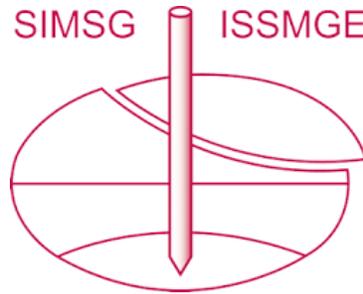


# INTERNATIONAL SOCIETY FOR SOIL MECHANICS AND GEOTECHNICAL ENGINEERING



*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.*

# Comportement global d'une fondation superficielle établie à proximité d'un talus

## Global behaviour of a shallow foundation near a slope

S.Maloum & Y.Le Pape – *Doctorants LERGEC, Ecole Nationale Supérieure des Arts et Industries de Strasbourg, 24, bd de la victoire, 67024 Strasbourg cedex, France*

A.-H.Soubra – *Professeur LGCNSN, IUP Génie Civil et Infrastructures, Bd de l'Université-BP 152, 44603 Saint Nazaire Cedex France*

J.-G.Sieffert – *Professeur LERGEC, Ecole Nationale Supérieure des Arts et Industries de Strasbourg, 24, bd de la victoire, 67024 Strasbourg cedex, France*

**RESUME :** Le problème de l'interaction sol-fondation superficielle au voisinage d'un talus est étudié. L'aspect stabilité est abordé par trois approches, dont les résultats ont permis d'établir une formulation des diagrammes d'interaction : (i) une analyse de résultats d'essais centrifugés réalisés au Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC) de Nantes, (ii) des résultats théoriques issus de l'application du théorème de la borne supérieure de l'analyse limite, (iii) des résultats de simulations numériques, obtenus à l'aide du logiciel aux éléments finis CESAR-LCPC. Une analyse de la cinématique de la fondation, fondée sur ces derniers résultats est ensuite proposée. Enfin, un modèle d'interaction sol-fondation superficielle de type macro-élément, fondé sur les études effectuées précédemment, est développé, dans le cadre de l'élastoplasticité non associée, en tenant compte des effets induits par la géométrie de la surface du massif. Il permet de suivre l'évolution des déplacements en fonction de l'histoire du chargement.

**ABSTRACT:** The influence of the proximity of a slope upon soil-shallow foundation interaction is investigated. The synthesis of the results obtained from three approaches allows to establish a formulation of an interaction diagram : (i) an analysis of centrifuged tests data base carried out by the Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC) of Nantes, (ii) theoretical results issued from the application of the upper-bound theorem of limit analysis, (iii) numerical results obtained with CESAR-LCPC finite elements code. The analysis of the foundation kinematic based on numerical results, is proposed later, for different steps of the loading. Finally, a soil-shallow foundation interaction macro-element model is developed within the framework of the non-associated time-independent elastoplasticity. It is based on the two mentioned above studies, and takes into account the effects induced by the ground surface geometry. This model allows to compute the total displacements at any step of loading history.

## 1 INTRODUCTION

La conception classique des fondations superficielles repose sur la connaissance de la charge admissible par le sol ainsi que des tassements tolérés par la superstructure. Une littérature abondante, traitant de l'interaction sol-fondation superficielle, témoigne de l'importance accordée à ce sujet : le phénomène d'interaction d'une structure avec le sol environnant traduit les effets mécaniques réciproques qu'exerce un élément sur l'autre du fait de leur appartenance à deux domaines connexes. Son degré d'importance varie en fonction des caractéristiques de l'ouvrage, du type de fondation, de la nature du sol et de sa géométrie.

La configuration classique souvent abordée dans ce thème, est relative au cas d'une fondation établie sur un massif horizontal. Cependant, la gestion de l'espace urbain peut imposer certaines contraintes aux ouvrages, telles que les établir non plus sur des terrains horizontaux, mais soit sur une pente, soit à proximité d'un talus. Ce dernier cas de figure correspond à la géométrie du problème considéré dans cette communication. L'étude est restreinte au cas d'une fondation superficielle filante, établie à une distance  $d$  (égale à la largeur  $B$  de la fondation) de la crête

d'un talus d'angle  $\beta$ , taillé dans un massif de sable (Fig 1), et sollicitée par un chargement statique centré-incliné.

