



Approche de la modélisation d'une loi d'interaction limon-acier sous sollicitation dynamique à l'aide d'essais en laboratoire

Azzedine OULARBI¹, Daniel LEVACHER², Nabil MIMOUNI³

1. Université Saad DAHLAB de Blida, Faculté des Sciences de l'Ingénieur, Département SEE, Route de Soumaa, BP 270, 09000 Blida, Algérie.
drazzoular@gmail.com
2. Université de Caen, Faculté des Sciences, UMR 6143 CNRS- M2C, Esplanade de la paix, 14032 Caen, France.
3. Ingénieur consultant, 15125 Westroad, Houston, TX, 77095 USA.

Résumé :

Les nombreuses méthodes d'évaluation du frottement latéral le long du fût des pieux offshore, utilisant une approche globale, restent défailtantes, en raison de la méconnaissance des mécanismes du phénomène réellement mis en jeu à l'interface sol-pieu, lors de la mise en œuvre de la structure par un chargement dynamique tel que le battage ou le vibrofonçage.

L'approche utilisée dans le cadre de la présente étude vise à modéliser une loi de comportement de l'interaction limon-acier à l'interface d'un pieu flottant sous sollicitation dynamique.

Pour appréhender et comprendre le mécanisme de mobilisation du frottement latéral en intégrant les caractéristiques de compressibilité du sol environnant, un dispositif expérimental approprié a été mis au point et testé pour réaliser des essais intermédiaires, entre les essais à contrainte normale constante et des essais à vitesse constante (OULARBI, 2010). C'est les résultats de cette approche qui sont présentés dans cet article.

Mots-clés :

Pieux – Modélisation – Frottement latéral – Limon – Interaction – Dynamique – Battage – Vibrofonçage

1. Introduction

Depuis l'avènement des outils informatiques et numériques, une nouvelle voie d'approche des problèmes de mise en œuvre dynamique des pieux très long dit « flottant » consiste, après l'approche théorique et l'étude expérimentale, en la résolution des équations de la propagation d'onde après modélisation théorique (analytique ou numérique).

Il est clair que ces trois voies ne sont pas indépendantes. La résolution numérique est en effet indissociable de l'approche théorique qui conduit à la modélisation et l'approche

expérimentale qui permet de caler les paramètres du modèle et de valider le programme numérique. Ce dernier permet ensuite par le jeu de simulation, d'effectuer toute sorte d'investigation ou de prédiction en remplacement à la procédure expérimentale qui reste fastidieuse et coûteuse. Cependant, cette démarche est entourée d'inconnues, essentiellement l'impact du frottement latéral sur la résistance à l'enfoncement. En effet, on ne maîtrise pas suffisamment bien les modèles d'interaction sol/structure et les nombreux paramètres qui y interviennent. La présente étude a pour but, justement, d'apporter une contribution en proposant un modèle avec un nombre simplifié de paramètres dont le choix et la justification proviennent d'une expérimentation réalisée à 1g au laboratoire à l'aide d'un modèle physique spécialement conçu pour analyser les mécanismes de mobilisation du frottement latéral durant un chargement dynamique, et ce dans le cas particulier d'une interaction limon-acier (MIMOUNI, 1998).

2. Le matériau d'essai

Il s'agit d'un sol provenant de sondage effectué au niveau de la plaine alluviale de la Vilaine. Le massif est constitué d'une argile limoneuse dont la granulométrie renferme 50 à 60% d'éléments inférieurs à 2μ . La fraction fine est composée essentiellement de montmorillonite, le reste en proportion plus faible d'illite et de kaolinite.

Les caractéristiques géotechniques des différents échantillons non remaniés prélevés sur un sondage sont répertoriées dans le tableau 1. Le sol que l'on cherche à modéliser est donc un terrain argilo-limoneux organique sableux de haute plasticité.

Tableau 1. Caractéristiques géotechniques du sol testé.

