



HAL
open science

Etude de la capacité portante des fondations sur inclusions rigides

Yuxiang Shen, Jesús Pérez-Herreros, Fahd Cuira, Jean-François Semblat, Sébastien Burlon

► **To cite this version:**

Yuxiang Shen, Jesús Pérez-Herreros, Fahd Cuira, Jean-François Semblat, Sébastien Burlon. Etude de la capacité portante des fondations sur inclusions rigides. 11ème Colloque National de l'AFPS (Association Française du Génie Parasismique), Nov 2023, Le Gosier, France. hal-04478305

HAL Id: hal-04478305

<https://hal.science/hal-04478305>

Submitted on 26 Feb 2024

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Etude de la capacité portante des fondations sur inclusions rigides

Yuxiang Shen^{1*}, Jesús Pérez-Herreros², Fahd Cuira³, Jean-François Semblat⁴, Sébastien Burlon⁵

¹ IMSIA (UMR 9219), CNRS, EDF, CEA, ENSTA Paris, Institut Polytechnique de Paris, Palaiseau, France / TERRASOL (Groupe SETEC), Paris, France, e-mail: yuxiang.shen@setec.com

² TERRASOL (Groupe SETEC), Paris, France, e-mail: jesus.perez@setec.com

³ TERRASOL (Groupe SETEC), Paris, France, e-mail: fahd.cuira@setec.com

⁴ IMSIA (UMR 9219), CNRS, EDF, CEA, ENSTA Paris, Institut Polytechnique de Paris, Palaiseau, France, e-mail: jean-francois.semblat@ensta-paris.fr

⁵ TERRASOL (Groupe SETEC), Paris, France, e-mail: sebastien.burlon@setec.com

Résumé. La méthode de calcul à la rupture est un outil fondamental pour l'évaluation de la capacité portante des fondations soumises à des charges sismiques. En particulier, l'approche cinématique par l'extérieur a été utilisée avec succès pour déterminer la capacité portante de fondations superficielles sur des sols cohérents et frottants. Cette étude vise à étendre cette approche aux fondations renforcées par inclusions rigides. Le domaine de stabilité dans l'espace (N, V, M) des fondations sur inclusions rigides est obtenu par superposition des domaines de stabilité des fondations sur sol frottant non-renforcé et sur sol cohérent avec renforcement. Les inclusions jouant un rôle stabilisant sont prises en compte par leur action à l'intersection avec la surface de rupture. Les résultats montrent que le renforcement avec inclusions rigides augmente la résistance de la fondation sous charge sismique. De plus, le domaine de stabilité obtenu peut être directement implémenté dans un modèle de type « macro-élément » dans le cadre d'une étude d'interaction sol-structure non-linéaire.

ABSTRACT. The yield design theory is a crucial tool for evaluating the bearing capacity of foundations when subjected to seismic loading. The upper bound kinematic approach, in particular, has proven effective for evaluating the bearing capacity of shallow foundations on cohesive and frictional soils. This study aims to extend this approach to foundations on rigid inclusions. The yield surface in the (N, V, M) space is obtained by superimposing the yield surface of shallow foundations on non-reinforced frictional soil and that of inclusion reinforced cohesive soil. The inclusions are taken into account by their effect at the intersection with the failure surface. The results of this study demonstrate that reinforcement with rigid inclusions can efficiently increase the resistance of the foundation under seismic loading. Furthermore, the obtained yield surface can be directly implemented in a "macro-element" model in the framework of a nonlinear soil-structure interaction study.

Mots Clés : Calcul à la rupture, approche cinématique par l'extérieur, fondation sur inclusions rigides, PN ASIRI+

1. INTRODUCTION

La technique de renforcement par inclusions rigides (IR) constitue une solution alternative de fondation présentant des avantages techniques et économiques significatifs par rapport au concept conventionnel de fondation sur pieux. La correcte estimation de sa capacité portante sous charge sismique constitue un sujet clé pour effectuer sa conception. Une approche permettant d'évaluer la capacité portante des fondations sous charge sismique a été développé dans le cadre théorique du calcul à la rupture [1]. Elle a été largement utilisée dans

la recherche de la capacité portante des fondations superficielles sous charge statique inclinée et excentrée [2-3], ainsi que sous chargement sismique [4-6].

