



BATTAGES ET CHARGEMENTS DE PIEUX TUBULAIRES OUVERTS A DUNKERQUE

F. BRUCY⁽¹⁾ ; J. MEUNIER⁽²⁾

⁽¹⁾ Institut Français du Pétrole - 1-4 avenue du Bois Préau - 92500 RUEIL MALMAISON

⁽²⁾ IFREMER - Zone Industrielle du Diable - BP 70 - 29280 PLOUZANE

Summary

In the framework of a research program of CLAROM (an association grouping French oil companies, contractors, certification body and research institutes working on offshore operations), open-ended tubular piles were tested on a dense sandy site, at Dunkerque. Four piles, 324 mm in diameter, were driven to penetrations of 11 and 22 m and loaded in tension and in compression. The objective was to look at the formation of the soil column inside the piles during driving and to analyse the influence of such column on the behaviour of the pile during driving and during loadings. Results are presented which evidence the plugging behaviour of the piles under a static load although during driving the piles core the soil and see their dynamic resistance fall after removal of the soil column.

1. INTRODUCTION

Dans le cadre d'un programme de recherche du CLAROM (groupement français de compagnies pétrolières, d'entreprises, d'un organisme de certification et d'organismes de recherche impliqués dans les ouvrages à la mer), des pieux tubulaires ouverts ont été expérimentés sur un site de sable dense à Dunkerque. Quatre pieux de 324 mm de diamètre ont été battus à une pénétration de 11 et 22 m puis chargés en traction et en compression. L'objectif principal était d'examiner la formation de la colonne de sol à l'intérieur des pieux pendant le battage et d'analyser l'influence de cette colonne sur le comportement des pieux en battage et sous chargements statiques. Cet article décrit le site expérimental, les pieux, l'instrumentation et les opérations effectuées. Il présente ensuite les résultats importants de l'expérimentation.

2. DESCRIPTION DE L'EXPERIMENTATION

1 Procédure expérimentale

La procédure expérimentale a été particulièrement conçue pour examiner la formation de la colonne de sol à l'intérieur des pieux et l'influence de cette colonne sur les résultats du battage et des chargements statiques.

Quatre pieux instrumentés ont été mis en place sur un site du Port Autonome de Dunkerque. Deux pieux courts CL et CS (C pour Court) et deux pieux longs LL et LS (L pour Long) ont été battus respectivement jusqu'à 11 et 22 mètres de pénétration. Cinq mois après leur battage, les pieux ont été rebattus sur de courtes pénétrations (0,07 m à 0,35 m) (rebattage n° 1). Quelques semaines plus tard, les pieux courts CL et CS ont subi deux chargements statiques dits "avec colonne intacte": un chargement en traction suivi d'un chargement en compression. Puis on a procédé au curage de la colonne de sol présente dans les quatre pieux, une hauteur de 0,32 m étant laissée intacte au fond du pieu.

Les quatre pieux ont été rebattus (rebattage n° 2). Une seconde série de chargements statiques, dits "avec colonne curée", a ensuite été réalisée sur les pieux courts.

2 Conditions de sol

Le sol est constitué d'un dépôt alluvionnaire sableux d'environ 30 m surmonté d'un remblai hydraulique récent, également sableux, d'environ 3 mètres d'épaisseur. La nappe phréatique est à 4,80 m sous la surface du sol. La reconnaissance a consisté dans la réalisation d'un sondage carotté et de deux profils pénétrométriques (Fig. 1). Le sondage carotté a montré (jusqu'à 26 m) un sable fin, moyennement compressible. La densité relative vaut environ 80 %. On note la présence de matières organiques vers 8 m.

