



PIEU ISOLÉ SOUS CHARGES LATÉRALES CYCLIQUES EN MILIEU SABLEUX

F. SCHOEFS ⁽¹⁾ et D. LEVACHER ⁽²⁾

⁽¹⁾ Laboratoire de Mécanique et Géomécanique, Université de Nantes
⁽²⁾ Laboratoire de Mécanique des Fluides et Génie Civil, Université du Havre

Summary

Over the last few years, the development of port facilities has called for studies on the behaviour of laterally cyclically loaded piles. The hypotheses taken in account for these calculations are still very basic and most often lead to using global security factors. Economic and time-resistance requirements therefore entail the need for us to define more closely the ground-pile interaction when submitted to such loading.

Test series have therefore been carried in a centrifuge. This article shows the results of the study of a flexible pile and more precisely of the effect of cyclical impacts on the distribution of stress and 'P-Y' curves.

INTRODUCTION

Ces dernières années, le développement des ouvrages portuaires ou littoraux a nécessité des études de comportement de pieux chargés latéralement d'une manière cyclique. En effet, le dimensionnement de ces éléments repose encore sur des hypothèses très simplificatrices qui débouchent sur des facteurs de sécurité globaux : les impératifs économiques mais aussi de durabilité des ouvrages conduisent donc à affiner la caractérisation de l'interaction sol-pieu sous de tels chargements.

Les essais ont été réalisés à l'automne 1992 par Kotthaus et Levacher sur la centrifugeuse de Bochum (Allemagne). L'étude s'est portée sur un modèle dit "flexible" et un autre dit "rigide", dans un sable sec sous une sollicitation monotone puis cyclique. Le dépouillement a été mené au L.C.P.C. de Bouguenais, au sein de la section "centrifugeuse". L'objectif de cette campagne a été d'étudier l'impact des cycles sur la répartition en fonction de la profondeur des efforts tranchants, moments fléchissants, pressions latérales et surtout des courbes P-Y que de nombreuses méthodes de calcul utilisent (en France notamment). Le présent article ne soumet que les résultats concernant le pieu flexible.

LES ESSAIS SUR MODÈLES CENTRIFUGÉS

La similitude physique est une méthode de résolution des problèmes physiques étudiés par voie expérimentale. On réalise un modèle correspondant à l'ouvrage ou au problème étudié et on transpose les résultats obtenus par l'intermédiaire de relations basées sur les règles de similitude.

L'intérêt des essais en centrifugeuse est de pouvoir faire varier la gravité appliquée au modèle et par là-même de disposer d'un degré de liberté supplémentaire concernant les relations de similitude.

En géotechnique, si le modèle a été réalisé à l'échelle 1/n, la pesanteur sera de n fois la pesanteur terrestre et les échelles des différentes grandeurs physiques découlent

des relations précitées sachant que l'on veut utiliser le même sol et le même état de contrainte qui y est appliqué afin de conserver une loi de comportement et un mécanisme de ruine identiques. Le respect des règles de similitude impose alors :

| Grandeur physique | Echelle |
|----------------------------|------------------|
| Dimensions géométriques | 1/n |
| Contraintes, Déformations | 1 |
| Matériau (masse volumique) | 1 |
| Vitesses | 1 |
| Forces | 1/n ² |
| Masses | 1/n ³ |
| Accélérations | n |

La simulation des forces de masse par des forces centrifuges est donc parfaitement adaptée aux problèmes de géotechnique : le comportement rhéologique est reproduit assez fidèlement, de même que des phénomènes comme la dissipation d'énergie et l'on peut appréhender les schémas de rupture au moins qualitativement.

Les performances et caractéristiques de la centrifugeuse de Bochum sont les suivantes :

| | |
|----------------------|---------|
| Longueur du bras | 4,125 m |
| Masse embarquée maxi | 2 t |
| Accélération maxi | 250 g |

CONDITIONS EXPÉRIMENTALES

Le pieu modèle dit "flexible" qui a servi pour les essais et le pieu prototype correspondant ont les caractéristiques suivantes (les essais ont été effectués à 17,85 g) :

| | Pieu modèle | Pieu prototype |
|----------------------------------|-------------|-------------------------|
| Rigidité E.I (N.m ²) | 558 | 56,65 * 10 ⁶ |
| Diamètre B (mm) | 28 | |
| Fiche D (mm) | 280 | |

Ce pieu est un tube en duraluminium (AU4G) et simule le comportement d'un pieu composite acier-béton d'une fiche de 5m et de 50 cm de diamètre. Le sol est du sable de Fontainebleau de densité relative 72,5 % et de poids spécifique apparent sec (γ_d) 15,76 kN/m³.

Quel que soit le critère utilisé (Matlock-Reese, Davisson), ce système sol-pieu est classé comme semi-rigide mais son coefficient de raideur relative est voisin de la borne 'pieu flexible' d'où le choix de l'appellation

'pieu flexible'. La raideur du pieu n'étant pas significative en soit, il est important de la relier aux caractéristiques du sol : c'est à ce niveau que l'on parle de coefficient de raideur relative.

