

CAPACITE PORTANTE DES FONDATIONS SUPERFICIELLES SUR SOL RENFORCE PAR INCLUSIONS RIGIDES

BEARING CAPACITY OF SHALLOW FOUNDATIONS ON REINFORCED SOIL WITH RIGID INCLUSIONS

Yuxiang Shen^{1,2}, Jesús Pérez-Herreros¹, Fahd Cuiria¹, Jean-François Semblat², Sébastien Burlon¹

¹ Terrasol, Paris, France

² IMSIA (UMR 9219), CNRS, EDF, ENSTA Paris, Institut Polytechnique de Paris, Palaiseau, France

RÉSUMÉ – Cette étude porte sur la détermination de la capacité portante des fondations superficielles sur sol renforcé par inclusions rigides via l'approche cinématique du calcul à la rupture. Une comparaison entre la capacité portante estimée et la somme des capacités portantes individuelles des inclusions et de la semelle révèle que cette dernière donne une surestimation significative. Des facteurs correcteurs liés à l'inclinaison et à l'excentrement de la charge sont également étudiés.

ABSTRACT – This study concerns the determination of the bearing capacity of shallow foundations on reinforced soil with rigid inclusions using the kinematic exterior approach of the yield design. A comparison between the estimated bearing capacity and the sum of the individual bearing capacities of the inclusions and the footing reveals that the latter results in a significant overestimation. Reduction factors arising from the load's inclination and eccentricity are also studied.

1. Introduction

La technique d'amélioration de sol par inclusions rigides présente des avantages techniques et économiques significatifs, permettant d'utiliser des fondations superficielles sur des sols compressibles. Elle permet d'augmenter la capacité portante du sol tout en réduisant les tassements globaux et différentiels. Une bonne estimation de la capacité portante de la fondation sous charge verticale, excentrée et/ou inclinée, est essentielle pour sa conception.

Dans la présente étude, une approche permettant d'évaluer la capacité portante de ce mode de fondation sous différents types de chargement a été développée dans un cadre théorique rigoureux dérivée de la méthode cinématique du calcul à la rupture. Les objectifs de cette étude se concentrent sur trois aspects principaux :

- Déterminer la capacité portante d'une fondation filante posée sur un sol renforcé par inclusions rigides ;
- Evaluer les effets d'inclinaison et d'excentrement et les facteurs correcteurs correspondants.;
- Quantifier l'erreur commise par certaines approches simplifiées usuelles.

Ce travail s'inscrit dans le cadre du projet national français ASIRI+.

2. Approche du calcul à la rupture

Les approches basées sur la théorie du calcul à la rupture sont identifiées comme pertinentes pour évaluer la capacité portante des fondations superficielles sous charges statiques inclinées et excentrées, ainsi que sous charges sismiques. Ces approches comprennent l'approche cinématique par l'extérieur, qui a été largement utilisée pour

étudier la capacité portante des semelles filantes sur des sols homogènes cohérents ou frottants (Salençon et Pecker, 1995a, 1995b, Soubra, 1999).

La capacité portante des fondations renforcées par inclusions rigides n'a pas encore reçu le même niveau d'attention, en raison de la complexité supplémentaire introduite par un système de fondation composé de plusieurs éléments distincts en interaction avec des caractéristiques très différentes : le sol mou, les inclusions rigides et le matelas de répartition entre la fondation et le massif renforcé. Cette composition complique la détermination du mécanisme de rupture, cependant, quelques exemples sont désormais disponibles dans la littérature.

Pecker et al. (1998) ont évalué la capacité portante d'une fondation superficielle de grande dimension sur un sol cohérent renforcé par inclusions rigides de forte inertie en utilisant l'approche cinématique du calcul à la rupture. Les capacités portantes et le mécanisme de rupture ont ensuite été comparés à ceux de cinq essais en centrifugeuse à l'échelle réduite.

