

# 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 des fondations mixtes semelle-pieux sous sollicitation horizontale

## The design of piled-raft foundations under lateral load

S. Borel – *Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC) - France*

**RÉSUMÉ:** On propose une méthode opérationnelle pour le dimensionnement d'une fondation mixte soumise à une sollicitation horizontale. Cette méthode combine les méthodes usuelles de calcul des déplacements des fondations superficielles et profondes. Elle introduit des interactions entre semelle et pieux. La méthode a été appliquée à des essais antérieurs réalisés aux États-Unis dans les années 1970. Il s'agissait d'un système de deux fondations en opposition constituées chacune par une semelle et un groupe de six pieux battus instrumentés. Ces fondations ont fait l'objet de deux chargements latéraux : le premier avec la semelle au contact du sol (fondation mixte) et le deuxième après excavation sous la semelle (groupe de pieux traditionnel). On a vérifié que la méthode proposée permettait de modéliser de façon satisfaisante le comportement observé durant les essais. La méthode met bien en évidence l'effet favorable de la semelle, qui réduit très sensiblement les déplacements horizontaux et les moments fléchissants en tête des pieux. Ces derniers sont diminués de moitié pour le cas traité.

**ABSTRACT:** An efficient design method is proposed for piled-raft foundation under lateral loads. It combines the methods used for the displacement design of shallow and deep foundations. It takes into account the interactions between the piles and the raft. This method has been applied to previous full-scale tests carried out in the United States in the seventies. Two groups of six instrumented driven piles were laterally loaded several times: first with the concrete pile cap in direct contact with the soil (piled raft), and then, after a thin layer of soil had been removed beneath the cap (pile group). The proposed method models very well the behaviour observed during the tests. It highlights the positive effect of the raft in contact with the soil, which reduces significantly the displacements and the maximum pile bending moments. For the analysed case histories, the moments are divided by two.

## 1 INTRODUCTION

Les fondations mixtes sont constituées d'un groupe de pieux et d'une semelle de liaison au contact direct du sol, l'ensemble étant dimensionné en tenant compte à la fois des parts de charge reprises par les pieux et par la semelle.

Au cours des quinze dernières années, les fondations mixtes ont connu un développement important, tant sur le plan des méthodes de dimensionnement et des outils de modélisation que sur celui des réalisations et des essais sur ouvrages expérimentaux (Randolph 1994, Mandolini & Viggiani 1997, Katzenbach & Reul, 1997). Les travaux menés ont principalement concerné le domaine du bâtiment, où les pieux réducteurs de tassements constituent une alternative intéressante au dimensionnement traditionnel des fondations profondes (Hansbo, 1984) mais aussi le domaine des ouvrages d'art où la prise en compte du contact de la semelle avec le sol permet de réduire le nombre et la longueur des pieux (Combarieu, 1988). Pour autant, et comme le soulignent Kulhawy & Prakoso (1997), le comportement des fondations mixtes soumises à des sollicitations latérales n'a pas encore été abordé.

Or les situations où la reprise des efforts latéraux nécessite une justification précise sont nombreuses : ce sont par exemple les fondations des piles de pont soumises à l'écoulement d'une rivière ou au choc d'un bateau, à la dilatation thermique et au fluage du tablier ; ce sont aussi les fondations de culées de pont, de murs de soutènement de hauteur moyenne, de barrages et écluses de type courant, de quais, d'appontements, de plates-formes d'amarrage et de ducs d'albe, les fondations situées en pied de remblai, etc.

## 2 PRÉSENTATION DE LA MÉTHODE DE CALCUL

La méthode que nous proposons pour calculer le déplacement latéral et la rotation des fondations mixtes combine les méthodes

utilisées couramment pour le calcul des fondations profondes et des fondations superficielles. D'une façon générale, ces méthodes permettent de relier le déplacement et la rotation de la fondation aux efforts appliqués.

### 2.1 Déplacement d'une fondation profonde

Les méthodes de calcul des pieux sous sollicitations latérales peuvent être regroupées en deux catégories principales (Fleming et al., 1992) :

1. les méthodes où le sol est représenté par un massif continu ;
2. les méthodes aux coefficients de réaction où l'interaction pieu-sol est modélisée par une fonction de transfert de charge qui exprime la réaction du sol en fonction du déplacement relatif entre le pieu et le sol.