<i>Profondeur</i> <i>(m)</i>	<i>W</i> <i>(%)</i>	<i>W_l</i> <i>(%)</i>	<i>I_p</i> <i>(%)</i>	<i>γ_d</i> <i>(kN/m³)</i>	<i>M.O.</i> <i>(%)</i>	<i>C_u</i> <i>(kPa)</i>	<i>e</i> <i>-</i>
0 à 2	48	75	30	11,0	1	45	1,3
2 à 4	108	125	82	6,6	3	15	2,9
4 à 8	64	70	31	9,3	2	40	1,8
8 à 17	78	87	47	9,1	4	39	1,7

3. Modèle proposé pour l'interaction pieu/sol sur la surface latérale

Après analyse des résultats d'essais réalisés en laboratoire (MIMOUNI, 1998), le comportement observé peut être raisonnablement modélisé par une loi du type élastique linéaire parfaitement plastique en déplacement fonction de deux paramètres : la pente de mobilisation élastique β et le frottement limite τ_r (frottement résiduel). Il a été observé, par ailleurs, qu'après un seuil de déplacement de l'ordre de 1,1 mm, la contrainte τ atteint une valeur limite de frottement variant entre 8 et 22 kPa (OULARBI, 2010). Il a été noté aussi que le paramètre β dépend à la fois de la contrainte horizontale σ_h et de la vitesse v .

3.1 Influence de la contrainte horizontale σ_h sur le frottement latéral τ_r

Pour décrire l'influence de la contrainte horizontale σ_h sur le frottement latéral τ_r une étude de variation a été menée. A son issue, il a été relevé que, quelle que soit la valeur de la cohésion non drainée C_u , et pour une vitesse particulière fixée à $v_0=15,4$ mm/s, l'effort τ_r croît quasi-linéairement avec la contrainte horizontale σ_h . Ainsi, pour les séries de mesures obtenues, on arrive à un nuage de points, qui semble s'ajuster autour d'une droite passant par l'origine (figure 1).

On en conclut que dans le cas spécifique de notre sol de type argilo-limoneux très plastique, la relation obéit à une loi linéaire de la forme : $\tau_r = 0,2866 * \sigma_h$.

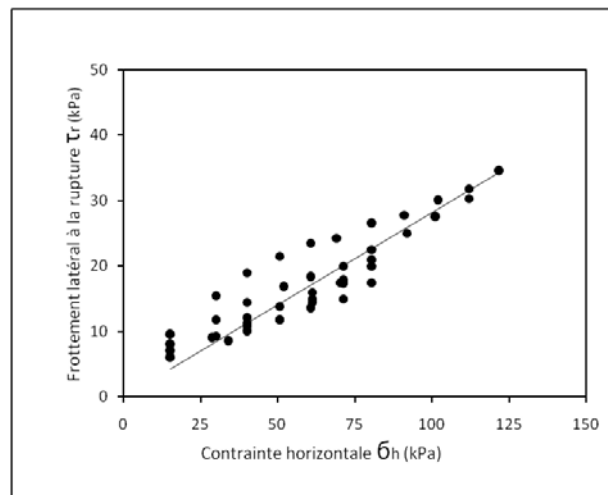


Figure 1. Influence de la contrainte σ_h sur le frottement τ_r ($V_{moy}=15,40$ mm/s)

3.2 Influence de la vitesse particulière v sur le frottement latéral τ_r

Pour élucider cette influence on a procédé comme précédemment, en recherchant à travers l'allure des courbes de variation du frottement latéral τ_r en fonction de la vitesse particulière v (figure 2), paramétrées par C_u et σ_h , le modèle de prédiction le mieux adapté en s'inspirant sur la démarche employée par HEEREMA (HEEREMA, 1979).

L'analyse de l'allure des courbes de variation τ_r en fonction de v a permis de relever les faits suivants :

- A faible cohésion non drainée ($C_u=10,2$ kPa) le frottement apparent τ_r semble indépendant de la vitesse ;
- A cohésion non drainée relativement plus importante ($C_u=40$ kPa), l'allure des courbes suggère une variation de type hyperbolique (forte dépendance). L'influence de v sur τ_r est d'autant plus nette que les vitesses sont plus faibles ;
- Les courbes sont juxtaposées dans l'ordre croissant de la contrainte horizontale σ_h , ce qui confirme encore l'accroissement du frottement latéral τ_r avec la vitesse particulière v .