Deux pieux de ce type sont implantés dans le sable par un procédé simulant un forage : ils sont placés dans le conteneur vide et des tiges métalliques les maintiennent en place et le sable est disposé par pluviation en lits successifs. Celle-ci est réalisée à l'aide d'une trémie équipée d'un manchon flexible qui permet de répartir le sable sur toute la surface du conteneur : la hauteur de chute maintenue constante à l'aide d'un palan garantit une

bonne homogénéité du massif ainsi reconstitué mais pas une répétitivité satisfaisante puisque la procédure n'est pas automatisée.

Un des pieux a été chargé statiquement et a servi de référence : il est équipé de trois capteurs de déplacement et un capteur de force (fig. 1a). L'autre, plus instrumenté, a été utilisé pour le chargement cyclique à proprement parler : il comporte, en plus des capteurs précités, douze jauges de déformation réparties sur la fiche (fig. 1b). Le mode de chargement a été très simplifié par rapport à la réalité puisqu'il s'agit simplement de signaux triangulaires.

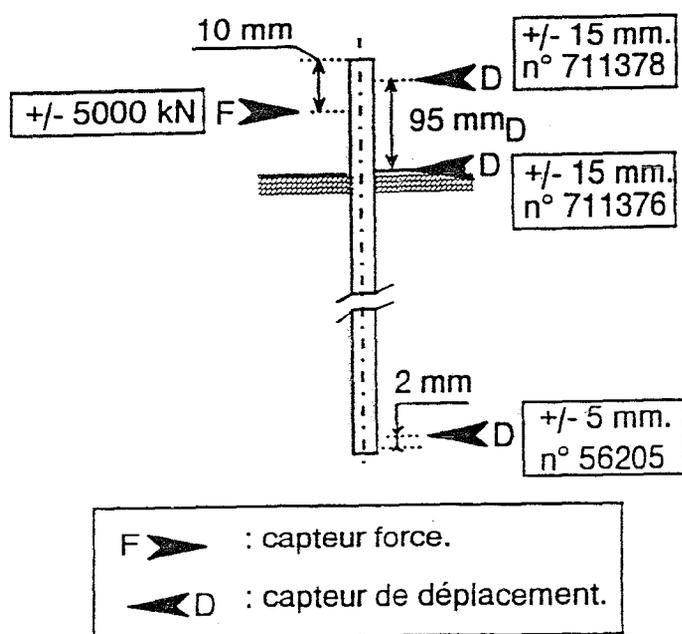


Fig. 1a

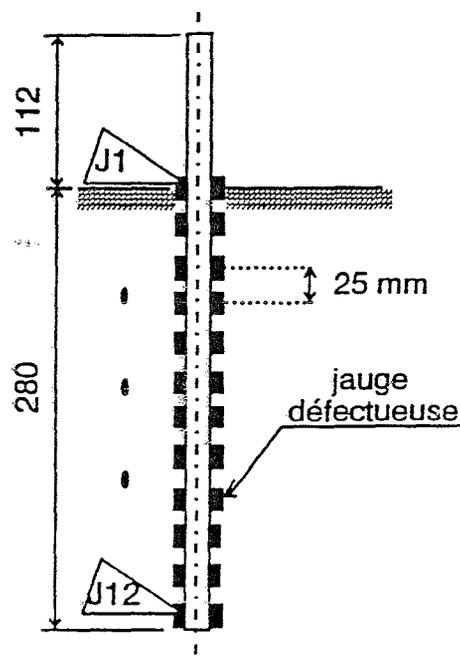


Fig. 1b

En chargement statique, le pieu est chargé de 0 à 700 N (223 kN en valeur prototype) avec un retour à 0. La durée du cycle est de 250 s (fig. 2a).

En cyclique, on répète cette amplitude de chargement 100 fois mais la période est alors de 50 s (fig. 2b). Les dix premiers cycles font l'objet d'une saisie simultanée de toutes les grandeurs mesurées avec une fréquence de 1 Hz puis, l'acquisition n'est faite que tous les dix cycles jusqu'au 100^e.

OBTENTION DES COURBES P-Y

A chaque cote de jauge sur la fiche et à chaque niveau de chargement, on peut avoir aisément accès aux moments fléchissants par mesure des déformations. Les variations des pressions P et des déplacements Y au cours du chargement sont alors déduites des moments respectivement par double dérivation et double intégration. Une dérivation simple donne l'effort

