

# Modélisation de l'interaction sol-fondations superficielles

**Ch. BAY-GRESS**

**J.-G. SIEFFERT**

*LERGEC, ENSAIS  
(École nationale supérieure  
des arts et industries  
de Strasbourg)  
24, bd de la Victoire  
67084 Strasbourg Cedex*

**J. LAUE**

*Institut für Geotechnik  
ETH Hönggerberg  
CH-8093 Zürich  
Lehrstuhl für Grundbau  
und Bodenmechanik  
Ruhr-Universität Bochum  
Universitätsstrasse 150  
D-44780 Bochum*

## Résumé

Les ouvrages de génie civil sont classiquement dimensionnés selon les sollicitations qu'ils doivent reprendre, avec des conditions limites locales souvent peu réalistes. Les fondations sont dimensionnées par ailleurs, selon les sollicitations transmises, mais en aucun cas la modification du comportement de l'une des parties n'est prise en compte pour le dimensionnement de l'autre partie. Il est nécessaire de comprendre d'abord ce qui se passe au niveau local sol-fondation pour caractériser le comportement de cet ensemble de propriétés mécaniques et rhéologiques différentes soumis à des sollicitations complexes, avec tous les problèmes inhérents au contact. Le travail présenté concerne des fondations superficielles posées sur un milieu pulvérulent homogène isotrope, sous des sollicitations de type effort vertical et moment couplé ou non-couplé.

# Modelisation of the soil-foundation interaction

## Abstract

Civil engineering structures are currently designed taking into account classical loads, with limit conditions often not pertinent. On the other hand, foundations are designed under the transmitted loads, disregarding the influence of the behaviour variation of one element on the other. Our development consists in the phenomenon formulation of the soil-foundation system behaviour, which involves distinct mechanical and rheological characteristics under complex loading, considering all the problems inherent to the contact. The present study concerns shallow footings laid on a cohesionless homogeneous and isotropic sand mass, submitted to loads like vertical force and moment load coupled or non-coupled with the vertical loading.

## Interaction sol/structure

Dans le thème très vaste de l'interaction sol-structure, on s'intéresse ici à l'aspect particulier du comportement des fondations superficielles soumises à un chargement complexe. Cette étude s'inscrit dans le cadre de la coopération européenne pour la recherche scientifique et technique COST C7 dont le thème est précisément l'interaction sol-structure en génie civil urbain. Pour mémoire, cette action européenne peut être considérée comme un complément logique de l'action COST C1 concernant les liaisons semi-rigides. Lors de cette précédente action, les liaisons poteaux-poutres et même poteaux-fondations ont été caractérisées au sein de la structure et pour différents matériaux (COST C1, 1992). Si l'on envisage maintenant une vision globale du problème structure-sol-fondation, il reste à caractériser la liaison sol-structure ou plus précisément la condition limite à imposer pour le dimensionnement d'une structure. A l'heure actuelle, les conditions aux limites utilisées sont de type encastrement ou ressorts élastiques linéaires (Gilbert, 1995). Cependant, lorsque les sollicitations sont transmises aux fondations, celles-ci se déplacent, et la réponse du sol n'est pas parfaitement élastique. Ces déplacements imposés à la structure induisent une redistribution des sollicitations au sein de la structure. Les sollicitations sur la fondation sont modifiées, et la réponse en déplacement également. Ce phénomène d'interaction entre le sol et la structure se poursuit ainsi jusqu'à ce qu'un état d'équilibre soit atteint. Une analyse *in situ* récente (Gusmao, 1997) rend compte du comportement d'ensemble du sol, des fondations et d'une structure. L'auteur montre que lors de la construction d'un immeuble, la rigidité sol-structure augmente et la répartition des charges sur les fondations est modifiée. Il apparaît cependant une raideur sol-structure limite à partir de laquelle la poursuite de la construction ne modifie plus les efforts internes dans les poteaux dus à l'interaction sol-structure. Cela signifie que le tassement continue d'augmenter, mais qu'il augmente alors proportionnellement à la charge appliquée.

L'approche proposée consiste à décrire les phénomènes observés au niveau du système sol-fondation pour les prendre en compte dans le comportement des liaisons externes de la structure. Le cadre du problème étudié est le suivant : les actions extérieures à la structure (charges permanentes, charges d'exploitation, vent) sont transmises à la fondation sous la forme des sollicitations  $V$ ,  $H$  et  $M$ . On se limite dans cette étude aux composantes  $V$  et  $M$ .

La démarche adoptée pour traiter ce problème est la suivante :

- constitution d'une base de données expérimentales sur les fondations superficielles isolées carrées afin de maîtriser le maximum de paramètres pour les modélisations postérieures ;
- exploitation des essais permettant la caractérisation du comportement non linéaire du système sol-fondation ;
- modélisation numérique par la méthode des éléments finis validée sur les essais réalisés afin de compléter la base de données expérimentales par l'analyse de l'influence de certains paramètres non variés dans l'étude expérimentale (paramètres du sol et de la fondation).

La synthèse des observations expérimentales et numériques constitue le cahier des charges des éléments de liaison externe de la structure.

## Base de données expérimentales

### Dispositif expérimental

Les essais en centrifugeuse sur fondations superficielles ont été réalisés à l'Université de Bochum (Allemagne) qui possède une grande expérience de ces simulations (Laue, 1996). Les essais concernent des fondations carrées de 5 cm de côté posées sur un lit de sable dense dont les caractéristiques sont résumées ci-dessous (tableau I). Le sable a été mis en place au préalable par pluviation manuelle dans un conteneur circulaire fixé à l'extrémité du bras de la centrifugeuse (Fig. 1 et 2).

TABLEAU I Caractéristiques intrinsèques du sable utilisé en centrifugeuse (Normsand Bochum 942-d).