Pour un pieu ou un groupe de pieux, ces différentes approches permettent de relier le déplacement horizontal  $u_{\text{pieu}}$  et la rotation  $\theta_{\text{pieu}}$  de la fondation aux efforts appliqués (force horizontale  $H_{\text{pieu}}$  et moment  $M_{\text{pieu}}$ ) :

$$H_{\text{pieu}} = H_p(u_{\text{pieu}}, \theta_{\text{pieu}}) \quad (1)$$

$$M_{\text{pieu}} = M_p(u_{\text{pieu}}, \theta_{\text{pieu}}) \quad (2)$$

### 2.2 Déplacement d'une fondation superficielle

Le calcul des déplacements horizontaux n'est pas un problème courant pour les fondations superficielles. Le plus souvent, celles-ci sont justifiées en s'assurant que les efforts horizontaux ne provoquent pas de glissement, c'est à dire que le cisaillement sous la semelle reste inférieur à un cisaillement limite, avec des coefficients partiels adaptés.

Lorsqu'il est nécessaire, le calcul des déplacements est généralement réalisé par référence à des modèles de massif continu. Poulos & Davis (1974) récapitulent les principales situations

pour lesquelles des abaques ou des formules analytiques ont été établies. Tout comme pour les groupes de pieux, on peut écrire pour les fondations superficielles :

$$H_{\text{semelle}} = H_s(u_{\text{semelle}}, \theta_{\text{semelle}}) \quad (3)$$

$$M_{\text{semelle}} = M_s(u_{\text{semelle}}, \theta_{\text{semelle}}) \quad (4)$$

où  $H_{\text{semelle}}$  (respectivement  $M_{\text{semelle}}$ ) désigne la force horizontale (respectivement le moment) appliquée à la semelle et  $u_{\text{semelle}}$  (respectivement  $\theta_{\text{semelle}}$ ) désigne le déplacement horizontal (respectivement la rotation) de la semelle.

### 2.3 Déplacement d'une fondation mixte

Pour calculer le déplacement d'une fondation mixte où la charge est supportée à la fois par la semelle et par les pieux, nous proposons de combiner les relations précédentes. Ceci nécessite l'écriture des conditions de liaison et la prise en compte d'une interaction entre la semelle et les pieux.

#### 2.3.1 Conditions de liaison entre la semelle et les pieux

Nous supposons que la semelle de liaison est rigide. Le déplacement horizontal  $u_{\text{mixte}}$  de la fondation mixte est défini comme le déplacement de la semelle de liaison qui est aussi égal au déplacement de la tête des pieux :  $u_{\text{mixte}} = u_{\text{semelle}} = u_{\text{pieu}}$ .

La rotation  $\theta_{\text{mixte}}$  de la fondation mixte est également définie comme la rotation de la semelle de liaison :  $\theta_{\text{mixte}} = \theta_{\text{semelle}} = \theta_{\text{pieu}}$ .

#### 2.3.2 Interaction entre la semelle et les pieux

Si l'on néglige l'interaction entre la semelle et les pieux, les efforts repris par la fondation mixte sont la somme des efforts supportés par la semelle et les pieux pris séparément. Les relations précédentes permettent alors de calculer la force horizontale  $H_{\text{mixte}}$  et le moment  $M_{\text{mixte}}$  appliqués au centre de la fondation mixte :

$$H_{\text{mixte}} = H_s(u_{\text{mixte}}, \theta_{\text{mixte}}) + H_p(u_{\text{mixte}}, \theta_{\text{mixte}}) \quad (5)$$

$$M_{\text{mixte}} = M_s(u_{\text{mixte}}, \theta_{\text{mixte}}) + M_p(u_{\text{mixte}}, \theta_{\text{mixte}}) \quad (6)$$

Néanmoins, l'hypothèse qui consiste à négliger l'interaction entre la semelle et les pieux est peu satisfaisante. En effet, immédiatement sous la semelle, le sol accompagne le déplacement horizontal de la semelle et de la tête des pieux. Dans cette zone, le déplacement relatif entre les pieux et le sol est fortement diminué par rapport à la situation où la semelle n'est pas en contact avec le sol (semelle en position haute). La mobilisation de la réaction frontale du sol, qui est fonction de ce déplacement relatif, est ainsi réduite.