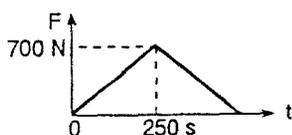


fig. 2a

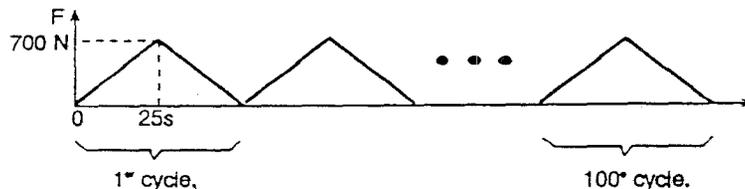


fig. 2b

tranchant et une intégration débouche sur la rotation de la section. La dérivation est réalisée après approximation de la courbe expérimentale des moments fléchissants par des polynômes de degré 5 par morceaux : le logiciel

correspondant a été développé par le L.C.P.C. en 1985. Afin de suivre de plus ou moins près la courbe expérimentale, un coefficient d'ajustement peut être imposé ou calculé automatiquement afin de réaliser un

compromis entre la courbe passant par tous les points expérimentaux et une courbe très éloignée et 'très lisse'. Le pas entre les points de mesure doit être constant, ce qui est le cas ici si l'on affecte les jauges fictives d'une valeur de mesure convenable : on a donc imposé une valeur qui s'intègre parfaitement dans l'allure générale de la courbe des moments. De plus, deux valeurs correspondant à des jauges fictives au-dessus du sol ont été calculées à partir de l'effort en tête et introduites comme résultats expérimentaux, ceci afin d'imposer une linéarité de la courbe au-dessus du sol et donc implicitement la pente de la courbe des moments à la surface. En sortie, on obtient les efforts tranchants et les pressions (en kPa) respectivement après la première et la seconde dérivation.

L'intégration a fait l'objet de la mise au point d'un programme basé sur la méthode des trapèzes corrigée. On place un point de mesure fictif au-dessus du sol : sa cote est égale à la distance entre les jauges afin de garder un pas constant. Ce point nous permet de calculer par intégration le déplacement à la surface du sol et de le

comparer avec la valeur enregistrée par le capteur à cet endroit. Les deux constantes d'intégration sont calculées à partir des valeurs des déplacements en tête et au niveau du sol mesurés par les capteurs.

Le déplacement mesuré en pointe nous permet de recalculer la courbe des moments : on applique aux moments un coefficient multiplicateur qui permette de réaliser l'égalité entre le déplacement mesuré et le déplacement calculé. L'erreur est alors calculée automatiquement par le programme. Etant donné le positionnement des pieux par des tringles, le capteur au sol peut s'avérer être 1 à 2 mm au dessus de la surface du sol, ce qui entraîne une erreur de 3% sur le déplacement : dans ce cas, la valeur mesurée est inférieure à celle calculée, ce que l'on a effectivement observé.

RÉSULTAT DES ESSAIS

- Courbes effort-déplacement (fig. 3)

Elles concernent les déplacements des trois capteurs.

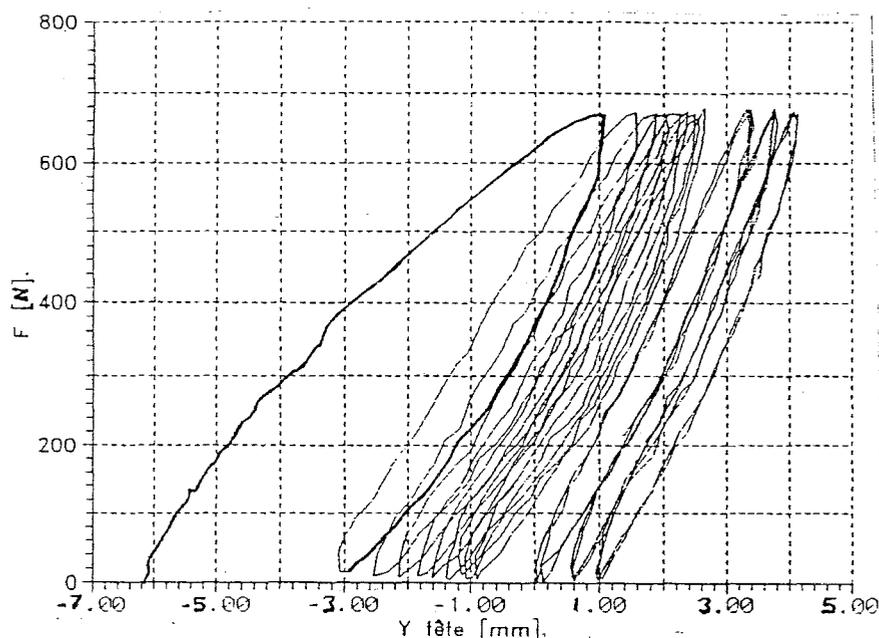


Fig. 3 : Courbe effort-déplacement en tête (cycles 1...9, 20, 30, 40)

Afin de pouvoir effectuer des comparaisons, on introduit la notion de raideur moyenne. Elle est définie sur le schéma ci-dessous (fig. 4) : pour chaque cycle, on calcule la pente de la droite tracée entre le minimum et le maximum (en effort).

En chargement statique, le déplacement en pied est de l'ordre du 10^e du déplacement au sol qui est lui-même deux fois plus faible que celui en tête : l'hypothèse d'encastrement en pied pour un pieu flexible est donc validée par cette première constatation. On a de plus confirmation que l'essentiel des déplacements se produit au-dessus du sol pour un pieu de ce type.