$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	E(MPa)	$\nu$	$c'$ (kPa)	$\phi'$ (°)	$\psi'$ (°)
17,03	19	0,25	$0 \leq 1$ kPa	$34,6 \pm 3^\circ$	10,7

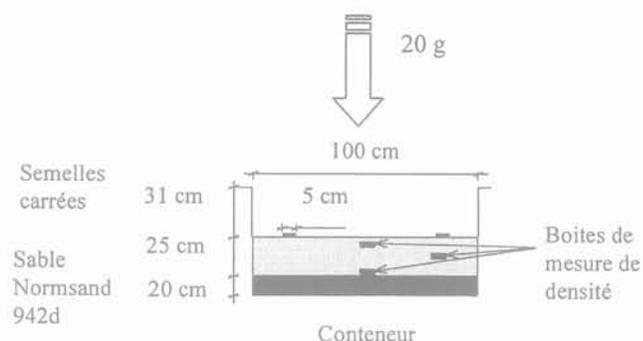


FIG. 1 Schéma du conteneur d'essai. Schematic representation of the container.

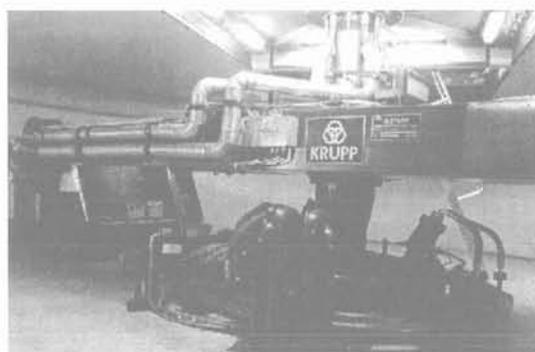


FIG. 2 Centrifugeuse de l'Université de Bochum. Centrifuge of the University of Bochum.

Le dispositif original utilisé pour réaliser les essais découplés est présenté sur la figure 3. Les paramètres mesurés sont les efforts verticaux appliqués par les vérins hydrauliques, les déplacements verticaux et horizontaux de la fondation par des capteurs externes, ainsi que les déplacements verticaux des vérins. Les valeurs des déplacements horizontaux mesurés sont suffisamment faibles pour que ce paramètre puisse être négligé. La plaque supérieure solidaire de la semelle visible sur la figure 3 permet de recevoir les deux tiges des vérins espacées de 17 cm (la fondation ne mesurant que 5 cm de large). La taille de la fondation est choisie de manière à modéliser une fondation de taille réelle courante (1 m x 1 m pour le cas étudié, avec un facteur d'échelle de 20 dû à l'accélération de 20 g imposée à l'ensemble du dispositif). Les essais ont été filmés à l'aide d'au moins une caméra pour une éventuelle exploitation graphique complémentaire (observation du soulèvement du sable à la périphérie de la fondation, par exemple).

Les chemins de chargement appliqués sont :

- un chargement vertical centré monotone ou cyclique ;
- un chargement vertical excentré monotone ;
- un chargement découplé monotone ou cyclique.

Seuls les essais monotones sont présentés dans cet article. Le chargement découplé consiste à appliquer dans un premier temps une charge verticale centrée  $V_0$  (phase A, Fig. 4), puis un moment à l'aide de deux vérins hydrauliques (phase B, Fig. 4), tout en maintenant la charge verticale appliquée constante. Le moment est produit par la diminution de l'effort dans un vérin, et l'augmentation de l'effort dans l'autre vérin, avec la même vitesse de chargement ou de déchargement.

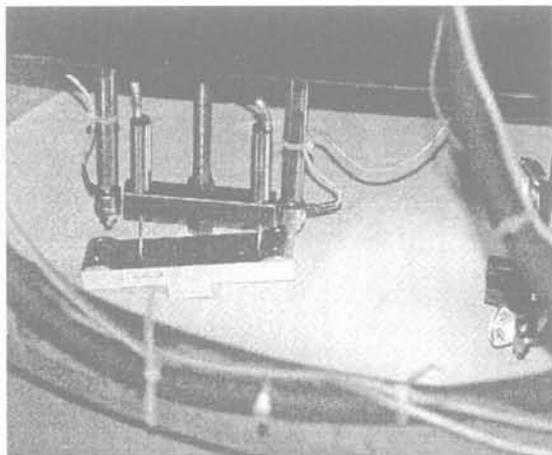
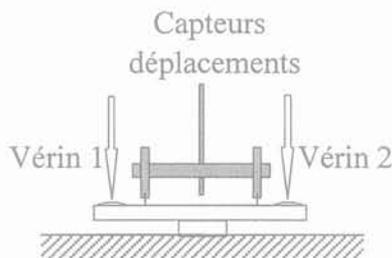


FIG. 3 Description du dispositif expérimental. Description of the instrumentation.

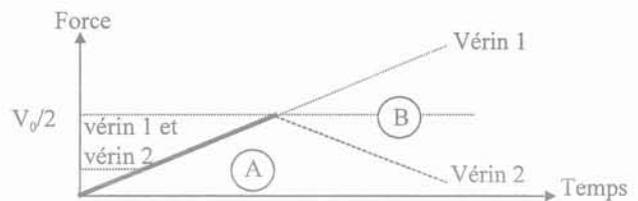


FIG. 4 Principe du chargement dit découplé : moment (B) découplé du préchargement vertical (A).

Schematic of the loading sequence for a vertical preloading (A) and uncoupled moment load (B).

La charge ultime obtenue pour ces divers chemins de chargement permet d'obtenir un point dans l'espace adimensionnel moment  $\left(\frac{M}{V_u B}\right)$  - effort vertical  $\left(\frac{V}{V_u}\right)$

appliqué sur la semelle (Fig. 5) avec  $V_u$  la charge limite obtenue pour un chargement vertical centré dans les mêmes conditions expérimentales. On représente par un point unique la charge limite pour un chargement excentré et un chargement découplé, puisque d'un point de vue réglementaire, les capacités portantes calculées pour ces deux systèmes de chargements sont équivalentes. L'ensemble de ces points constitue la courbe d'interaction M-V. Cela signifie *a priori* que, une fois cette courbe établie dans l'espace M-V et quel que soit le chemin de chargement appliqué, si les valeurs des charges appliquées atteignent la courbe d'interaction, cette charge est la capacité portante de la fondation considérée. Mais l'unicité de la courbe d'interaction M-V par divers chemins de chargement et sa variation suivant les paramètres du sol et des fondations restent à discuter.

