



UN MODELE POUR L'INTERACTION LATÉRALE DYNAMIQUE ARGILE - PIEU

A. BENAMAR

Groupe de Recherche en Génie Civil,
Laboratoire de Mécanique des Fluides et de Génie Civil, Université du Havre

Résumé

Ce papier présente les résultats d'une étude expérimentale effectuée au laboratoire avec un appareillage simulant le battage d'un pieu dans une couche d'argile. Les paramètres les plus influents sur la mobilisation de l'effort d'interaction latérale ont été mis en évidence en utilisant les signaux de force et de déplacement mesurés sur le pieu. Un modèle rhéologique de type plastique incluant une relation de viscosité non linéaire a été proposé pour l'interaction latérale argile - pieu en cours de battage, puis validé par une simulation numérique.

Abstract

This paper presents a laboratory study aimed at investigating the shaft pile -soil interaction during driving. The test equipment (a rod driven through a sample of clay) is briefly described and some signals are presented to illustrate the quality of the measurements. The analysis of the stress waves propagating in the rod, during driving, provided a good estimation of interaction forces, bar velocities and displacements of the pile model in the sample. The relationships between these parameters were used to base a law governing the shaft interaction. This plastic law, enclosing a non-linear viscosity, is used in a numerical simulation of laboratory and field driving tests.

I . INTRODUCTION

L'évaluation de la capacité portante des pieux par les méthodes dynamiques présente un intérêt certain pour les ouvrages côtiers où les essais statiques ne sont pratiquement pas réalisables. Ces ouvrages sont généralement fondés sur des pieux qui traversent d'épaisses couches de sols argileux et qui résistent principalement par frottement latéral.

Les méthodes dynamiques reposent sur l'analyse de la réponse d'un pieu à un impact et utilisent des programmes de calcul basés sur la théorie de propagation des ondes dans un milieu élastique unidimensionnel. La mise en oeuvre de ces méthodes nécessite notamment la connaissance des lois d'interaction pieu - sol durant le battage. La prévision de la capacité portante par ces méthodes utilise une corrélation entre la résistance dynamique et la résistance statique.

Les modèles rhéologiques de l'interaction latérale sol - pieu ont peu évolué depuis les travaux de Smith [1960]. Le modèle viscoélastique à patin est souvent repris sans justification théorique ou expérimentale. Les dispositifs mis au point en laboratoire ces dernières années ont pour but d'élaborer un modèle plus réaliste. Afin de mieux maîtriser les conditions expérimentales, et au vu des études antérieures, un nouveau dispositif a été réalisé au Laboratoire Central des Ponts et Chaussées à Nantes.

L'étude menée avec ce dispositif a permis de caractériser à partir des mesures de contraintes et de déplacement, les paramètres les plus influents dans l'interaction latérale sol - pieu durant le battage.

II . L'ETUDE EXPERIMENTALE

II.1. Le dispositif d'essais de battage

L'appareillage mis en oeuvre a permis de simuler le battage d'un pieu (barre de 9 m de long et 0.02 m de diamètre) à travers un échantillon de sol (de diamètre 0.2 m et haut de 0,5 m) installé dans une cellule triaxiale (fig. 1). Divers capteurs permettent de suivre à tout instant la propagation des ondes dans la barre et d'en déduire la loi de mobilisation de l'effort de frottement entre le sol et la barre. Les échantillons sont préparés et consolidés sur place, et le sol utilisé est une argile homogène (kaolinite), peu perméable, normalement consolidée (à 300, 400 et 500 kPa), et dont les caractéristiques physico-mécaniques sont résumées dans le tableau 1. Le dispositif permet de varier les conditions de choc et celles de confinement de l'échantillon [Benamar, 1992] et un jeu de presse-étoupes permet le drainage de l'interface pieu - sol. L'impact produit par la chute d'une masse est un signal rectangulaire dont la vitesse est constante. La position des jauges de déformation sur la barre (fig. 1) ainsi que la hauteur de l'échantillon sont choisies de façon à dissocier les ondes ascendantes et descendantes au niveau des sections de mesure.

| | |
|----------------------------|---------------|
| Limite de plasticité | $W_p = 31\%$ |
| Indice de plasticité | $I_p = 23$ |
| Indice de compression | $C_c = 0,70$ |
| Teneur en eau | $w = 35\%$ |
| Résistance au cisaillement | $C_u = 65kPa$ |

Tabl. 1 - Caractéristiques du sol ($\sigma_c = 500$ kPa) .

