

Étude expérimentale de l'effet de la proximité d'un talus sur les courbes de réaction P-Y des pieux chargés latéralement

**S. MEZAZIGH
D. LEVACHER**

Université du Havre,
Laboratoire de Mécanique,
Groupe de Recherche
en Génie Civil,
quai Frissard, BP 265,
76055 Le Havre Cedex

J. GARNIER

Laboratoire Central
des Ponts et Chaussées
de Nantes, BP 19,
44340 Bouguenais

Résumé

Un important programme de recherches a été engagé visant à améliorer le dimensionnement des pieux sous sollicitations latérales. L'objectif principal concerne la détermination des courbes de réaction P-Y qui interviennent dans les méthodes actuelles. L'article présente l'étude du cas mal connu mais fréquent d'un pieu implanté à proximité d'un talus. L'approche expérimentale sur modèles réduits centrifugés est décrite ainsi que la méthode permettant la détermination des pressions exercées par le sol le long du pieu. L'effet du talus sur les déplacements du pieu et sur les moments de flexion est examiné. Les courbes de réaction sont aussi obtenues, pour différentes distances à la crête et plusieurs pentes du talus. Les coefficients à appliquer aux courbes de réaction d'un massif horizontal pour tenir compte de la proximité d'une pente sont enfin déduits de ces essais.

Experimental study of the slope effect on the P-Y reaction curves of laterally loaded piles

Abstract

An extensive program of centrifuge tests was undertaken to study the effect of slope on P-Y curves in sand. The paper concerns the method developed in a previous series of centrifuge tests to experimentally determine P-Y curves. Bending moment curves are fitted by local quintic spline functions through a crossed validation method and then twice differentiated. These experimental P-Y curves are validated by back analysis. The program of tests on piles near slopes is given. It includes studies of the effect of distance to the slope, slope angle, soil properties. Sample preparation method, model piles, and the lateral loading device are described. Deflection-vs-load curves, bending moment curves and derived P-Y curves for piles close to slopes are compared with horizontal soil response. The coefficients that can apply to P-Y reaction curves of the reference piles (single pile in horizontal ground) are proposed for being used in practice.

NOTATIONS

B	: diamètre du pieu (m).
$E_p I_p$	: rigidité à la flexion du pieu (MN.m ²).
e	: cote de l'effort en tête (m).
FH	: effort horizontal en tête du pieu (kN).
g	: accélération de la gravité terrestre (m.s ⁻²).
I_D	: indice de densité (%).
K	: coefficient de réaction du sol (kN/m).
L	: fiche du pieu dans le sol (m).
M	: moment de flexion à une profondeur donnée (kN.m).
M_{max}	: moment maximal (kN.m).
m	: coefficient de proportionnalité.
n	: exposant des courbes P-Y en repère log-log.
P	: réaction latérale du sol à une profondeur donnée (kN/m).
Ref.	: essai de référence sur sol horizontal.
t	: distance du pieu à la crête du talus (m).
t_{lim}	: distance limite de la crête du talus (m).
T	: effort tranchant à une profondeur fixée (kN).
Y	: déplacement latéral du pieu à une profondeur donnée (mm).
Y_{ref}	: déplacement en tête du pieu référence (mm).
z	: profondeur à partir de la surface du sol (m).
γ_d	: poids volumique sec du sable (kN/m ³).
β	: angle du talus (rd).
η	: coefficient de proportionnalité.

1

Introduction

Les méthodes utilisant le module de réaction se sont imposées pour le calcul de pieux sollicités latéralement, car elles permettent de prévoir les efforts dans les pieux mais aussi leurs déplacements. Elles nécessitent, en revanche, une détermination préalable des courbes de réaction P-Y qui lient, dans chaque couche de sol, le déplacement horizontal du pieu (Y), à la pression de réaction exercée par le sol (P).

Différentes méthodes, basées sur les résultats d'essais de pénétromètre ou du pressiomètre, permettent de construire les courbes P-Y pour un pieu isolé installé dans un massif à surface horizontale et soumis à un chargement statique.

Les problèmes surviennent, par contre, dès que l'on s'écarte de cette situation idéale, ce qui est le plus souvent le cas dans la pratique, et de nouvelles recherches apparaissent donc nécessaires.

Une étude a ainsi été entreprise au Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC) pour déterminer l'influence de la proximité d'un talus et de la disposition de pieux en groupe, sur les courbes P-Y. Son objectif final est de fournir aux praticiens des coefficients à appliquer alors aux courbes de réaction du pieu isolé sur sol horizontal. L'article présente la méthode utilisée pour la réalisation et l'interprétation

des essais sur modèles centrifugés, ainsi que les principaux résultats obtenus lors de l'étude de l'effet de la proximité de talus.

2

Méthode utilisée

Le problème est tridimensionnel et l'interaction sol-pieu est trop complexe, pour que cette étude puisse être conduite par des méthodes théoriques ou numériques. Compte tenu du nombre d'essais nécessaires, elle ne peut pas, non plus, être réalisée à l'aide d'essais sur des pieux réels.

Les modèles réduits centrifugés constituent une nouvelle voie rendant désormais possible l'étude de ce type de problème, comme l'ont montré les travaux de Bouafia (1990) et de Terashi *et al.* (1991). Les essais antérieurs réalisés au LCPC ont démontré qu'en instrumentant les pieux de jauges de déformation, pour mesurer les moments de flexion, il était possible de déterminer expérimentalement les courbes P-Y (Bouafia, 1990). La principale difficulté de la méthode réside dans le lissage puis la double dérivation de la courbe des moments. Un logiciel de lissage utilisant des fonctions splines ou des polynômes avait été développé, et l'étude a montré que les fonctions splines quintiques conduisaient aux meilleurs résultats.

Contrairement à ce qui est parfois effectué, il est capital de ne pas introduire de conditions ou d'hypothèses supplémentaires, lors de ces opérations de lissage et de dérivation (pression nulle à la surface du sol ou en pied, par exemple). Ces conditions très fortes et très restrictives ont, en effet, une influence déterminante sur la forme des courbes de réaction obtenues. Elles représentent alors plus l'idée que le chercheur se fait *a priori* de la relation P-Y que la relation physique réelle.

Dans le logiciel SLIVALICS (Deny, 1985), développé au LCPC, le lissage des points expérimentaux est réalisé par des fonctions splines quintiques s'appuyant sur 6 points de mesure successifs et dans lesquelles est introduit un paramètre d'ajustement δ_0 . Suivant la valeur donnée à ce paramètre, les courbes peuvent être très fidèles (elles passent alors au plus près des points expérimentaux mais peuvent présenter de légères ondulations liées aux imprécisions des mesures extensométriques) ou au contraire être plus lisses en s'écartant alors parfois légèrement des valeurs expérimentales.

