

INTERNATIONAL SOCIETY FOR SOIL MECHANICS AND GEOTECHNICAL ENGINEERING



This paper was downloaded from the Online Library of the International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (ISSMGE). The library is available here:

<https://www.issmge.org/publications/online-library>

This is an open-access database that archives thousands of papers published under the Auspices of the ISSMGE and maintained by the Innovation and Development Committee of ISSMGE.

Calcul non-linéaire des pieux sous charge horizontale

Non-linear analysis of laterally loaded piles

H. Ejjaouani – *Laboratoire Public d'Essais et d'Études (LPEE), Casablanca, Maroc*

J.-P. Magnan – *Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC), Paris, France*

V. Shakhirev – *Laboratoire Public d'Essais et d'Études (LPEE), Casablanca, Maroc*

RÉSUMÉ: Cette communication traite du problème du comportement des pieux de différentes longueurs soumis à des charges horizontales, quand on peut représenter le pieu, suivant son encastrement, par un pieu absolument rigide, un pieu de rigidité finie ou un pieu souple (pieu de longueur infinie). Les principales formules pour le calcul des pieux sous charges horizontales sont données ainsi que celles correspondant à l'application simultanée de charges horizontales et de moments. Ces formules sont fondées sur l'hypothèse de Winkler et tiennent compte de la non linéarité des relations entre les charges horizontales et les déplacements horizontaux du pieu qu'elles provoquent.

ABSTRACT: This paper is devoted to the behaviour of piles of various lengths, submitted to horizontal loads. Depending on their embedment, such piles can be described as rigid piles, piles with finite rigidity or flexible piles (piles of infinite length). The main formulae for the design of piles submitted to horizontal loads are given, as well as those related to loading conditions combining moments and horizontal loads. These formulae are based on Winkler's hypothesis and include the effects of non linearity of the relations between the horizontal loads and the horizontal displacements of the pile.

1 INTRODUCTION

L'analyse du comportement des pieux sous charges horizontales (Shakhirev et al., 1997) a conduit les auteurs à proposer d'utiliser un modèle non linéaire pour décrire l'interaction du sol et du pieu (Shakhirev & Ejjaouani, 1995 ; Ejjaouani & Shakhirev, 1995 ; Magnan et al., 1999). Le coefficient de réaction du sol $K(z,u)$ (exprimé en kN/m^3) varie non linéairement avec la profondeur z et dépend, à travers le déplacement horizontal du pieu au niveau de la surface du sol u_0 , de l'évolution des déformations plastiques du sol autour du pieu.

À leur tour, les déformations plastiques du sol dépendent du comportement du pieu (infiniment rigide, rigidité finie, souple), déterminé par le rapport des caractéristiques de déformabilité du sol et du pieu, ainsi que de l'encastrement du pieu dans le sol (Shakhirev & Ejjaouani, 1996).

Les bases du modèle décrivant l'interaction entre le sol et le pieu se trouvent dans les études expérimentales qui ont été publiées par Shakhirev & Ejjaouani (1995), Ejjaouani & Shakhirev (1995) et Magnan et al. (1999).

2 MODULE DE RÉACTION DU SOL

L'analyse des modèles de calcul existants pour les massifs de sol en contact avec des structures allongées et étroites comme les pieux montre que l'hypothèse la plus acceptable pour les applications est celle des déformations locales (Winkler). Ce modèle des déformations locales permet de tenir compte des discontinuités du sol de fondation au niveau de la surface de contact.

Les études expérimentales effectuées sur différents types de pieux placés dans différents types de sols ont montré que la relation entre la charge horizontale et le déplacement est non linéaire.

Lorsqu'une charge horizontale est appliquée à un pieu, des déformations plastiques apparaissent dans le sol quand les déplacements sont encore petits et, lorsque les déplacements horizontaux augmentent, ces déformations plastiques s'étendent latéralement vers le bas et provoquent la rupture du sol autour du pieu.

Cette évolution se reflète dans la loi de variation de $K(z,u)$ et dans la forme de la relation entre la charge et le déplacement ho-

rizontal. Ainsi, le coefficient de réaction du sol dépend non seulement de la profondeur mais aussi de l'évolution des déformations plastiques du sol, qui est liée à son tour à la charge horizontale et aux déplacements horizontaux qu'elle entraîne.