II.2. Détermination de la résistance latérale

Les signaux de force mesurés sur la barre (fig. 2) sont obtenus sur toute la durée du choc. Les ondes incidentes sont bien distinguées et permettent une analyse fine sur toute la durée du choc.

Les ondes réfléchies sont de forme triangulaire et de durée plus longue que les ondes incidentes, mettant en

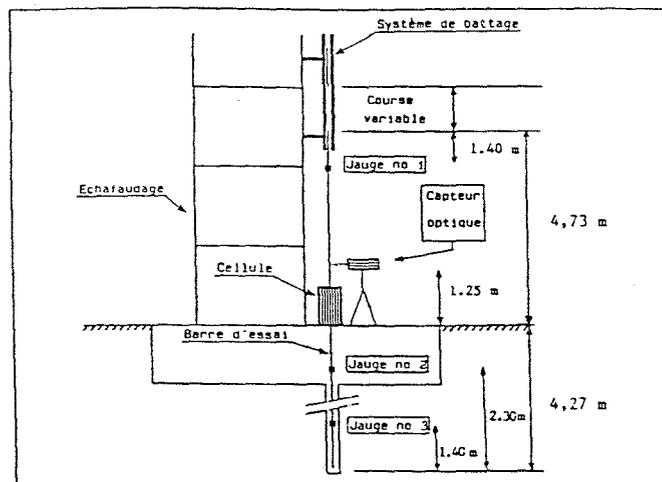


Fig.1 : Schéma de montage expérimental

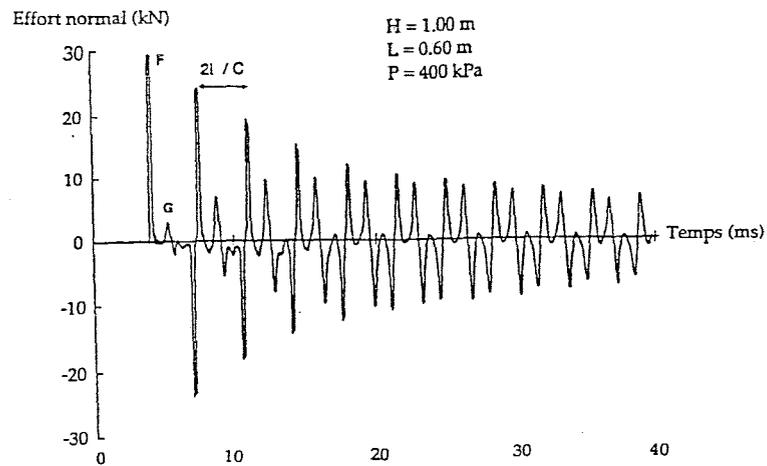


Fig.2 : Signal de force mesuré au-dessus de l'échantillon (jauge1)

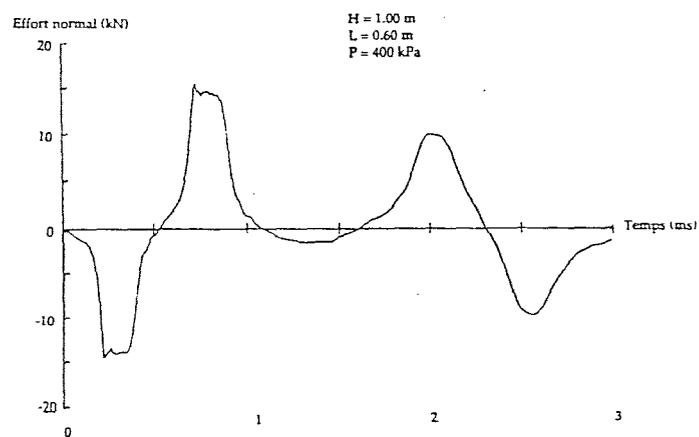


Fig.3 : Force et durée des ondes mesurées

évidence la nature progressive de la mobilisation de la force d'interaction latérale (fig. 3).