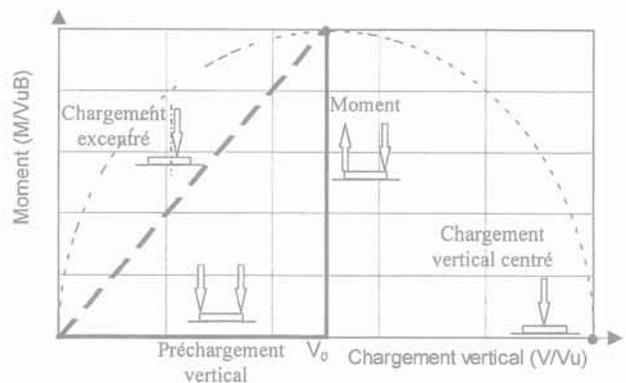


FIG. 5 Courbe d'interaction moment-effort vertical. Moment load-vertical load interaction diagram.

## 2.2

### Analyse des résultats

Les résultats obtenus permettent de comparer le comportement du système sol/fondation pour un chargement vertical excentré et un chargement découplé. En ce qui concerne le chargement découplé, les essais en centrifugeuse permettent d'établir l'influence du préchargement vertical sur le comportement d'une fondation superficielle soumise à un moment.

Le comportement du système sol/fondation est caractérisé par (Fig. 11) :

- la raideur statique globale sol/fondation (désignée par  $K_s$  dans le cas général,  $K_v$  pour la raideur verticale et  $K_h$  pour la raideur au balancement) ;
- la pente de l'asymptote de la courbe charge-déplacement de la fondation dans une configuration proche de la rupture (désignée par  $K_r$ ) ;
- la valeur limite du chargement (désignée par  $V_u$  ou  $M_u$ ).

L'étude de l'influence de divers paramètres sur ces caractéristiques permet ensuite de formuler les raideurs statiques à prendre en compte pour intégrer le phénomène d'interaction sol/structure dans le dimensionnement des structures. Les essais sous chargement vertical centré sont présentés sous forme de courbes charge-déplacement en grandeurs prototype (Fig. 6).

Pour l'ensemble des essais réalisés, le poids propre du modèle réduit de la fondation en aluminium est pris en compte. L'application de ce poids propre se fait lors de l'accélération de la centrifugeuse (le poids de la fondation devient alors 20 fois plus important). Cette procédure implique une vitesse de chargement différente pour le poids propre de la fondation et la charge appliquée par les vérins hydrauliques (partie initiale des courbes, Fig. 6).

On constate que l'ensemble des courbes expérimentales présente des paliers (bien que le chargement appliqué soit continu) et une asymptote oblique. L'allure de ces courbes s'explique par une combinaison de plusieurs phénomènes mis en évidence entre autres par De Beer (1965) et plus récemment par Pu et Ko (1988) : le mécanisme de rupture dans le sol dépend du niveau de contrainte, mais également de la forme de la fondation et du niveau d'accélération.

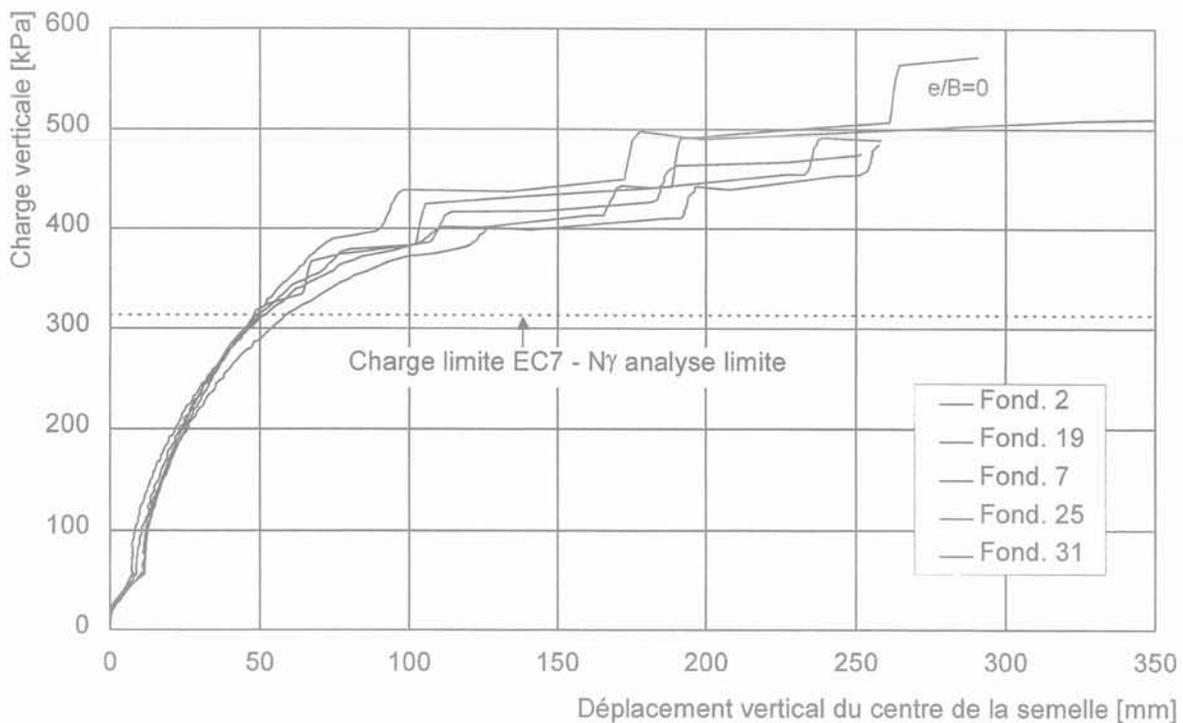


FIG. 6 Résultats des essais en centrifugeuse (chargement vertical centré).  
Results of centrifuge tests under vertical centred force.