D'autre part, le pieu ne retrouve pas sa configuration initiale lors du déchargement et un déplacement rémanent est observé : le système sol-pieu étudié n'a donc pas un

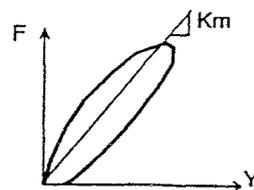


Fig. 4 : Raideur moyenne Km

comportement élastique. Une analyse locale plus détaillée nous permet de dégager les constatations suivantes :

- Le déplacement permanent en tête vaut 1/3 de l'amplitude totale à cet endroit. Ce rapport est de 1/2 à la surface du sol. On peut donc conclure à une "plasticité" du sol. Un autre phénomène vient se greffer : il s'agit de l'écoulement de sable derrière le pieu lors du chargement. Cette rupture du sol par poussée rend alors impossible tout retour à la configuration initiale. On peut conclure à un comportement élastoplastique à ces niveaux.

- En pied par contre, la courbe effort-déplacement comporte une verticale pour le déchargement : le comportement à ce niveau est donc rigide-plastique.

Pour ce qui est de la raideur moyenne, on observe que le comportement du système sol-pieu est de plus en plus raide lorsque l'on s'enfonce dans le sol. Celle-ci est 8 fois plus grande (1307 N/mm) en pied qu'en surface (162 N/mm). Ce résultat, combiné avec les très faibles déplacements observés, permet de valider l'hypothèse d'encastrement en pied.

En chargement cyclique, les courbes présentant les déplacements aux trois points considérés présentent des allures identiques :

- le premier cycle est 'ample' et la déformation permanente est importante.
- dès le second cycle, le module augmente fortement et le comportement est beaucoup plus élastique puisque la déformation permanente supplémentaire devient négligeable.

- à partir du troisième cycle, le module semble avoir atteint un palier.

- à partir du huitième cycle, la déformation permanente est constante et très faible. On observe alors des boucles parfaitement identiques que l'on déduit les unes des autres par simple translation.

Les amplitudes des déplacements diminuent fortement du premier au second cycle puis se stabilisent rapidement. On fait la même constatation avec la raideur moyenne. En pied, le déplacement est très faible et même nul à partir du 9^e cycle, ce qui confirme la caractérisation élastique du système sol-pieu : le sol semble donc se remanier et se compacter sous l'effet du chargement alterné et bloque ainsi le pieu.

Le mouvement du pieu crée donc derrière lui des crevasses qui se comblent par rupture du sol en poussée (fig. 5). Ce sol est alors compacté lors du retour du pieu. Le pieu ne peut donc revenir à sa position initiale et conserve des contraintes résiduelles. En tête, ce phénomène de compactage se traduit par une diminution de 37 % de l'amplitude du déplacement entre le premier et le second cycle. Au sol, entre ces deux même cycles, la raideur moyenne est multipliée par 1,8 et, entre le premier et le 40^e cycle, on obtient même un facteur de 3,3. En tête comme en pied, elle n'augmente pas plus de 1% par cycle après le quatrième. Cet ensemble d'informations permet de conclure à la formation d'une sorte de 'manchon de sable dense' au voisinage du pieu.

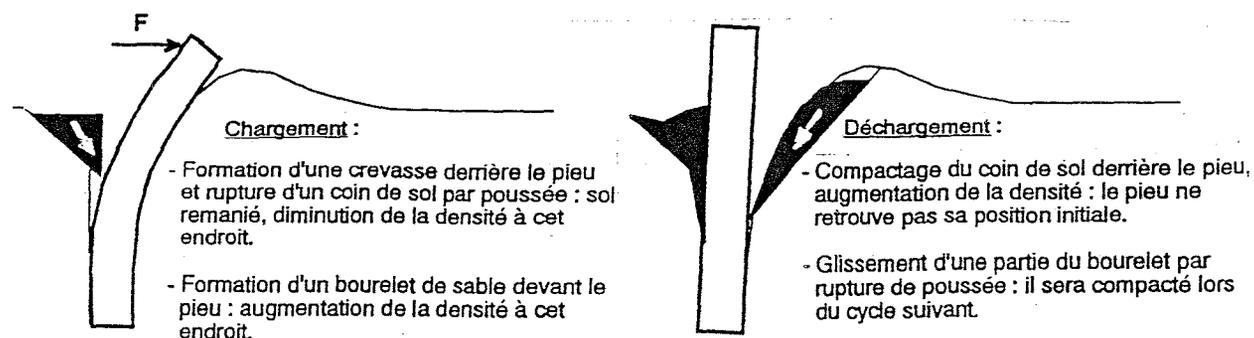


Fig. 5 : Mécanisme de comportement du système 'sol-pieu' envisageable sous chargement cyclique

Le premier cycle correspond donc à la mise en place du mécanisme et on tend ensuite vers un équilibre (dès le quatrième cycle la raideur augmente très peu) : le sol s'est alors remanié pour se mobiliser sous la forme d'un butée et d'une contrebutée qui reprennent les sollicitations. On atteint ainsi un comportement élastique linéaire avec des déplacements rémanents négligeables. Il est important de constater l'influence considérable des cycles sur la raideur moyenne.

