,01 kN près et deux capteurs de déplacement de type LVDT d'une course utile de 40 mm et de résolution de l'ordre de $2/1000^{\text{e}}$ de mm ;
- d'un système de guidage fixé au moule et relié en trois niveaux au train de tige permettant de conserver la verticalité du système ;
- d'un ordinateur et d'une centrale d'acquisition des données de type spider 8 HBM à laquelle sont reliés les capteurs. Les données sont enregistrées, à raison d'une mesure par seconde.

Une fois le matériel installé, on poursuit avec l'essai CLT. La force et le déplacement sont enregistrés directement pendant qu'on impose une vitesse de chargement constante de l'ordre de 0,01 mm/s. Le pilotage s'effectue en déplacement. Pour chaque éprouvette, trois séries d'au moins 5 cycles de chargement statique ont été réalisés à différentes profondeurs (≈ 30 cm, ≈ 43 cm et ≈ 56 cm). Chaque essai CLT est mené jusqu'à un enfoncement de l'ordre de 5 mm. On réalise de cinq à six cycles de chargement-déchargement-rechargement. Le déchargement est rapide jusqu'à une pression nulle et le rechargement est mené suivant le même chemin emprunté lors d'un chargement monotone. Une fois que les cycles de chargement, déchargement et rechargement des essais CLT sont finalisés ; on procède à l'enlèvement du dispositif d'enfoncement statique et on poursuit l'essai DCLT sur environ 10 cm de profondeur. Cette procédure est répétée de façon à avoir réalisé des séries de chargement CLT à trois profondeurs différentes. Une fois le chargement CLT réalisé à la troisième profondeur, on poursuit avec l'essai DCLT jusqu'au fond de l'éprouvette.

5 Résultats

Dans la Figure 4a, on présente les pénétrographes des éprouvettes testées. Pour les analyses qui suivent, on compare les résultats DCLT des 5 impacts précédant l'essai CLT et les 5 impacts ultérieurs à l'essai CLT. A titre d'exemple, on a présenté dans la Figure 4b les courbes DCLT et CLT pour le niveau 2 de l'éprouvette SHM2. On constate de manière générale une bonne répétabilité des courbes. Par ailleurs, on observe les mêmes ordres de grandeur pour les contraintes au palier des courbes issues de ces deux techniques.

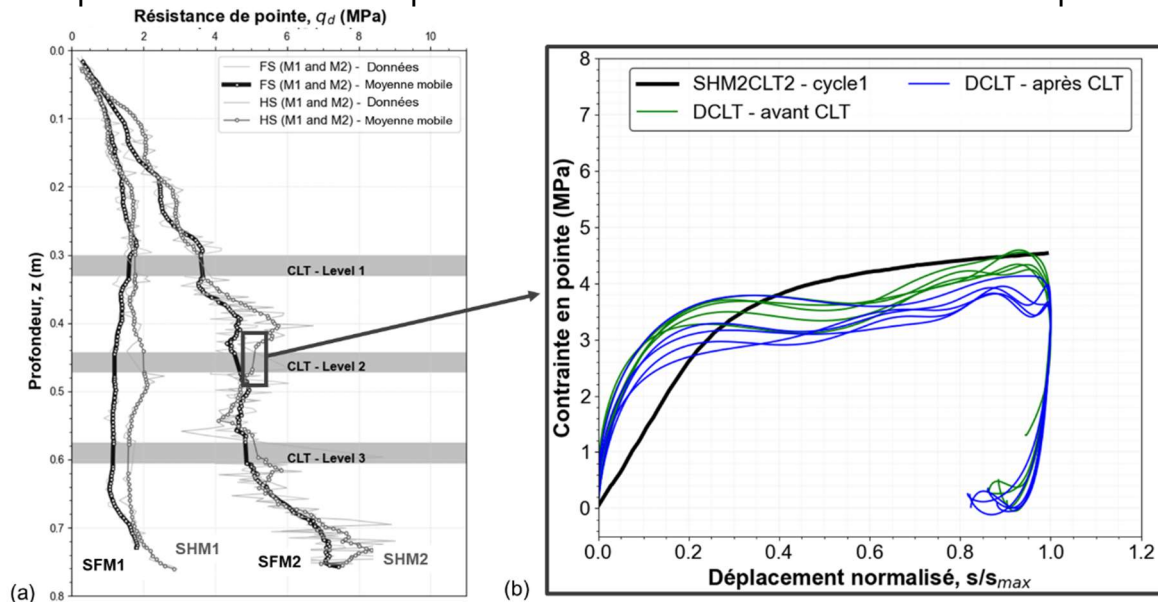


Figure 4. (a) Pénétrogramme de l'éprouvette SHM2 (b) exemple de courbes de chargement (Niveau 2) : courbes DCLT avant l'essai CLT, courbe CLT et courbes DCLT après l'essai CLT

5.1 Détermination de la résistance ultime alimentant le modèle d'interaction

En exploitant les 5 courbes DCLT obtenues avant et après les chargements CLT à l'aide des méthodes présentées (Tableau 1), on obtient différentes valeurs de résistance qui sont comparées dans la Figure 5 aux valeurs issues des courbes CLT. Pour cette analyse, on définit q_{CLT} selon le critère proposé par Terzaghi : la résistance ultime étant la contrainte correspondante à un déplacement de 10% du diamètre.