Pour les essais décrits ci-après, le critère utilisé pour déterminer le paramètre d'ajustement δ_0 consiste à vérifier, par approximations successives, l'équilibre statique du pieu. Pour cela, l'effort tranchant obtenu par la première dérivation des courbes des moments fléchissants déterminées par ce lissage est comparée à l'effort exercé en tête du pieu mesuré par un capteur de force.

$$\begin{aligned}
 FH + \int_0^L P.B(z).dz + T(L) &\approx 0 & \text{à } 5 \% \text{ près} \\
 FH.e + \int_0^L P.B(z).z.dz + T(L).L &\approx 0 & \text{à } 5 \% \text{ près}
 \end{aligned} \tag{1}$$

Le paramètre d'ajustement retenu est celui qui permet d'obtenir une différence inférieure à 5 %. Aucune hypothèse supplémentaire n'est donc imposée lors de la détermination de la courbe des pressions.

L'étude précédente (Bouafia, 1990), réalisée sur des pieux instrumentés de 12 paires de jauges, a aussi montré que le nombre de points de mesure devait être augmenté pour garantir une précision suffisante sur les courbes de pression obtenues, en particulier en tête et en pied du pieu.

3

Programme d'essais

L'objectif étant l'étude de l'effet d'un talus sur les courbes P-Y, nous avons décidé de tester des pieux assez flexibles mis en place à proximité de talus de très grande longueur comparativement à la fiche du pieu. Ce choix permet de réduire le nombre de paramètres, en éliminant en particulier la hauteur du talus. Deux pentes de talus ont été étudiées (2/1 et 3/2) et le programme a comporté 59 essais de chargement répartis sur 7 conteneurs.

3.1

Massif de sol

Le matériau utilisé est un sable de Fontainebleau blanc fin, dont les caractéristiques ont été présentées par J. Garnier (1994). Le sable est mis en place dans les conteneurs d'essai (1 200 mm x 800 mm), par pluviation à l'aide de la trémie automatique du LCPC. Deux densités différentes ont été étudiées (16,1 kN/m³ et 15,5 kN/m³) soit des indices de densité de 0,81 et 0,63. Cette trémie garantit une très bonne homogénéité des massifs, avec des écarts sur les densités inférieurs à 1 % (Garnier, 1994 ; Mezazigh, 1995).

3.2

Pieu et procédure de chargement

Le pieu modèle est un tube d'aluminium AU4G, de diamètre extérieur de 18 mm, d'épaisseur 1,5 mm et de longueur totale de 380 mm, avec une fiche dans le sol de 300 mm. L'accélération centrifuge de 40 g permet donc de simuler un prototype de 720 mm de diamètre et 12 m de fiche ($EI = 514 \text{ MN.m}^2$). Il est équipé de 20 paires de jauges, espacées de 15 mm. Deux capteurs de déplacement DP1, DP2, situés respectivement aux cotes 65 mm, 20 mm par rapport à la surface du sol, et un capteur de force permettent la détermination des conditions en tête.

Le pieu est mis en place dans le massif de sable par battage. La masse utilisée pour le battage pèse 615 g et sa hauteur de chute est de 470 mm. Le nombre de coups nécessaire à la pénétration totale varie suivant la densité du sable (environ 80 coups pour une densité de 16 kN/m³ et seulement 50 coups pour une densité du sable de 15 kN/m³). Deux ou trois essais de chargement latéral de pieux implantés dans un massif à surface horizontale sont d'abord réalisés, avant d'excaver la pente. Il est en effet très important de déterminer avec précision la réponse d'un pieu sur sol horizontal, et en particulier les courbes P-Y correspondantes, puisque ces résultats constituent la référence lors de l'étude de l'effet de la proximité d'un talus.

Après ces essais, le talus est terrassé et 4 à 6 essais sont effectués sur des pieux implantés à différentes distances relatives t/B de la crête de talus (Fig. 1). Le char-

gement horizontal du pieu est réalisé par un dispositif développé au LCPC (Garnier, 1994). L'effort de traction est transmis au pieu, à la cote 40 mm, par l'intermédiaire d'un câble métallique et le dispositif permet d'effectuer des chargements par paliers, comme le montre l'exemple de la figure 2.

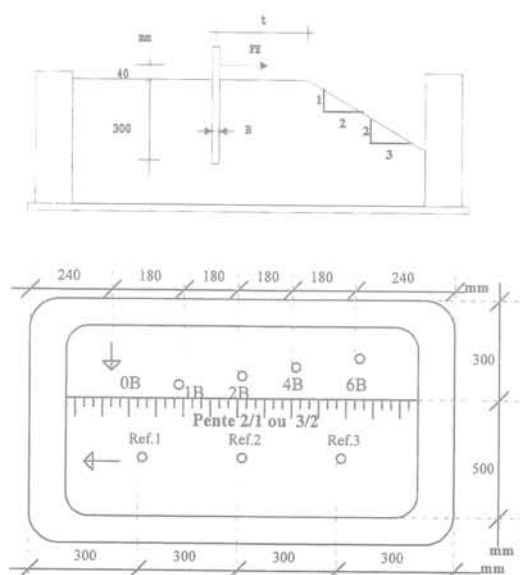


FIG. 1 Notations et positions des pieux dans le conteneur.

Notation and location of piles in container.

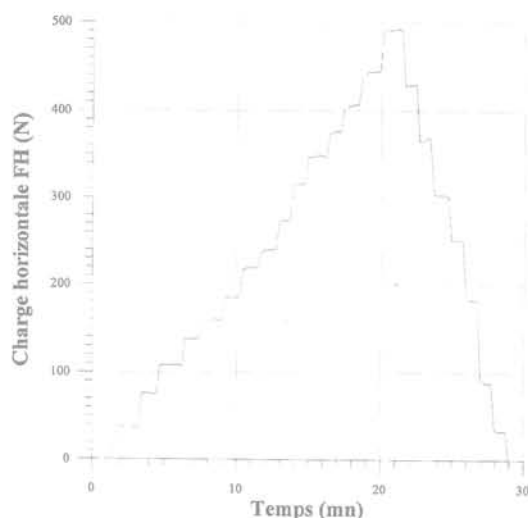


FIG. 2 Modes de chargement. Loading curve.

4

Résultats

Le programme comporte 59 essais de chargement de pieux, implantés dans des massifs horizontaux (essais de référence) ou à des distances à la pente t comprises entre 0 et 12 fois le diamètre du pieu ($t/B = 0$ à 12), et ceci pour les deux angles du talus de 1/2 et 3/2 étudiés.

Courbes de chargement

Un chargement latéral est d'abord opéré sur des pieux isolés de référence, installés dans le massif horizontal. La figure 3 montre un exemple des courbes de chargement de ces pieux de référence. Ces courbes attestent la très bonne répétitivité des essais et l'homogénéité du massif reconstitué par pluviation.