Nous proposons d'utiliser un modèle du sol de fondation à deux paramètres, de la forme :

$$K(z,u) = K_D \left(\frac{z}{D} \right)^{v(u_0)} \quad (1)$$

avec :

K_D - valeur du module de réaction à la profondeur $z=D$ (pointe du pieu),

D - longueur du pieu dans le sol,

$v(u_0)$ - paramètre traduisant l'influence de l'évolution des déformations plastiques du sol entourant le pieu et dépendant lui-même de u_0 .

3 CALCUL DES PIEUX SOUS CHARGE HORIZONTALE

Le calcul des pieux sous charges horizontales est l'un des problèmes les plus complexes de la mécanique des sols. Faut de pouvoir établir des solutions générales adaptées au fonctionnement de pieux d'encastements différents ayant, pour cette raison, des réponses différentes aux charges horizontales, les pieux ont été divisés en pieux infiniment rigides, qui subissent une rotation rigide autour d'un point neutre et dont on peut négliger la flexion, en pieux de rigidité finie, qui subissent simultanément une rotation et une flexion, et en pieux souples (ou de longueur finie) qui subissent seulement une flexion.

Le calcul des pieux sous charge horizontale s'effectue avec les solutions développées pour ces trois cas particuliers.

L'équation utilisée pour la description du comportement du pieu sous l'effet d'une force horizontale doit être neutre, sans propriétés prédéfinies (ce n'est pas le cas, par exemple, des fonctions trigonométriques, qui imposent l'amortissement périodique des déplacements horizontaux $u(z)$) dont on définira les paramètres en imposant les conditions aux limites. Parmi les fonctions disponibles, nous avons choisi la plus simple, un poly-

nom adimensionnel du sixième degré :

$$u(z) = a_0 + a_1 \left(\frac{z}{D}\right) + a_2 \left(\frac{z}{D}\right)^2 + a_3 \left(\frac{z}{D}\right)^3 + a_4 \left(\frac{z}{D}\right)^4 + a_5 \left(\frac{z}{D}\right)^5 + a_6 \left(\frac{z}{D}\right)^6 \quad (2)$$

Le degré de ce polynôme a été fixé d'après le nombre des conditions aux limites du problème et la forme adimensionnelle a été retenue pour que les coefficients a_i aient tous la même dimension.

En utilisant l'expression (2), les problèmes partiels suivants ont été résolus :

- Comportement d'un pieu infiniment rigide (Shakhirev et al., 1997 ; Ejjaouani & Shakhirev, 1996), en utilisant les deux premiers termes de l'équation (2) :

$$u(z) = a_0 + a_1 \left(\frac{z}{D}\right) \quad (3)$$

- Comportement d'un pieu souple (ou de longueur infinie) (Ejjaouani et al., 1997), en utilisant cinq termes de (2) :

$$u(z) = a_0 + a_1 \left(\frac{z}{D}\right) + a_2 \left(\frac{z}{D}\right)^2 + a_3 \left(\frac{z}{D}\right)^3 + a_4 \left(\frac{z}{D}\right)^4 \quad (4)$$

- Comportement d'un pieu de rigidité finie, en utilisant tous les termes de l'expression (2).

Pour l'analyse de problèmes aussi variés, il importe d'adopter une approche identique parce que le résultat quantitatif dépend souvent de la méthode utilisée pour la résolution.

La figure 1 présente le schéma de calcul d'un pieu de rigidité finie qui, sous l'action de la charge horizontale H et du moment M appliqués à la tête du pieu, à la hauteur L au-dessus de la surface du sol, pivote et fléchit dans le sol par rapport à un point neutre se trouvant à une profondeur D_0 .

La rotation du pieu dans le sol et sa flexion simultanée provoquent une réaction du sol $q(z) = bK_D(z, u) \cdot u(z)$ qui, compte tenu de (1), s'écrit sous la forme :

$$q(z) = bK_D \left(\frac{z}{D}\right)^{v(u_0)} u(z) \quad (5)$$

avec b – largeur du pieu.

Nous trouvons les coefficients constants inconnus a_i de l'expression (2) en utilisant les conditions aux limites.