Cependant, le fort accroissement de la raideur constatée entre le premier et le second cycle peut s'expliquer pour une part dans le mode d'obtention du massif : en effet, le dispositif de suspension des pieux par tringles et butées de maintien latéral au-dessus du conteneur a présenté l'inconvénient de former de petits cratères autour du pieu

en surface. Même si ces derniers ont été comblés, le sol était plus lâche à cet endroit et ceci a donc vraisemblablement amplifié l'augmentation de raideur.

Evolution de la profondeur du point de moment maximum au cours d'un cycle : (fig. 6)

Lorsque l'effort augmente, au cours d'un cycle, le point de moment maximum tend à s'approcher de la surface. Cependant tous les cycles ne jouent pas le même rôle :

- Le premier cycle est encore particulier puisque la profondeur reste constante. Pour tous les autres cycles, on part d'un Z/B de -6,2 en début de chargement pour atteindre - 2,68 pour l'effort maximum.

- L'étude des cycles 2, 3 et 4 montre que la "montée" de ce point est rapide en début de chargement (jusqu'à 70

kN en valeur prototype) puis est plus lente et atteint enfin un palier pour un 'effort prototype' de 165 kN.

- Pour le cinquième cycle, la progression est linéaire jusqu'à 165 kN ('effort proto') et à partir du neuvième, "la montée" ne se fait que pour un effort assez important (85 kN) et progresse linéairement ensuite.

Cette observation trouve son explication dans la présence de moments résiduels après déchargement, le pieu ne revenant pas dans sa configuration initiale.

Lorsque l'on applique en tête un effort d'intensité croissante, cet état s'estompe peu à peu et disparaît dès que la sollicitation est suffisamment grande (165 kN). En effet, comme ceci a été représenté ci-dessous (courbes en pointillés), en opérant un changement d'origine (moments nuls sous $F = 6,23$ [N]), le point de moment maxi se trouve alors à profondeur constante au cours du cycle.

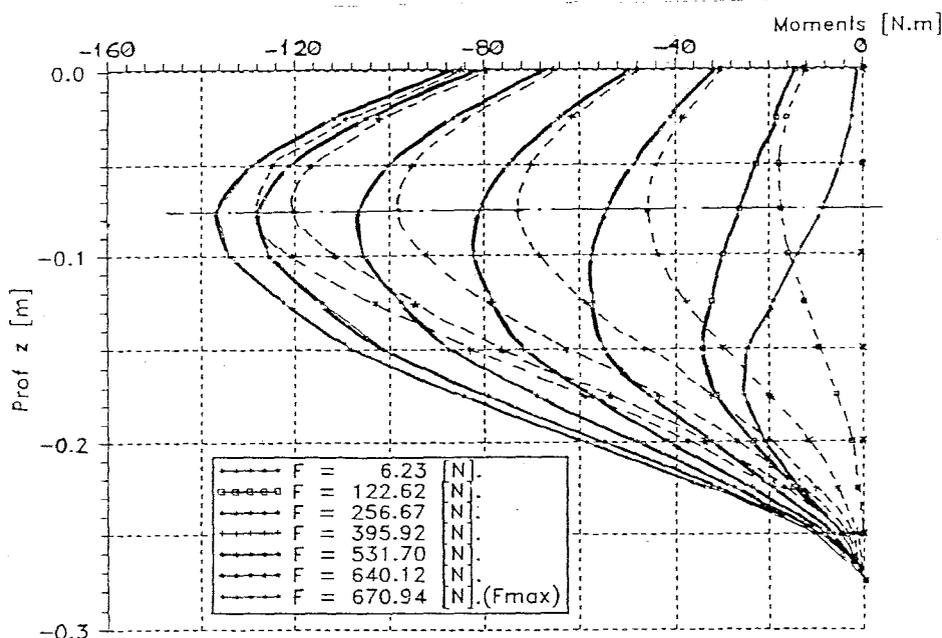


Fig. 6 : Courbe moment-profondeur au cours du chargement (4^e cycle).

Distribution des pressions latérales et des déplacements (fig. 7 et 8)

Les grandeurs suivantes sont relatives au pieu prototype.

L'allure de la courbe des pressions obtenue correspond bien à ce qu'il est habituel d'observer mises à part certaines singularités. On constate bien notamment la présence d'une zone de butée (de $Z/B=0$ à $-7,2$ avec B : diamètre ou largeur du pieu) et d'une zone de contrebutée (de $Z/B=-7,2$ jusqu'au pied du pieu). Il est intéressant de noter une fois de plus que le premier cycle présente une distribution particulière : il peut donc être considérée comme une phase de mise en place de l'environnement du pieu.