Pour tenir compte de l'interaction entre la semelle et les pieux, nous introduisons les hypothèses suivantes :

1. le comportement transversal des pieux est modélisé par des courbes de réaction, par exemple celles proposées dans le règlement français de calcul des fondations, le fascicule 62 - Titre V (1993) ;
2. il n'y a pas de glissement sous la base de la semelle, c'est à dire que le cisaillement mobilisé reste suffisamment inférieur au cisaillement limite. Dans le cas contraire, on ne peut plus supposer que le déplacement horizontal du sol situé immédiatement sous la semelle est égal à celui de la semelle de liaison ;
3. il n'y a pas de couplage entre les déplacements verticaux et les déplacements horizontaux du sol.

Le principe de la méthode est illustré sur la figure 1 dans le cas d'un pieu rigide encastré dans une semelle.

La méthode reprend la notion de déplacement libre du sol qui est couramment utilisée pour calculer un élément de fondation profonde situé en pied de remblai. On définit dans ce cas une

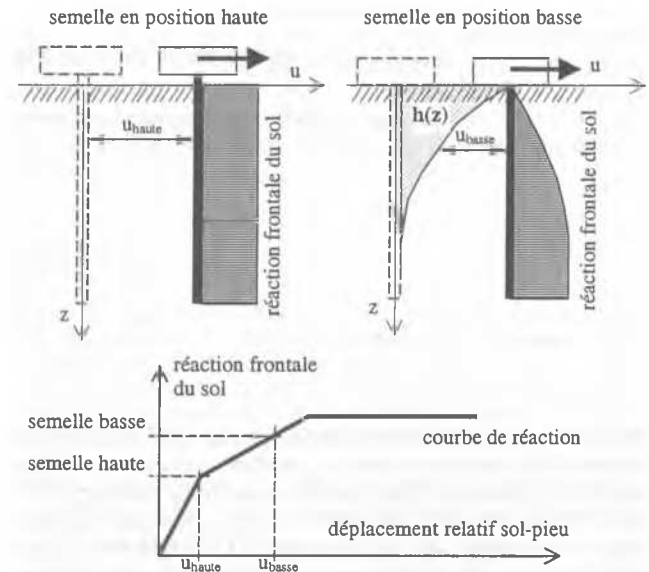


Figure 1. Principe de la méthode dans le cas d'un pieu rigide encastré.

fonction  $g(z)$  qui est égale au déplacement horizontal du sol à la profondeur  $z$  et en l'absence de pieu (Frank, 1999). La pression du sol sur le pieu est alors calculée en retranchant le déplacement libre  $g(z)$  du déplacement horizontal du pieu.

Dans le cas d'une semelle isolée soumise à une sollicitation latérale, nous introduisons une fonction  $h(z)$  qui est égale au déplacement horizontal du sol à la profondeur  $z$ . La pression du pieu sur le sol est calculée en retranchant  $h(z)$  au déplacement relatif entre le pieu et le sol. Le problème est alors entièrement défini dès que la fonction  $h(z)$  est connue.

### 2.4 Déplacement du sol dans l'axe d'une semelle rigide

Pour mettre en œuvre la méthode, il reste à calculer le déplacement libre du sol sous une semelle superficielle. Dans le cas d'une semelle rigide reposant sur un massif élastique de hauteur finie  $H$ , le déplacement horizontal  $u_0$  d'une semelle rigide est proportionnel au cisaillement horizontal appliqué  $\tau$  et inversement proportionnel au module d'Young  $E$ . L'analyse dimensionnelle montre que le déplacement  $u_0$  peut s'écrire sous forme adimensionnelle :

$$\frac{u_0}{B} = k \left( \frac{L}{B}, \frac{L}{H}, \nu \right) \times \frac{\tau}{E} \quad (7)$$

où  $k$ ,  $B$ ,  $L$  et  $\nu$  désignent respectivement : une fonction numérique de trois variables adimensionnelles, la dimension de la semelle qui est perpendiculaire à la direction de chargement, la dimension de la semelle qui est parallèle à la direction de chargement et le coefficient de Poisson du sol.