Le capteur optoélectronique permet de mesurer le déplacement transitoire durant un choc ainsi que le déplacement permanent. Sur le signal de déplacement transitoire d'une section de la barre au-dessus de l'échantillon (fig. 4), on distingue les différents incréments dus à chaque onde qui traverse la section. Ce signal fait apparaître un glissement important au premier aller-retour de l'onde initiale (incrément 1-6).

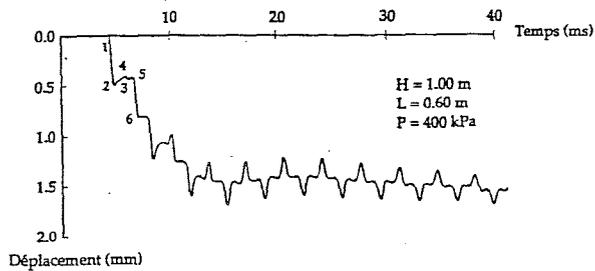


Fig.4 : Déplacement transitoire de la barre au-dessus de l'échantillon

L'identification des efforts résistants repose sur la mesure des amplitudes des ondes incidentes F et résistantes G dans la barre et se déduisent des équations

d'équilibre d'un élément de l'interface pieu-sol. Comme les ondes sont dissociées au niveau des sections de mesure, la vitesse particulière de la barre est proportionnelle à la force mesurée par la relation :

$$F = Z v \quad (1)$$

où Z est l'impédance mécanique de la barre.

La vitesse particulière étant un paramètre important dans les phénomènes dynamiques, on a recherché à établir son influence sur la mobilisation de l'effort de frottement latéral. La figure 5 présente la relation résistance - vitesse pour une série d'essais sur un échantillon normalement consolidé, chaque essai étant désigné par un symbole. Cette relation n'est pas linéaire, et elle est approchée avec une bonne approximation par la fonction :

$$R = A(1 - e^{-BV}) \quad (2)$$

où A et B sont deux coefficients qui dépendent de la durée de l'impact, de la pression de confinement et de la nature du sol. La relation 2 montre que la résistance dynamique n'est pas une relation intrinsèque au système pieu-sol, mais dépend des caractéristiques de l'impact et surtout de la vitesse. Cette relation met en évidence un amortissement "exponentiel" à l'interface.

La résistance latérale augmente avec la vitesse de la barre jusqu'à atteindre une asymptote correspondant à la mobilisation totale du frottement latéral. Cette valeur asymptotique est le coefficient A qui est proportionnel à la pression de confinement.