S'inspirant de ces travaux, Shen (2023) a proposé de baser la détermination de la capacité portante d'une semelle filante sur sol renforcé sur l'étude de trois familles distinctes de modes de rupture, regroupant des mécanismes de rupture se développant dans un ou plusieurs éléments du système, à savoir la plateforme de transfert de charge, le massif de sol renforcé par IR ou l'interface entre les deux. Un multicritère adapté aux inclusions rigides a également été développé pour quantifier leur contribution à la résistance du massif renforcé. Une série d'études de validation analytique et numérique est réalisée pour confirmer la validité des modes de rupture proposés ainsi que des valeurs de capacité portante et des diagrammes d'interaction obtenus pour les différentes configurations.

2.1. Modes de rupture

Trois familles de mécanismes potentiels de rupture sont considérées, comme illustré sur la Figure 1. Elles se caractérisent par :

- Mode I : un mécanisme de rupture superficiel qui a lieu entièrement dans le matelas, soit avec une profondeur de rupture inférieure à l'épaisseur du matelas ;
- Mode II : correspond au mécanisme de rupture potentiel de glissement ou de soulèvement pouvant se développer à l'interface entre le matelas et le sol mou renforcé ;
- Mode III : implique un mécanisme de rupture se développant au sein d'un sol cohérent homogène renforcé par inclusions rigides. La profondeur dudit mécanisme dépasse dans ce cas l'épaisseur du matelas et intersecte les inclusions rigides contribuant ainsi à la résistance.

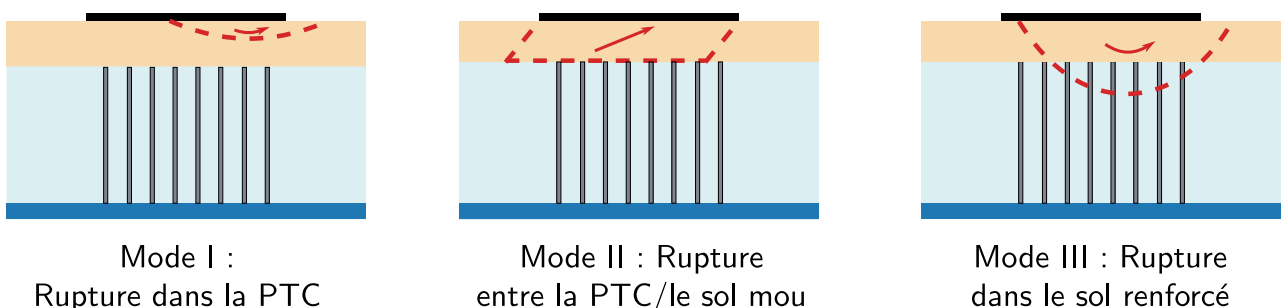


Figure 1. Modes de rupture proposés pour l'étude de la capacité portante d'une fondation filante sur sol renforcé par inclusions rigides

Les modes I et II sont relativement simples à analyser. Le mode I a déjà été étudié dans la littérature et des solutions existent pour des sols purement cohérents ou frottants.

Dans ce travail, les mécanismes proposés par Paolucci et Pecker (1997) pour une fondation sur sol frottant sont utilisés. Le mode II peut être simplifié comme un mécanisme de saut de vitesse au niveau de l'interface entre le sol renforcé et le matelas. Ce mode est inspiré par le mécanisme F_0 pour sol cohérent, proposé par Salençon et Pecker (1995b). Dans ces deux familles de modes de rupture, le renforcement n'intervient pas dans le calcul de la puissance des efforts résistants P_{rm} . La vérification de la capacité portante de la fondation s'exprime donc par l'inégalité suivante :

$$P_{ext}(\mathbf{Q}, \mathbf{U}, \Psi) \leq P_{rm}(\Lambda_{sol}, \mathbf{U}, \Psi) \quad (1)$$

où P_{ext} est la puissance des efforts externes, \mathbf{Q} représente l'ensemble des forces appliquées sur le système de fondation, regroupant respectivement la force verticale centrée, la force horizontale, le moment de basculement et les deux forces d'inertie dans le sol. \mathbf{U} est le champ de vitesse virtuelle décrivant le mécanisme de rupture. Ψ comprend les paramètres géométriques du mécanisme cinématique. Λ_{sol} représente la résistance des sols (matelas + sol mou).