Une synthèse bibliographique montre que les travaux de recherche se sont davantage focalisés sur la formulation empirique du coefficient réducteur de la portance  $i_{\beta}$  [Bakir, 1993], attribuable à la proximité du talus pour le cas d'un chargement statique vertical centré, et sur les formulations de  $i_{\beta\beta}$ ,  $i_{e\beta}$  et  $i_{e\beta\beta}$ , respectivement pour les chargements centrés inclinés, verticaux excentrés et inclinés excentrés, afin d'estimer l'influence du couplage talus-inclinaison/excentricité de la charge sur la capacité portante [Maréchal, 1999]. La cinématique de la fondation ainsi que les phénomènes localisés (glissement et décollement) au niveau de l'interface sol-fondation, restent quant à eux, encore méconnus quels que soient le type et le chemin de chargement imposé. L'objectif visé dans cette communication, est la construction d'un modèle global, de type macro-élément sol-fondation superficielle rigide, établie en bord de talus. La loi globale de comportement lie les déplacements du centre de la semelle aux forces exercées par la fondation sur le sol d'assise. Seul le cas des évolutions indépendantes du temps est considéré. Deux étapes préliminaires sont requises : l'étude de la capacité portante et la cinématique. Elles permettent l'établissement des surfaces de charge et de potentiel plastique.

## 2 ANALYSE DE LA CAPACITE PORTANTE

### 2.1 Concept de diagramme d'interaction

La formulation traditionnelle de la capacité portante d'une fondation non enfouie en bord de talus, repose sur l'évaluation de la contrainte normale ultime donnée par la formule suivante :

$$q_u = \frac{1}{2} N \gamma B i_{\beta\beta} \quad (1)$$

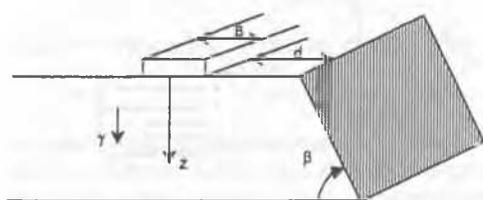


Figure 1 : Géométrie du problème

La méthode des diagrammes d'interaction, proposée pour la première fois par [Butterfield & Tiof, 1979], offre une alternative de représentation de la capacité portante de la fondation, compatible avec le concept de surface de charge de la théorie de la plasticité. Il s'agit de considérer les enveloppes des valeurs à la ruine des charges appliquées, dans l'espace des composantes de sollicitations admissibles par le sol.

Il est notoire que le facteur  $N_\gamma$  exhibe des dispersions importantes suivant les auteurs. Dans le souci de s'affranchir des effets induits par ce terme, [Paolucci & Pecker, 1997] ont proposé de normaliser ces composantes, par la valeur de la charge de ruine obtenue pour le cas de référence  $N_\gamma B/2$  (fondation sur plan horizontal, sollicitée par un chargement vertical centré). La non-symétrie de la surface libre implique l'étude des cas d'inclinaisons positives et négatives distinctement. La convention de signes adoptée considère que l'inclinaison est positive si la charge est dirigée vers le talus.

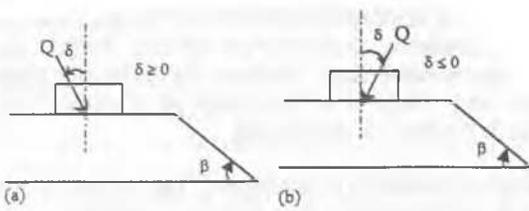


Figure 2: (a) Inclinaison positive ; (b) Inclinaison négative

Dans le premier cas (Fig 2.a), les effets de l'inclinaison du chargement ainsi que ceux de la proximité du talus sont cumulatifs, alors que dans le second (Fig 2.b), ils sont dits antagonistes. Une analyse comparative concernant les diagrammes obtenus suivant trois approches est effectuée dans ce qui suit.

### 2.2 Approche expérimentale

Des essais centrifugés à 50g, réalisés par le Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC) de Nantes [Maréchal, 1999], ont porté sur la simulation du comportement global d'un prototype de largeur  $B=2m$ , sous chargements quasi- statiques. Les modèles réduits de fondations superficielles filantes ont été simplement déposés, sur un massif de sable sec et homogène de Fontainebleau, dans lequel, un talus d'angle  $\beta$  a été taillé (Fig 1). Des capteurs de déplacement ont permis de contrôler l'évolution de la cinématique de la fondation rigide, à base rugueuse, en fonction du chargement. Le critère de ruine expérimentale fixé correspond à l'initiation des « grands déplacements ».