En dérivant quatre fois l'expression (2), on obtient la pression du pieu sur le sol et, en égalant l'expression (5) avec la pression de réaction du sol $q(z)$, on obtient :

$$u^{IV}(z) = 24a_4 \frac{1}{D^4} + 120a_5 \frac{z}{D^5} + 360a_6 \frac{z^2}{D^6} = -\frac{K_D b}{EI} \left(\frac{z}{D}\right)^v u(z) \quad (6)$$

Nous obligeons la pression du pieu sur le sol à correspondre à

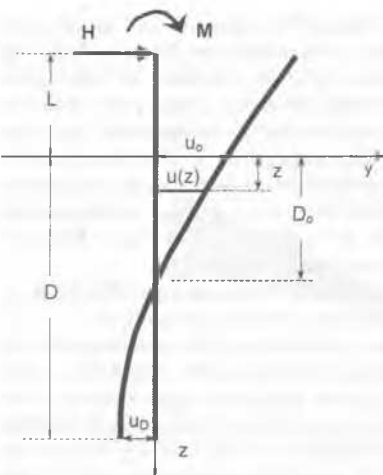


Figure 1 Schéma de calcul pour un pieu de longueur finie

la pression de réaction du sol au minimum en trois points importants, c'est à dire :

- pour $z = 0$; $q(z=0) = 0$; $a_4 = 0$;
- pour $z = D_0$; $q(z=D_0) = 0$;

$$a_5 = -\frac{bK_D D^5 u_D}{360 EI (D - D_0)} \quad (8)$$

- pour $z = D$; $u(z) = -u_D$; $q(z=D) = q(D)$;

$$a_6 = \frac{bK_D D^5 u_D}{360 EI (D - D_0)} \quad (9)$$

La dérivée troisième de l'expression (2) par rapport à z donne l'expression de l'effort tranchant $Q(z)$ dans une section quelconque du pieu et la dérivée seconde le moment $M(z)$:

$$u'''(z) = 6a_3 \frac{1}{D^3} + 60a_5 \frac{z^2}{D^5} + 120a_6 \frac{z^3}{D^6} = \frac{Q(z)}{EI} \quad (10)$$

$$u''(z) = 2a_2 \frac{1}{D^2} + 6a_3 \frac{z}{D^3} + 20a_5 \frac{z^2}{D^5} + 30a_6 \frac{z^3}{D^6} = \frac{M(z)}{EI} \quad (11)$$

Si l'on admet que l'effort tranchant et le moment fléchissant sont nuls à la base du pieu, les équations (10) et (11) donnent :

- $Q(z=D) = 0$ d'où $a_3 + 10a_5 + 20a_6 = 0$,

$$a_3 = \frac{bK_D D^4 u_D}{36 EI (D - D_0)} (3D_0 - 2D) \quad (12)$$

- $M(z=D) = 0$ d'où $a_2 + 3a_3 + 10a_5 + 15a_6 = 0$

$$a_2 = -\frac{bK_D D^4 u_D}{24 EI (D - D_0)} (4D_0 - 3D) \quad (13)$$

Pour décrire le comportement de l'extrémité inférieure du pieu, nous allons utiliser la dérivée première de (2), qui donne l'inclinaison du pieu $\theta(z)$. Pour $z=D$, cette expression s'écrit :

$$u'(z=D) = a_1 + 2a_2 + 3a_3 + 5a_5 + 6a_6 = \theta_{(D)} D \quad \text{d'où}$$

$$a_1 = \theta_D D + \frac{bK_D D^4 u_D}{120 EI (D - D_0)} (15D_0 - 12D) \quad (14)$$

Le coefficient a_0 peut être obtenu en écrivant que, pour $z=0$, le déplacement horizontal du pieu est égal à $u=u_0$, d'où :

$$a_0 = u_0 \quad (15)$$

En reportant dans (2) les a_i déterminés ci-dessus, on obtient :

$$u(z) = u_0 + \left[\theta_D D + \frac{bK_D D^4 u_D}{120 EI (D - D_0)} (15D_0 - 12D) \right] \left(\frac{z}{D}\right) - \frac{bK_D D^4 u_D}{24 EI (D - D_0)} (4D_0 - 3D) \left(\frac{z}{D}\right)^2 + \frac{bK_D D^4 u_D}{36 EI (D - D_0)} \times (3D_0 - 2D) \left(\frac{z}{D}\right)^3 - \frac{bK_D D^4 u_D}{120 EI (D - D_0)} \left(\frac{z}{D}\right)^5 + \frac{bK_D D^5 u_D}{360 EI (D - D_0)} \left(\frac{z}{D}\right)^6 \quad (16)$$