Le mode III est de nature plus complexe que les deux autres, car il nécessite de prendre en compte la contribution du renforcement par inclusions rigides comme suivant :

$$P_{ext}(\mathbf{Q}, \mathbf{U}, \Psi) \leq P_{rm}(\Lambda_{sol}, \mathbf{U}, \Psi) + \Sigma P_{IR}(\Omega_{IR}, \mathbf{U}, \Psi) \quad (2)$$

où Ω_{IR} représente les forces résistances dues à chacune des inclusions au niveau de la discontinuité de vitesse.

Dans ce mode, la puissance des efforts résistants comprend à la fois la contribution du sol et la contribution des inclusions. La contribution du sol peut être prise en compte par les mécanismes proposés pour un sol cohérent non-renforcé en négligeant le matelas frottant d'épaisseur limitée et sous l'hypothèse que la présence de renforcement n'affecte pas le champ cinématique de rupture, comme illustré sur la Figure 2. La prise en compte des inclusions rigides est présentée au §2.2.

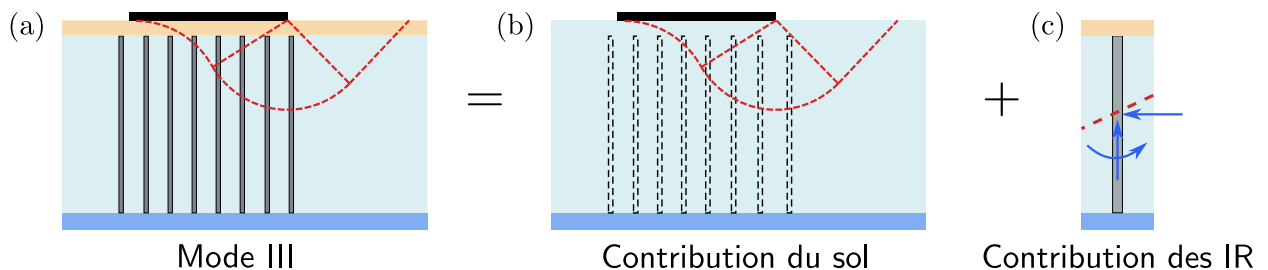


Figure 2. Description détaillée du mode III : (a) mécanisme de rupture multi-blocs avec les inclusions, (b) contribution du sol par mécanisme de multi-bloc, et (c) forces à l'intersection de chaque inclusion avec le mécanisme de rupture

2.2. Prise en compte des inclusions rigides

La prise en compte des inclusions rigides nécessite le calcul de la puissance de leurs efforts résistants. Dans le cadre de ce travail, les renforcements sont pris en compte par leur action Ω_{IR} à l'intersection avec la surface de rupture (discontinuité de vitesse), décomposée en : T_n (effort axial), T_c (effort de cisaillement), et M_c (moment fléchissant), comme illustré sur la Figure 3(a).

La puissance des efforts résistants du renforcement peut être calculée en multipliant les efforts par la vitesse virtuelle au niveau de l'intersection. La détermination de la vitesse au niveau de l'intersection est triviale une fois que le champ de vitesse virtuelle est connu en tout point du mécanisme de rupture. Il n'est pas de même pour l'obtention des efforts dans les inclusions.

Un multicritère adapté aux inclusions rigides est proposé dans Shen et al. (2023) pour la détermination du domaine des efforts admissibles dans les inclusions, en combinant

plusieurs mécanismes de rupture d'intérêt pour la résistance de ces éléments de renforcement sous charge composée, à savoir :

- (1) Résistance interne de l'inclinaison liée à une rupture par compression/cisaillement;
- (2) Résistance axiale liée à l'interaction entre le sol et l'inclusion : en tête (poinçonnement dans le matelas), le long du fût (par frottement axial), ou en pointe (poinçonnement dans le sol d'ancrage) ;
- (3) Résistance transversale liée à la saturation (plastification) de la réaction frontale du sol le long de l'inclusion ;
- (4) Résistance interne de l'inclusion liée à une rupture par flexion ;

Les quatre critères inclus dans ce multicritère, ainsi que le domaine utile qui en résulte, sont illustrés sur la Figure 3(b).