### 2.3 Analyse limite

L'approche cinématique de la théorie de l'analyse limite est utilisée. Le sol est modélisé par un matériau standard de Coulomb. L'adhérence sol-fondation est supposée parfaite. Deux mécanismes de rupture cinématiquement admissibles, M1 et M2 sont étudiés. (i) Le mécanisme de rupture M1 (Fig 3) asymétrique, similaire à celui proposé par [Soubra, 1999] dans le cas d'une approche pseudo-statique de la capacité portante des fondations filantes sur sol horizontal et soumises à des actions sismiques, est proposé pour rendre compte des effets antagonistes (force dirigée vers l'intérieur du talus). Ce mécanisme, est composé d'une succession de blocs triangulaires rigides. Il est important de noter que le mécanisme M1 suppose que le talus n'a pas d'incidence sur la capacité portante d'une fondation rigide chargée par une force dirigée vers l'intérieur du talus. Cette hypothèse sera discutée par la suite. (ii) Le mécanisme M2 permet la prise en compte explicite de l'effet du

talus. Il correspond au cas des effets cumulatifs (force dirigée vers le talus). Dans les deux cas, l'écriture de l'équation du bilan énergétique permet de déterminer la charge de ruine. La charge critique est obtenue par minimisation numérique par rapport aux différents paramètres angulaires.

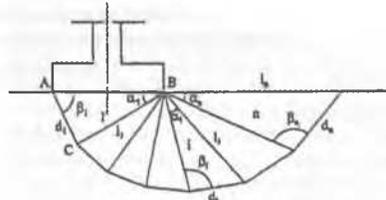


Figure 3 : Mécanisme de rupture M1

### 2.4 Simulation numérique

La troncature géométrique du massif a été effectuée de manière à assurer un déplacement nul, loin de la fondation. Afin de réduire les problèmes de convergence numérique dus à une distorsion excessive des éléments, le passage du maillage d'un état lâche à un état fin, suit une progression géométrique. Des éléments finis quadratiques isoparamétriques à 8 nœuds ont été adoptés pour le système sol-fondation. Le comportement de la fondation est élastique linéaire isotrope ( $E = 71.10^6$  kPa,  $\nu = 0,33$ ). L'interface, maillée par des éléments de contact sans épaisseur, rend compte des glissements éventuels. On adopte, pour le sol et l'interface, un comportement de type élasto-plastique associé, sans écrouissage avec un critère de Mohr-Coulomb ( $E = 65.10^3$  kPa,  $\nu = 0,3$  ;  $\gamma = 16$  kN/m<sup>3</sup>,  $\phi = 37,5^\circ$ ). Pour remédier à des problèmes de convergence numérique, une très faible cohésion ( $c = 0.5$  KPa) a été adoptée pour le sol ainsi que l'interface.

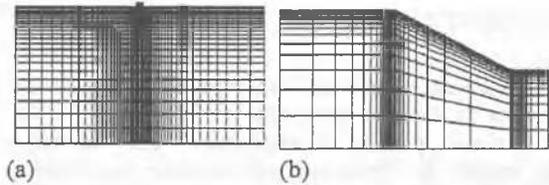


Figure 4 : (a) Discrétisation du massif horizontal ; (b) Discrétisation du massif comportant un talus

## 3 FORMULATION MATHÉMATIQUE DES DIAGRAMMES D'INTERACTION

Les résultats, obtenus par les trois approches précitées, sont reportés sur la figure ci-dessous. La représentation est effectuée dans le plan  $(h,v)$  où  $v$  et  $h$  désignent respectivement les composantes normées verticale et horizontale du chargement.

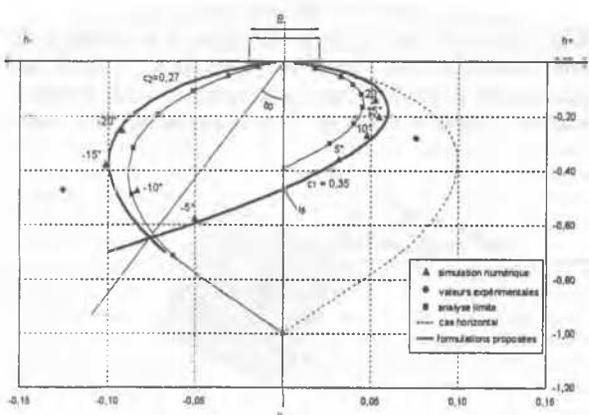


Figure 5 : Résultats obtenus par les trois approches

Les charges de ruine expérimentales enregistrées (pour  $\delta = \pm 15^\circ$ ) sont nettement supérieures à celles obtenues par les deux autres approches. Ce résultat est induit par la dépendance de l'angle de frottement interne vis-à-vis de la pression effective [Hettler & Gudehus, 1988].