En contrebutée, il existe un maximum relatif (en $Z/B = -5,4$) que l'on ne rencontre pas d'habitude et dont on ne peut que difficilement expliquer l'origine physiquement. En effet, cette 'anomalie' peut être interprétée soit comme une hétérogénéité localisée du massif de sable (ce que l'on peut écarter de prime abord), soit comme un manque de précision dans la courbe de moments qui entraîne un lissage imprécis en dérivation. Dans cette

même zone, les pressions sont très fortes et se stabilisent à l'avant-dernière jauge. A ce niveau, entre en jeu le phénomène complexe et encore méconnu de la réaction en pointe.

De plus Bouafia [1] a constaté qu'en contrebutée, les pressions obtenues étaient très sensibles à la précision de la courbe des moments, précision que nous ne pouvons atteindre étant donné le faible nombre de jauges dont nous disposons : le lissage par tronçons à l'aide de polynômes d'ordre 5 est donc mal guidé et ne nous permet pas de prendre en compte les résultats d'une manière quantitative.

Ensuite, malgré les précautions prises (injection de deux points fictifs dans le programme), la pression n'est pas nulle en surface et même loin d'être négligeable (30% du maximum). Pour ce qui est de l'annulation des pressions, elle se produit toujours à la même profondeur et le chargement cyclique ne semble pas avoir d'influence.

Enfin, si l'on fait une vérification de l'équilibre statique du pieu, on s'aperçoit qu'il n'est pas satisfait notamment parce que les pressions de butée sont trop importantes.

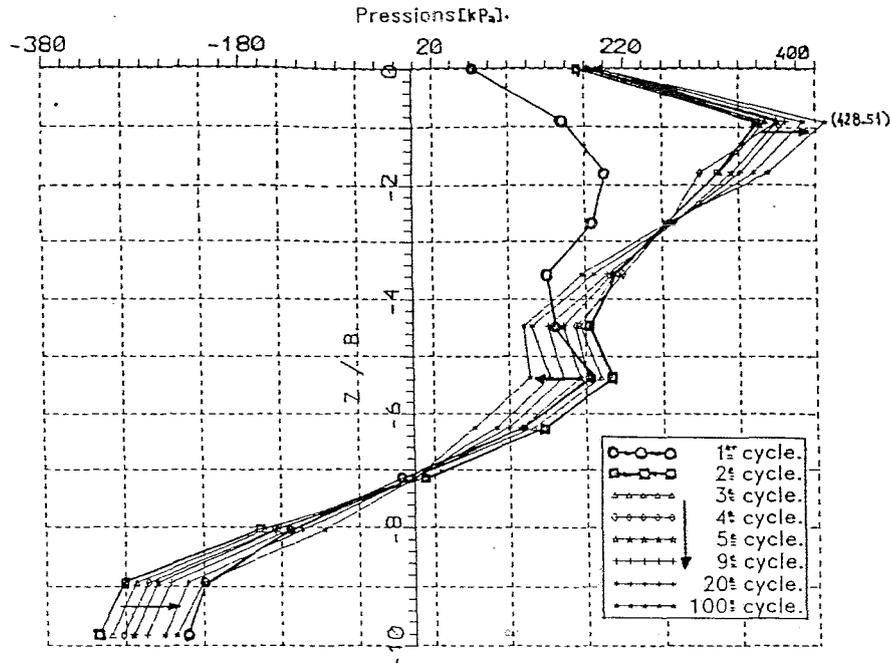


Fig. 7 : Distribution des pressions avec la profondeur pour $F=F_{max}$

La dérivation ne donne donc pas pleinement satisfaction ici en grande partie parce que la densité de jauges est insuffisante.

Pour ce qui est des déplacements, on observe l'allure classique de la déformée d'un pieu flexible. Avec les précautions nécessitées par les remarques du paragraphe précédent, on peut établir une corrélation entre cette courbe et celle des pressions.

En butée, les pressions augmentent en intensité avec les cycles alors que les déplacements diminuent. Ceci peut s'expliquer par une forte augmentation de la compacité du sol au voisinage du pieu.

En revanche, un problème se pose au niveau du point de pression nulle qui devrait coïncider avec celui de déplacement nul, ce qui est loin d'être le cas à partir du second cycle. De même, en pied, il est très surprenant de constater la présence de pressions très fortes pour des déplacements négligeables : compte tenu de ce qui a été dit au sujet de la validité des pressions dans cette zone, on ne peut prendre en compte ce phénomène.

On ne peut donc affiner l'analyse compte tenu des problèmes inhérents à la méthode de dérivation.

Courbes P - Y : (fig. 9)

Etant donné la grande imprécision des résultats en contrebutée, on se contente ici de tracer ces courbes pour la partie en butée. Elles présentent une allure classique, et se caractérisent par leur non-linéarité et par l'absence de palier (sauf éventuellement pour le premier cycle). Afin de les comparer, on définit le module tangent à l'origine (exprimé en kPa/mm).