Cette expression (16) contient deux inconnues u_D et θ_D . L'inclinaison θ_D du pieu à son extrémité inférieure peut être déduite du non déplacement du centre de rotation du pieu ($z=D_0$).

$$\theta_D \cdot D = -\frac{u_0 D}{D_0} - \frac{bK_D D^5 u_D}{360 EI (D - D_0)} \times \left[-36 + 90 \frac{D_0}{D} - 80 \left(\frac{D_0}{D}\right)^2 + 30 \left(\frac{D_0}{D}\right)^3 - 2 \left(\frac{D_0}{D}\right)^5 \right] \quad (17)$$

L'expression (14) de a_1 devient alors :

$$a_1 = -\frac{u_0 D}{D_0} - \frac{bK_D D^5 u_D}{360 EI (D - D_0)} \left[45 \frac{D_0}{D} - 80 \left(\frac{D_0}{D}\right)^2 + 30 \left(\frac{D_0}{D}\right)^3 - 2 \left(\frac{D_0}{D}\right)^5 \right] \quad (18)$$

Le déplacement horizontal de l'extrémité inférieure du pieu u_D peut être déduit de (16), en écrivant que $u(z=D) = -u_D$, soit :

$$u_D = \frac{u_0(D-D_0)}{D_0 \left[1 + \frac{bK_D D^5}{360EI(D-D_0)} \left[26 - 78 \frac{D_0}{D} + 80 \left(\frac{D_0}{D} \right)^2 - 30 \left(\frac{D_0}{D} \right)^3 + 2 \left(\frac{D_0}{D} \right)^5 \right] \right]}$$

Si l'on connaît u_D , l'équation (16) devient :

$$u(z) = u_0 - \left\{ \frac{u_0 D}{D_0} + \frac{bK_D D^5 u_D}{360EI(D-D_0)} \times \left[45 \frac{D_0}{D} - 80 \left(\frac{D_0}{D} \right)^2 + 30 \left(\frac{D_0}{D} \right)^3 - 2 \left(\frac{D_0}{D} \right)^5 \right] \right\} \left(\frac{z}{D} \right) - \frac{bK_D D^4 u_D}{24EI(D-D_0)} (4D_0 - 3D) \left(\frac{z}{D} \right)^2 + \frac{bK_D D^4 u_D}{36EI(D-D_0)} (3D_0 - 2D) \left(\frac{z}{D} \right)^3 - \dots - \frac{bK_D D^4 D_0 u_D}{120EI(D-D_0)} \left(\frac{z}{D} \right)^5 + \frac{bK_D D^5 u_D}{360EI(D-D_0)} \left(\frac{z}{D} \right)^6 \quad (19)$$

La force horizontale que peut reprendre un pieu de longueur finie peut être déduite de l'équation d'équilibre :

$$H = \int_0^D q(z) dz = b \int_0^D K_D \left(\frac{z}{D} \right)^v u(z) dz \quad (20)$$

On peut déduire la profondeur D_0 du centre de rotation du pieu de l'équilibre des moments :

$$M(z) = H(L+z) - \int_0^z q(t)(z-t) dt + M \quad (21)$$

dans laquelle t est une variable auxiliaire.

Après intégration et transformation en tenant compte de (21), on obtient pour $z=D$ l'équation qui permet de déterminer D_0 :

$$\frac{(L+D)(v+2)-D}{D(v+1)(v+2)} - \frac{(L+D)(v+3)-D}{(v+2)(v+3)D_0} - \frac{F_e D(D-D_0)F_v}{D_0(D-D_0+DF_e F_{\alpha 1})} + \frac{M_0}{bK_D D^2 u_D} = 0 \quad (22)$$