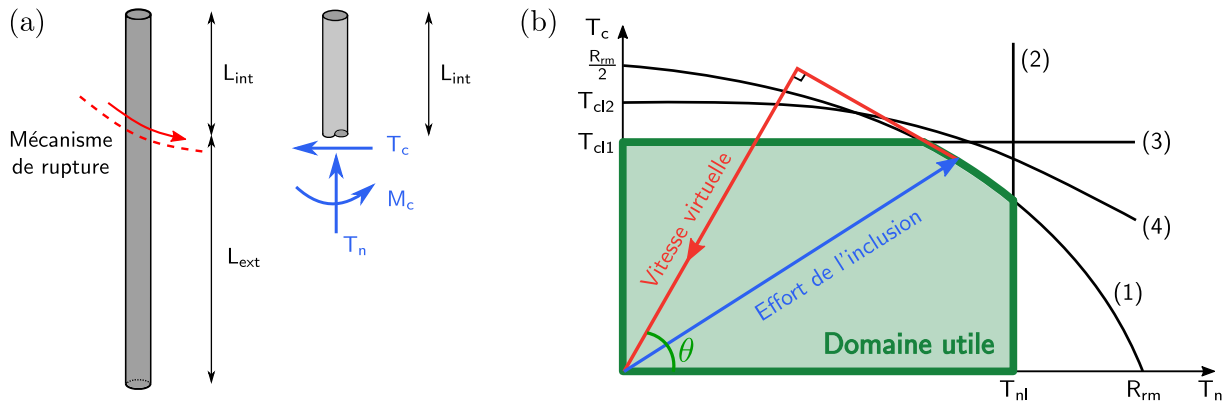


Figure 3. (a) Schéma d'une inclusion rigide intersectée par une discontinuité de vitesse et efforts à l'intersection et (b) multicritère des efforts dans le plan $T_n - T_c$

Ce domaine utile permet de déterminer les forces de résistance potentielles Ω_{IR} fournies par les inclusions. Lorsque la rupture se produit, les forces résistantes doivent se situer à la frontière de ce domaine, et leur position est déterminée par le principe du travail maximal. Ce principe stipule que les efforts résistants sont établis de manière à maximiser la puissance des efforts dans les inclusions rigides pour un champ de vitesse virtuel donné U .

2.3. Diagramme d'interaction

Un cas d'application est retenu dans cette étude pour illustrer la construction du diagramme d'interaction sur le plan $V-H$ (V : effort vertical, H : effort horizontal).

Cette configuration comprend une semelle de 10 m de largeur B , reposant sur une couche de matelas de 0.5 m d'épaisseur caractérisée par un angle de frottement φ de 38° . Le sol mou, considéré comme cohérent mais sans résistance à la traction, présente une cohésion (non-drainée) notée c , prise égale à 25 kPa. Avec cette cohésion, la valeur limite de frottement latéral q_s et la pression limite p_l^* sont estimées respectivement à 25 kPa et 200 kPa. La résistance unitaire du sol sous la pointe des inclusions q_b est de 2 MPa. Les inclusions rigides en sept rangées ont un diamètre d de 0.4 m et une longueur L de 10 m sont placées sous la fondation, sans encastrement dans le matelas, avec un espacement s de 1.5 m. Le taux de substitution α est de 5.6% dans cette configuration.

Les diagrammes d'interaction pour la configuration donnée, issus des trois modes de rupture (cf. §2.1), sont illustrés sur la Figure 4(a). Une zone admissible, appelée domaine de stabilité potentielle, est délimitée par ces trois courbes, comme illustré sur la Figure 4(b). Il est important de noter que la capacité portante sous charge verticale centrée d'une fondation sur sol renforcé par inclusions rigides est contrôlée par le mode III (i.e., le mécanisme de rupture traverse le massif de sol renforcé et fait participer les inclusions rigides).