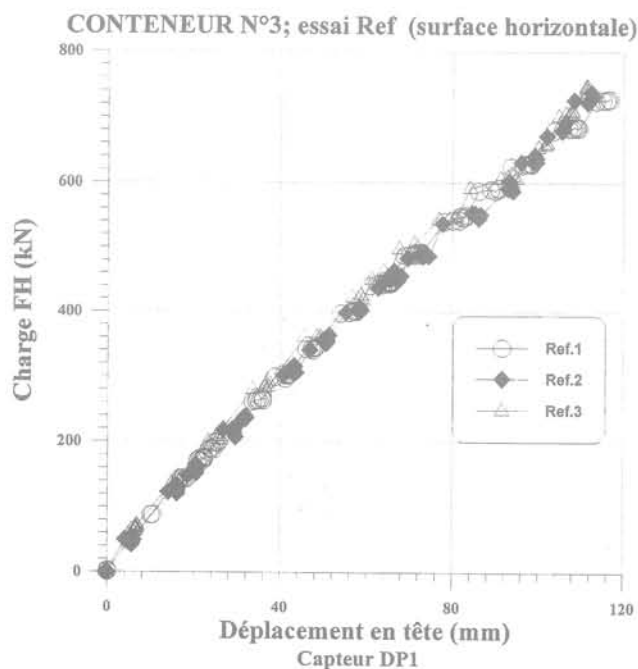


FIG. 3 Déplacement horizontal en tête des pieux de référence (surface horizontale).
Horizontal displacements of reference piles head (horizontal ground).

L'effet de la présence d'un talus sur les déplacements en tête est illustré par la figure 4 où sont présentées les courbes de chargement obtenues près d'un talus dressé à 2/1 dans un sable dense (conteneur 3). La distribution des courbes obtenues sur des pieux à différents t/B est logique. Pour un effort donné, le déplacement en tête le plus fort est enregistré sur le pieu en crête du talus ($t/B = 0$). Lorsque t croît, le déplacement diminue jusqu'à des valeurs d'environ 6 (pour un talus à 2/1) et 10 (pour une pente de talus de 3/2). Pour des pieux situés à de plus grandes distances du talus, les déplacements n'évoluent plus, et les courbes de chargement se superposent à peu près à celles des pieux de références obtenues en massif horizontal.

Dans le cas des pieux installés près d'un talus dressé à 2/1 ($\beta = 26,6^\circ$), pour les pieux en crête de talus ($t/B = 0$), les déplacements sont multipliés par un facteur d'environ 1,7 par rapport au pieu de référence.

Dans le cas d'un talus dressé à 2/3 ($\beta = 33,7^\circ$) et pour $t/B = 0$, un facteur multiplicateur des déplacements d'environ 2,4 est nécessaire pour retrouver ceux des pieux de référence. On a pu également noter que la densité du massif n'a aucun effet sur la distance limite de l'influence du talus sur les déplacements en tête. Seul l'angle du talus a un effet important sur cette distance limite.

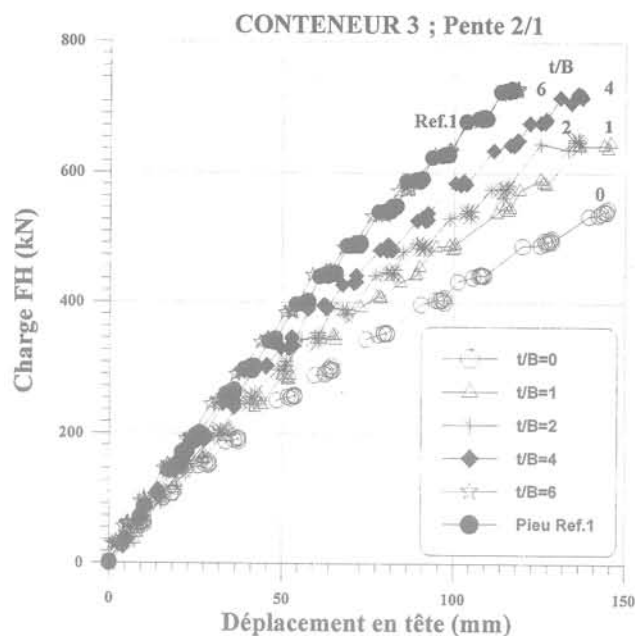


FIG. 4 Effet de la pente sur les courbes de chargement.
Effect of the slope on loading curves.

4.2

Courbes des moments

La mesure des moments fléchissants est faite à l'aide des jauges de déformation réparties le long du pieu. Comme pour les relations effort-déplacement, la courbe de référence des moments fléchissants est celle donnée par les pieux isolés sur massif horizontal (Fig. 5). L'allure des courbes obtenues confirme bien, là aussi, l'homogénéité du massif et la fiabilité des essais de chargement et des mesures de moments.

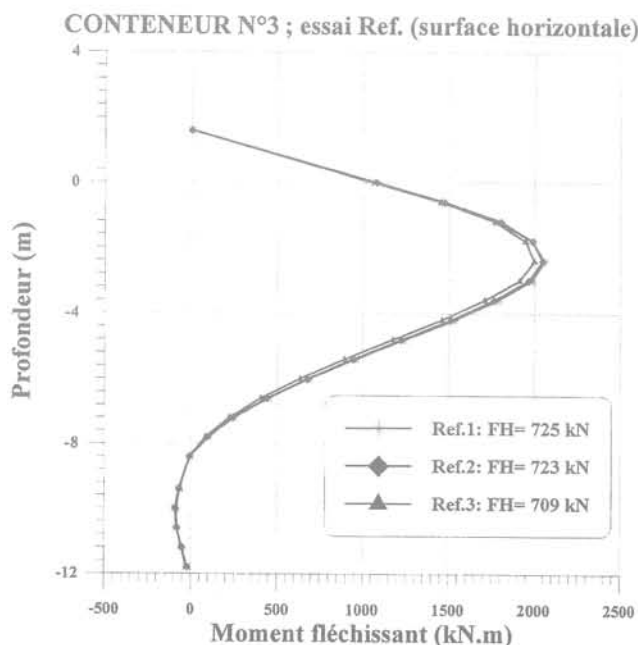


FIG. 5 Moment fléchissant des pieux de référence (surface horizontale).
Reference piles bending moments (horizontal ground).

Les moments fléchissants obtenus pour les différents pieux installés au bord du talus traduisent aussi clairement l'influence de la proximité du talus. A titre d'exemple, les courbes des moments mesurés lors du chargement des pieux de référence du conteneur 3 sont reproduites sur la figure 6 (charge latérale de 540 kN). L'évolution des courbes de moments, lorsque la distance à la crête t/B varie, est aussi donnée sur la figure 3 (conteneur 3, talus dressé à 2/1). Le moment maximum est multiplié par un facteur d'environ 1,25 pour un pieu en crête de talus dressé à 2/1, par rapport au pieu de référence. Ce facteur atteint environ 1,8 pour un talus à 3/2. On note également sur ces courbes, que la profondeur du point de moment maximal augmente régulièrement lorsque le pieu se rapproche du talus. Elle passe de 0,2 L en massif horizontal à environ 0,3 L en crête du talus de pente 2/1 (L étant la fiche du pieu). Par contre, pour un talus 3/2, la profondeur du point du moment maximal du pieu en crête du talus passe à environ 0,37 L.