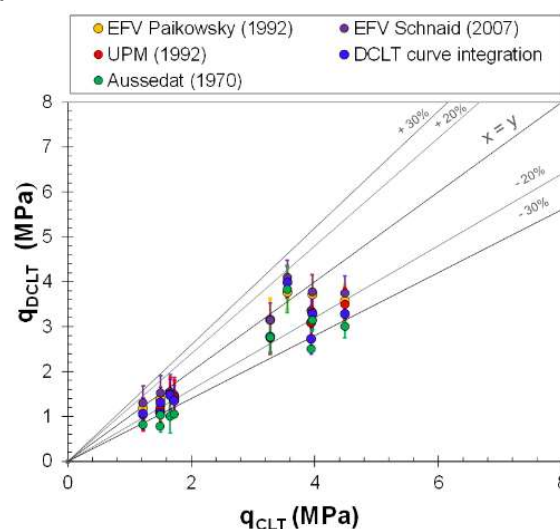


Figure 5. Comparaison des valeurs de résistances ultimes obtenues

On constate que les différentes méthodes testées fournissent des valeurs comparables aux valeurs de résistance issues de l'essai CLT. Parmi ces différentes méthodes testées, on retient la méthode UPM car celle-ci fournit les valeurs les plus proches de q_{CLT} avec la dispersion la plus faible.

5.2 Application des modèles d'interaction : comparaison entre les courbes DCLT et CLT expérimentales et estimées

On applique le modèle proposé en utilisant les paramètres (q_{DCLT} et E) définis et déterminés dans les sections précédentes et la valeur de résistance ultime obtenue à partir des courbes DCLT à l'aide de la méthode UPM. Dans la Figure 6, on présente la comparaison entre les courbes estimées (DCLT en noir et CLT en bleu) par le modèle proposé et celles obtenues expérimentalement (DCLT en gris et CLT en vert) pour le niveau 2 de profondeur.