En résumé, on s'aperçoit que le frottement latéral résiduelle est fonction de la cohésion non drainée, de la vitesse particulaire, de la contrainte horizontale, et d'une manière implicite de la teneur pondérale en eau, de la forme : $\tau_r = f(C_u, v, \sigma_h, \omega)$.

Toutefois, en raison de l'impossibilité du dispositif expérimental utilisé pour le contrôle continu de la teneur en eau pendant l'expérimentation on n'a pas pu en tenir compte, ce qui va à l'encontre de la précision du modèle à concevoir, d'autant plus que le sol testé est très sensible à l'eau.

En définitive, pour modéliser l'interaction limon-acier, on tentera d'établir un modèle analytique simplifié de la forme $\tau_r = f(C_u, v, \sigma_h)$.

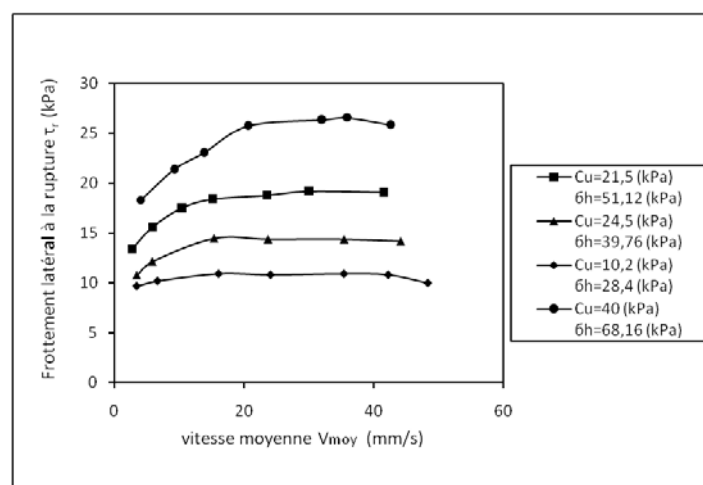


Figure 2. Influence de la vitesse V_{moy} sur le frottement τ_r (σ_h constante).

3.3 Formulation du modèle analytique de loi d'interaction et détermination du paramètre b

L'analyse des résultats concernant la variation du frottement latéral τ_r en fonction de la vitesse particulaire v , nous indique, malgré la dispersion des points expérimentaux de l'ensemble des essais, que le modèle logarithmique est celui qui semble le plus adapté (OULARBI, 2010) :

$$\tau_r = b * \log(v) + c ; b \text{ et } c \text{ sont des paramètres fonction respectivement de } v \text{ et } \sigma_h.$$

Pour une vitesse moyenne $v_0=15,40\text{m/s}$ on obtient :

$$\tau_r = b * \log(v_0) + c = 0,2866 * \sigma_h \text{ d'où } c = a * \sigma_h - b * \log(v_0), \text{ ce qui correspond en définitif à la relation :}$$

$$\tau_r = b * \log(v/v_0) + 0,2866 * \sigma_h \quad (1)$$

La corrélation liant le frottement latéral τ_r aux logarithmes de (v/v_0) , quelle que soit la valeur de C_u , révèle une évolution linéaire dont la pente est égal à b (figure 3).

Le nuage de points expérimentaux (b, C_u) reportés sur le graphe de la figure 4 semble converger vers la droite de régression d'équation :

$$b = 0,1245 * C_u - 1,5562 \quad (2)$$

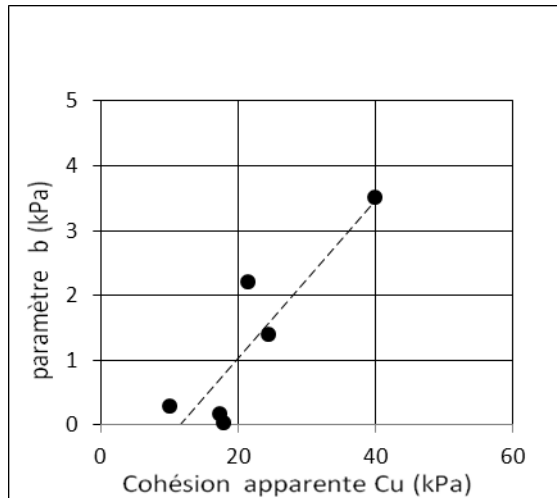
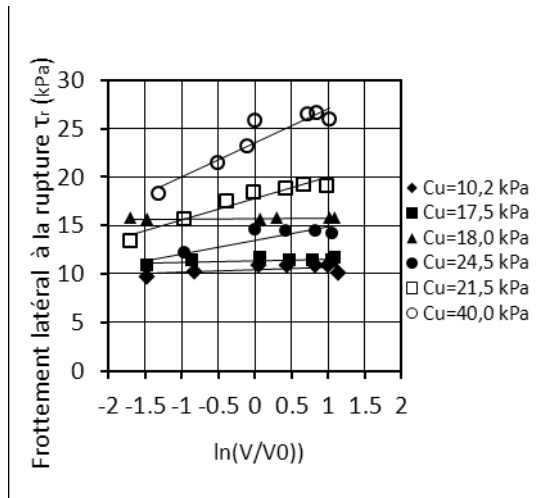