Les mêmes constatations que sur les courbes de chargement peuvent être faites sur les courbes de moments. Les moments les plus élevés sont observés pour le pieu en crête de talus ($t/B = 0$). Ils diminuent lorsque t/B croît et se stabilisent pour des distances t supérieures à 6 ou 8B. Les courbes de moments se superposent alors à celles obtenues sur les pieux de référence.

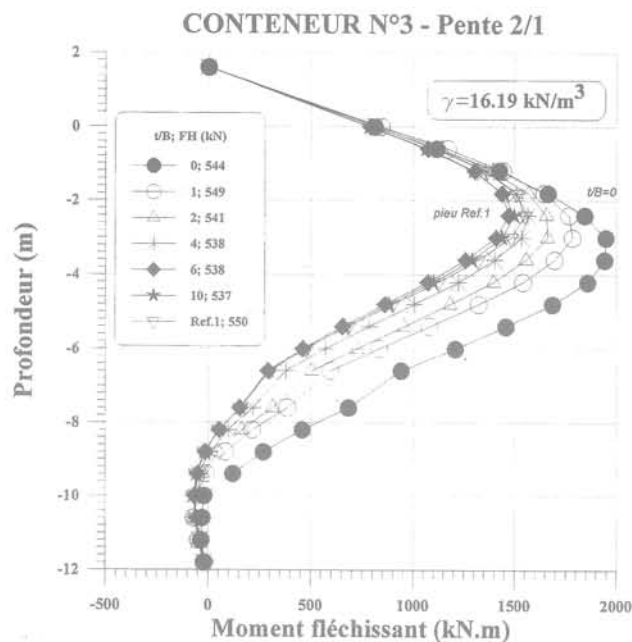


FIG. 6 Courbes des moments en fonction de la distance à la crête t/B (FH = 540 kN).
Moment curves as a function of the distance from the crest, t/B .

4.3

Courbes de réaction P-Y

La déformée du pieu et donc son déplacement horizontal $Y(z)$ sont obtenus par double intégration de la courbe des moments. Les deux constantes d'intégration sont fournies par les déplacements mesurés en tête (Fig. 7).

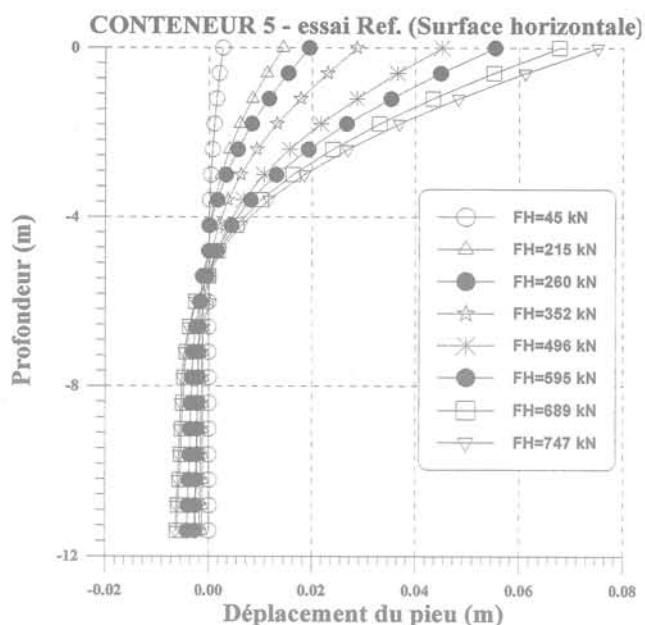


FIG. 7 Déformée du pieu $Y(z)$.
Horizontal displacement $Y(z)$.

Les courbes de pressions $P(z)$ sont déterminées par la méthode décrite au paragraphe 2. Les résultats obtenus ont montré que les pressions sont très faibles près de la surface (Fig. 8), bien que la condition $P = 0$ à la surface du sol n'ait pas été imposée (cf. § 2).

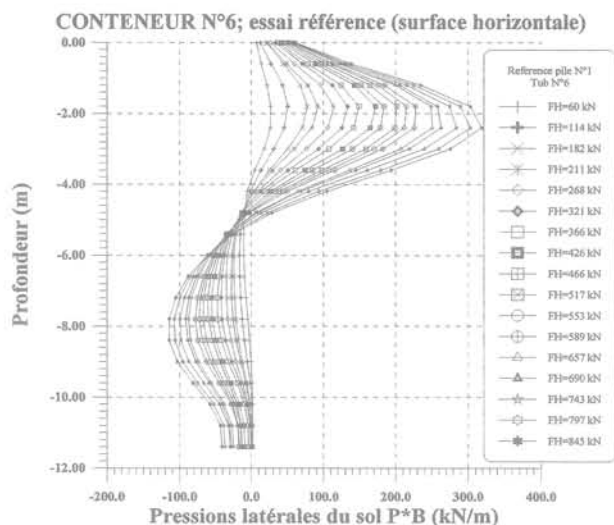


FIG. 8 Courbes des pressions $P*B(z)$.
Pressure curves $P*B(z)$.

Pour chaque profondeur, les courbes de réaction $P-Y$ sont déduites des précédentes et la figure 9 montre les courbes obtenues pour le même pieu ($t/B = 2$, conteneur 3). La résistance latérale du sol croît avec la profondeur jusqu'à environ 4B à 5B, à partir de laquelle les courbes $P-Y$ ne changent plus beaucoup. Cette valeur pourrait correspondre à l'apparition d'une profondeur critique et ce point fait l'objet d'une autre étude. On note aussi qu'à une profondeur comprise entre 5B et

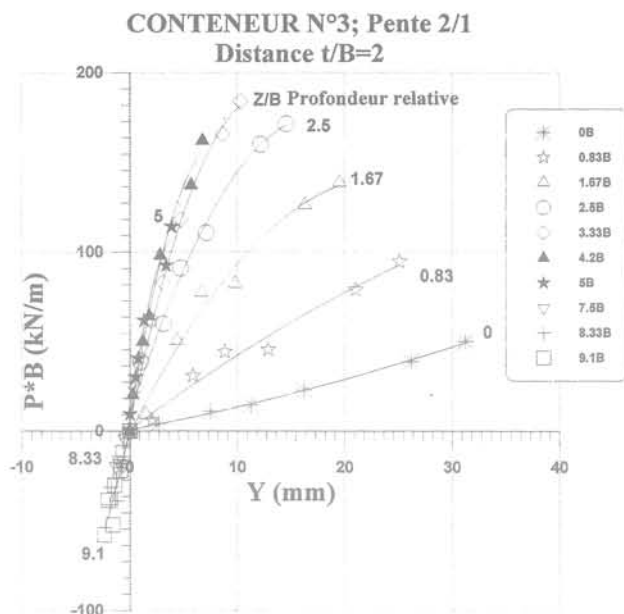


FIG. 9 Courbes P-Y à différentes profondeurs.
P-Y reaction curves at different depths.