L'objectif de cette étude est d'évaluer la capacité portante des fondations filantes sur IR soumises à des charges sismiques. La configuration de ces fondations pose deux difficultés particulières pour les études analytiques basées sur l'approche cinématique :

- Le sol support est constitué de deux formations : une couche granulaire servant de plate-forme de transfert de charge (PTC) et une couche de sol mou et cohérent renforcé par IR ;
- La présence des IR rigidifie le système de fondation, ce qui peut avoir une incidence favorable sur la capacité portante sous charge sismique.

L'impact des forces d'inertie dans le sol a été étudié dans la présente étude mais n'est pas présenté dans cet abstract en raison de contraintes de pagination. Toutefois, les études antérieures montrent que la sollicitation sismique dans le sol a peu d'influence sur la capacité portante des fondations bien conçues, présentant un coefficient de sécurité statique supérieur à 3 [2]. Dans le cas particulier d'une fondation sur IR, la présence des IR contribue à augmenter la capacité portante sous charge statique. Par conséquent, l'effet d'inertie de sol est encore moins susceptible d'impacter la capacité portante d'une fondation sur IR.

2. MODÉLISATION DU PROBLÈME

2.1 Description du modèle

Le problème étudié comporte semelle filante soumise à une sollicitation sismique. Cette fondation est posée sur une demi-espace constitué d'une couche représentant la PTC d'épaisseur h_m , purement frottante et caractérisé par l'angle de frottement φ , et d'une couche de sol mou purement cohérent avec une cohésion c sans résistance à la traction et renforcé par IR, comme illustré sur la figure 1.

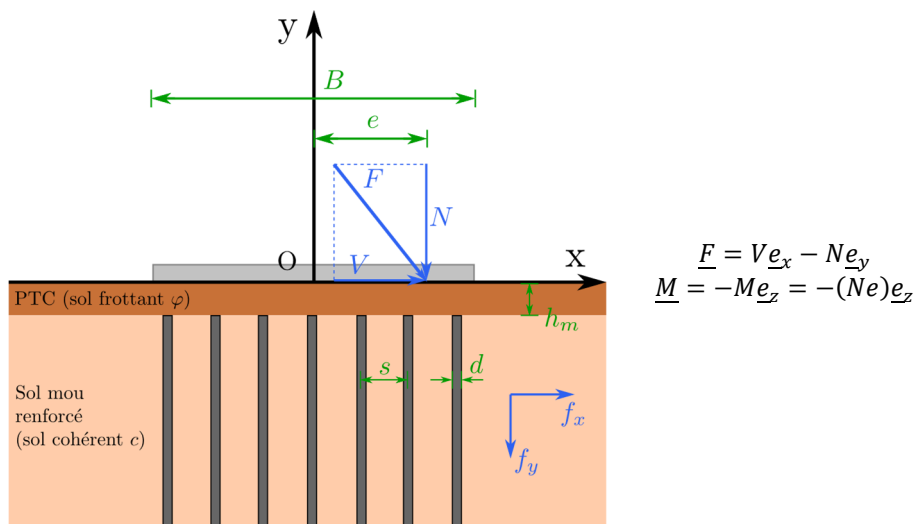


Figure 1 : Problème bidimensionnel de capacité portante d'une semelle renforcée par inclusions rigides sous charge sismique

Pour modéliser la sollicitation sismique, un torseur de forces verticales et horizontales (N, V) appliqué sur la semelle est considéré, ainsi que des forces volumiques qui représentent les effets d'inertie dans le sol. L'effort résultant des forces transmises à la semelle est noté \underline{F} et le

moment \underline{M} est calculé en multipliant l'effort vertical \underline{N} par l'excentrement e . Les efforts volumiques horizontal et vertical du sol sous charge sismique sont notés respectivement f_x et f_y .