Ainsi, il a été démontré (Kusakabe, 1991) que pour une semelle carrée soumise à 20 g et posée sur un lit de sable très dense, on observe une rupture par cisaillement localisé (courbes charge-déplacement avec asymptote oblique (Fig. 7b), alors que pour les mêmes conditions d'études mais pour un modèle réduit à 1 g, on observe une rupture généralisée (courbes charge-déplacement avec pic) (Fig. 7a). Au cours des essais présentés, les semelles tassent, et la surcharge latérale sur le sol augmente. Ces phénomènes conduisent à une augmentation graduelle de la capacité portante qui se traduit par une asymptote oblique sur la courbe charge-déplacement de la semelle. Les courbes obtenues ne présentent donc pas de pic, et la détermination de la charge de rupture est problématique. Les critères de rupture généralement utilisés pour les différents types de rupture du sol sous une fondation superficielle sont définis sur la figure 7.

Les critères de rupture utilisés pour interpréter les essais réalisés sont de trois types (Fig. 8) :

- le critère de Brinch Hansen (Hansen, 1963) ;
- un critère géométrique sur le déplacement  $\delta$  de la fondation ;
- l'ordonnée à l'origine de l'asymptote oblique.

B. Hansen a défini la charge limite  $V_u$  comme étant la charge pour laquelle le déplacement est deux fois plus important que le déplacement correspondant à  $0,9 V_u$  (Fig. 8).

La charge de rupture définie par un critère géométrique correspond à la charge pour laquelle le déplacement relatif global de la fondation  $\delta$  est tel que  $\delta \leq 10 \%$ ,

avec  $\delta = \sqrt{\left(\frac{y}{B}\right)^2 + \theta^2}$  (où  $y$  est le déplacement vertical du centre de la fondation et  $\theta$  la rotation de la fondation).

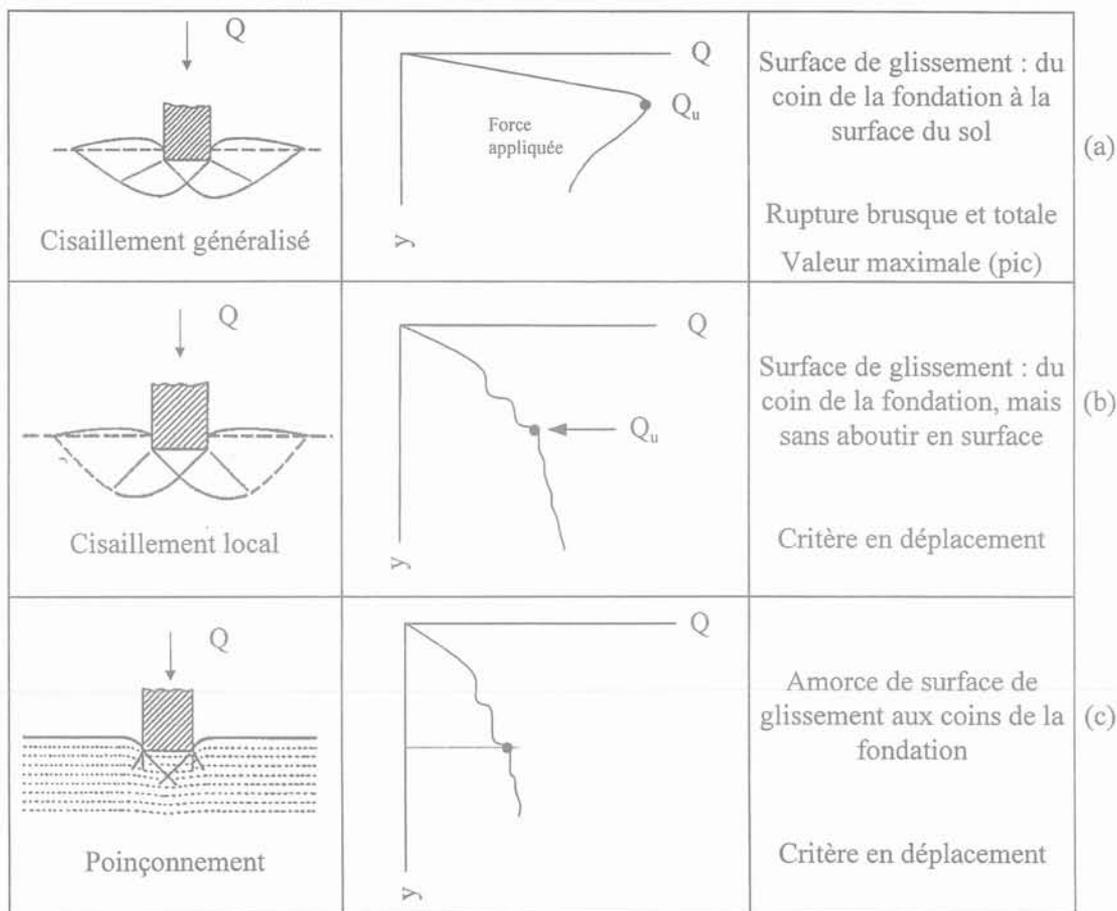


FIG. 7 Mécanismes de rupture du sol sous fondation superficielle (Vesic, 1973).  
Failure mechanisms of soil under shallow foundation (Vesic, 1973).