De même, le déplacement horizontal  $u_z$  du massif sous le centre de la semelle à la profondeur  $z$  peut être mis sous la forme :

$$\frac{u_z}{u_0} = f \left( \frac{z}{B}, \frac{L}{B}, \frac{L}{H}, \nu \right) \quad (8)$$

où  $f$  désigne une fonction numérique de quatre variables. On en déduit l'expression du déplacement horizontal  $u_z$  :

$$\frac{u_z}{B} = k \left( \frac{L}{B}, \frac{L}{H}, \nu \right) \times f \left( \frac{z}{B}, \frac{L}{B}, \frac{L}{H}, \nu \right) \times \frac{\tau}{E} \quad (9)$$

Pour déterminer les valeurs de la fonction  $k$ , on peut se reporter aux abaques et formules cités par Poulos et Davis (1974) ; on peut également réaliser des études numériques spécifiques par

Tableau 1. Approximation trilineaire du déplacement horizontal relatif dans l'axe d'une semelle rigide rectangulaire ( $H/B > 3$ ).

Profondeur relative $z/B$	0	0,4	1	3
Déplacement relatif $f = u_z/u_0$	1	0,5	0,25	0

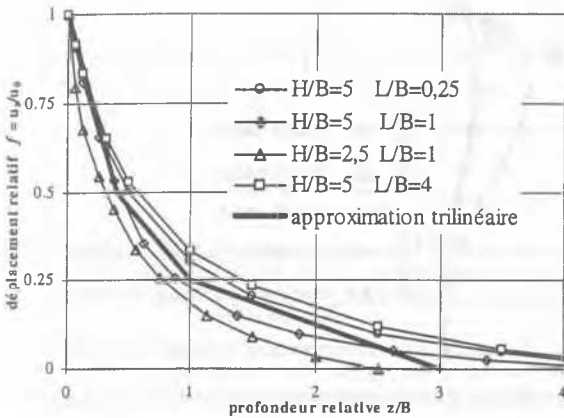


Figure 2. Approximation trilineaire du déplacement relatif dans l'axe de la semelle rigide ( $H/B > 3$ ).

exemple avec la méthode des éléments finis, ou encore se reporter à des observations expérimentales.

Pour ce qui concerne la fonction  $f$ , le déplacement horizontal dans l'axe de la semelle n'a été, à notre connaissance, systématiquement examiné que dans le cas d'une semelle filante flexible posée sur un espace élastique linéaire homogène semi-infini (Milovic, 1992). Nous avons étudié plus précisément la fonction  $f$  par la méthode des éléments finis (Borel, 2001).

Lorsque l'épaisseur de la couche déformable est supérieure à trois fois la largeur de la semelle, nous proposons de retenir une approximation simple du déplacement relatif du sol dans l'axe de la semelle (tableau 1 et figure 2). L'erreur commise est inférieure à 10% du déplacement en tête pour les cas que nous avons considérés.

### 3 EXEMPLE D'APPLICATION

#### 3.1 Présentation des essais

Au début des années 1970, l'Université de Bucknell aux États-Unis a poursuivi un programme de recherche expérimentale consacrée aux groupes de pieux sous chargement latéral. Kim et al. (1972, 1976, 1979) ont réalisé des essais de chargement de deux pieux isolés et trois groupes de six pieux instrumentés. Ces pieux étaient constitués de profilés H en acier battus à travers un sol cohérent jusqu'au refus au contact d'une couche de calcaire rencontrée à 12,2 m de profondeur. La disposition des fondations est illustrée sur la figure 3. Les fondations implantées côte à côte étaient chargées simultanément à l'aide de vérins hydrauliques installés entre les semelles de liaison. Le chargement vertical était assuré par des vérins prenant appui sur une poutre de réaction et un système de tirants d'ancrage.