Figure 3. Corrélation entre τ_r et $\ln(V/V_0)$. Figure 4. Coefficient b en fonction de C_u .

L'insertion de l'expression du paramètre b dans la relation fonctionnelle (1) conduit à l'expression finale de la relation analytique recherchée :

$$\tau_r = (0,1245 \cdot C_u - 1,5562) \cdot \log(v/v_0) + 0,2866 \cdot \sigma_h \quad (3)$$

Cette relation est valable pour $v_0 = 15,40 \cdot 10^{-3}$ m/s ; τ_r frottement latéral à la saturation (kPa) ; C_u cohésion non drainée (kPa) ; σ_h contrainte horizontale (kPa) et v , vitesse particulaire (m/s).

4. Validation de la relation analytique proposée

Une étude sur la validation du modèle analytique proposé est réalisée en confrontant ses prédictions à celles obtenues par deux approches. Tout d'abord on s'appuie sur les résultats expérimentaux obtenus en laboratoire (OULARBI, 2010). Ces mesures concernent les variations de τ_r en fonction de σ_h , et de τ_r en fonction de v , comparées aux prédictions du modèle analytique proposé. Ensuite, en confrontant les résultats à ceux obtenus par l'approche de HEEREMA (HEEREMA, 1979). Afin de vérifier la validité d'une telle relation analytique et l'acceptabilité de ses résultats, un calage avec les résultats expérimentaux s'avère donc nécessaire. Les paramètres de calcul, C_u , σ_h , v sont les mêmes que ceux utilisés durant les essais.

4.1 Validation par l'approche expérimentale

Les résultats de la superposition des courbes frottement-contrainte horizontale et frottement-vitesse prédites par le modèle analytique et celles mesurées au laboratoire sont présentées sur les figures 5 et 6. On peut noter la bonne concordance dans l'allure, entre les profils du frottement latéral calculés et ceux mesurés. On relève néanmoins, sur la plupart des courbes, un croisement entre les courbes théoriques et expérimentales accompagné d'un décalage en deçà et au-delà du point d'intersection. Cela est dû,

Thème 4 – Ouvrages portuaires et offshore

probablement, à l'imprécision commise sur la valeur de la vitesse et à la simplification du paramètre teneur en eau dans l'élaboration du modèle.

En effet, à défaut d'utiliser une vitesse instantanée on a utilisé qu'une vitesse moyenne sur tout l'intervalle de temps de l'essai, ce qui impact négativement sur la valeur réelle du frottement latéral, sachant qu'une augmentation de contrainte horizontale, dite contrainte de confinement, entraîne une légère diminution de la vitesse de déplacement. De ce fait il n'est pas surprenant d'obtenir des vitesses réelles plus importantes que la vitesse moyenne en deçà du point d'intersection et d'autres moins importantes au-delà de ce même point. Par ailleurs, en particulier pour des sols argilo-limoneux, l'influence de la teneur en eau sur la résistance au cisaillement et la compressibilité sont dominants, ceci a été confirmé par les résultats d'une série d'essais réalisés à l'appareil triaxial (BOUSSAID, 2005). Il en résulte, par conséquent, un écart en valeur absolue plus moins significatif entre les valeurs théoriques et les valeurs expérimentales, ce qui va dans le sens d'une surestimation ou d'une sous-estimation, et en tout état de cause l'erreur relative n'excède pas les 13%, elle varie entre 8 et 12.5%. Donc, pour affiner la précision du modèle analytique, il apparaît nécessaire d'améliorer le dispositif expérimental de telle manière à contrôler simultanément et continuellement la variation la teneur en eau et la vitesse réelle au cours de l'essai. Toutefois, ces premiers résultats semblent encourageants.