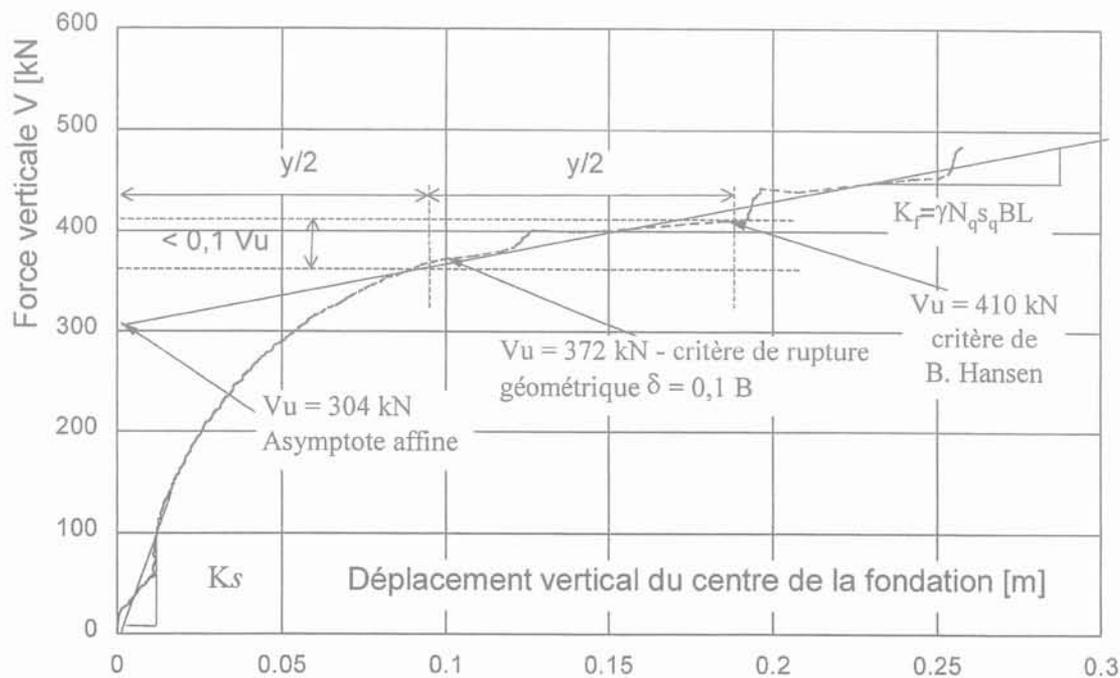


FIG. 8 Critères de rupture.  
Failure criteria.

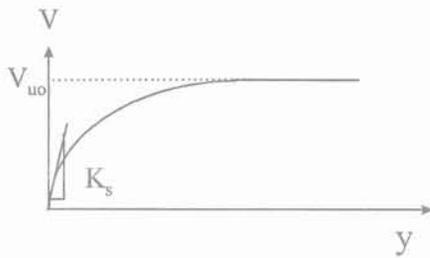


FIG. 9 **Modèle de Butterfield (1980) avec asymptote horizontale.**  
Model of Butterfield (1980) with horizontal asymptote.

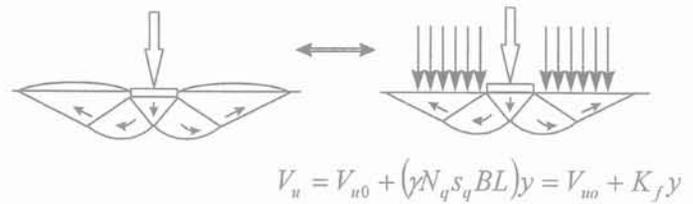


FIG. 10 **Expression de l'asymptote oblique.**  
Expression of the oblique asymptote.

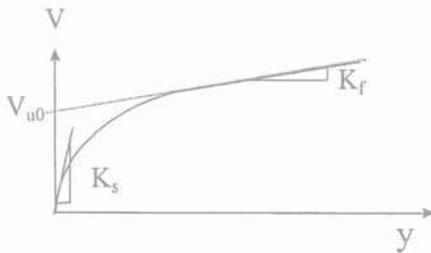


FIG. 11 **Modèle proposé avec asymptote oblique.**  
Model proposed for oblique asymptote.

déplacement vertical  $y$  (Fig. 10). Dans notre cas, pour l'essai vertical centré, au cours du chargement, la fondation tasse, et le sol environnant se soulève, ce qui entraîne une continuelle augmentation de la capacité portante et donne un comportement asymptotique oblique.  $V_{u0}$  est la charge à l'origine, et le terme  $K_f = \gamma N_q s_q BL$  la pente de l'asymptote (Fig. 11).

Le modèle devient :  $V = (V_{u0} + K_f y) [1 - e^{\frac{-K_s y}{V_{u0} + K_f y}}]$ . D'une part, la charge limite est définie de manière cohérente avec les phénomènes observés expérimentalement, et, d'autre part, on dispose alors d'un modèle prédictif pour lequel tous les paramètres sont aisément déterminés. En effet, la valeur de  $V_u$  utilisée est un résultat d'analyse limite, de même que  $N_q$ , et  $K_s$  la raideur statique initiale verticale est donnée par les fonctions d'impédance. Cette formulation est validée si la raideur initiale est bien supérieure à la raideur de l'asymptote finale ( $K_s \gg K_f$ ). Dans le cas étudié, on trouve des raideurs expérimentales  $K_s$  ( $\approx 12$  MN/m) de l'ordre de 15 à 20 fois supérieures à  $K_f$  ( $\approx 648$  kN/m), ce qui est suffisant pour valider le modèle qui tend vers la valeur de  $K_f$  pour un déplacement infini.

A partir de ce modèle, on a une méthode prédictive du comportement sol-fondation sous chargement vertical centré. On constate que les résultats expérimentaux et le modèle proposé sont très proches (Fig. 12).

En ce qui concerne la troisième méthode, nous proposons une amélioration du modèle de Butterfield (1980) pour des courbes comportant une asymptote horizontale :  $V = V_u [1 - e^{\frac{-K_s y}{V_u}}]$ , où  $V_u$  et  $K_s$  sont respectivement la charge limite et la raideur statique initiale définies sur la figure 9. Pour le comportement asymptotique oblique observé, ce modèle est amélioré en exprimant le terme  $V_u$  comme évolutif en fonction du