L'expression (20) donnant la force horizontale H peut être écrite sous la forme plus compacte :

$$H = bK_D D u_0 \left[\frac{1}{v+1} - \frac{D}{(v+2)D_0} - \frac{F_e F_{\alpha 2} (D-D_0)D}{D_0(D-D_0+DF_e F_{\alpha 1})} \right] \quad (23)$$

avec $F_e = \frac{bK_D D^4}{360EI}$

indice de souplesse du système « pieu-sol », dépendant des caractéristiques physiques du pieu et du sol ;

$$F_{\alpha 1} = 26 - 33 \frac{D_0}{D} - F_{\alpha 3}, \quad F_{\alpha 2} = F_1 + F_2 - F_3 + F_4 - F_5$$

$$F_{\alpha 3} = 45 \frac{D_0}{D} - 80 \left(\frac{D_0}{D} \right)^2 + 30 \left(\frac{D_0}{D} \right)^3 - 2 \left(\frac{D_0}{D} \right)^5$$

$$F_1 = \frac{F_{\alpha 3}}{v+2}, \quad F_2 = \frac{60D_0 - 45D}{(v+3)D}, \quad F_3 = \frac{30D_0 - 20D}{(v+4)D}$$

$$F_4 = \frac{3D_0}{(v+6)D}, \quad F_5 = \frac{1}{v+7}$$

$$F_v = F_{v1} + F_{v2} - F_{v3} + F_{v4} - F_{v5}$$

$$F_{v1} = \frac{F_1[(L+D)(v+3)-D]}{D(v+3)}, \quad F_{v2} = \frac{F_2[(L+D)(v+4)-D]}{D(v+4)}$$

$$F_{v3} = \frac{F_3[(L+D)(v+5)-D]}{D(v+5)}, \quad F_{v4} = \frac{F_4[(L+D)(v+7)-D]}{D(v+7)}$$

$$F_{v5} = \frac{F_5[(L+D)(v+8)-D]}{D(v+8)}$$

L'effort tranchant $Q(z)$ et le moment fléchissant $M(z)$ à la profondeur z ont pour expressions :

$$Q(z) = H - bK_D D u_0 \left\{ \frac{1}{v+1} \left(\frac{z}{D} \right)^{v+1} - \frac{D}{(v+2)D_0} \left(\frac{z}{D} \right)^{v+2} - \dots - \frac{F_e D(D-D_0)}{D_0(D-D_0+DF_e F_{\alpha 1})} \left[F_1 \left(\frac{z}{D} \right)^{v+2} + F_2 \left(\frac{z}{D} \right)^{v+3} - \dots - F_3 \left(\frac{z}{D} \right)^{v+4} + F_4 \left(\frac{z}{D} \right)^{v+6} - F_5 \left(\frac{z}{D} \right)^{v+7} \right] \right\} \quad (24)$$

$$M(z) = M + H(L+z) - bK_D D^2 u_0 \left\{ \frac{1}{(v+1)(v+2)} \left(\frac{z}{D} \right)^{v+2} - \frac{D}{(v+2)(v+3)D_0} \left(\frac{z}{D} \right)^{v+3} - \frac{F_e D(D-D_0)}{D_0(D-D_0+DF_e F_{\alpha 1})} \times \left[\frac{F_1}{v+3} \left(\frac{z}{D} \right)^{v+3} + \frac{F_2}{v+4} \left(\frac{z}{D} \right)^{v+4} - \frac{F_3}{v+5} \left(\frac{z}{D} \right)^{v+5} + \frac{F_4}{v+7} \left(\frac{z}{D} \right)^{v+7} - \frac{F_5}{v+8} \left(\frac{z}{D} \right)^{v+8} \right] \right\} \quad (25)$$

Les formules de calcul (23) à (25) couvrent le cas particulier du pieu infiniment rigide (dans ce cas, EI tend vers l'infini, $F_e=0$ et l'on retrouve la solution de Shakhirev et al., 1997). Le passage du pieu de rigidité finie au pieu infiniment rigide et au pieu de longueur infinie se déroule sans discontinuité et correspond aux observations faites dans les essais.

L'analyse et le traitement d'un grand nombre de données expérimentales, obtenues sur des pieux de longueurs diverses et dans des sols variés, a permis d'établir un tableau de valeurs du coefficient de réaction K_D et du paramètre v qui traduit le développement des déformations plastiques du sol autour du pieu. Lorsque l'encastrement du pieu augmente, c'est à dire lorsque sa flexibilité augmente, le coefficient de réaction du sol K_D diminue par rapport à sa valeur pour les pieux courts, ce qui est conforme aux observations d'autres auteurs (Shakhirev et al., 1997).