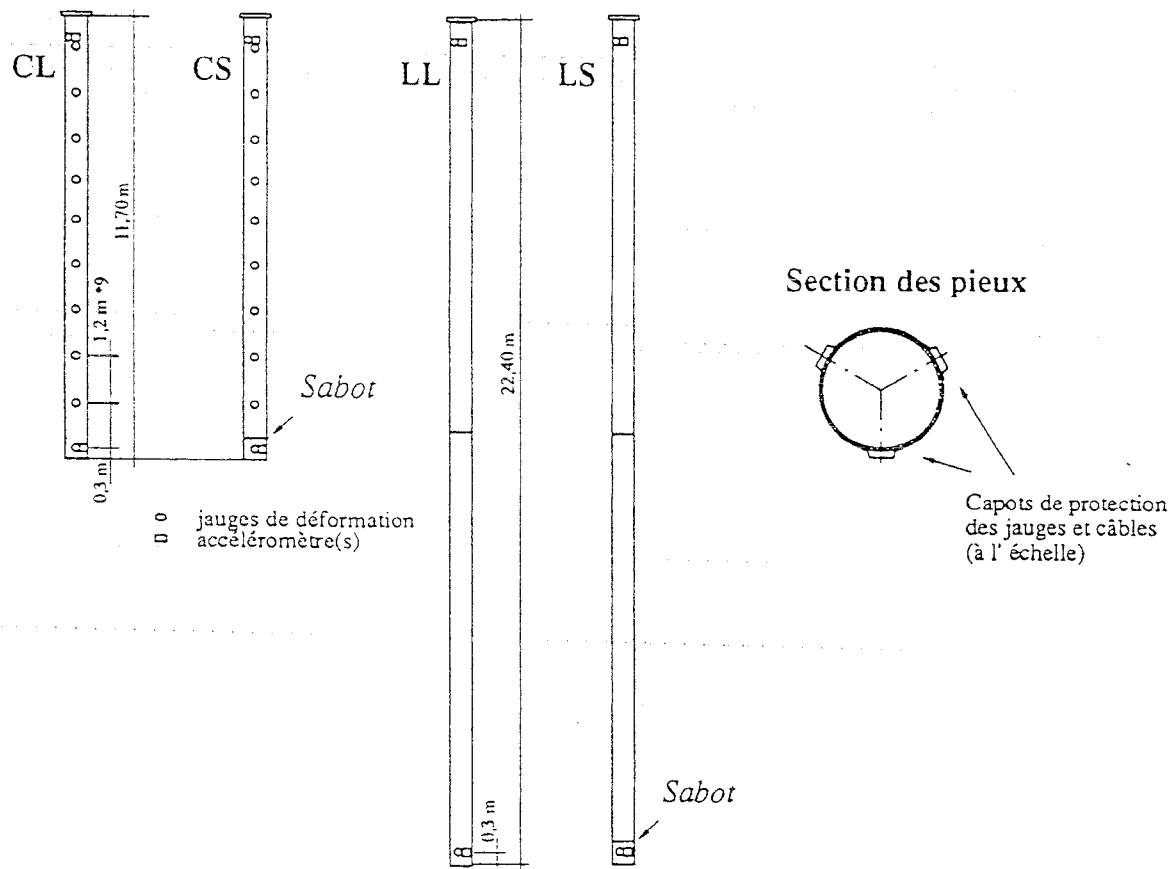


Fig. 2 : Description des pieux

Instrumentation pour le battage

En tête de chaque pieu, une instrumentation spécifique est placée pour le battage et les rebattages comprenant des jauges de déformation et des accéléromètres. En pointe, a été placé un accéléromètre par pieu, avant le battage. Des mire réfléchissantes, collées sur le pieu, sont destinées à être visées par un théodolite électronique qui enregistre le déplacement transitoire du pieu sous chaque coup de marteau.

Un dispositif mécanique simple a été utilisé pour mesurer la hauteur de la colonne de sol, tout au long du battage, sans nécessiter d'interruption

Instrumentation pour les chargements statiques

Préalablement à la mise en place des pieux, des jauges de déformation ont été collées sur la paroi extérieure des pieux. Les pieux CL et CS sont équipés de trente jauges réparties en dix niveaux sur la hauteur du pieu. Les pieux LL et LS sont équipés chacun d'un seul niveau de trois jauges situé à 0,30 m au-dessus de la pointe. Des capots vissés et soudés protègent les jauges et leurs câbles (Fig.2). L'intérieur des pieux est nu et la pointe demeure entièrement ouverte.

Pour chaque chargement statique, un capteur de force et des capteurs de déplacement potentiométriques sont disposés en tête de chaque pieu. Le mouvement éventuel de la colonne de sol au cours des chargements statiques est mesuré à l'aide d'un fil lesté.