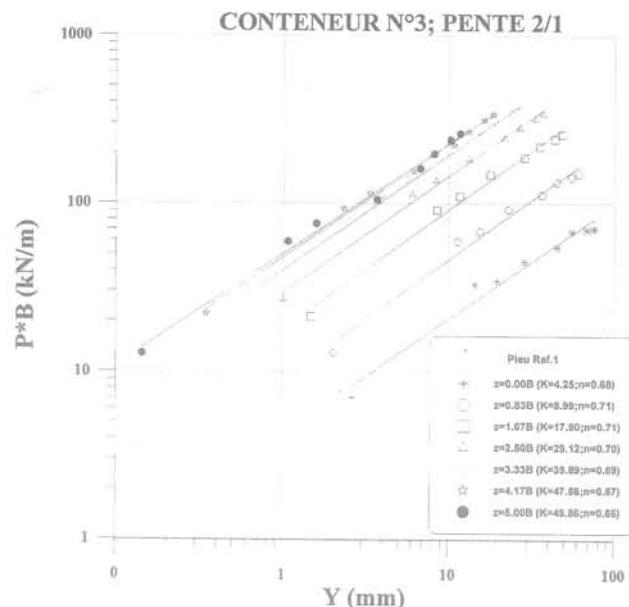


FIG. 10 Courbes P-Y expérimentales dans un repère bilogarithmique.
Experimental P-Y curves in logarithmic diagrams.

6B, les pressions et les déplacements changent de signe en même temps. La résistance latérale du sol reste cependant la même, puisque la pente des courbes P-Y est à peu près inchangée.

Les résultats de l'étude de l'interaction sol-pieu, définie par les courbes P-Y à différentes profondeurs, ont montré un comportement non linéaire avec une forme de type parabolique. Ces courbes indiquent également que la réaction du sol est faible en surface et qu'elle augmente en profondeur. Cependant, ces courbes ne présentent pas de palier net correspondant à la résistance ultime du sol sauf tout près de la surface où les déplacements sont les plus importants. Ce résultat était prévisible, puisque les pieux ont été testés sous des charges en tête conduisant à des déplacements maximaux de 0,3B (30 % du diamètre).

Nous avons recherché des expressions simples qui permettraient de mieux représenter les courbes P-Y obtenues expérimentalement. Dans ce but, plusieurs lissages basés sur des formes déjà préconisées par des chercheurs et différents règlements ont été testés (API, 1987 ; PHRI, 1980 ; Terashi *et al.*, 1989 ; Georgiadis *et al.*, 1991 ; Li Yan *et al.*, 1992). Le lissage qui paraît le mieux refléter l'allure des courbes expérimentales est la fonction parabolique. Nous avons donc tenté d'optimiser ces expressions déjà proposées par Terashi (1989) et Li Yan (1992) en traitant toutes les courbes P-Y obtenues dans notre étude. Ces courbes ont été tracées dans des diagrammes bilogarithmiques dont un exemple est représenté sur la figure 10. Elles conduisent à des relations de la forme :

$$P \cdot B = K \cdot (Y/B)^n \quad (2)$$

Deux paramètres apparaissent :

- K qui représente l'ordonnée à l'origine des courbes P-Y obtenues ;
- l'exposant n qui représente la pente de ces droites.

Pour les essais de référence sur sol horizontal, les courbes P-Y en diagramme bilogarithmique sont parallèles et l'exposant n varie peu autour de 0,7, quelle que soit la profondeur. Cette valeur est supérieure à celle

trouvée par Terashi ($n = 0,5$ indépendamment de la position du pieu par rapport au talus). Pour les autres positions du pieu par rapport à la crête du talus, les résultats ont montré que la valeur de n varie avec la profondeur, la position du pieu par rapport au talus et l'angle du talus. L'analyse des résultats a montré, cependant, que n reprend la valeur 0,7 dès que l'on s'éloigne du talus (environ $t/B = 5$), ou dès que l'on s'enfonce profondément dans le sol à partir d'environ 4B ou 5B.

Toutefois, les variations de n restent assez modérées et les données obtenues par les essais réalisés dans cette série d'essais, ne sont pas suffisantes pour dégager des lois de variation définitives. Par souci de simplification, nous avons décidé, à ce stade des recherches, d'effectuer tous les lissages avec l'exposant $n = 0,7$. Les régressions obtenues restent assez satisfaisantes même pour les pieux en crête de talus.

Par ailleurs, pour les couches superficielles du sol (profondeur inférieure à 5B), nous avons effectué une étude systématique des variations du coefficient K qui s'est révélé dépendre de la position du pieu par rapport au talus, de l'angle de talus, proportionnellement avec la profondeur et, d'une façon moindre, de la densité du massif (Fig. 11) :

$$K = \eta(t/B, I_D, \beta) \cdot \frac{Z}{B} \quad (3)$$

5

Effet de la proximité d'un talus sur la réponse du pieu

Les essais ont d'abord permis de quantifier l'influence de la présence d'un talus sur les déplacements en tête. La figure 12 donne, pour un talus à 2/1, le rapport entre le déplacement d'un pieu situé à une distance t/B et le déplacement en tête du pieu de référence soumis à la même charge.

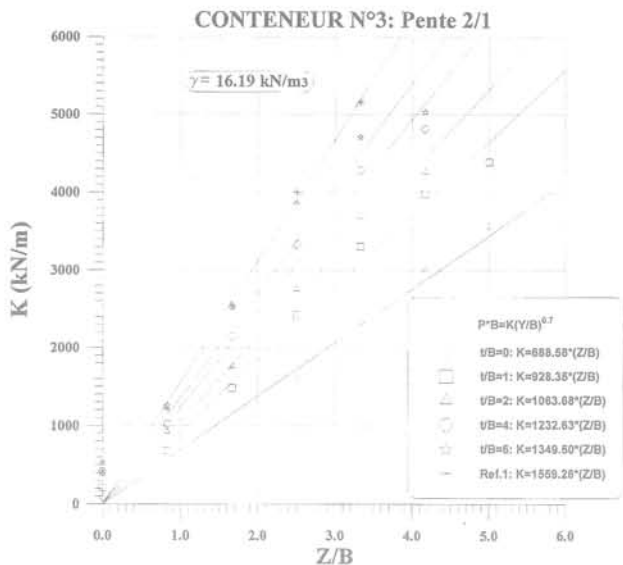


FIG. 11 Variation du coefficient de réaction K avec la profondeur.
Evolution of the reaction coefficient K with the depth.

On peut effectuer les observations suivantes :

- le rapport dépend très peu de la valeur de la charge appliquée ;
- le rapport atteint 1,6 pour un pieu situé en crête du talus ($t/B = 0$) à 2/1 et environ 2,4 pour un talus 3/2 ;
- l'effet de la pente ne se fait plus sentir pour des distances supérieures à 6B ou 7B dans le cas du talus à 2/1 et environ 10 et 12B pour un talus dressé à 3/2.