On remarque que ce module augmente fortement entre le premier et le cinquième cycle (facteur 3) puis qui se stabilise (augmentation de 20 % du cinquième au centième cycle) : ceci confirme le fait que l'on tend vers

un équilibre sol-pieu. Après le cinquième cycle, les courbes sont très distordues et peuvent difficilement être analysées dans leur globalité. Enfin les remarques faites au moment de l'étude des pressions permettent de comprendre que le module à la surface du sol soit non nul.

Une étude de la variation du module avec la profondeur (fig. 10), révèle qu'il augmente de manière quasi-linéaire avec celle-ci. C'est d'ailleurs l'hypothèse classique qui est prise en compte lorsque le massif est sableux. Si on avait pu procéder à une étude en contrebutée, on aurait peut être plutôt relevé une allure proche de celle d'un essai pénétrométrique. La pente de cette droite tend à augmenter jusqu'au quatrième cycle puis se stabilise. Le module est alors presque constant comme on peut le remarquer sur les courbes 'module-nombre de cycles' qui ont été tracées en surface et au niveau de la première jauge (fig. 11). Un tableau récapitulatif des valeurs mesurées est donné ci-dessous (fig. 12).

CONCLUSIONS

Cette étude a donc permis d'appréhender un certain nombre de phénomènes physiques. En particulier, il est notable de constater qu'un pieu flexible sous sollicitations latérales cycliques tend vers un état d'équilibre du point de vue de la distribution des efforts : le premier cycle correspond alors à une phase de mise en place du mécanisme et, dès le quatrième cycle, on assiste à une stabilisation des phénomènes. On a pu aussi valider les hypothèses usuelles concernant l'encastrement en pied et la variation linéaire avec la profondeur, du module tangent issus des courbes P-Y pour un pieu fiché dans du sable. Après un nombre suffisant de cycles (de l'ordre de 10), le système sol-pieu a même un comportement voisin du 'linéaire élastique'.

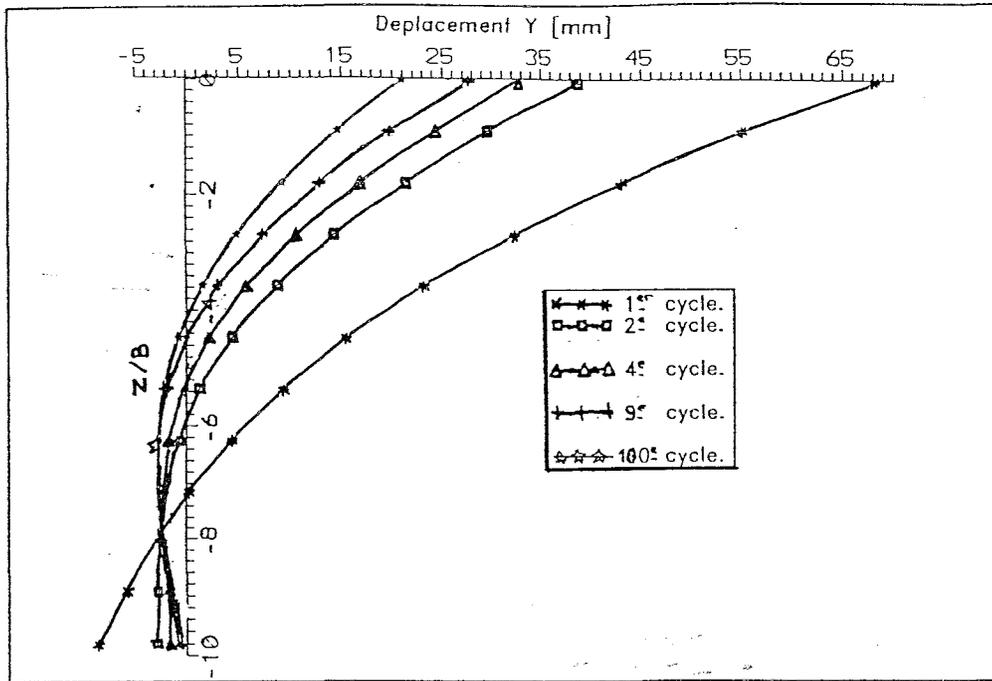


Fig. 8 : Distribution des déplacements avec la profondeur ($F = F_{max}$)

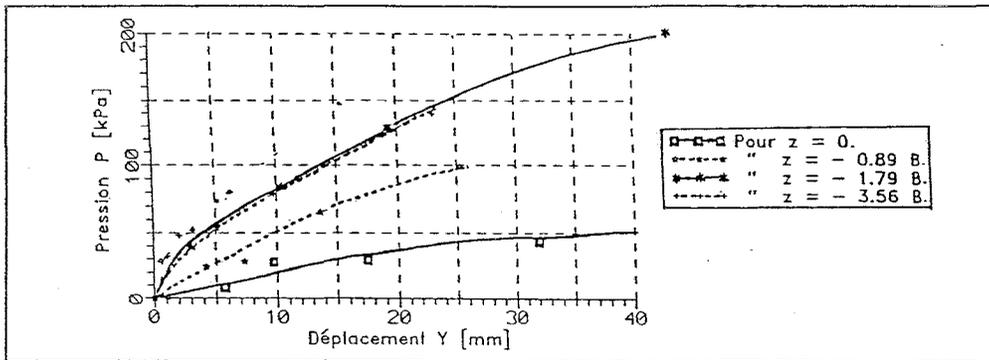


Fig. 9 : Courbe P - Y en butée (premier cycle).