Quant aux résultats déduits de la simulation numérique, ils majorent systématiquement ceux de l'analyse limite. La dissymétrie du diagramme est induite par la présence du talus dont l'influence peut être identifiée par comparaison avec le cas d'une surface libre horizontale.

Cette influence est notable aussi bien pour les effets cumulatifs qu'antagonistes, jusqu'à une certaine inclinaison de la charge notée  $\delta_0$ . Ainsi, le diagramme d'interaction peut être mathématiquement défini par le domaine convexe limité par les courbes d'équations :

$$\text{pour } \delta \leq \delta_0 \quad f(h, v) = h - c_2 v \ln(1/v) = 0 \quad (2)$$

et

$$\text{pour } \delta \geq \delta_0 \quad f(h, v) = h + c_1 v \ln(i_\beta/v) = 0 \quad (3)$$

L'équation (2) a été proposée par [Le Pape, 2000] pour le cas du plan horizontal. L'équation (3) utilise une forme mathématique similaire dans laquelle le facteur de réduction  $i_\beta$  dû à la présence de la pente a été introduit. Les coefficients  $c_1$  et  $c_2$  dont les valeurs sont indiquées sur la figure (5), contrôlent les positions et les valeurs des extrema de sollicitations horizontales. Les équations (2) et (3) décrivent une enveloppe pouvant être interprétée comme une surface de charge par la théorie de la plasticité.

#### 4 ANALYSE DE LA CINEMATIQUE DE LA FONDATION

L'hypothèse d'associativité étant incompatible avec l'établissement d'une loi de comportement globale sol-fondation [Montrasio & Nova, 1988], la connaissance d'un potentiel plastique déduit de l'étude de la cinématique de la fondation, est exigée. En effet, la trajectoire de la semelle, c'est-à-dire la représentation des déplacements horizontaux en fonction des déplacements verticaux, est une représentation continue de la normale au potentiel plastique [Gottardi & Butterfield, 1995]. Une analyse paramétrique portant sur l'angle de dilataance a été effectuée, dans le but de mettre en évidence son influence sur la cinématique de la fondation. La figure ci-dessous représente l'ensemble des trajectoires obtenues pour  $\delta \in [-20^\circ, 20^\circ]$ , pour différents angles de dilataance.

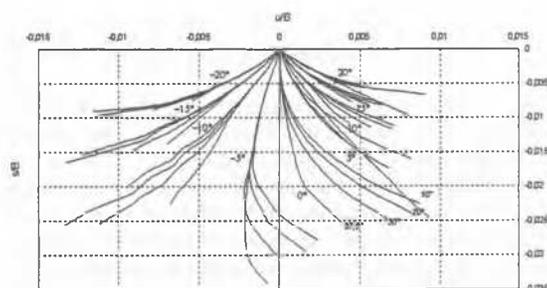


Figure 6 : Trajectoires en fonction de l'inclinaison et de la dilataance (37.5°, 30°, 20° et 10°)

La non-linéarité du comportement du système sol-fondation est mise en évidence. La direction de la trajectoire est amorcée par une phase élastique suivie d'une phase non linéaire amplifiant les déplacements horizontaux, ou dans le cas particulier des faibles valeurs d'inclinaisons négatives, inversant

progressivement la direction des déplacements horizontaux vers le talus.

#### 5 MODELE GLOBAL

La construction d'un modèle global élastoplastique de comportement sol-fondation superficielle, en bord de talus, repose sur la détermination de trois quantités : (i) les surfaces de charge  $f(v, h, \zeta)$  formulées, à partir des diagrammes d'interaction. Pour notre étude, une loi de type isotrope contrôlée par un paramètre scalaire  $\zeta$  rendant compte de l'expansion uniforme de la surface de charge vers la surface enveloppe de ruine, est adoptée. (ii) Les surfaces de potentiel plastique  $g$  ne sont pas formulées explicitement. L'utilisation de la règle de normalité et l'étude de la cinématique permettent de les déterminer indirectement par l'analyse de la direction. Cette analyse est effectuée, à l'approche de la ruine des trajectoires simulées numériquement pour différentes inclinaisons du chargement extérieur. La loi ci-dessous est proposée :

$$\partial g / \partial h = (a \tan \delta + b) \partial g / \partial v \quad (4)$$

où  $a$  et  $b$  sont deux paramètres dépendant de la dilataance. Contrairement au cas des fondations sur surfaces libres horizontales,  $b$  est non nul, et traduit l'observation de déplacements horizontaux pour un chargement vertical centré. (iii) Enfin, la loi « d'écrouissage » de type hyperbolique proposée est issue de l'observation du comportement induit par une charge verticale centrée.

$$v \cdot \frac{1}{2} N_\gamma \gamma B = K \cdot \left( 1 - \frac{v}{v^*} \right) \cdot s \quad (5)$$

où  $K$  et  $v^*$  désignent respectivement la raideur à l'amorce du chargement et un paramètre qui contrôle la vitesse de transition de l'état initial à la ruine.