4 Moyens et procédures expérimentaux

Les pieux sont mis en place à l'aide d'un marteau de battage hydraulique IHC-S35, avec une énergie imposée de 15 kJ. Tous les deux mètres, quelques coups de marteau sont donnés avec des énergies différentes: 5, 10, 20 kJ voire 25 et 30 kJ.

Les rebattages sont effectués à l'aide d'un appareillage Test-Consult. Une masse frappante cylindrique de 20 kN est lâchée en chute libre sur la tête du pieu équipée d'une enclume protectrice. Elle coulisse dans un tube-guide coiffant la tête du pieu et fixé au sol. Des séquences de coups avec des hauteurs de chute variant de 0,30 m à 3,00 m sont données.

Les efforts de chargements statiques sont appliqués grâce à un bâti de réaction et un vérin hydraulique. Les chargements de traction sont appliqués par paliers de 100 kN, maintenus chacun pendant 60 minutes et incrémentés jusqu'à ce que le déplacement atteigne 50 mm ; les chargements de compression sont appliqués par paliers de 200 kN, maintenus chacun pendant 60 minutes et incrémentés jusqu'à une charge totale de 1200 kN.

Le curage de la colonne de sol est réalisé par forage en circulation directe, à l'intérieur des pieux. La colonne de sol est curée jusqu'à 0,30 m au-dessus de la pointe. L'évacuation du sable ne pouvant être parfaite, on constatera les jours suivants un dépôt de sable non compacté d'environ 1,50 m au fond du pieu.

3. MESURES EN COURS DE BATTAGE : RESULTATS DYNAMIQUES

1 Formation de la colonne de sol

Au cours du battage, les pieux découpent une colonne de sol dont la hauteur est inférieure à la pénétration du pieu (Fig. 3). Le taux instantané de remplissage varie entre 25 et 90 % (Brucy et Meunier, 1991). Pendant le rebattage n° 1 subséquent, le taux de remplissage est semblable au taux obtenu en fin de battage.