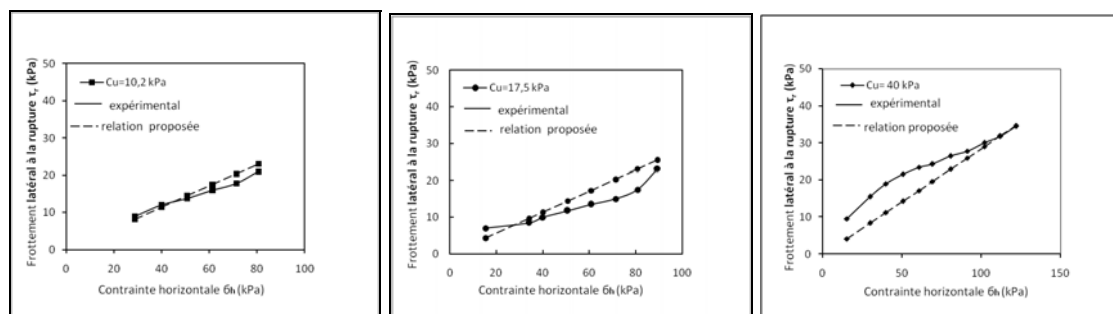


Figure 5. Comparaison entre modèle analytique et modèle expérimental (Essais à vitesse constante).

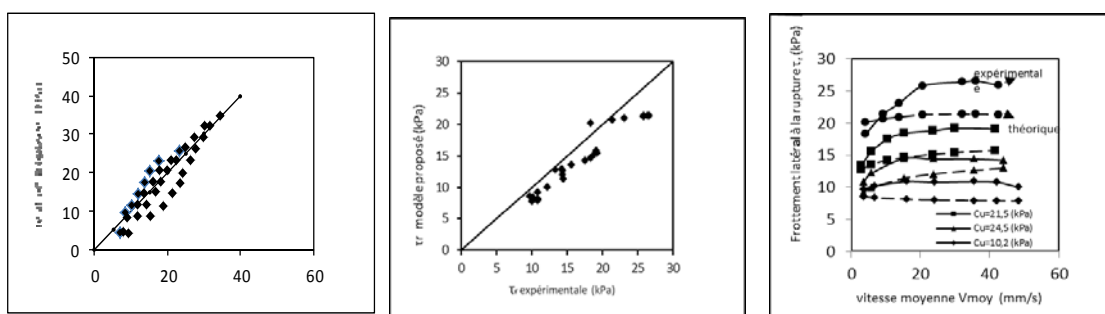


Figure 6. Comparaison entre modèle analytique et modèle expérimental (Essais à contrainte horizontale constante).

4.2 Validation par l'approche de Heerema

Les résultats de la superposition des courbes frottement-vitesse prédites par le modèle analytique proposé et celles fournies par le modèle analytique de Heerema sont regroupées sur la figure 7, avec un intervalle des vitesses assez étendu, allant jusqu'à $v=2,5$ m/s. Le profil du frottement latéral est en bon accord avec les résultats obtenus par le modèle de Heerema puisque l'allure de croissance est assez semblable pour les deux modèles. Néanmoins au-delà des allures, les valeurs divergent avec l'augmentation de la vitesse particulière, sachant que les valeurs données par le modèle de Heerema paraissent trop élevées par rapport à celles fournies par le modèle proposé.