Chaque fondation a été chargée quatre fois avec un intervalle de 9, 4 et 20 mois entre chaque campagne d'essai. Pour les trois premières séries d'essai (séries A, B et C), les pieux étaient reliés par une semelle en béton armé coulée directement au contact du sol. Pour la dernière série d'essai (série D), le contact semelle-sol a été supprimé en excavant 10 cm de terrain situé immédiatement sous la semelle. Ainsi, chaque fondation a été chargée trois fois avec la semelle en position basse (fondation mixte) et une fois avec la semelle en position haute (groupe de pieux traditionnel).

Lors des essais, les efforts appliqués ont été mesurés ainsi que les déplacements et rotations de la fondation et les contraintes

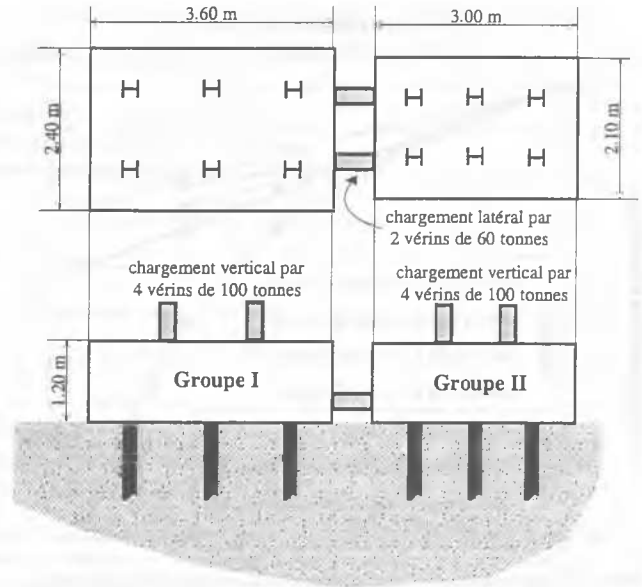


Figure 3. Vue en plan et coupe des groupes de pieux.

dans les pieux au moyen de jauges de déformation collées sur les profilés H.

Chaque essai comportait un chargement vertical maintenu, une part significative des efforts, de l'ordre de 20 à 30%, étant supportée directement sous la semelle. Le chargement latéral était ensuite appliqué par paliers maintenus au moins une heure.

#### 3.2 Approche retenue pour le calcul des essais

La démarche poursuivie a consisté dans un premier temps à reproduire les mesures effectuées sur les fondations avec la semelle en position haute. Les caractéristiques mécaniques du sol en profondeur ont été définies à partir des données géotechniques disponibles. Dans un deuxième temps, nous avons repris les calculs en tenant compte du contact de la semelle avec le sol. Différentes études paramétriques ont été entreprises.

Les données géotechniques disponibles comportent notamment une identification des couches rencontrées et un essai SPT jugé représentatif du site par les auteurs des essais de chargement. Un profil pressiométrique Ménard a été estimé sur la base de ces éléments (tableau 2).

La mobilisation de la réaction frontale du sol en fonction du déplacement relatif du pieu a été modélisée à l'aide des courbes de réaction définies suivant la proposition du règlement français de calcul des fondations (figure 4).

Tableau 2. Coupe géotechnique et paramètres des courbes de réaction.

profondeur	type de sol	SPT (N)	$p_t$ (kPa)	$p_r$ (kPa)	$K_r$ (MPa)
0 m à 3 m	argile sableuse	30 à 40	320	190	21
3 m à 8 m	argile	10 à 20	275	160	34
8 m à 12,2 m	argile limoneuse	20 à 50			100
> 12,2 m	calcaire	refus			

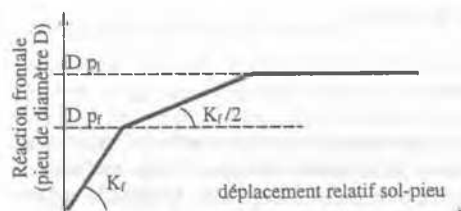


Figure 4. Définition des courbes de mobilisation de la réaction frontale.