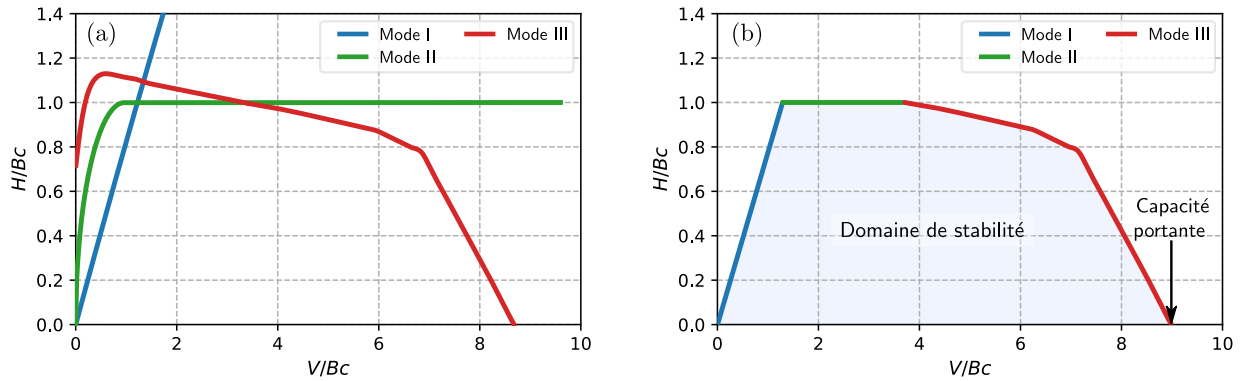


Figure 4. (a) Diagrammes d'interaction issus des trois modes de rupture et (b) domaine de stabilité d'une fondation renforcée par inclusions rigides dans le plan normalisé $V-H$

3. Impact de l'excentrement et l'inclinaison de la charge

Le cadre conventionnel de vérification (CEN, 2004, AFNOR, 2013) implique la comparaison de la force verticale V appliquée à la fondation avec la valeur limite V_{max} qui représente la capacité portante de la fondation sur sol renforcé et charge verticale centrée, selon le critère :

$$V - V_{max} \leq 0 \quad (3)$$

Pour tenir compte des effets de l'excentrement et de l'inclinaison de la charge, la valeur limite V_{max} est ajustée en appliquant plusieurs facteurs correcteurs, tel que le facteur correcteur de l'excentrement i_e et le facteur correcteur de l'inclinaison i_δ . Le critère de vérification est ensuite exprimé sous forme :

$$V - V_{max} i_e i_\delta \leq 0 \quad (4)$$

Dans la suite de l'étude, nous utilisons l'approche analytique détaillée en §2 pour examiner l'évolution de ces deux facteurs correcteurs, i_δ et i_e , dans le cas d'une semelle sur sol renforcé par inclusions rigides. La même configuration de référence est maintenue (cf. §2.3), avec trois diamètres d'inclusions, 0.2 m, 0.4 m, et 0.55 m, correspondant respectivement à des taux de substitution de 1.4 %, 5.6 % et 10.6%. Pour étudier l'impact du renforcement, une configuration sans renforcement est également analysée. Il est important de noter que cette configuration sans renforcement inclut également une couche de matelas granulaire.

3.1. Facteur correcteur de l'excentrement de la charge i_e

Pour toutes les configurations étudiées, le facteur correcteur de l'excentrement i_e est calculé comme le rapport entre la capacité portante de la fondation $V_{max,e}$ divisé par la capacité portante de la même fondation sous charge verticale centrée, désignée par $V_{max,e=0}$.

$$i_e = \frac{V_{max,e}}{V_{max,e=0}} \quad (5)$$

Les résultats sont représentés sur la Figure 5(a) et comparés avec le facteur correcteur de l'excentricité $i_e = 1 - 2e/B$ proposé par Meyerhof (1953).

L'application de cette expression dans le cas d'une semelle non-renforcée conduit à une estimation conservatrice de la valeur de ce facteur correcteur par rapport aux valeurs obtenues par l'approche cinématique par l'extérieur. Cependant, cette tendance s'inverse dans le cas des fondations renforcées, conduisant à une estimation par excès de ce facteur. Par exemple, pour un excentrement $e/B = 0.2$, la capacité portante d'une fondation sur sol non renforcé est réduite de 36%, celle d'une fondation sur sol renforcé de 46% (avec un taux de substitution de 5,6%).