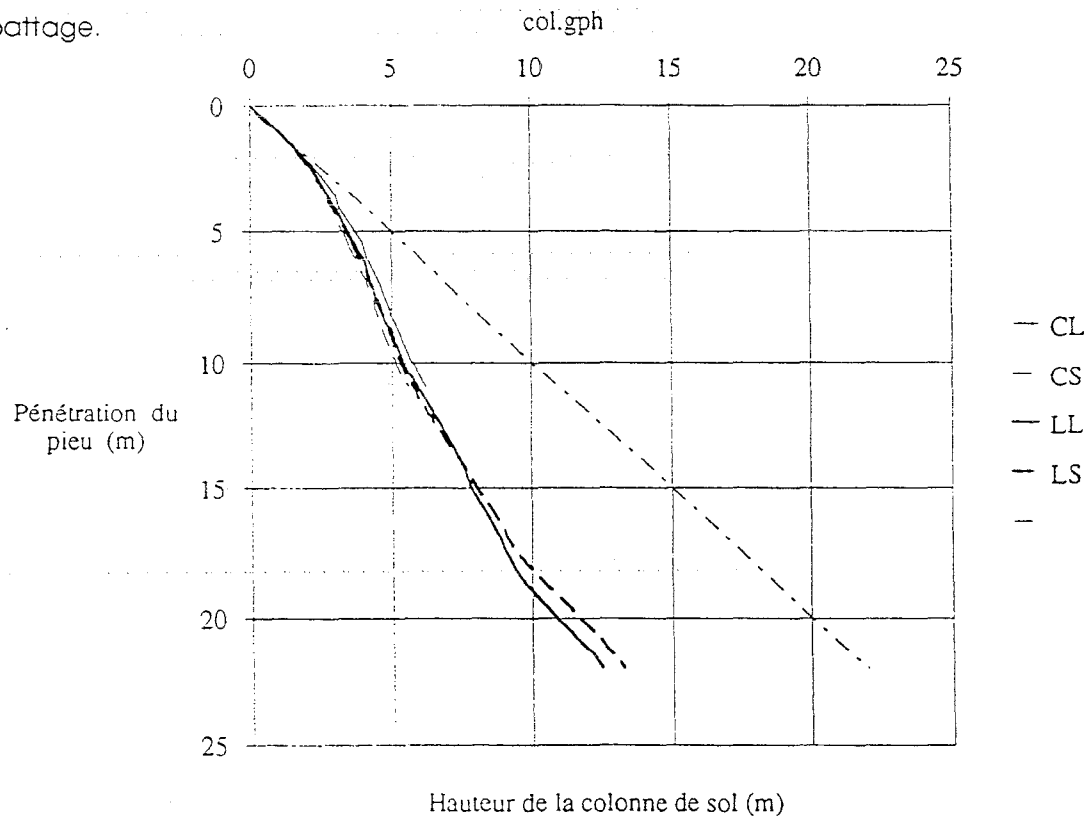


Fig. 3 : Progression de la colonne de sol dans le pieu

2 Mesures dynamiques

Les signaux de contrainte et d'accélération enregistrés lors du battage et des rebattages se montrent répétitifs d'un choc à l'autre. La qualité des signaux est prouvée par la relation linéaire obtenue entre contrainte et vitesse maximales incidentes et par la relation parabolique entre énergie dépensée et vitesse maximale incidente (Fig. 4). Le choc acier contre acier du marteau hydraulique produit des pics d'accélération élevés qui ont entraîné des ruptures dans les connexions des accéléromètres et des jauges.

Vitesse incidente maxi (m/s)

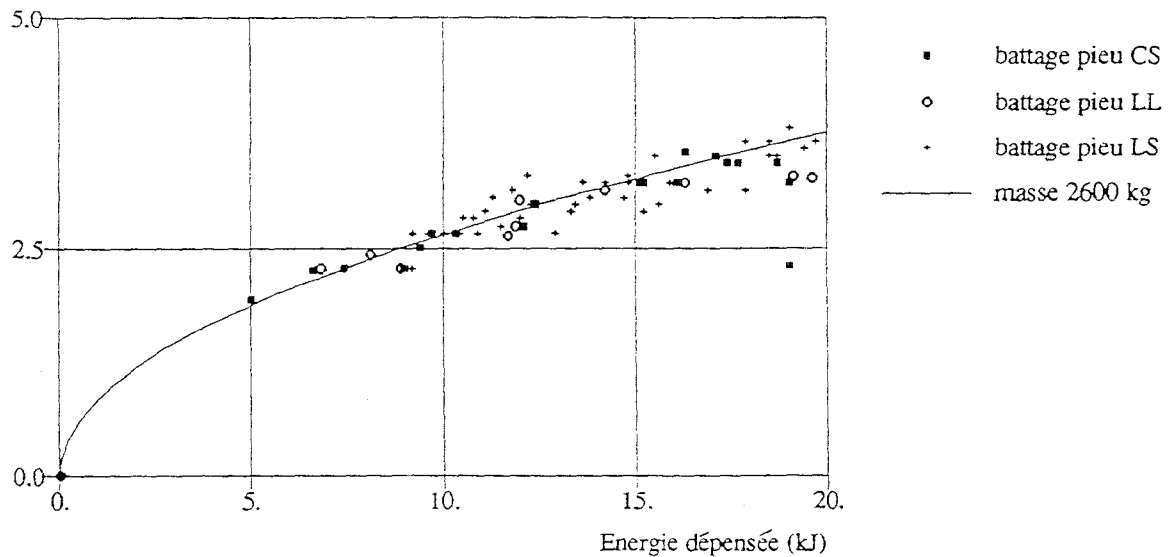


Fig.4 : Energie dépensée en fonction de la vitesse incidente

Les signaux de contraintes et d'accélération enregistrés permettent de déterminer pour chaque impact du marteau le signal de résistance dynamique du pieu (fonction du temps). Ce signal représente la somme des résistances instantanées opposées par le pieu, en frottement latéral et en pointe, sous l'impact considéré. Une formule classique est celle de Case :

$$R_{dyn}(t) = \frac{S}{2} \left[\sigma(t) + \sigma\left(t + \frac{2l}{C}\right) + Z \left[v(t) - v\left(t + \frac{2l}{C}\right) \right] \right]$$

dont le maximum est défini comme la résistance dynamique du pieu, notée R_{dy} (scalaire).