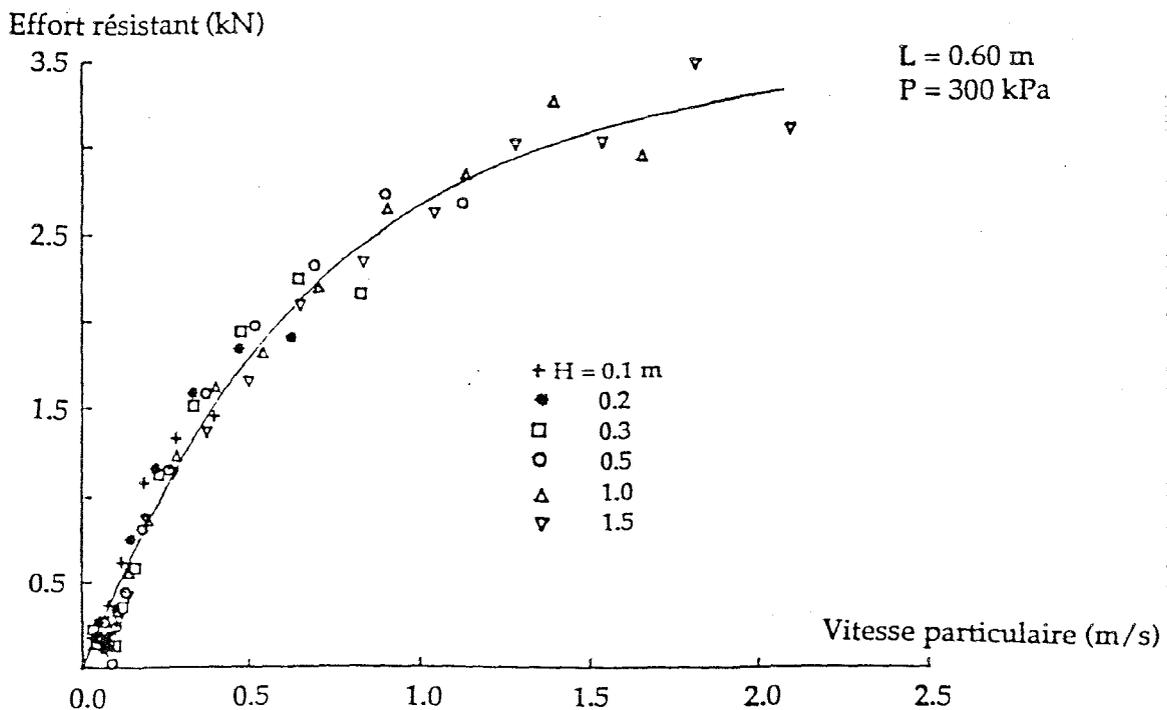


Fig.5 : Effort d'interaction latérale fonction de la vitesse de la barre pour une série d'essais

L'effort de frottement n'est pas entièrement mobilisé si la vitesse d'impact (énergie de battage) n'est pas suffisante (fig. 6). Les marteaux utilisés sur site doivent

donc fournir l'énergie nécessaire pour traverser les couches de sol, et leur choix en fonction du site doit être pertinent pour l'efficacité du battage.

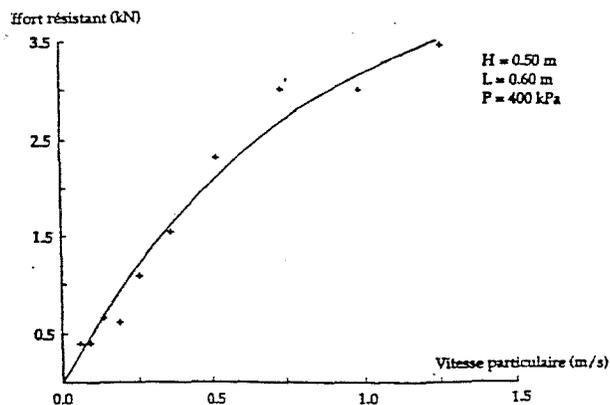


Fig. 6 : Mobilisation partielle de la résistance latérale pour une énergie de battage faible (7J)

III . MODELE D'INTERACTION

Dans les modélisations habituelles, on a souvent introduit un amortissement linéaire pour représenter la dissipation d'énergie à l'interface pieu-sol. Gibson et Coyle [1968] ont proposé une modification de la relation de Smith [1960] en introduisant un amortissement non linéaire déduit des essais en laboratoire. Mais cette corrélation repose sur des essais à vitesse constante ne mettant pas en jeu les phénomènes d'inertie du sol autour du pieu.

Le comportement à l'interface pieu-sol durant le battage est habituellement schématisé par un modèle unidimensionnel qui, le long du fût, représente l'interaction de chaque couche de sol avec le pieu, en supposant que les couches agissent indépendamment les unes des autres.