2.2 L'approche cinématique par l'extérieur

L'approche cinématique par l'extérieur consiste à évaluer différents mécanismes cinématiques de rupture cinématiquement admissible \underline{U} pour lesquels on vérifie que la puissance des efforts extérieurs P_e est inférieure à la puissance résistante maximale P_m . En minimisant la puissance résistante maximale, on peut obtenir une majoration des chargements potentiellement admissibles [1].

$$P_m(\underline{U}) \geq P_e(\underline{U}) \quad (1)$$

La puissance résistante maximale P_m vaut :

$$P_m(\underline{U}) = \int_{\Omega} \pi(\underline{d}) d\Omega + \int_{\Sigma} \pi([\underline{U}]) d\Sigma \quad (2)$$

Où $[\underline{U}]$ désigne la discontinuité de \underline{U} au franchissement de Σ .

Pour un matériau sans résistance à la traction nous retrouvons [1] :

- Dans le volume Ω :

$$\pi(\underline{d}) = +\infty \text{ si } tr(\underline{d}) < 0 \quad (3)$$

$$\pi(\underline{d}) = C [|d_1| + |d_2| + |d_3| - tr(\underline{d})] \text{ si } tr(\underline{d}) \geq 0 \quad (4)$$

- Le long des lignes Σ de discontinuité de vitesse, de normale \underline{n} :

$$\pi([\underline{U}]) = +\infty \text{ si } [\underline{U}] \cdot \underline{n} < 0 \quad (5)$$

$$\pi([\underline{U}]) = C [[\underline{U}] - [\underline{U}] \cdot \underline{n}] \text{ si } [\underline{U}] \cdot \underline{n} \geq 0 \quad (6)$$

On note par P_e la puissance virtuelle de tous les efforts appliqués au système. Elle comprend les charges appliquées sur la semelle $\underline{F}(N, V, M)$ et les forces volumiques (f_x, f_y) engendrées par l'inertie dans le sol ainsi que la contribution stabilisante des inclusions rigides P_e^{IR} .

$$P_e = P_e^Q + P_e^f + P_e^{IR} \quad (7)$$

3. REPRISE DES ETUDES SUR LA PORTANCE D'UNE SEMELLE FILANTE SUR SOL NON RENFORCE

L'approche cinématique par l'extérieur a déjà été utilisée dans la littérature [2-4] pour l'étude de la capacité portante des semelles filantes posées sur des sols homogènes cohérents ou frottants et sous charge sismique. Différents champs de vitesse virtuels ont été proposés pour déterminer le domaine de stabilité tel qu'illustré sur les figures 2 et 3.

Ces champs de vitesse virtuels ont été repris dans la présente étude afin de valider dans un premier temps le code de calcul. Les résultats obtenus sont comparés à ceux disponibles dans les références [2,4,7] sur les figures 4 et 5.

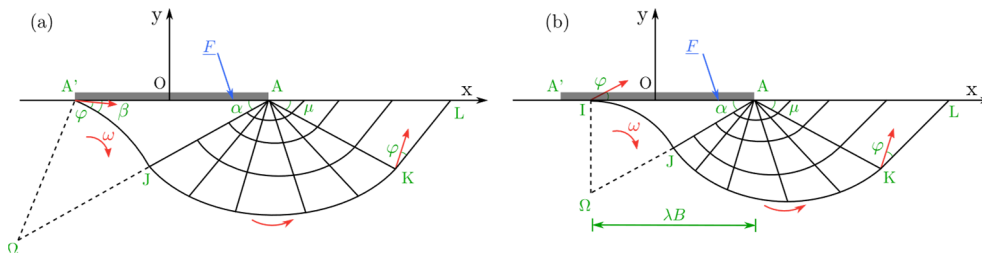


Figure 2 : Champs de vitesse pour une semelle rigide sur sol frottant proposés par Paolucci et Pecker [4] (a) sans décollement, (b) avec décollement