La formule de Case ne s'applique pas à tous les signaux des impacts de rebattage, notamment pas aux signaux des impacts à faible hauteur de chute sur les pieux longs (Meunier et Brucy, 1991). La résistance dynamique doit alors être validée (ou établie) par simulation des signaux enregistrés et éventuellement calage de l'enfoncement par coup mesuré.

La résistance dynamique dépend des caractéristiques du choc et notamment de la vitesse d'impact. La méthodologie SIMBAT du CEBTP (Paquet, 1988) a été appliquée aux mesures dynamiques pour déterminer des résistances dites "dynamiques corrigées", R_c , qui soient indépendantes de la vitesse d'impact. Comparée aux résistances R_c obtenues au premier rebattage, après la phase initiale de ramollissement (Fig. 5a), les résistances R_c du deuxième rebattage sont faibles (Fig. 5b). La diminution est attribuée au curage de la colonne de sol qui a eu lieu dans l'intervalle des deux rebattages.

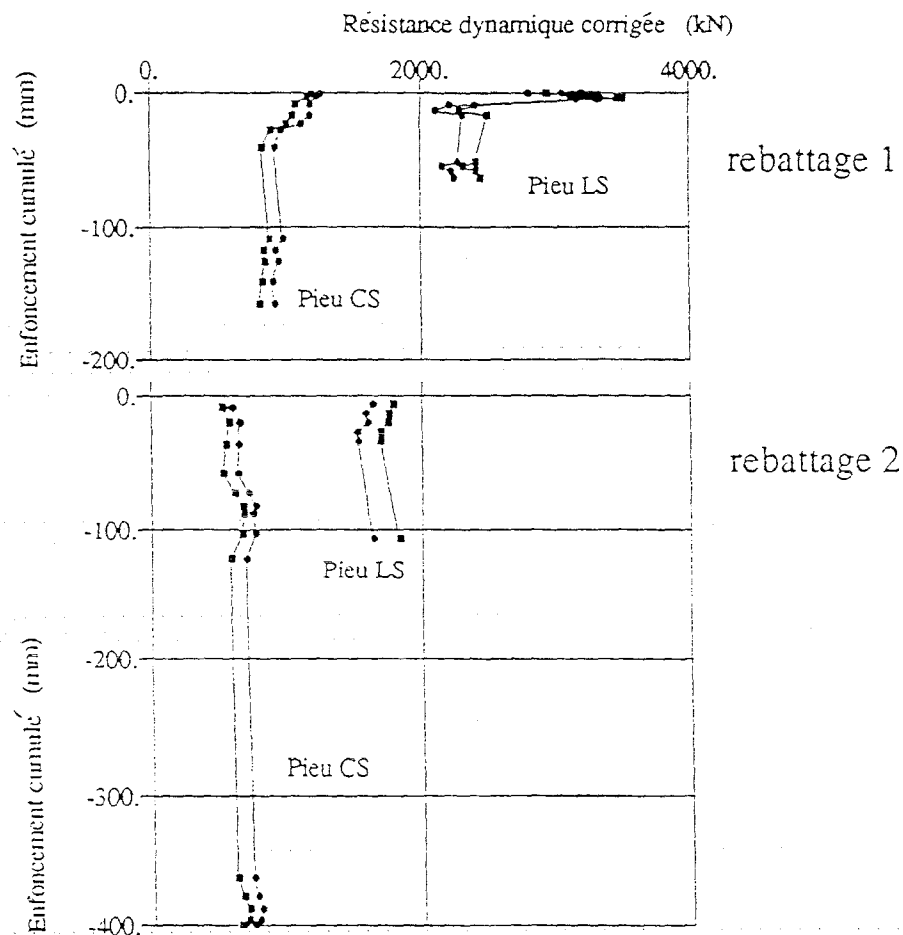


Fig. 5 : Résistances dynamiques avant et après curage

4. CHARGEMENTS STATIQUES : RESULTATS STATIQUES

1 Mouvement de la colonne de sol

Pendant les chargements statiques, on constate que la hauteur de la colonne de sol dans les pieux CL et CS ne varie pas, malgré les enfoncements respectifs des pieux de 0,07m et de 0,10m dûs au chargement de compression. La colonne de sol descend avec le pieu comme un bouchon. Ce résultat est obtenu pour la première série de chargements statiques, "avec colonne intacte", comme pour la seconde série, avec "colonne curée".