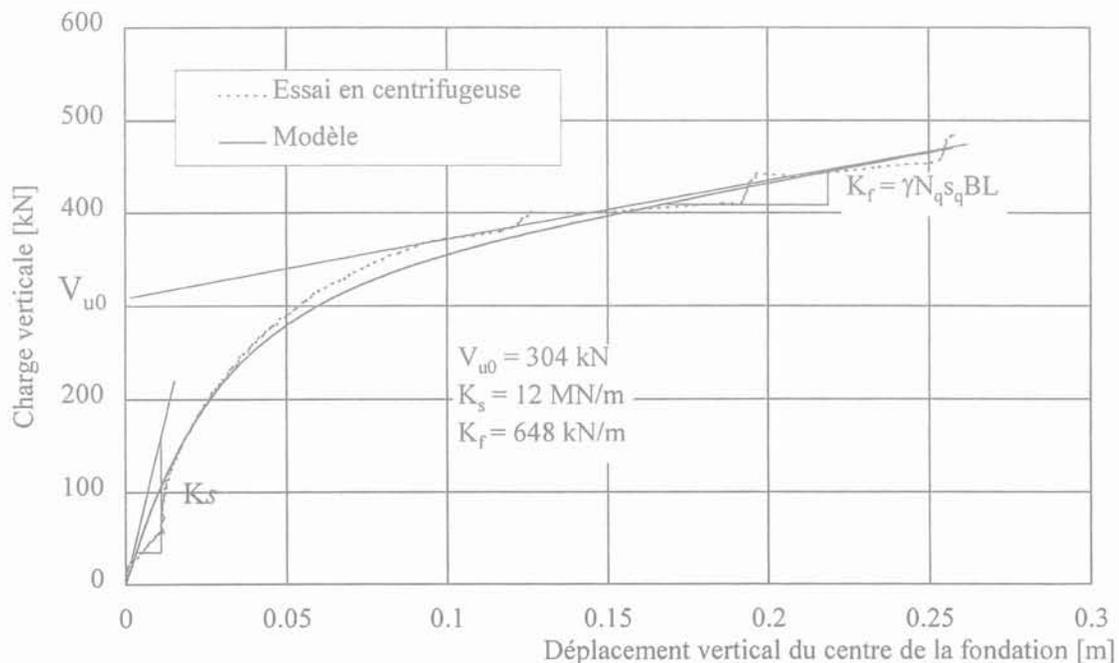


FIG. 12 **Corrélation courbe expérimentale - modèle pour un essai sur fondation superficielle sous chargement vertical centré.**  
Experimental curve - model correlation for a test on shallow foundation under vertical centred force.

Les résultats des essais verticaux excentrés et découplés sont présentés sous la forme d'un diagramme adimensionnel à quatre branches. Cette forme permet de corréler très rapidement les différents points de la courbe. Les résultats comparés des essais excentrés et découplés (Fig. 13 et 14) montrent que :

- lorsque l'on applique uniquement un moment (chargement découplé), le déplacement vertical de la fondation augmente (ce qui n'est pas forcément le résultat attendu) ;
- l'allure des courbes charge-déplacement est totalement différente pour un chargement excentré ou découplé, de même que la charge limite ;

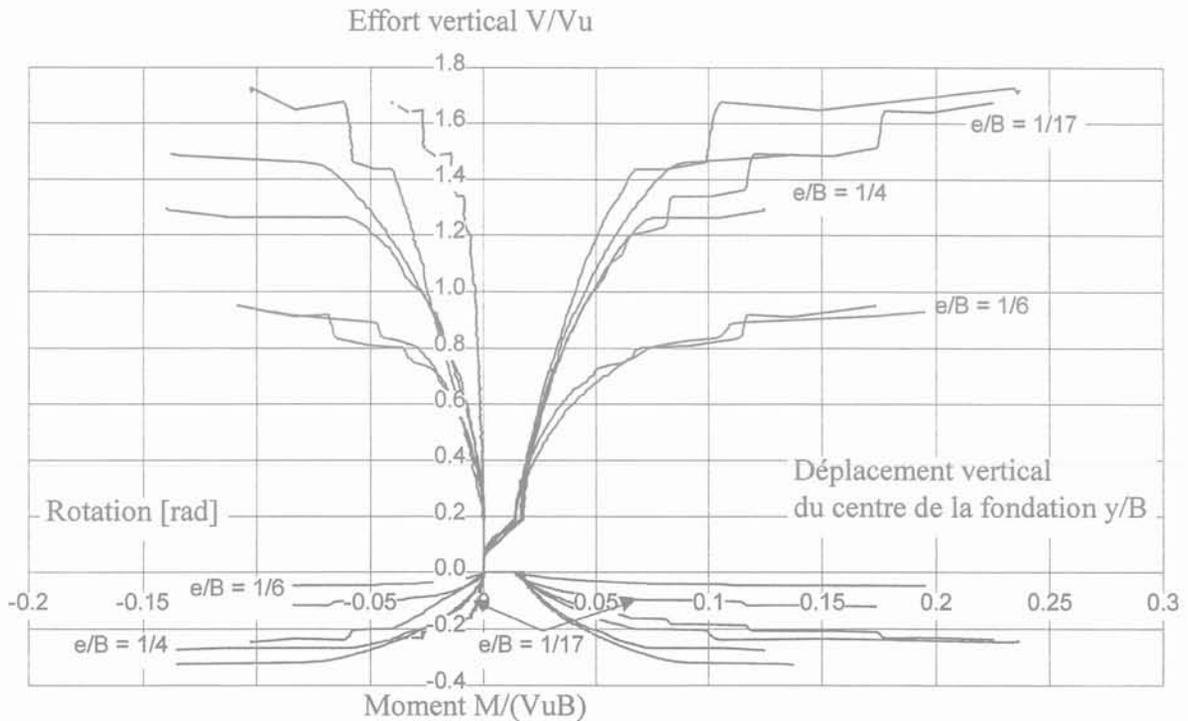


FIG. 13 Courbes expérimentales charge-déplacement pour chargement vertical excentré.  
Experimental load versus displacement curves for a vertical centred force.