Le moment maximal dans le pieu est aussi affecté par la présence d'un talus, comme l'indiquent les résultats de la figure 12 qui correspond au cas d'un talus à

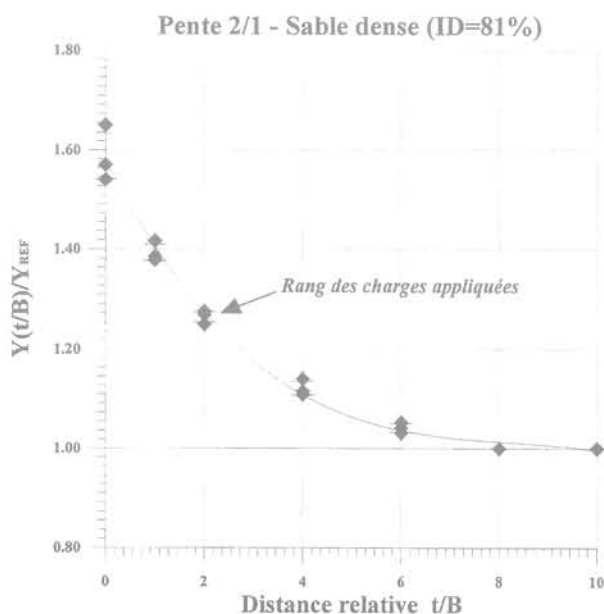


FIG. 12 Effet de la présence d'un talus sur les déplacements en tête.
Effect of a slope on displacements at the head.

2/1 et d'un sable dense. Le moment maximal est proportionnel à la charge appliquée en tête mais le coefficient de proportionnalité m dépend de la distance à la crête :

$$M_{\max} = m(t/B) \times FH \quad (4)$$

Tous les résultats obtenus sont regroupés sur la figure 13 montrant l'évolution du rapport $m(t/B)/m_{\text{Ref}}$ en fonction de la distance relative t/B (m_{Ref} représente la valeur du coefficient m dans le cas du massif horizontal de référence). Cette figure montre que la distance limite au-delà de laquelle le talus n'a plus d'influence sur le moment maximal dans le pieu est de 7B à 8B, pour les talus dressés à 2/1, et 10B à 12B, pour les talus à 3/2. Ces bornes semblent peu dépendre de la densité du massif. On note par ailleurs que, dans le cas le plus défavorable du pieu en crête de talus ($t/B = 0$), le moment maximal est augmenté, par rapport au cas de référence sur sol horizontal, d'environ 74 % pour des talus à 3/2 et 25 % pour des talus à 2/1.

L'objectif principal de ce travail concerne l'effet de la distance au talus sur les courbes de réaction. Puisque ces courbes dépendent beaucoup de la profondeur (Fig. 9), l'analyse a d'abord été effectuée à profondeur identique. Les courbes de réaction obtenues à la profondeur $1,67B$, sur des pieux implantés à différentes distances du talus, sont rassemblées sur la figure 14 (talus 2/1, conteneur 3). Malgré la difficulté déjà signalée de la détermination des courbes P-Y et leur grande sensibilité aux imprécisions pouvant affecter la mesure des moments, les résultats semblent très logiques. L'influence du talus est de plus en plus grande lorsque le pieu se rapproche de la crête. La présence du talus se fait sentir, à la fois sur le module de réaction (tangente à l'origine) et sur la pression limite (palier horizontal). Ainsi, le module tangent initial apparaît divisé par un facteur d'environ 3 pour le pieu en crête de talus ($t/B = 0$), par rapport au pieu de référence.

On note également que les courbes P-Y correspondant au cas $t/B = 6$ pour un talus à 2/1 (aux cas de $t/B =$

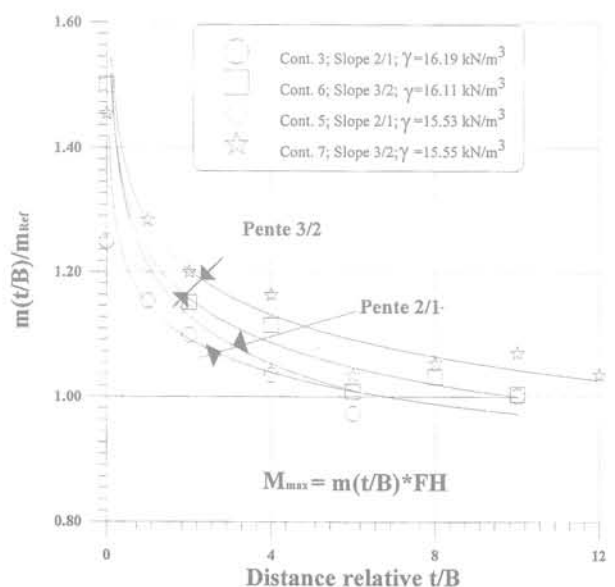


FIG. 13 Variation du rapport $m(t/B)/m_{\text{Ref}}$ avec la distance relative t/B .
Ratio $m(t/B)/m_{\text{Ref}}$ with the relative distance t/B .

CONTENEUR N° 3; Pente 2/1.

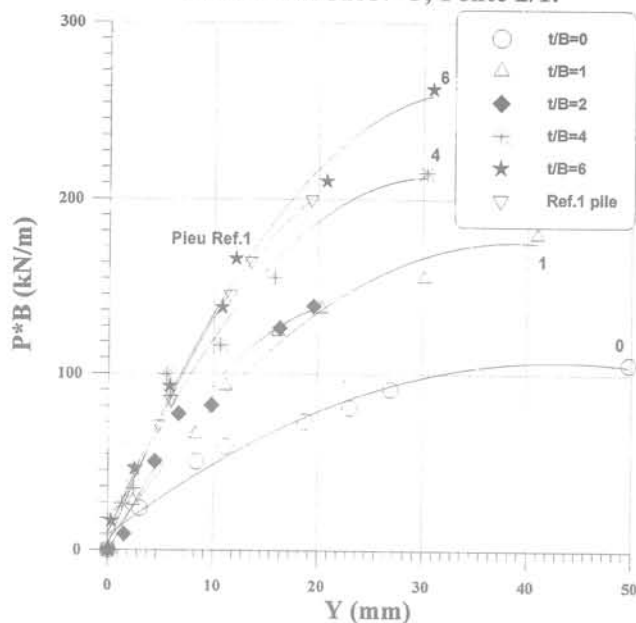


FIG. 14 Courbes de réactions à différentes distances des pieux du talus ($z/B=1,67$).
Reaction curves at different distance from the slope ($z/B = 1.67$).