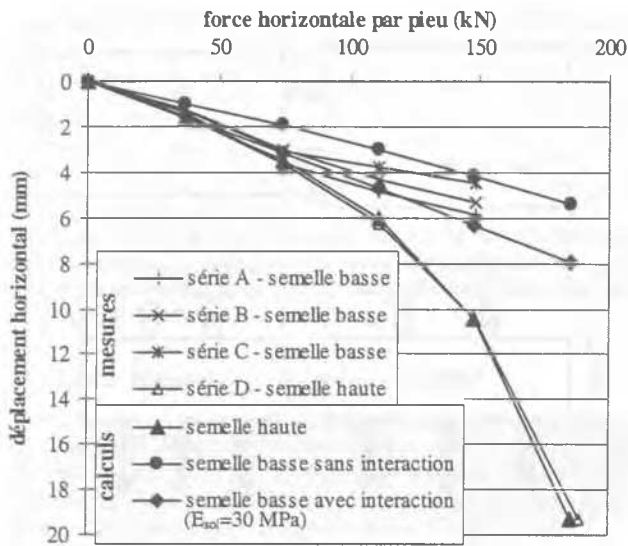


Figure 5. Comparaison des déplacements mesurés et calculés (groupe D).

Les calculs ont été menés à l'aide du logiciel de calcul aux coefficients de réaction GOUPIL (Degny & Romagny, 1989) qui permet de déterminer les déplacements et les efforts pour un groupe de pieux soumis à une sollicitation tridimensionnelle quelconque.

### 3.3 Confrontation des calculs aux résultats expérimentaux

La figure 5 montre les courbes de chargement obtenues lors des quatre campagnes d'essai pour le groupe I. Les déplacements horizontaux mesurés avec la semelle en position basse sont très proches les uns des autres (séries A, B et C). On observe un comportement de la fondation légèrement plus raide lorsque l'essai est répété. Le déplacement horizontal ne dépasse pas le centimètre.

Tant que la force horizontale reste inférieure à 74 kN/pieu, on n'observe pas de différence significative entre la fondation avec la semelle en position basse et avec la semelle en position haute (série D). Pour une force plus grande, le comportement de ces fondations diffère et devient non linéaire. Entre 74 kN/pieu et 148 kN/pieu, le déplacement horizontal augmente quatre fois plus pour le groupe de pieux avec la semelle en position haute que pour le groupe de pieux avec la semelle en position basse. Avec les paramètres retenus, le calcul avec la semelle en position haute permet de reproduire l'ensemble de la courbe de chargement. Le calcul avec la semelle en position basse a été effectué avec et sans interaction semelle-pieux au sens qui a été défini lors de la présentation de la méthode. La prise en compte de l'interaction augmente le déplacement calculé de 40% environ. Pour les calculs comme pour les mesures, l'effet de la semelle sur le déplacement horizontal ne devient significatif que lorsque la force horizontale dépasse 74 kN/pieu.

Les moments fléchissants mesurés dans les pieux sont comparés aux valeurs calculées sur la figure 6. Le contact de la semelle avec le sol réduit le moment fléchissant maximal de moitié. Outre un bon accord général, on peut noter que la prise en compte de l'interaction semelle-pieux modifie relativement peu l'allure des moments fléchissants, en réduisant toutefois le moment maximal de 15% environ.

## 4 CONCLUSIONS

Nous avons proposé une méthode opérationnelle de calcul des fondations mixtes sous sollicitations latérales. Cette méthode a été appliquée à un groupe de pieux chargé avec la semelle en position haute et avec la semelle en position basse.