2 Comportement effort-déplacement de la tête du pieu

Les courbes représentant l'effort imposé en tête en fonction du déplacement mesuré en tête sont obtenues en continu pendant l'essai, sur un enregistreur XY. La figure 6 compare les courbes obtenues sur le même pieu avant le curage de la colonne de sol - la colonne est intacte -, et après le

curage de la colonne de sol jusqu'à 0,35 m de la pointe. On ne constate pas de différence significative, notamment en compression, ce qui montre que le frottement latéral à l'intérieur du pieu, dans la partie haute, contribue peu à la résistance du pieu sous l'effort imposé en tête.

Les courbes présentent un coude, après quelques millimètres de déplacement, au-delà duquel le pieu subit de grands déplacements de fluage. L'effort correspondant est défini comme effort de rupture. En compression, les critères de rupture basés sur la forme du début de la courbe ne sont pas applicables ici sans adaptation car les débuts de courbe sont altérés par le chargement en traction préalable qui a laissé sous la pointe, une zone décomprimée. Le critère de rupture basé sur le fluage (sur "les pentes des droites de stabilisation") n'est pas déterminant. Faute de mieux, on utilise le critère de déplacement $D/10$ (D : diamètre du pieu), en rectifiant le début des courbes.

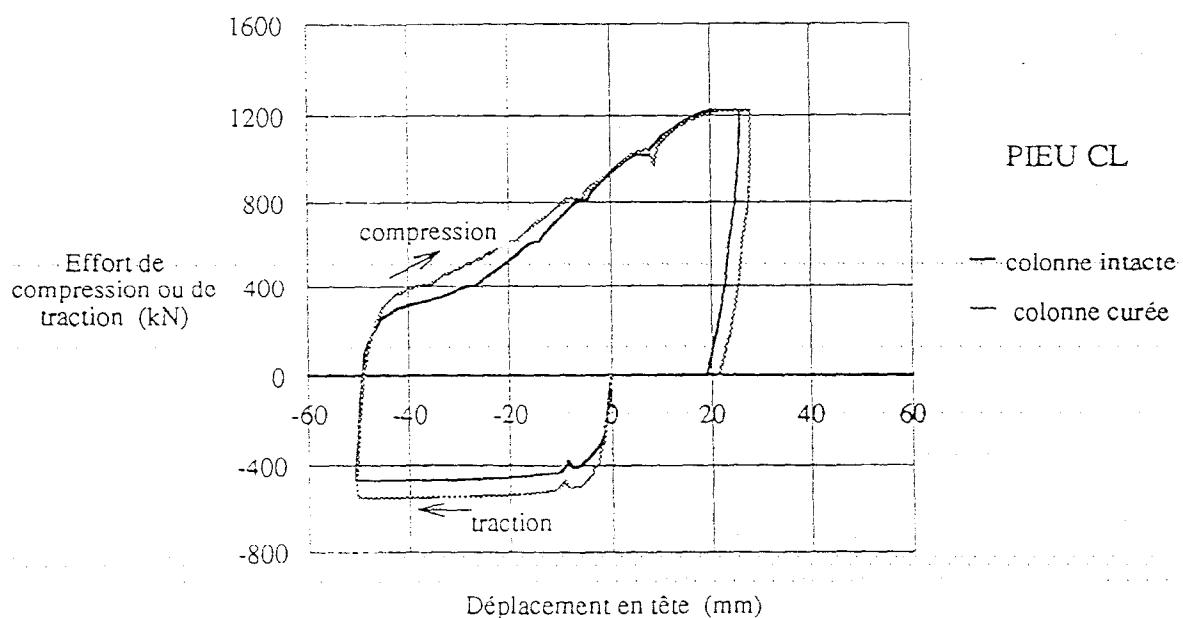


Fig.6 : Courbes effort-déplacement

3 Efforts axiaux dans le pieu

Les efforts axiaux dans le pieu résultant de l'effort imposé en tête sont mesurés par les déformations longitudinales des jauges sur le pieu. En fait, ces efforts mesurent des variations par rapport à l'état initial du pieu en début de chargement, qui n'est pas connu, et qui n'est pas nécessairement un état de "repos". En effet, des efforts résiduels provenant du battage et des chargements précédents subsistent dans le pieu. L'effort résiduel de pointe dû au battage est mis en évidence au moment de la rupture de ce même pieu lors