La comparaison entre les trois configurations renforcées révèle que la configuration avec le taux de substitution α le plus important est plus susceptible à l'effet de l'excentrement de la charge. Cependant, la variation des valeurs de i_e pour différents taux de substitution variant de 1.4% à 10.6% reste faible.

3.2. Facteur correcteur de l'inclinaison de la charge i_δ

Le facteur correcteur de l'inclinaison de charge i_δ , tel que défini par l'Équation 6, a été calculé pour les configurations étudiées. Il est présenté sur la Figure 5(b) en fonction de l'inclinaison normalisée.

$$i_\delta = \frac{V_{max,\delta}}{V_{max,\delta=0}} \quad (6)$$

Le facteur correcteur de l'inclinaison de charge i_δ , proposé par Meyerhof (1953) pour une fondation sur sol cohérent non-renforcé, est systématiquement plus élevé que celui des configurations sur sol renforcé, ce qui signifie que la présence des inclusions rigides accentue la sensibilité de la capacité portante de la fondation vis-à-vis des effets d'inclinaison de la charge. De plus, cet effet augmente lorsque le taux de substitution augmente également. Un renforcement par inclusions rigides augmente de façon significative la capacité portante sous chargement vertical sans que cela améliore la capacité du massif à reprendre des charges horizontales qui transitent principalement par le sol en place. Plus le taux de substitution est élevé, plus le contraste entre les capacités portante verticale et « horizontale » est fort.

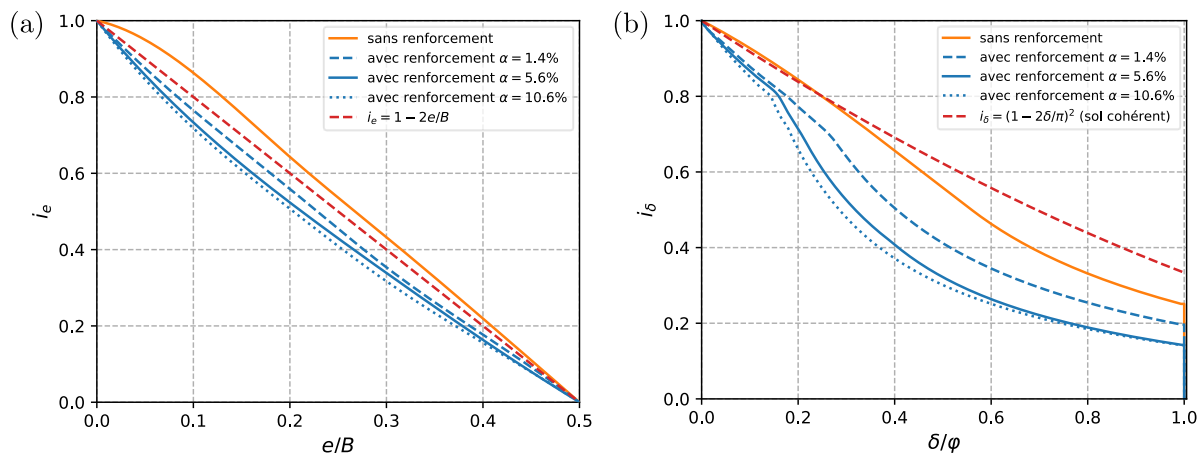


Figure 5. (a) Facteur correcteur de l'excentricité i_e et (b) facteur correcteur de l'inclinaison i_δ pour les fondations renforcées par inclusions rigides avec différents taux de substitution α

4. Comparaison à un calcul basé sur la somme des capacités portantes

L'approche présentée au §2, dérivée de la théorie du calcul à la rupture, permet la détermination de la capacité portante d'une semelle sur inclusions rigides sur la base de développements théoriques solides et éprouvés. Il est intéressant de comparer cette approche avec celle usuellement pratiquée dans certains bureaux d'études et consiste à, approcher la capacité portante du massif renforcé en additionnant les capacités portantes individuelles du sol et des inclusions, comme décrit par l'équation 7:

$$V_{max}^\Sigma = V_{max}^{sr} + n_{IR} V_{max}^{IR} \quad (7)$$

où V_{max}^{sr} représente la capacité portante d'une semelle sur sol cohérent non-renforcé, n_{IR} le nombre d'inclusions rigides et V_{max}^{IR} la capacité portante d'une seule inclusion sous charge axiale.