La figure (7) présente les trajectoires obtenues par la méthode des éléments finis d'un côté, et celles déduites du modèle global de l'autre.

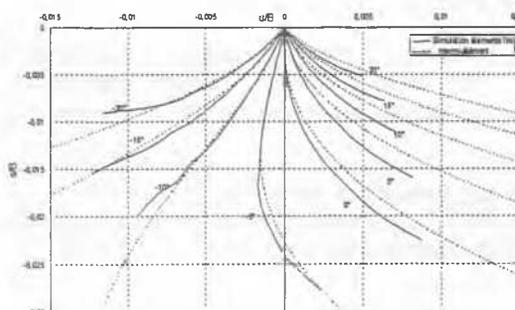


Figure 7 : Comparaison : simulation par éléments finis – modèle de type macro-élément

En ce qui concerne le domaine des inclinaisons négatives, la comparaison est satisfaisante. On note, cependant, des écarts du côté des inclinaisons positives, correspondant au chargement dans le sens du talus.

#### 6 CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Bien que très efficace pour le dimensionnement et la prévision du comportement des ouvrages, la méthode des éléments finis présente un inconvénient majeur relatif aux temps de calculs induits par le grand nombre de degrés de liberté. Pour remédier

à cela, une alternative consiste à développer un macro-élément capable de traduire de manière cohérente, le comportement de l'interaction sol-structure. Il a été montré comment les concepts usuels de la géotechnique (capacité portante et cinématique des ouvrages) peuvent être utilisés dans le cadre de la construction d'un modèle global élastoplastique de comportement sol-fondation superficielle. Les effets de la proximité du talus sur la ruine ont été mis en évidence par une approche comparative exhaustive entre les différentes méthodes d'investigations disponibles. L'influence qualitative de la valeur de l'angle de dilatance du sable sur la cinématique de la fondation a été mise en évidence par le biais de résultats issus de la simulation numérique par éléments finis. Le modèle proposé est extrêmement simple et requiert certainement des améliorations quant à la formulation d'un potentiel plastique plus sophistiqué avec une prise en compte plus adéquate de l'influence du talus. La dépendance des paramètres introduits dans le macro-modèle vis-à-vis des paramètres intrinsèques du sol et des paramètres relatifs à la géométrie de la surface libre doit être étudiée en détails.

#### REFERENCES

- Bakir, N. 1993. Etude sur modèles centrifugés de la capacité portante de fondations superficielles. *Thèse de Doctorat de l'Ecole Centrale de Nantes*.
- Butterfield, R. & Ticof, J. 1979. Discussion : Design parameters for granular soils. Seventh European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Brighton, U.K, vol 4, 259-262.
- Gottardi, G. & Butterfield, R. 1995. The displacement of a model rigid surface footing on dense sand under general planar loading. *Soils and foundations*, 35(3): 71-82.
- Hettler, A. & Gudehus, G. 1988. Influence of the footing width on the bearing capacity factor. *Soils and foundations*, 28(4): 81-92.
- Le Pape, Y. 2000. Modélisation globale des liaisons : application à l'interaction sol-structure. *Thèse de Doctorat de l'Université Louis Pasteur, Strasbourg I*.
- Maréchal, O. 1999. Portance des fondations superficielles établies à proximité de talus et soumises à des chargements inclinés et excentrés. *Thèse de Doctorat de l'Ecole Centrale de Nantes*.
- Montrasio, L. & Nova, R. 1988. Assestamenti di una fondazione modello sotto carico inclinato : risultati sperimentali e modellazione matematica. *Rivista Italiana di Geotecnica*, 1: 35-49.
- Paolucci, R. & Pecker, A. 1997. Seismic bearing capacity shallow strip foundations. *Earth. Eng.*, 36(3): 95-105.
- Soubra, A. 1999. Upper-bound solutions for bearing capacity of foundations. *Geotech. and Geoenv. Eng.*, 125(1): 59-68.