4 COMPARAISON DES CALCULS ET DES ESSAIS EFFECTUÉS SUR LE SITE EXPÉRIMENTAL

Nous avons comparé les résultats du calcul par les formules précédentes avec les données expérimentales provenant d'essais sur des pieux battus en béton armé de section 30cm x 30cm, encastres de $D=2m$; $D=4m$; $D=6m$ et $D=12m$. La charge horizontale était appliquée à une hauteur de $L=1m$ au dessus de la surface du sol. Les essais de pieux sous charge horizontale ont été exécutés par paire, installés face à face, au moyen de tirants et d'un vérin (Shakhirev & Ejjaouani, 1995 ; Magnan et al., 1999).

Le sol du site expérimental est une argile limoneuse marron-clair de consistance moyenne ($\gamma = 19,5 \text{ kN/m}^3$; $\gamma_d = 16,3 \text{ kN/m}^3$; $w = 20\%$; $e = 0,67$; $I_L = 0,4$).

La figure 2 montre la relation entre la charge horizontale H et le déplacement horizontal u_0 qu'elle provoque, pour différentes

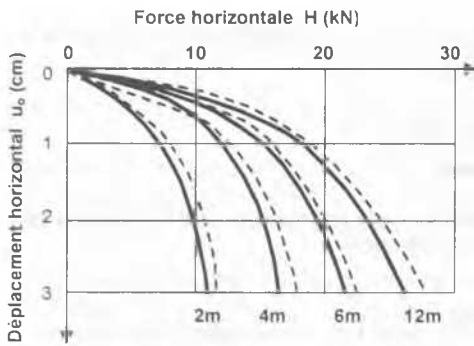


Figure 2. Comparaison des résultats du calcul (lignes continues) et des données expérimentales (lignes pointillées)

profondeurs d'encastrement des pieux dans le sol. Les calculs correspondent correctement aux essais pour tous les pieux.

La figure 3 présente les courbes calculées des déplacements horizontaux u , des réactions du sol q , des moments fléchissants M et des efforts tranchants Q en fonction de la profondeur z .

Le comportement calculé du pieu encastré de $D=2m$ correspond au cas du pieu court rigide, dont on peut négliger la flexion (Shakhirev et al., 1997 ; Shakhirev & Ejjaouani, 1995 ; Magnan et al., 1999).

Pour un encastrement plus important ($D=4m$), le pieu passe dans le domaine des pieux de rigidité finie (rotation-flexion).

Pour l'encastrement $D=6m$, l'influence de la flexion devient prédominante et les valeurs de u et q à l'extrémité inférieure du

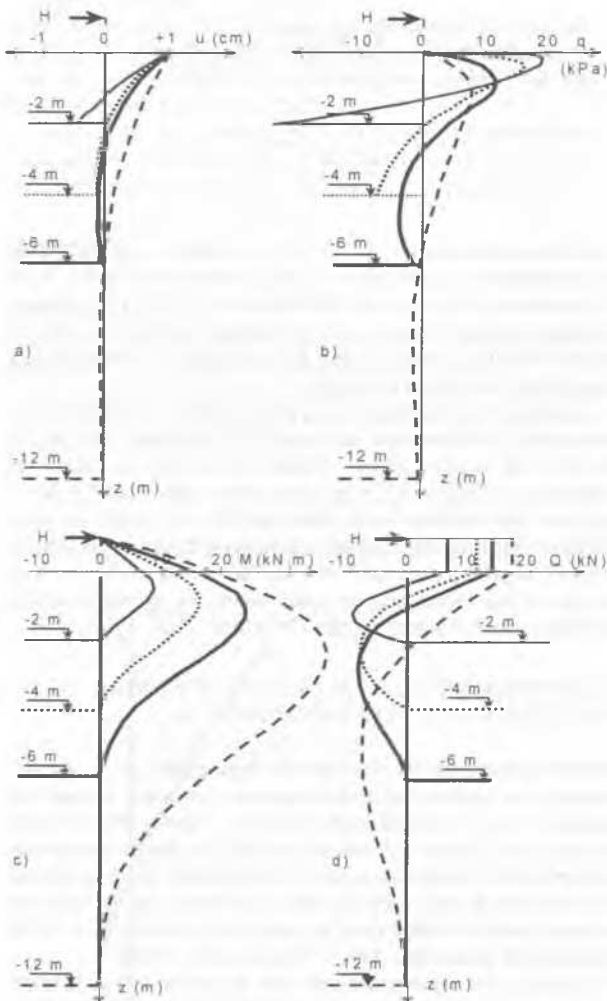


Figure 3. Courbes de calcul des pieux en fonction de la profondeur (pieux encastrés de $D=2m$, $4m$, $6m$ et $12m$) (a) déplacement u ; b) réaction du sol q ; c) moment fléchissant M ; d) effort tranchant Q .