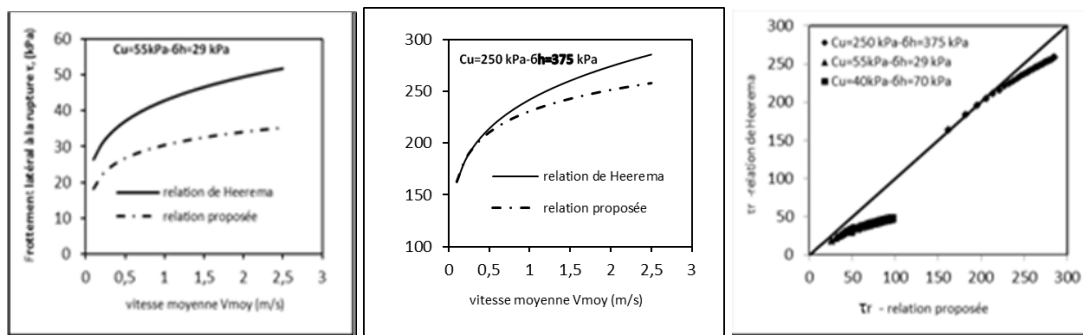


Figure 7. Comparaison entre modèle analytique et modèle de Heerema
(Essais à vitesse constante).

5. Conclusion

Pour simuler le comportement d'un sol à l'interface latérale sol/pieux un modèle analytique (cas de l'interaction limon/acier) a été approché au moyen de tests réalisés sur des échantillons non remaniés.

Différentes approches ont été utilisées afin de valider le modèle développé, d'abord une comparaison des prédictions a été menée avec les mesures expérimentales. Les prévisions du modèle donnent des résultats satisfaisants puisque l'écart relevé n'excède pas les 13%, en dépit au recours à la simplification de la teneur en eau élément, pourtant, prépondérant dans le cas des sols sensibles argilo-limoneux. Il convient donc de se garder à une généralisation immédiate de la portée de cette comparaison en raison du nombre limité d'essais. A cela s'ajoutent les imprécisions des paramètres utilisés à cause des imperfections du dispositif expérimental et de son instrumentation qui ne permet pas, par exemple, de mesurer d'une manière continue la vitesse ou de contrôler la teneur en eau. Des tests complémentaires réalisés avec un dispositif plus approprié sont donc nécessaires pour l'amélioration du modèle proposé.

Ensuite, une comparaison des prédictions du modèle proposé a été menée avec ceux du modèle de HEEREMA (HEEREMA,1979) pour montrer un bon accord sur la forme des profils de τ_r en fonction de v , cependant des écarts plus ou moins importants sont relevés selon le cas. Globalement les résultats concordent moins bien qu'avec les résultats

Thème 4 – Ouvrages portuaires et offshore

expérimentaux. Des travaux complémentaires sont donc à envisager pour parfaire la validation du modèle proposé.

6. Références bibliographiques

HEEREMA E.P. (1979). *Relationships between wall friction, displacement, velocity and horizontal stress in clay and in sand, for pile driveability analysis*. Ground engineering, pp 55-65.

MIDDENDORP P., VAN BREDERODE P.J. (1984). *Skin friction models for sand from static and dynamic laboratory load tests*. Proc. 2nd international conference on the application of stress wave theory on piles, Stockholm, pp 210-220.

LEVACHER D. (1992). *Modélisation numérique et physique du battage des pieux. Simulation en centrifugeuse du comportement des pieux*. Thèse de Doctorat d'Etat, Ecole Centrale de Nantes.

MIMOUNI N. (1998). *Etude expérimentale du frottement latéral à l'interface sol-structure en dynamique : cas d'une interaction limon-acier*. Thèse de Doctorat, université du Havre.

BOUSSAID K., THOREL L., GARNIER J., FEBER V., DAVID J.P. (2005). *Comportement mécanique de sols intermédiaires reconstitués: Influence de la teneur en eau et du pourcentage d'argile*. 17^{ème} Congrès français de mécanique, n°458, Troyes, France.

ROCHER-LACOSTE F., BOURDOUXHE M.P. (2006). *Comparison behaviour during installation and static loading test performances of eight impact and vibratory driven piles in stiff clay*. XIII^{ème} Danube-European Conference on Geotechnical Engineering, Ljubljana (Slovénie), pp 487-492.

OULARBI A., LEVACHER D., MIMOUNI N. (2010). *Simulation physique du frottement latéral à l'interface sol-pieu lors du fonçage (Cas d'une interaction limon-acier)*. XI^{èmes} Journées Nationales Génie Côtier – Génie Civil, Les Sables d'Olonne(France). doi:10.5150/jngcgc.2010.081