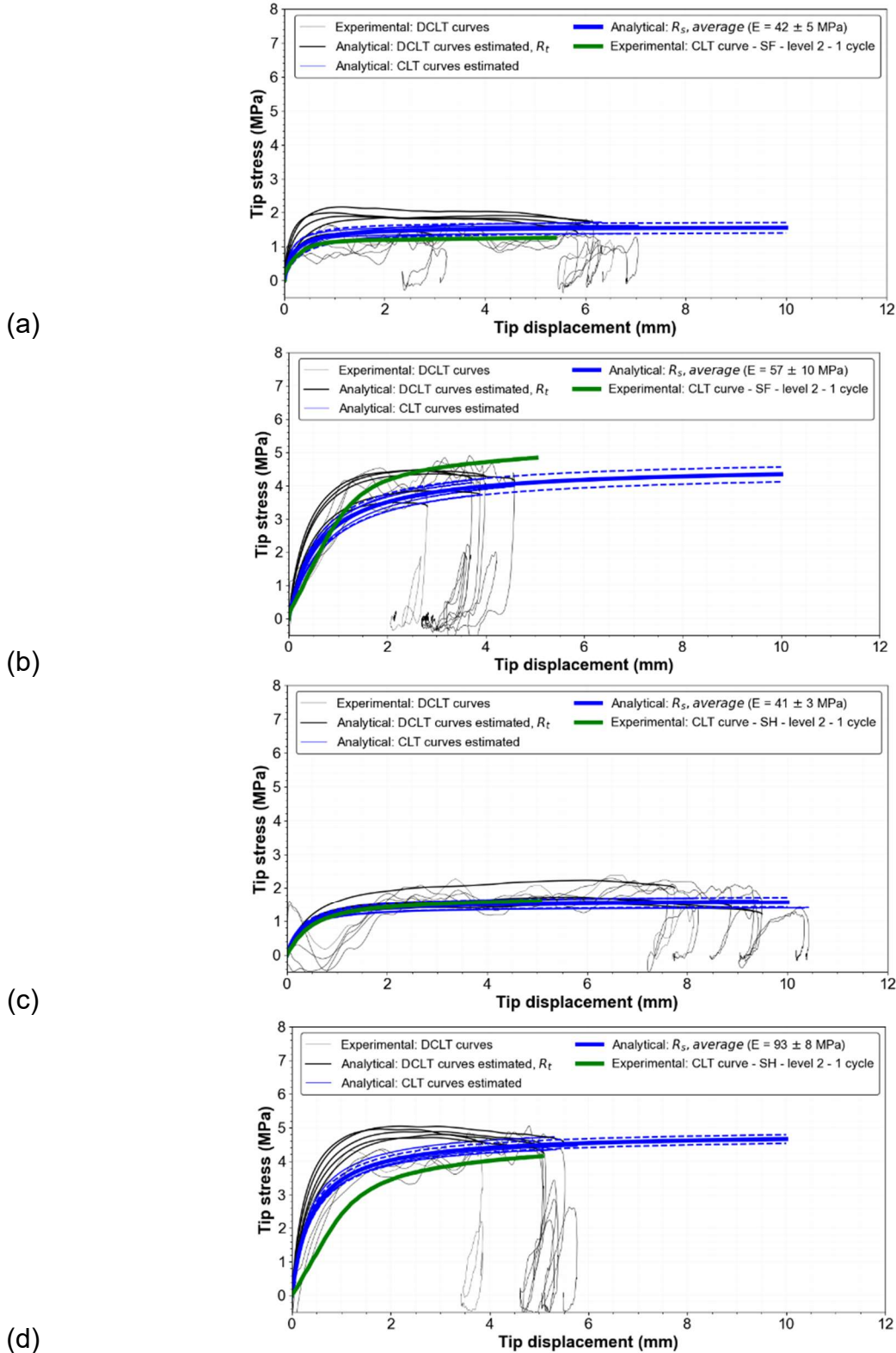


Figure 6. Courbes expérimentales et estimées à l'aide du modèle d'interaction : (a) SFM1, (b) SFM2, (c) SHM1 et (d) SHM2

6 Conclusions

L'essai DCLT permet d'obtenir une courbe de chargement dynamique en pointe pour chaque impact, comparable à une courbe statique CLT. Cette courbe peut être exploitée à l'aide des méthodes et des modèles proposés pour les essais de chargement dynamiques des pieux afin de remonter à des paramètres de rupture, mais aussi de déformation. Dans ce travail on a présenté les résultats obtenus à partir d'une série d'essais de chargement DCLT et CLT en laboratoire réalisés au sein des éprouvettes des sables de Hostun et Fontainebleau compactées à différents états de densité. En plus d'une comparaison qualitative des courbes, on applique un modèle d'interaction afin d'estimer les courbes statiques à partir de l'essai DCLT.

Afin de définir la méthode d'obtention de la résistance ultime alimentant ce modèle, on compare différentes méthodes de calcul appliquées à des essais de chargement dynamique en pointe. La méthode UPM, qui présente la meilleure correspondance entre les deux techniques et la dispersion la plus faible, est retenue. La méthode d'obtention de la résistance ultime choisie, on applique le modèle d'interaction proposé.

Globalement, on observe une bonne correspondance entre les courbes estimées et celles obtenues expérimentalement, notamment plus les éprouvettes moins denses. Cette analyse a montré que à l'aide d'un modèle d'interaction adapté, il est possible de dissocier l'effet statique de l'effet dynamique lors de la pénétration. Cela ouvre la voie à une meilleure interprétation de l'essai DCLT.

7 Références bibliographiques

- Arbaoui, H. (2003). *Mésure de la déformabilité des sols en place à l'aide d'un pénétromètre*. Thèse doctorale, Université Blaise Pascal – Clermont II.
- Aussedat, G. (1970). *Sollicitations rapides des sols*. thèse doctorale, Faculté des Sciences de l'Université de Grenoble.
- Benz Navarrete, M. A., Breul, P., & Gourvès, R. (2021). Application of wave equation theory to improve dynamic cone penetration test for shallow soil characterisation. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 14(1), 289-02.
- Loukidis, D., Salgado, R., & Abou-Jaoude, G. (2008). *Assessment of Axially-Loaded Pile Dynamic Design Methods and Review of INDOT Axially-Loaded Design Procedure* (Numéro FHWA/IN/JTRP-2008/6).
- Lysmer, J. (1965). *Vertical motion of rigid footing*. thèse doctorale, University of Michigan.
- Middendorp, P., Bermingham, P., & Kuiper, B. (1992). Statnamic load testing of foundation piles. *4th Int. Conf. on the Application of Stresswave Theory to Piles*, 19(5), 265-272.
- Paikowsky, S. G., & Chernauskas, L. R. (1992). Energy Approach for Capacity Evaluation of Driven Piles. *4th International Conference on the Application of Stress-Wave Theory to Piles*, 595-601.
- Schnaid, F., Odebrecht, E., & Rocha, M. M. (2007). On the mechanics of dynamic penetration tests. *Geomechanics and Geoengineering*, 2(2), 137-146.
- Smith, E. A. L. (1960). Pile-driving analysis by the wave equation. *Journal of the soil mechanics and foundations division*, 86(4), 35-61.