pieu tendent vers zéro. Pour l'encastrement $D=12m$, seule la flexion existe (cas du pieu souple ou de longueur infinie). Si l'encastrement du pieu croît encore, la charge horizontale supportable du pieu n'augmente plus (Magnan et al., 1999). Ce comportement des pieux est conforme aux conclusions des études expérimentales (Shakhirev et al., 1997 ; Shakhirev & Ejjaouani, 1995 ; Ejjaouani et al., 1997).

Toutefois, le comportement réel des pieux sous charge horizontale en fonction de la profondeur de fonçage dans le sol diffère parfois des formules obtenues. On sait ainsi que l'augmentation de la flexion (c'est-à-dire de la longueur du pieu) modifie non seulement le comportement du pieu sous la charge, mais aussi le comportement du sol autour du pieu (Shakhirev et al., 1997 ; Magnan et al., 1999 ; Ejjaouani et al. 1997).

On a établi que l'augmentation de la flexibilité du pieu réduit la réaction du sol, donc aussi la valeur du module de réaction K_D .

De même, l'inclinaison des courbes « charge-déplacement » évolue (figure 2), donc le paramètre traduisant l'influence de l'évolution des déformations plastiques du sol autour du pieu dépend non seulement de u_0 mais aussi de l'indice de souplesse F_e du système « pieu-sol », qui dépend des caractéristiques physiques du pieu et du sol :

$$F_e = \frac{bK_D D^4}{360 EI} \quad (26)$$

On a élaboré pour cette raison des tableaux donnant le module de réaction du sol K_D en fonction du type du sol (sable, argile limoneuse, argile) et de son état (densité, humidité) ainsi qu'un tableau particulier pour $v(u_0)$ pour les pieux courts rigides (Shakhirev et al., 1997), correspondant à $F_e=0,01$.

Ensuite, sur la base d'essais de chargement statique de pieux les coefficients minorateurs de K_D en fonction de F_e et de v en fonction de F_e et de u_0 ont été déterminés pour une grande gamme des pieux.

5 CONCLUSIONS

Le modèle des déformations locales permet de reproduire de façon satisfaisante le comportement des pieux sous charge horizontale, en utilisant un module de réaction dépendant de la profondeur et du déplacement horizontal du pieu à la surface du sol. Une solution générale du problème des pieux soumis à une charge horizontale combinée à un moment a été obtenue. Cette solution est applicable aux pieux infiniment rigides, aux pieux de rigidité finie et aux pieux souples (de longueur infinie).

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Ejjaouani H. & Shakhirev V. 1996. Particularités du dimensionnement des fondations sur pieux des lignes électriques aériennes. *Revue Marocaine du Génie Civil*, 62, 31-42.
- Ejjaouani H., Shakhirev V., Gamali H. & Tabet M. 1997. Calcul des groupes des pieux infiniment longs soumis à des charges horizontales. *La Recherche Appliquée au LPEE*, Bilan 1996/1997, 21-24.
- Magnan J.P., Shakhirev V. & Ejjaouani H. 1999. Comportement et modélisation de pieux rigides, de rigidité finie et souples sous charges horizontales. Comptes rendus, 12^{ème} Congrès Européen de Mécanique des Sols et de la Géotechnique, Amsterdam, 7-10 Juin 1999, vol. 1, 289-294.
- Shakhirev V. & Ejjaouani H.. 1995. Étude expérimentale de pieux rigides courts soumis à des charges horizontales. *Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, 196, 27-42.
- Shakhirev V. & Ejjaouani H. 1996. Les problèmes de construction dans les régions sismiques. *Revue Marocaine du Génie Civil*, 62, 54-60.
- Shakhirev V., Magnan J.P., Ejjaouani H. & Chemaou El Fihri O. 1997. Calcul des pieux courts rigides soumis à des forces horizontales. *Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, 210, 55-75.