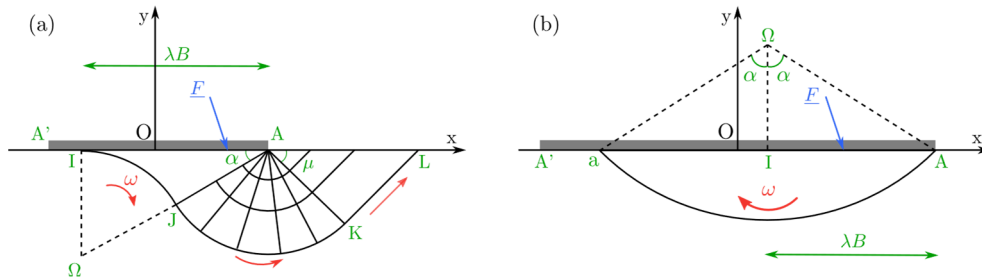


Figure 3 : Champs de vitesse pour une semelle rigide sur sol cohérent proposés par Pecker et Salençon [2] (a) mécanisme de cisaillement/rotation avec décollement, (b) mécanisme de rotation avec décollement

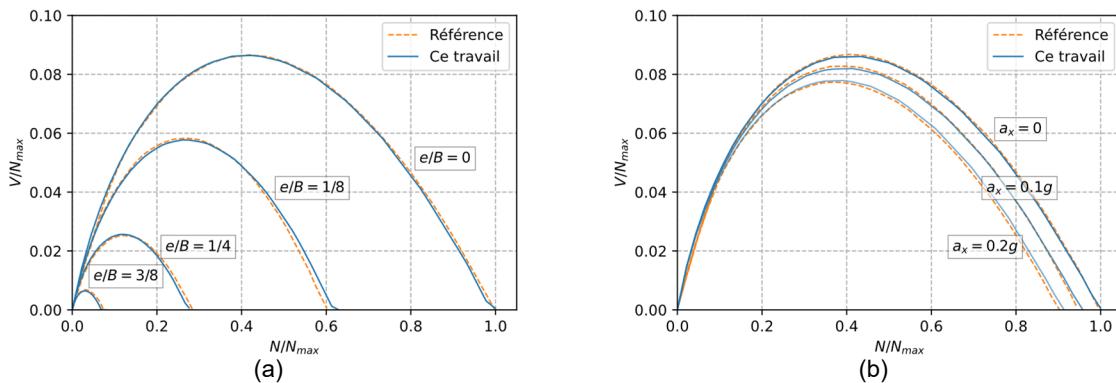


Figure 4 : Domaine de stabilité des fondations sur sol frottant, (a) effet de l'excentrement et (b) effet de l'inertie dans le sol

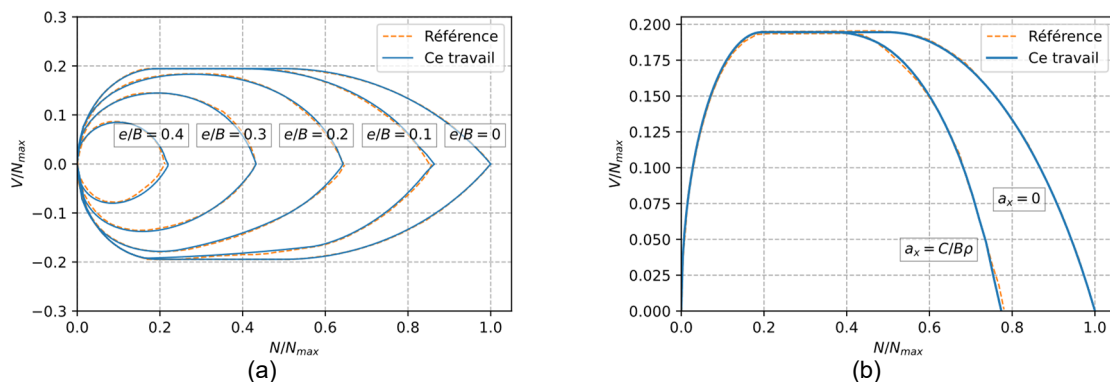


Figure 5 : Domaine de stabilité des fondations sur sol cohérent, (a) effet de l'excentrement et (b) effet de l'inertie dans le sol

4. CAPACITE PORTANTE D'UNE SEMELLE FILANTE SUR SOL RENFORCE PAR INCLUSIONS RIGIDES

4.1 Formulation du problème

Par rapport aux cas précédents où la semelle repose sur un demi-espace homogène infini, le cas d'une semelle renforcée par IR est caractérisé par la présence d'une PTC sur un sol mou renforcé. Afin de considérer ces particularités dans le calcul, le domaine de stabilité a été obtenu par superposition de deux cas simplifiés illustrées sur la figure 6:

- Cas I : sol frottant homogène sans renforcement pour une profondeur de rupture égale ou inférieure à l'épaisseur du matelas h_m ;
- Cas II : sol cohérent homogène avec prise en compte du renforcement par IR

Le cas I correspond aux modes de rupture superficiels se développant dans la PTC, tandis que le cas II désigne les modes de rupture se produisant dans le sol mou renforcé par IR.

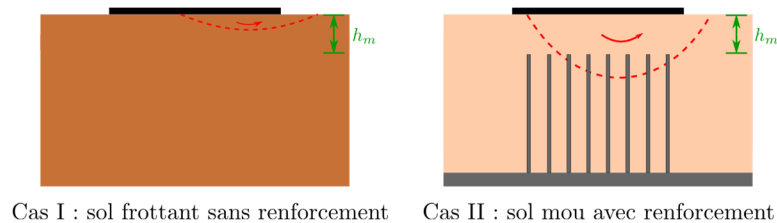


Figure 6 : Cas simplifiés utilisés pour étudier la capacité portante d'une semelle sur un sol renforcé avec des inclusions rigides

4.2 Prise en compte des inclusions rigides

Les inclusions sont prises en compte en considérant leur action à l'intersection avec la surface de rupture. Cette action est décomposée en un effort axial T_n et un effort de cisaillement T_c . Le point d'intersection entre l'inclusion et la surface de rupture est supposé ici comme un point de cisaillement maximal avec un moment fléchissant nul. Les efforts T_n et T_c dans les inclusions au droit de la surface de rupture, sont limités par les critères suivants :

- Résistance propre de l'inclusion (traction, cisaillement et moment fléchissant)
- Résistance d'interaction sol-inclusion (effort normal et frottement latéral)

L'hypothèse est faite que l'inclusion se comporte, près de la surface de rupture, comme une poutre sur appuis élastiques, dont la déformée est symétrique par rapport au point d'intersection avec la surface de rupture. Dans ce travail, il est supposé que la résistance propre de l'inclusion est significative. De ce fait, les efforts dans les inclusions, T_n et T_c , sont uniquement contrôlés par la résistance d'interaction sol-inclusion dans la présente étude.

L'effort axial est limité par le frottement latéral et les efforts en tête et en pointe de l'inclusion :

$$T_{nl} = \max (T_{tête} + q_s l_{int}, T_{pointe} + q_s l_{ext}) \quad (8)$$

L'interaction latérale inclusion-sol impacte l'effort tranchant T_c de l'inclusion.

- Pour $l \geq 2l_0$ avec la longueur de transfert l_0 :

$$T_{cl1} = p_l B \frac{l_0}{2} \quad (9)$$

- Pour $l < 2l_0$:

$$T_{cl1} = p_l B \frac{l}{4} \quad (10)$$

4.3 Configurations étudiées et résultats

Dans le cadre de cette étude, une configuration typique de fondation sur IR a été considérée. Cette configuration est composée d'une semelle de largeur de 10 m, reposant sur une PTC de 0.5 m d'épaisseur caractérisée par un angle de frottement de 38° . Le sol mou, considéré comme cohérent, présente une cohésion de 25 kPa ($q_s = 25$ kPa et $p_l = 200$ kPa). Les IR en béton de 0.4 m de diamètre et 10 m de longueur sont placées sous la fondation, sans

encastrement dans le matelas et avec un espacement de 1.5 m (le taux de substitution est de 5.6%).

Les domaines de stabilité sont calculés pour les deux cas élémentaires, puis superposés sur la figure 7(a) pour le cas sans excentrement. Les résultats sont également comparés avec ceux du cas sans renforcement. Il est intéressant de noter que la capacité portante sous chargement vertical centré augmente d'environ deux fois, passant de 1 285 kN à 2 266 kN. Les domaines de stabilité pour différents excentrement de la charge sont également présentés sur la figure 7(b). Il est intéressant de constater que, avec un excentrement de 0.2B, la capacité portante est d'environ la moitié de celle du cas sans excentrement.