Les phénomènes mesurés ont été reproduits tant sur un plan

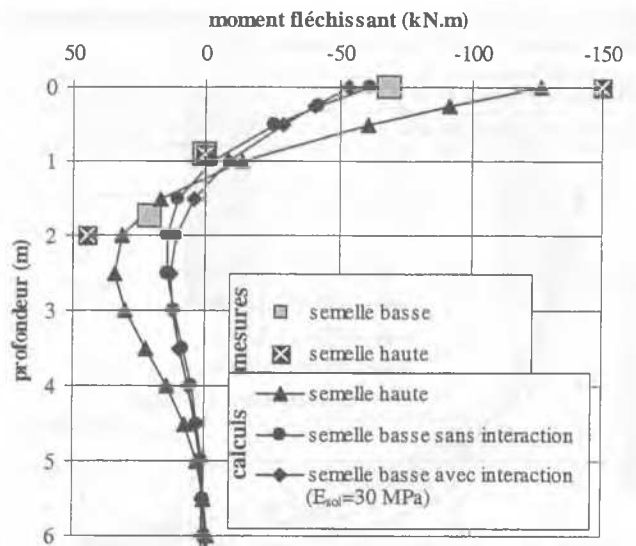


Figure 6. Moments fléchissants mesurés et calculés ( $H = 148$  kN/pieu).

qualitatif que quantitatif. En particulier, on a observé que le contact de la semelle avec le sol conduisait à réduire les moments fléchissants de 50% environ et à diminuer fortement les déplacements horizontaux.

On peut se reporter à Borel (2001) pour des exemples d'application de la méthode à d'autres types d'ouvrages.

## 5 RÉFÉRENCES

- Borel, S. 2001. Comportement et dimensionnement des fondations mixtes. Thèse de doctorat de l'École Nationale des Ponts et Chaussées.
- Combarieu, O. 1988. Calcul d'une fondation mixte semelle-pieu sous charge verticale centrée. *Note d'information technique du Laboratoire Central des Ponts et Chaussées*. Paris: LCPC.
- Degny, E. & Romagny, J.-C. 1989. Calcul des efforts et déplacements dans les groupes de pieux : le programme Goupil. *Bulletin de liaison des laboratoires des Ponts et Chaussées* 162: 3-12.
- Fleming, W.G.K. Weltman, A.J. Randolph, M.F. Elson W.K. 1992. *Piling Engineering*. New-York: John Wiley & Sons.
- Frank, R. 1999. *Calcul des fondations superficielles et profondes*. Paris: Presses de l'école nationale des Ponts et Chaussées.
- Hansbo, S. 1984. Foundations on friction creep piles in soft clays. *Proc. International conference on case histories in geotechnical engineering* 2: 913-922. St Louis Prakash Shamsher Ed.
- Katzenbach, R. & Reul O. 1997. Design and performance of piled rafts. *Proc. 14<sup>th</sup> ICSMFE* 4: 2253-2256. Rotterdam: Balkema.
- Kim J.B., Singh L.P., Brungraber R.J. 1976. Pile cap soil interaction from full-scale lateral load tests. *Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE* 105 GT5: 643-653.
- Kim, J.B. & Brungraber, R.J. 1976. Full-scale lateral load tests of pile groups. *Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE* 102 GT1: 87-105.
- Kim, J.B. Brungraber, R.J., Kindig C.H. 1972. Lateral load tests on full scale pile groups. *Proc. Performance of earth and earth-supported structures* 1(2): 1105-1133. New-York: ASCE.
- Kulhawy, F.H. & Prakoso, W.A. 1997. Some observations on piled raft (mat) foundation analyses. *Panel discussion, Proc. 14<sup>th</sup> ICSMFE, Amsterdam* 4: 2261-2262. Rotterdam: Balkema.
- Mandolini, A. & Viggiani C. 1997. Settlement of piled foundations. *Géotechnique* 47(4): 791-816.
- Milovic, D. 1992. *Stresses and displacements for shallow foundations*. Amsterdam: Elsevier Science Publishers.
- Poulos, H.G. & Davis, E.H. 1974. *Elastic solutions for soil and rock mechanics*. New-York: John Wiley & Sons.
- Randolph, M.F. 1994. Design methods for pile groups and piled rafts. *Proc. 13<sup>th</sup> ICSMFE, New Delhi* 5: 61-82. Rotterdam: Balkema.
- Règles techniques de conception et de calcul des fondations des ouvrages de génie civil. *Cahier des clauses techniques générales applicables aux marchés publics de travaux*. Fascicule 62 - Titre V 1993. Ministère de l'équipement, du logement et des transports. Paris: Textes officiels.