$$V_{max}^{sr} = (\pi + 2)Bc \quad (8)$$

$$V_{max}^{IR} = R_b + R_s \quad (9)$$

avec R_b la résistance de pointe, déterminée par le produit de la résistance unitaire du sol sous la pointe q_b et l'aire de la pointe A_b . R_s représente la résistance totale par frottement axial le long de l'inclusion qui est la somme des produits du frottement axial unitaire $q_{s,i}$ et de l'aire du fût de l'inclusion $A_{s,i}$, de l'ensemble des couches.

Plusieurs configurations de fondations filantes renforcées par inclusions rigides sont étudiées et comparées ici en variant la largeur de fondation, le nombre de rangées d'inclusions, leur espacement et leur diamètre de 0.2 à 0.6 m, ce qui conduit à des intervalles du taux de substitution allant de 0.4% à 15.1% (cf. Tableau 1). Les caractéristiques des couches de sol sont identiques à celles utilisées pour l'application numérique présentée au §2.3.

Tableau 1. Configurations étudiées de semelles renforcées par inclusions rigides

B (m)	s (m)	n_{JR} (-)	Intervalle des taux de substitution
3	1.5	2	[1.4%, 12.6%]
	2	2	[1.0%, 7.1%]
	2.5	2	[0.8%, 7.5%]
5	1.5	3	[1.3%, 11.3%]
	1.5	4	[1.7%, 15.1%]
	2	2	[0.6%, 5.7%]
	2	3	[0.9%, 8.5%]
	3	2	[0.4%, 3.8%]
10	1.5	6	[1.3%, 11.3%]
	1.5	7	[1.5%, 13.2%]
	2	5	[0.8%, 7.1%]
	2.5	4	[0.5%, 4.5%]
	3	4	[0.4% 3.8%]

Le résultat de l'étude menée pour des différentes largeurs de la semelle et différents taux de substitution est illustré sur la Figure 6(a) pour les configurations sans matelas et sur la Figure 6(b) pour celles avec matelas. Les capacités portantes, sous charge verticale centrée, estimées par les deux approches (i.e., comme la somme des capacités portantes V_{max}^{Σ} et directement via l'approche cinématique par l'extérieur V_{max}^{rup}), sont normalisées par la capacité portante du sol non-renforcé V_{max}^{sr} .

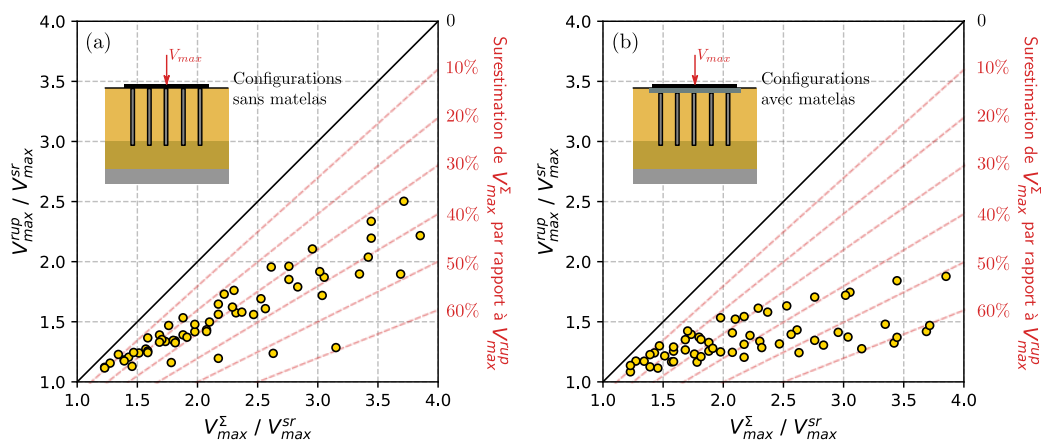


Figure 6. Comparaison des deux approches d'estimation de la capacité portante pour les configurations (a) sans matelas et (b) avec matelas

Pour ces deux configurations, on observe que la capacité portante issue du calcul à la rupture (qui, au titre d'une approche par l'extérieur, fournit un majorant de la résistance du système), est bien inférieure à la somme des capacités portantes du sol et des inclusions. Sommer les portances du sol et des inclusions surestime la capacité du massif renforcé, avec une erreur relative pouvant aller jusqu'à 60% pour les configurations étudiées.