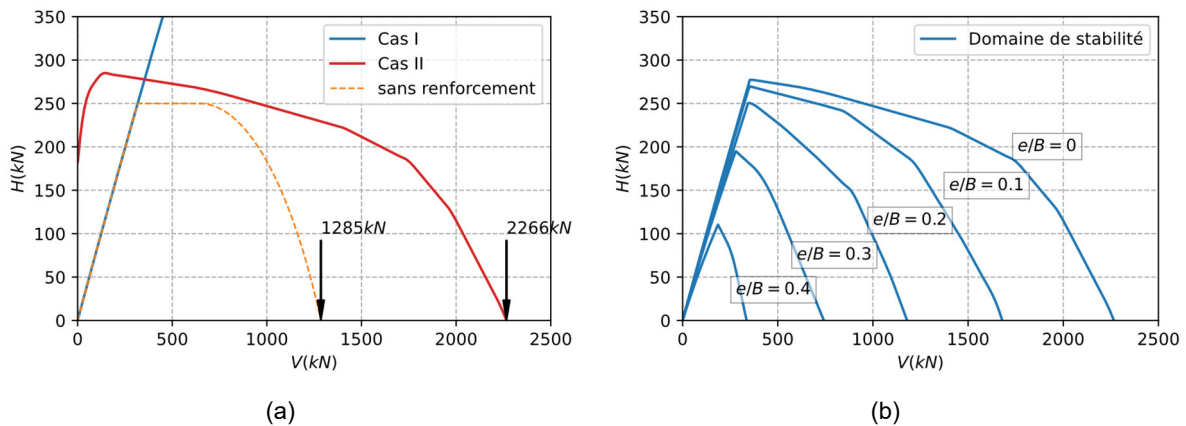


Figure 7: Domaine de stabilité d'une fondation sur inclusions rigides : (a) superposition des deux cas élémentaires ($e/B = 0$) et (b) effet de l'excentrement

5. CONCLUSIONS

Ce travail s'inscrit dans le cadre de la théorie de calcul à la rupture et utilise une approche cinématique par l'extérieur pour analyser la capacité portante des fondations sur IR. Le travail a commencé par reprendre les mécanismes de rupture déjà étudiés pour une semelle filante en suivant la prise en compte des IR. Étant donné la complexité des configurations de semelles renforcées, deux cas simplifiés ont été étudiées séparément et superposés afin d'obtenir le domaine de stabilité pour ce type de fondation.

Les résultats obtenus confirment une augmentation de capacité portante grâce à la présence des IR. L'évolution du domaine de stabilité en fonction de l'excentrement est présentée et discutée. Enfin, cette étude a également permis de confirmer le potentiel d'une telle approche pour en vue de son utilisation dans la pratique courante de la profession.

6. REFERENCES

- [1] Salençon J (1983) *Calcul à la rupture et analyse limite*. Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Paris, France.
- [2] Pecker A, Salençon J (1991) *Détermination de la capacité portante des fondations superficielles sous sollicitations dynamiques*. Compte rendu pour MRES.
- [3] Salençon J, Pecker A (1995) *Ultimate bearing capacity of shallow foundations under inclined and eccentric loads. Part II: purely cohesive soil without tensile strength*. Eur. J. Mech., A/Solids, 14(3):377-396.
- [4] Paolucci R, Pecker A (1997) *Seismic bearing capacity of shallow strip foundations on dry soils*. Soils dans foundations, 37(3):95-105.
- [5] Soubra AH (2000) *Upper-bound solutions for bearing capacity of foundations*. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 125(1):59-68.
- [6] Salençon J, Chatzigogos CT, Pecker A (2009) *Seismic bearing capacity of circular footings: a yield design approach*. Journal of mechanics of materials and structures, 4(2):427-440.
- [7] Pecker A (1997) *Analytical formulae for the seismic bearing capacity of shallow strip foundations*. Seismic behaviour of ground and geotechnical structures. CRC Press, Rotterdam, pp 261-268.