DISTANCE A LA CRETE DU TALUS : $t/B=4$

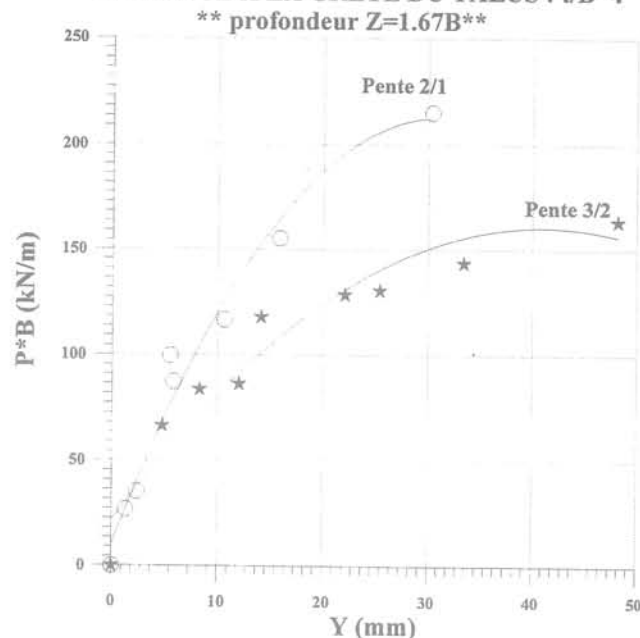


FIG. 15 Effet de l'angle du talus sur les courbes P-Y.
Effect of the slope on P-Y curves.

10 et 12 pour un talus à 3/2) sont pratiquement confondues avec celles du pieu de référence sur sol horizontal. Ceci explique et confirme les valeurs déjà observées des distances limites au-delà desquelles le talus n'a plus d'influence sur la réponse du pieu. Les mêmes constatations ont été également faites pour les autres profondeurs.

L'étude a montré aussi, qu'à distances à la crête identiques, l'angle du talus avait un effet non négligeable sur le comportement du pieu (Fig. 15), comme déjà observée sur le moment maximal.

L'objectif principal de ces travaux est la recherche de coefficients simples qui puissent être proposés pour la pratique courante. Ces coefficients de réduction $r(t/B)$ seraient appliqués aux courbes de réaction du sol horizontal de référence pour prendre en compte la proximité d'un talus, selon l'expression suivante :

$$P(t/B) = r(t/B) \cdot P_{Ref} \quad (5)$$

La présente étude a montré que ces coefficients r dépendent de t/B , mais aussi de l'angle du talus. Il semble par contre à peu près indépendants de la densité du massif et donc de ses caractéristiques mécaniques. Un autre résultat très intéressant obtenu lors de l'étude est illustré sur l'exemple de la figure 16. En effet, en reprenant l'expression mathématique des courbes P-Y proposée précédemment et tenant compte des valeurs de K obtenues pour les différentes positions des pieux par rapport à la crête du talus, on calcule la valeur du coefficient r en faisant le rapport $P(t/B)$ et P_{Ref} .

Les résultats de ces calculs ont montré l'influence très apparente de la distance relative t/B sur le coefficient de réduction. En revanche, l'influence de la densité du massif est peu perceptible, avec un écart maximal engendré par la variation de la densité sur le coefficient r , inférieur à 10 %. Une influence très remar-

quée également de la pente du talus représentée par deux droites distinctes. Les limites au-delà desquelles le talus n'a plus d'influence sont à nouveau mises en évidence ($r=1$ pour $t/B = 8$ si $\tan \beta = 1/2$ et $t/B = 12$ si $\tan \beta = 2/3$). Ces résultats ont montré également qu'entre la crête de talus ($t/B = 0$) et la distance limite au-delà de laquelle le talus n'a plus d'influence, la variation de r avec t/B est linéaire.

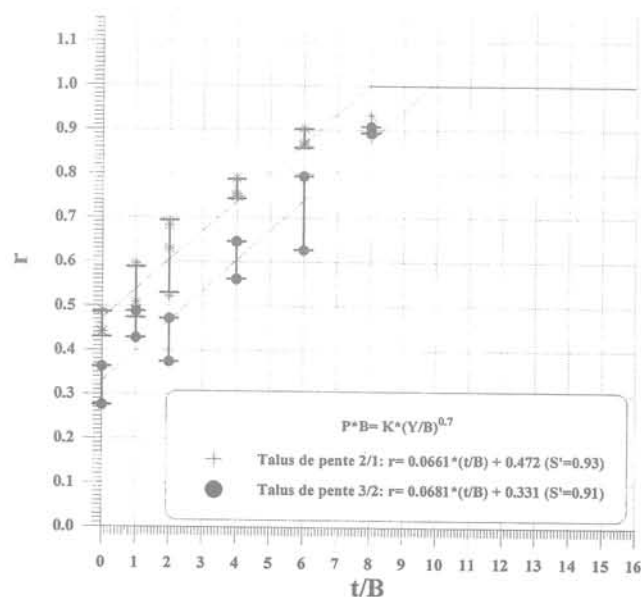


FIG. 16 Variation du coefficient r avec la distance relative t/B et l'angle du talus.
Coefficient r versus relative distance t/B and slope angle
 $P(t/B) = r(t/B) \times P_{Ref}$

En conclusion de cette étude de l'effet du talus sur les courbes P-Y, nous suggérons donc pour passer des courbes P-Y du pieu de référence à celles des pieux près du talus, de multiplier les pressions P par le coefficient de réduction ci-dessous et dont la représentation est donnée sur la figure 17.

$$r = \frac{17 - 15 \tan \beta}{100} \cdot \frac{t}{B} + \frac{1 - \tan \beta}{2} \text{ pour } t \leq t_{\text{lim}} \quad (6)$$

$$r = 1 \text{ pour } t > t_{\text{lim}}$$

avec $t_{\text{lim}} = 4B \cdot (6 \tan \beta - 1)$

La validation de ce coefficient est réalisée en comparant les courbes expérimentales (profils des déplacements et des moments) obtenues lors des essais avec les courbes correspondantes données par calcul de ces pieux à partir des courbes P-Y du pieu de référence affectées du coefficient r ci-dessus et introduit dans le logiciel PILATE-LCPC. La figure 18 montre un exemple des résultats obtenus lors de la validation de ce coefficient r ajusté pour le cas $t/B = 2$ où l'effet du talus est assez important. On y compare les courbes expérimentales (profils des déplacements et des moments) obtenues lors des essais sur les pieux $t/B = 2$ avec les courbes correspondantes données par calcul des ces pieux à partir des courbes P-Y du pieu de référence affectées du coefficient r ci-dessus. L'écart reste toujours inférieur à 10 %, ce qui valide le coefficient proposé.