Il y a deux façons de formuler convenablement un modèle unidimensionnel d'interaction. La première est empirique, où ressorts, patins de glissement, masses et amortisseurs sont assemblés de manière à reproduire par simulation la réponse du pieu à un chargement dynamique, en ajustant les paramètres du modèle. La seconde est une approche analytique basée sur un modèle continu de réponse du sol, étayée par des résultats expérimentaux. C'est cette approche que nous avons adoptée pour proposer un modèle d'interaction latérale.

Les résultats obtenus pour le déplacement ont montré qu'il y a glissement de la barre dans le sol dès l'arrivée de l'onde initiale. Holeyman [1985] a déjà montré que la plasticité est contenue dans le voisinage immédiat du fût. S'appuyant sur cette idée, Corté et Lepert [1986] ont proposé un modèle à deux étages.

La relation 2 entre l'effort résistant et la vitesse, traduisant un amortissement non visqueux, est utilisée pour modéliser l'interaction à l'interface. Elle détermine l'amplitude du seuil de glissement d'un patin en fonction de la vitesse du pieu, différente de la vitesse du sol. La radiation des ondes dans le sol est représentée, comme proposé par Novak [1977], par un ressort et un amortisseur visqueux disposés en parallèle. On obtient un modèle global pour l'interaction latérale composé de deux niveaux (fig. 7) :

- le premier modélise la radiation de ondes dans le sol, et entre en action dès que la vitesse du sol atteint celle du pieu. A ce moment, il n'y a plus de glissement (patin raccroché),

- le second représente le glissement à l'interface lorsque les vitesses du pieu et du sol sont différentes. Cet élément régit toute l'interaction tant qu'il y a glissement à l'interface.

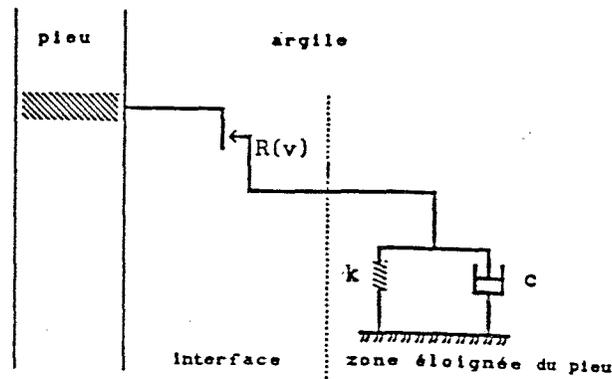


Fig. 7 : Modèle d'interaction latérale

IV . SIMULATION NUMERIQUE

IV.1 . Essai de laboratoire

Le logiciel de simulation de battage Brutus, développé au L.C.P.C., est utilisé pour calculer la réponse du pieu à l'impact d'une masse. Le programme est basé sur la méthode des caractéristiques pour résoudre le problème dynamique. Le modèle simplifié programmé dans le logiciel est composé uniquement du second niveau du modèle proposé, négligeant ainsi la partie de dissipation radiale. Cette simplification permet de n'introduire dans le calcul que les paramètres A et B déduits des résultats expérimentaux.

L'interface est discrétisée en éléments de 5 cm d'épaisseur au bout desquels agissent les forces d'interaction déterminées par la relation 2. Le choc est modélisé par un impact rectangulaire. L'ajustement du signal de force se fait en introduisant d'abord les paramètres A et B déduits des résultats expérimentaux, puis leurs valeurs sont modifiées de façon à obtenir le meilleur ajustement. La figure 8 présente le résultat de cette simulation obtenu avec des valeurs A et B ayant un écart de 10% par rapport aux valeurs expérimentales.

Le modèle proposé traduit donc correctement la mobilisation de l'interaction latérale sur la majeure partie du choc.