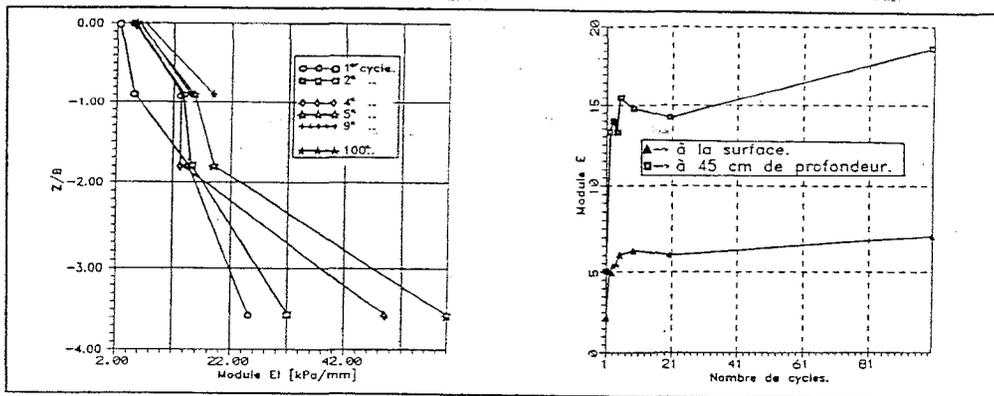


Fig. 10 : variation de E_t avec Z/B

Fig. 11 : ' E_t ' en fonction du nb de cycles.

| Z/B | Et [kPa/mm] | | | | | | | | |
|-------|-------------|------|-------|------|------|------|-------|------|--|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 9 | 20 | 100 | |
| 0 | 2.2 | 5 | 5.4 | 5.5 | 6 | 6.25 | 6 | 7.1 | |
| -0.89 | 5 | 13.5 | 14 | 13.3 | 15.5 | 14.8 | 14.25 | 18.7 | |
| -1.79 | 14.5 | 15 | 18.64 | 13.3 | 19 | | | | |
| -3.56 | 25 | 32 | 60 | 49 | 60 | | | | |

Fig. 12 : valeurs de E_t mesurées.

La quantification de ces résultats a cependant révélé les limites de l'expérimentation qui a été menée. Afin d'aborder ce nouvel aspect du problème et dans le but de dégager des prescriptions réglementaires, il serait bon de pouvoir effectuer des dérivations dans de bonnes conditions et pour cela de favoriser un lissage convenable en augmentant la densité de jauges.

Une perspective de cette étude réside aussi dans une meilleure modélisation de l'effort appliqué en tête, lors d'un accostage de navire par exemple.

Référence bibliographique

[1] : Bouafia A. 1989 Modélisation des pieux chargés latéralement en centrifugeuse. Thèse, E.C.N., Université de Nantes, 267p.

QUESTIONS DE MONSIEUR PUECH

1) Avez-vous réussi à maîtriser les problèmes liés à l'instrumentation du fût des très petits pieux qui sont utilisés dans vos essais en centrifugeuse et quelle est la fiabilité présumée des mesures effectuées ?

REPONSE

L'étude à l'aide de modèles centrifugés du comportement de pieux impose l'utilisation de pieux-modèles de taille très réduite. Ces pieux-modèles sont équipés en général de jauges de déformation le long du fût, afin d'étudier la distribution des contraintes quel que soit le type de sollicitation appliquée. Une bonne connaissance de cette distribution passe par un équipement correct, c'est-à-dire disposer d'un nombre de

jauges de déformation suffisant pour exploiter la courbe résultante.

Du point de vue technique, ce nombre de jauges peut s'installer sans problème.

Du point de vue mesures, la fiabilité d'un tel système n'est plus à démontrer (étalonnage préalable, étalonnage a posteriori). Les mesures sont obtenues avec une précision de l'ordre de 5 %.

2) Le Laboratoire de l'Université de Nantes envisage-t'il de poursuivre des recherches dans cette voie ?

REPONSE

Le Laboratoire de Mécanique et Géomécanique de l'Université de Nantes par l'intermédiaire de D. Levacher poursuit cette activité de recherche. Actuellement elle est toujours menée par D. Levacher au Laboratoire de Mécanique des Fluides et Génie Civil du Havre en collaboration avec l'Université de Nantes.

3) Avez-vous comparé vos résultats expérimentaux avec les courbes p-y cycliques telles que recommandées par l'API Rp2A ?

REPONSE

Non, nous n'avons pas comparé les courbes p-y obtenues avec celles données par les recommandations API. Ceci peut être envisagé par la suite. Le dépouillement d'essais sur des pieux rigides sont en cours.