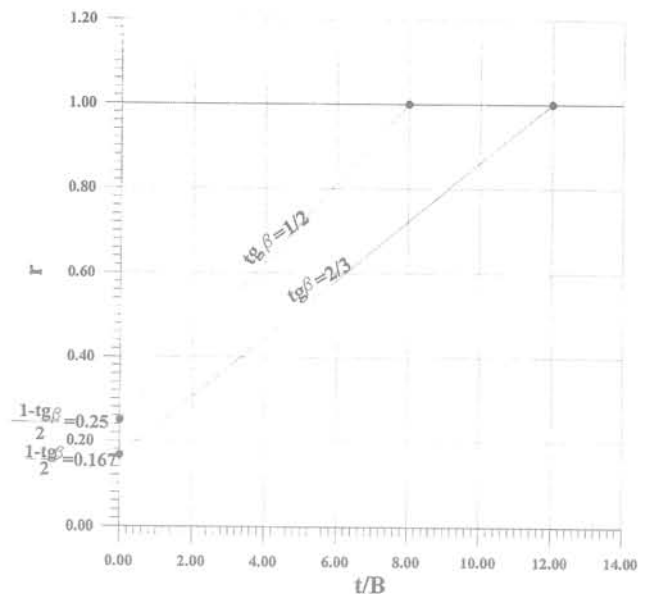


FIG. 17 Variation du coefficient r ajusté, avec la distance relative t/B et l'angle du talus. Ajusted coefficient r versus relative distance t/B and slope angle. $P(t/B) = r(t) \times P_{\text{Ref}}$

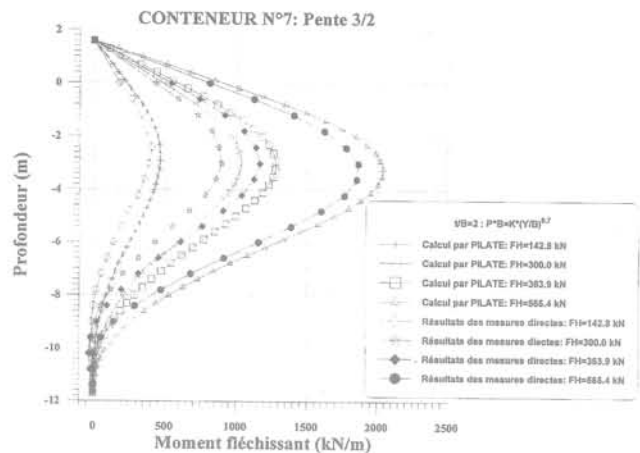
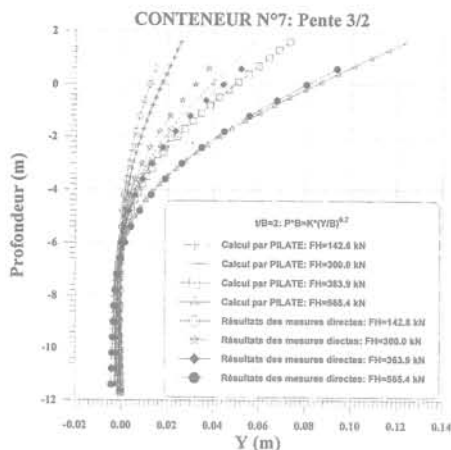


FIG. 18 Validation des courbes P-Y pour les pieux en crête du talus ($t/B = 2$). Validation of P-Y curves for the piles at the crest of the slope ($t/B = 2$).

6

Conclusion

Le programme concerne l'étude expérimentale du comportement de pieux chargés latéralement en tête. La méthode permettant la détermination des courbes de réaction avait été développée lors d'études antérieures. Elle est appliquée ici à l'étude de l'effet d'un talus sur les courbes, dans le cas d'un sol sableux. Les résultats montrent que la distance limite au-delà de laquelle le talus n'a plus d'influence est d'environ $8B$ pour un talus à $2/1$ et $12B$ pour un talus à $3/2$. Ces valeurs ne dépendent pratiquement pas de la densité du massif.

Pour des distances inférieures, les déplacements du pieu et les efforts internes croissent lorsque le pieu se

rapproche de la crête. Par rapport au cas du sol horizontal et pour une même charge, le déplacement en tête d'un pieu en crête de talus dressé à $2/1$ ($t/B = 0$) est multiplié par 1,6 et le moment maximal par 1,25. Ces valeurs atteignent respectivement 2,4 et 1,74 pour un talus dressé à $3/2$ ($t/B = 0$).

L'étude a surtout permis de déterminer directement l'effet du talus sur les courbes P-Y et de définir des coefficients de réduction à appliquer aux courbes de réaction sur sol horizontal. Ces coefficients $r(t/B)$ ne semblent dépendre que de la distance à la crête t/B et de sa pente et d'une façon moindre de la densité du massif. Enfin, des études complémentaires pourraient porter sur les massifs dotés de cohésion et sur les grands déplacements.

- A.P.I. – Recommended practice for planing, designing and construction of fixed off-shore platforms. A.P.I. – RP2A, American Petroleum Institute, Washington D.C., 1987, 17th ed.
- Bakir N.E., Garnier J., Canepa Y. – Shallow footings loading tests: Effect of testing procedures. *Centrifuge 94*, Singapore, p. 553-558, 1994.
- Bouafia A. – Modélisation des pieux chargés latéralement en centrifugeuse. Thèse de doctorat, ENSM de Nantes, 267 p, 1990.
- Bouafia A., Garnier J. – Experimental study of P-Y curves for piles in sand. *Centrifuge 91*, Boulder, Balkema, p. 261-268, 1991.
- Deny E. – SLIVALICS: Programme de lissage par spline quintique, calcul du paramètre d'ajustement par une méthode de validation croisée (notice d'utilisation). Rapport interne LCPC, FAER 1.05.10.4, 1985, 80 p.
- Garnier J., Canepa Y., Corté J.-F., Bakir N.E. – Study of bearing capacity of footings near slopes, XIII ICSMFE, New-Delhi, Balkema, p. 705-708, 1994.
- Georgiadis M., Anagnostopoulos C., Saffelkou S. – Centrifugal testing of laterally loaded piles in sand. *Canadian Geotechnical Journal* 29, p. 208-216, 1992.
- Mezazigh S. Étude expérimentale de pieux chargés latéralement: proximité d'un talus et effet de groupe. Thèse de doctorat, École Centrale de Nantes, 217 p, 1995.
- Terashi M., Kitazume M., Kawabata K. – Centrifuge modelling of a laterally loaded pile. Proc. of twelfth International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering (ICSMFE), Rio de Janeiro, vol. 2, p. 991-994, 1989.
- Terashi M., Kitazume M., Manuyama A., Yamamoto Y. – Lateral resistance of a long pile in or near the slope. *Centrifuge 91*, Boulder, Balkema, p. 245-252, 1991.
- Romagny J.C. – PILATE programme de calcul d'un pieu isolé soumis à des efforts de flexion en tête et à des poussées latérales de sol. Notice d'utilisation version janvier 1985 en Fortran 77 avec format libre, LCPC, 55 p, 1985.
- Yan L., Byrne P.M. – Lateral response to monotonic pile head loading. *Canadian Geotechnical Journal*, vol. 29, p. 955-970, 1992.