IV.2 . Essai réel de battage

Des mesures effectuées sur un pieu métallique battu à Merville (59), sont utilisées pour un ajustement avec le modèle d'interaction proposé. Le pieu est long de 16 m et fut enfoncé à une fiche de 14 m. Le sol est constitué

d'une couche homogène d'argile des Flandres. Le battage a été réalisé avec un mouton délivrant une énergie théorique de 40 kJ. L'accélération et l'effort normal ont été mesurés à 0,6 m de la tête du pieu.

Le pieu est discrétisé en éléments d'épaisseur 0,5 m au bout desquels agissent les efforts d'interaction selon le modèle simplifié. Aucun effort n'agit sur la pointe supposée libre. Le signal d'effort normal mesuré près de la tête est utilisé pour modéliser l'impact du mouton.

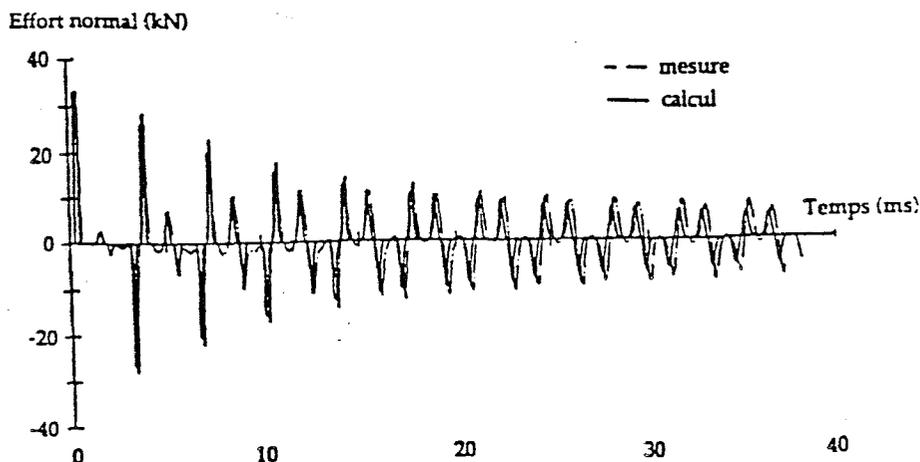


Fig. 8 : Effort normal calculé et mesuré au-dessus de l'échantillon

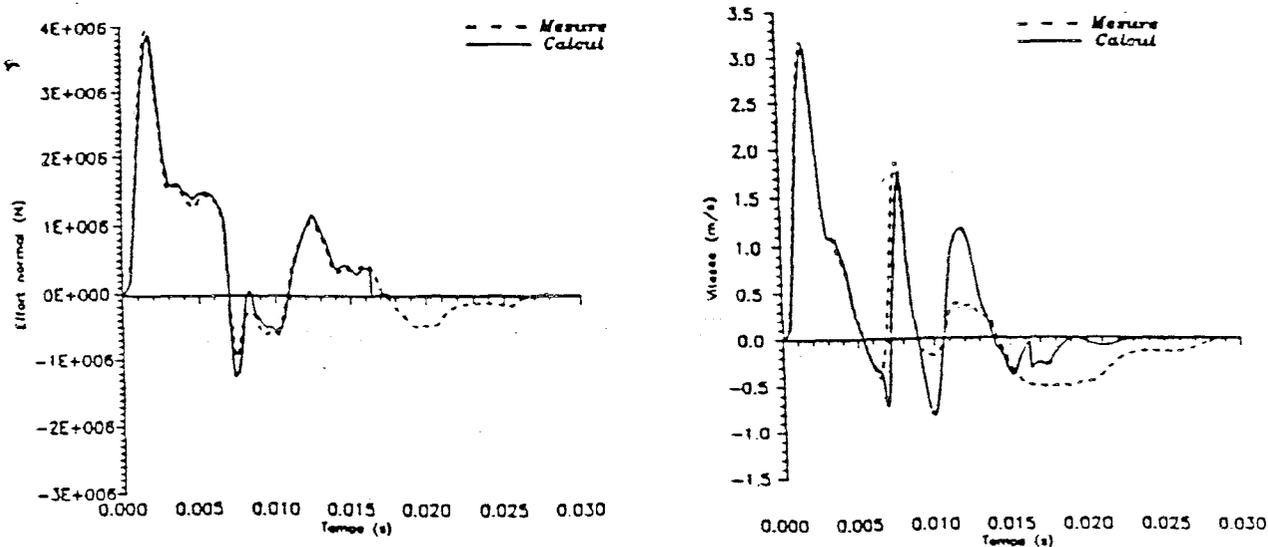


Figure 9 : Ajustement du modèle sur les signaux d'effort normal et de vitesse dans le pieu