du chargement en traction qui a suivi : il est égal et opposé à l'effort apparent mesuré en pointe à ce moment (Fig. 7). En effet, à l'arrachement, il ne saurait y avoir d'effort en pointe. Les efforts résiduels dus à ce même chargement en traction sont mis en évidence après le déchargement de la tête du pieu. Ils sont égaux aux efforts qui sont mesurés à ce moment et s'avèrent distincts des efforts initiaux (Fig. 7).

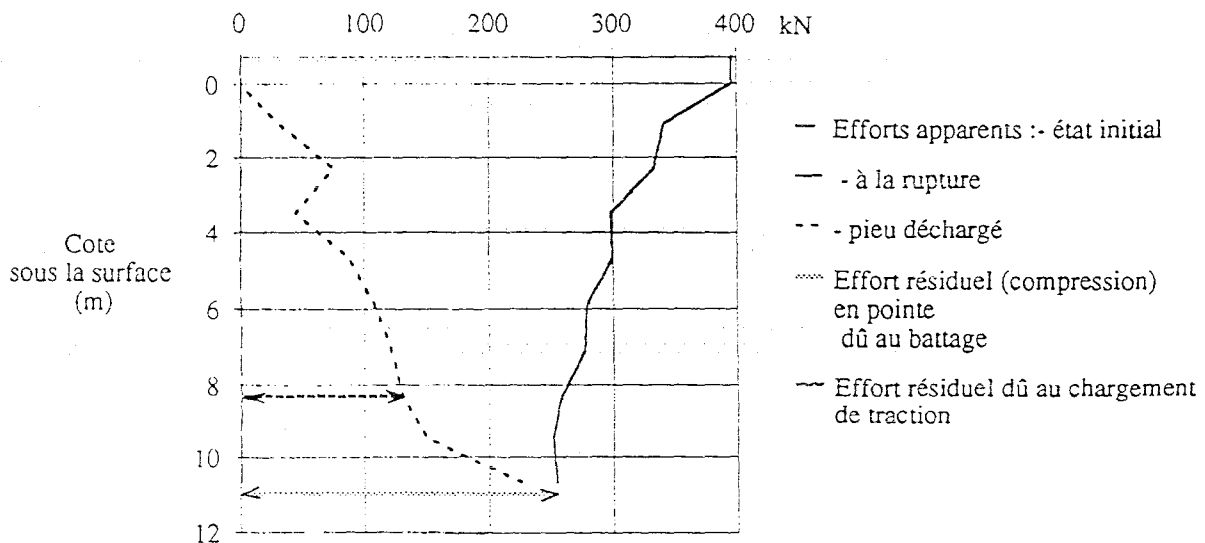


Fig.7 : Efforts résiduels dans le pieu

4 Efforts en pointe

Au moment des chargements en compression, les pieux viennent de subir un chargement en traction jusqu'à l'arrachement. Ils ont donc été totalement déchargés en pointe et ont un effort réel initial en pointe, nul. L'effort mesuré en pointe pendant le chargement de compression est donc l'effort réel. La figure 9 montre la mobilisation de l'effort de pointe sur un même pieu avant et après curage- en fonction du déplacement de la pointe (pointe assimilée au premier niveau de jauges). Le déplacement de la pointe est calculé comme la différence entre le déplacement mesuré en tête et les raccourcissements élastiques des tronçons successifs du pieu, ces derniers étant déterminés à partir des déformations mesurées par les jauges. On ne constate pas de différence significative entre les courbes avant et après curage, ce qui montre que la partie subsistant de la colonne de sol suffit à développer la même contribution à l'effort en pointe que la colonne de sol entière. On retrouve sur les courbes de la figure 8 la même altération en début de courbe que celle constatée sur les courbes en tête de la figure 6.