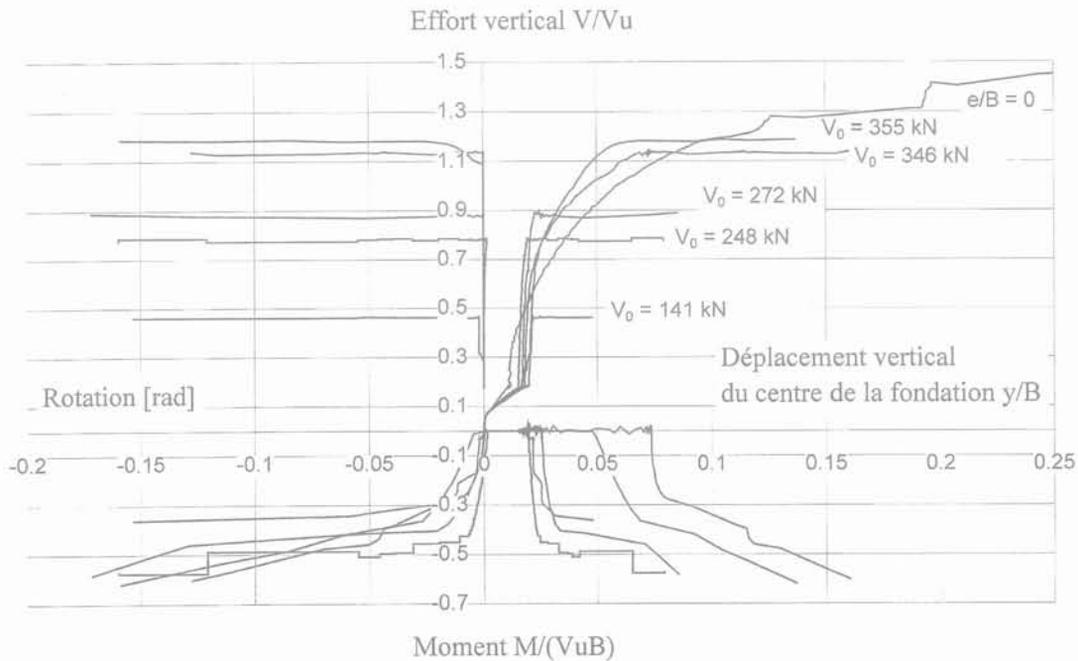
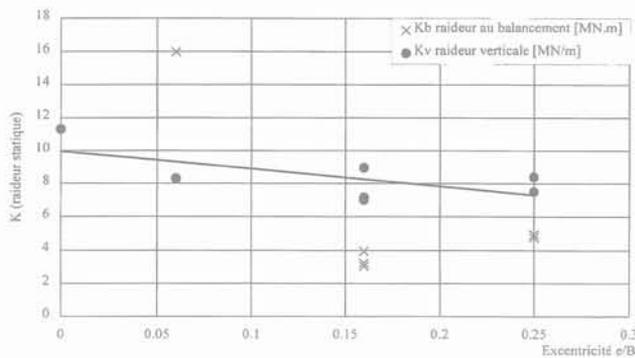


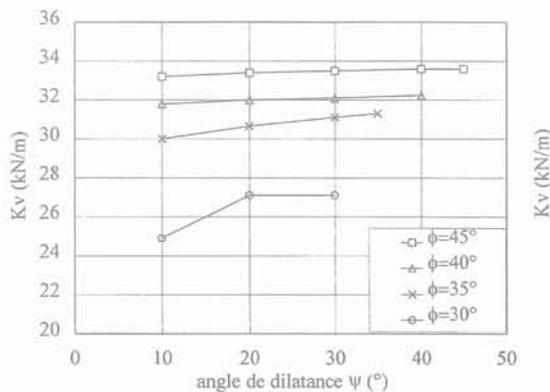
FIG. 14 Courbes expérimentales charge-déplacement pour chargement découplé (préchargement vertical + moment).  
Experimental load versus displacement curves for an uncoupled loading (vertical preloading and moment load).

– la raideur au balancement du système sol-fondation augmente en fonction du préchargement vertical appliqué. Cela signifie qu'après un préchargement vertical, la raideur du massif de sol augmente, mais des ruptures localisées apparaissent. Lorsqu'on applique ensuite sur la fondation un moment d'axe horizontal, la rotation engendrée est plus importante que pour un sol vierge de tout préchargement.

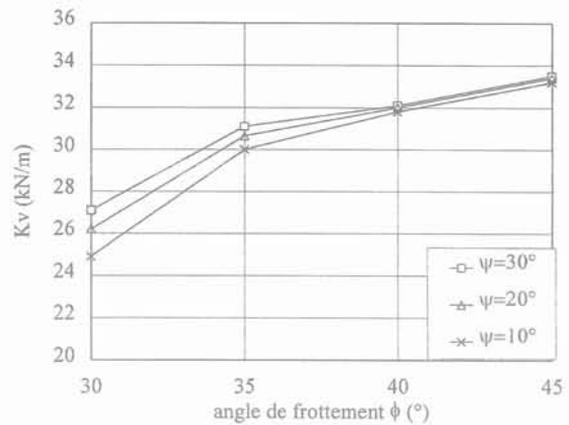
En ce qui concerne les raideurs statiques verticales on établit expérimentalement que les valeurs obtenues dépendent de l'excentricité de la charge appliquée (Fig. 14 et 15). On sait en effet que la raideur verticale ( $K_v$ ) du système sol-fondation diminue de manière quasi linéaire en fonction du rapport  $e/B$ . On établit également grâce à une analyse paramétrique l'influence des paramètres intrinsèques du sol (angle de frottement interne et angle de dilatanse) sur la raideur verticale  $K_v$  (Fig. 16 et 17). Il reste à déterminer une formulation des raideurs statiques permettant la prise en compte de ces paramètres. Les formulations actuelles (Wong *et al.*, 1976 ; Rücker, 1982 ; Schmid, 1988 d'après Sieffert, 1992) ne prennent en considération que les paramètres suivants : le module d'Young et le coefficient de Poisson du sol, et la géométrie de la fondation.



**FIG. 15** Variation des raideurs verticales et au balancement avec l'excentricité de la charge appliquée (résultats expérimentaux).  
Vertical and rocking stiffnesses variation with the load eccentricity (experimental results).

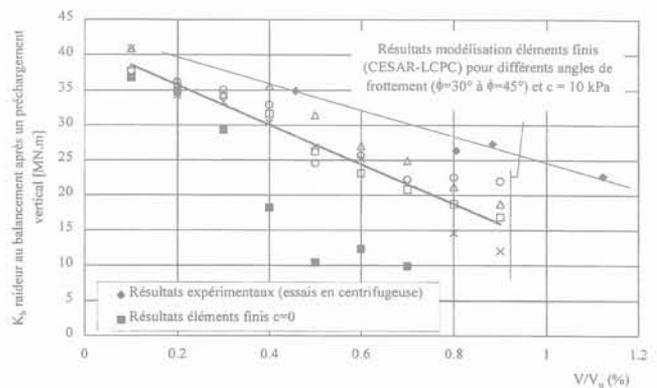


**FIG. 16** Variation de la raideur verticale sol/fondation en fonction de  $\psi$  (résultats numériques CESAR-LCPC).  
Vertical soil/foundation stiffness variation versus  $\psi$  (numerical results of CESAR-LCPC).