La procédure d'ajustement repose sur les résultats d'un essai pressiométrique réalisé sur le site et sur la courbe de l'essai de chargement statique. La figure 9 présente le meilleur ajustement obtenu pour l'effort normal et la vitesse.

Le modèle simplifié simulé permet d'aboutir à un ajustement satisfaisant de la réponse du pieu sur deux aller-retours de l'onde dans le pieu. Au-delà, la procédure de calage devient difficile. Cette limite dans l'ajustement peut provenir du modèle d'interaction qui ne tient pas

compte des phénomènes de dissipation radiale et des simplifications admises pour la réaction en pointe.

V . CONCLUSIONS

L'appareillage spécifique utilisé dans cette étude a permis une exploitation fine des signaux mesurés sur une large partie du choc et la mise en évidence de certains phénomènes de l'interaction dynamique tel que la nature de l'amortissement. Les résultats expérimentaux ont montré que l'analyse de la réponse d'un pieu à un choc

permet d'estimer la résistance dynamique latérale à chaque aller-retour des ondes dans le pieu.

La difficulté de mesure des pressions interstitielles n'a pas permis de rendre compte de leur évolution durant le choc. L'interaction sols cohérents - pieu étant complexe, il est utile de simplifier les phénomènes pouvant influencer ce comportement tel que le développement des pressions interstitielles.

L'introduction d'un amortissement non linéaire à l'interface présente une meilleure approche de l'interaction latérale. Cependant la vitesse n'est pas le seul paramètre qui influe sur la mobilisation du frottement latéral durant le battage, et l'association du déplacement dans une relation globale peut mieux rendre compte du phénomène. Le modèle simplifié utilisé dans la simulation numérique montre qu'il est représentatif de l'interaction sur une large partie du choc. Le modèle proposé peut être amélioré en mettant en évidence la vitesse de raccrochement du patin (vitesse du pieu = vitesse du sol).

Notations

- C : célérité des ondes dans la barre
- H : hauteur de chute du marteau
- l : longueur de la barre
- L : longueur du marteau
- P : pression de confinement du sol.

Références

- [1] Benamar A. 1992. Etude expérimentale du frottement latéral argile-pieu en cours de battage. Thèse de doctorat, Université de Nantes-Ecole Centrale de Nantes.
- [2] Benamar A. et Levacher D. 1993. Caractéristiques de l'interaction latérale argile-pieu durant le battage. Annales de l'I.T.B.T.P., 514, 54-65.
- [3] Corte J.F. et Lepert Ph. 1986. Lateral resistance during driving and dynamic pile testing. Proc. 3rd Int. conf. on Numerical Methods in Offshore Piling, Nantes, France, Ed. Technip, 3-15.
- [4] Gibson G.G. and Coyle H.M. 1968. Soil damping constants related to common soil properties in sands and clays. Report N° 125-1, Texas Transportation Institute, Texas A and M University.
- [5] Holeyman A. 1985. Dynamic non-linear skin friction of piles. Symposium "Penetrability, driveability of piles", San-Francisco, U.S.A., 173-176.
- [6] Novak M. 1977. Soil-pile foundation interaction. Proc. 9th Int. Conf. of Soil Mech. and Found. Eng., 2, Tokyo, Japan.
- [7] Smith E.A.L. 1960. Pile driving analysis by the wave equation. Journal of the Soil Mech. and Found. Division, ASCE, 86, SM4, 35-59.