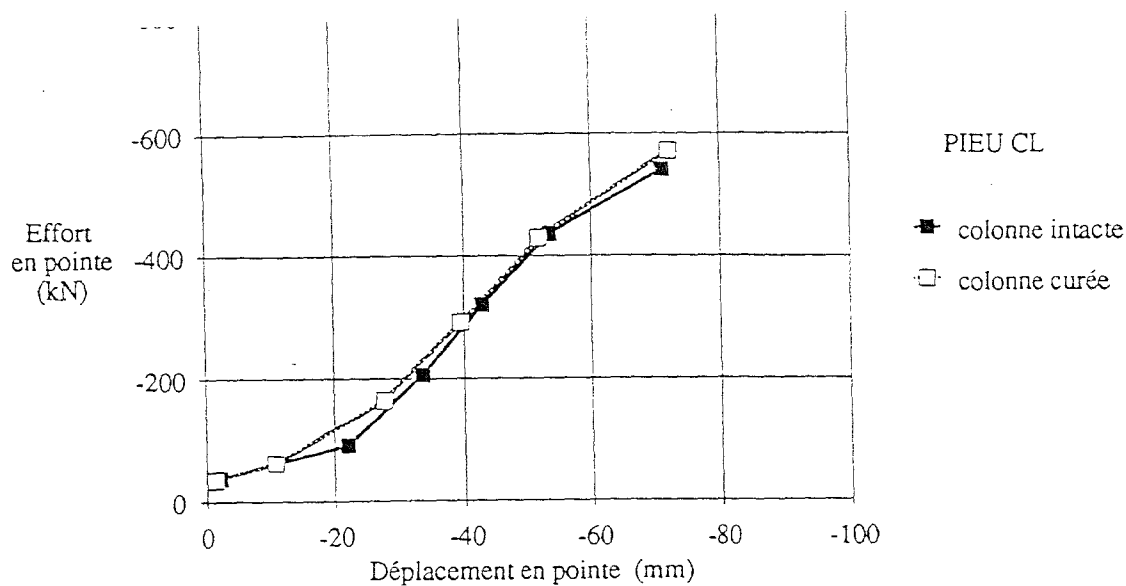


Fig. 8 : Mobilisation de l'effort de pointe

5. CONCLUSIONS

L'expérimentation de quatre pieux ouverts de 324 mm de diamètre dans les sables denses de Dunkerque a mis en évidence le comportement très différent des pieux dans les sables en battage et sous chargement statique.

- les pieux sont "carottants" en battage: ils découpent une colonne de sol, tandis que sous chargement statique de compression, ils sont bouchonnants: ils entraînent la colonne de sol.
- la résistance dynamique des pieux est influencée par le curage de la colonne de sol qui a eu lieu dans l'intervalle de deux rebattages, tandis que la résistance de pointe sous compression statique se développe de la même manière avant et après le curage de la colonne de sol.
- les efforts résiduels le long du pieu dûs au battage et aux chargements statiques ne sont pas négligeables: ils peuvent atteindre les mêmes ordres de grandeur que les efforts développés en traction.

REMERCIEMENTS

Les travaux présentés dans cette communication font partie d'un programme de recherche conduit par l'IFP et l'IFREMER dans le cadre du CLAROM (Club de Liaison pour les Actions de Recherche sur les Ouvrages en Mer). BOUYGUES OFFSHORE, BUREAU VERITAS, CEBTP, ELF-AQUITAINE, ETPM, SOLMARINE, TOTAL, partenaires du projet, sont remerciés pour leur autorisation de publication. Le Port Autonome de Dunkerque est également remercié pour sa coopération.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- (1) BRUCY, MEUNIER et NAUROY, 1991 " Behavior of pile plug in sandy soils during and after driving" 23rd Offshore Technology Conference, Houston, #6514, pp 145-153.
- (2) BRUCY, MEUNIER, NAUROY, LE TIRANT, 1991, "Comparison of static and dynamic tests of piles in sand", Colloque Fondations Profondes, ENPC, Paris.
- (3) MEUNIER, BRUCY, PAQUET, 1991, "Driving instrumentation as a means of evaluating pile performance. Application to four experimental piles in sand", Colloque Fondations Profondes, ENPC, Paris.
- (4) PAQUET, J, 1988, "Checking bearing capacity by dynamic loading - Choice of a methodology", 3rd Int Conf. on the application of Stress Wave Theory to Piles, Ottawa, Canada. Bi-TechPublishers.