**FIG. 17** Variation de la raideur verticale sol/fondation en fonction de  $\phi$  (résultats numériques CESAR-LCPC).  
Vertical soil/foundation stiffness variation versus  $\phi$  (numerical results of CESAR-LCPC).

On établit à partir des essais en centrifugeuse que la raideur statique au balancement du système sol-fondation ( $K_b$ ) décroît également lorsque l'excentricité de la charge augmente. Les essais dits découplés ont permis de montrer que la valeur de  $K_b$  diminue lorsque la valeur du préchargement vertical sur la fondation augmente (Fig. 18). Cela signifie que plus le préchargement vertical appliqué sur la fondation est important, plus la raideur au balancement est faible. Ce phénomène peut être imputé au fait que lors du préchargement vertical, le sol se plastifie en certains points, donc le module d'Young du sol diminue, et le moment qui peut être appliqué alors est plus faible que dans le cas d'un sol vierge de tout préchargement. Si l'on applique un moment sur la fondation après un préchargement vertical important, la rotation induite sera donc plus forte. L'analyse paramétrique effectuée montre également que la raideur au balancement du système sol-fondation dépend de la cohésion du sol (Fig. 18).



**FIG. 18** Variation de la raideur au balancement en fonction du préchargement vertical appliqué (résultats expérimentaux).  
Rocking stiffness versus applied vertical preloading (experimental results).

## Conclusion

En conclusion, nous avons mis en évidence le comportement d'une fondation carrée rigide sous des chemins de chargement complexes couplés et découplés.

Par contre, nous avons vu que l'interprétation des essais excentrés et découplés et l'établissement d'une courbe d'interaction unique n'est pas évidente. Une méthode prédictive du comportement sous chargement vertical centré est proposée. Il reste maintenant à étendre cette méthode pour avoir l'évolution de la raideur du système sol-fondation sous chargement complexe. La démarche est d'exprimer la courbe limite à partir de laquelle on peut établir les différents comportements à l'intérieur de ce domaine. Enfin, il faut examiner les cas de déchargement et rechargement complexe monotone ou cyclique.

### REMERCIEMENTS

Cette étude a été effectuée dans le cadre de missions scientifiques de courte durée du COST C7. Nous tenons à remercier également pour son accueil les professeurs H.L. Jessberger et Th. Triantafyllidis, ainsi que toute l'équipe du laboratoire de mécanique des sols et des fondations de l'Université de Bochum.

En ce qui concerne la courbe d'interaction M-V, son unicité n'est pas établie. Du fait des allures des courbes charge-déplacement, les valeurs des charges limites et donc l'allure de la courbe d'interaction dépendent du critère de rupture choisi. En effet, nous avons établi ci-dessus que la valeur de la capacité portante varie avec les conditions géométriques considérées (augmentation de la capacité portante si l'on considère le terme d'enfouissement dû au tassement de la fondation par exemple). En résumé, on constate que plus le déplacement vertical de la fondation augmente, plus la courbe d'interaction se « dilate », alors qu'elle se « contracte » lorsque la fondation subit une rotation. On ne peut donc exprimer une formulation pour la courbe d'interaction à partir des résultats des essais réalisés, ni affirmer son unicité. La solution consiste peut-être à déterminer une courbe d'interaction initiale par l'analyse limite (pour un chargement vertical avec différentes excentricités), avec des conditions géométriques inaltérées (ni enfouissement, ni rotation).

On peut ensuite extrapoler l'évolution de cette courbe d'interaction grâce aux résultats d'analyse limite en configuration géométrique initiale modifiée (avec enfouissement et/ou rotation de la semelle) qui seront corrélés avec les résultats expérimentaux par analyse inverse.

## Bibliographie

- Butterfield R. – « A simple analysis of the load capacity of rigid footings on granular materials ». Journée de géotechnique, ENTPE, Vaux-en-Velin, 1980, p. 128-137.
- Canepa Y., Garnier J., Amar S., Corté J.-F. – « Confrontation d'essais de chargement de fondations superficielles réalisées en vraie grandeur et en centrifugeuse ». *Centrifuge 88*, Balkema, p. 313-321.
- COST C1 – « Semi-rigid behaviour of civil engineering structural connections ». COST C1, *Proceedings of the first state of the art Workshop*, Ed. Colson A., ENSAIS, université Louis-Pasteur, 28-30 oct. 1992, 582 p.
- De Beer E.E. – « Influence on the mean normal stress on the shearing strength of sand ». *Proc. of the VI ICSMFE*, Montreal, 1965.
- Georgiadis M., Butterfield R. – « Displacements of footings on sand under eccentric and inclined loads ». *Can. Geotech. J.* 25, 1987, p. 199-212.
- Gilbert C. – « Une nouvelle approche des calculs d'interaction sol-structure. *Revue française de géotechnique* n° 72, 3<sup>e</sup> trimestre 1995, p. 3-9.
- Gusmao J.A.F., Guimaraes L.J.N. – « Limit stiffness in soil structure interaction of building ». *ICSMFE Hamburg 1997*, p. 807-808.
- Hansen B. – « Discussion on hyperbolic stress-strain response : cohesive soils ». *Journal Soil Mech Found Div, ASCE* 89, SM2, 1963, p. 242.
- Kusakabe O., Yamaguchi H., Morikage A. – « Experiment and analysis on the scale effect of  $N_y$  for circular and rectangular footings ». *Centrifuge 91*, 1991, Balkema, p. 179-186.
- Laue J. – « Zur Setzung von Flachfundamenten auf Sand unter wiederholten Lastereignissen, Schriftenreihe des Instituts für Grundbau, Ruhr-Universität Bochum ». *Heft 25*, 1996, 140 p.
- Pu J.-L., Ko H.-Y. – « Experimental determination of bearing capacity in sand by centrifuge footing tests ». *Centrifuge 88*, Balkema, 1988, p. 293-299.
- Sieffert J.-G., Cevaër F. – *Manuel des fonctions d'impédances, Fondations superficielles*. Ouest Éditions, Presses académiques, 1991, 174 p.
- Vesic A.S. – « Analysis of ultimate loads of shallow foundations ». *Journal Soil Mech Found Div, ASCE* 99, SM1, janvier 1973, p. 45-73.