De plus, cette tendance semble être accentuée par la présence du matelas, comme illustré sur la Figure 6(b). Dans cette configuration, le poinçonnement en tête des inclusions limite la capacité portante globale de la semelle par rapport aux configurations sans matelas.

5. Conclusions

Une approche permettant d'estimer la capacité portante d'une fondation sur sol renforcé par inclusions rigides a été développée dans le cadre de la théorie du calcul à la rupture. Elle intègre trois familles de modes de rupture ainsi qu'un nouveau multicritère adapté aux inclusions rigides pour la détermination du domaine de stabilité.

L'étude des facteurs correcteurs de l'excentrement et de l'inclinaison de la charge montre que les fondations sur sol renforcé par inclusions rigides sont plus sensibles aux effets d'inclinaison et d'excentrement des charges. Cependant, bien que les facteurs correcteurs soient plus défavorables, la capacité portante globale d'une fondation sur Inclusions rigides demeure (évidemment), dans tous les cas, supérieure à celle d'une fondation sur sol non renforcé.

La mise en œuvre du modèle développé montre par ailleurs que la somme des capacités portante du sol et des inclusions constitue une borne supérieure, dans un rapport de 1.1 à 1.6, de la capacité portante du massif renforcé. Ce constat milite pour adapter les errements usuels en introduisant un facteur « d'interaction » dans la combinaison des portances du sol et des inclusions.

6. Références bibliographiques

- AFNOR, (2013) NF P 94-261 : Justification des ouvrages géotechniques - Normes d'application nationale de l'Eurocode 7 - Fondations superficielles.
- CEN, (2004). Eurocode 7 - Part 1: Geotechnical design - Part 1: General rules, EN 1997-1. European Committee for Standardization (CEN), Brussels.
- Meyerhof, G., (1953). The bearing capacity of foundations under eccentric and inclined loads. In 3rd Soil Mechanics and Foundation Engineering Conference. Zurich, Swiss. pp.440-445.
- Paolucci, R., Pecker, A. (1997). Seismic bearing capacity of shallow strip foundations on dry soils. *Soils and foundations*, 37(3), pp.95-105.
- Pecker, A., Harikiopoulos, H., de Buhan, P., Dormieux, L., Morand, P. (1998). Comportement sismique d'une fondation sur sol renforcé par inclusions rigides, Paris, France. Compte rendu pour MRES.
- Salençon, J. (1983). Calcul à la rupture et analyse limite, Presses de l'École Nationale des Ponts et Chaussées, Paris, France.
- Salençon, J. (2002). De l'élasto-plasticité au calcul à la rupture. Editions Ecole Polytechnique, Paris, France.
- Salençon, J., Pecker, A. (1995a). Ultimate bearing capacity of shallow foundations under inclined and eccentric loads. Part I: purely cohesive soil. *European journal of mechanics series A/solids*, 14, pp. 349-349.
- Salençon, J., Pecker, A. (1995b). Ultimate bearing capacity of shallow foundations under inclined and eccentric loads. Part II: purely cohesive soil without tensile strength. *European journal of mechanics series A/solids*, 14, pp. 377-96.
- Shen, Y. (2023). Développement d'un macro-élément de fondations sous charge dynamique : Application au cas des sols renforcés par inclusions rigides. Thèse de doctorat de l'Institut Polytechnique de Paris, Palaiseau, France.
- Shen, Y., Pérez-Herreros, J., Cuira, F., Semblat, J. F., Burlon, S. (2023). Evaluation des efforts d'origine inertielle dans les inclusions rigides. In 11ème Colloque National de l'AFPS, Guadeloupe, France.
- Soubra, A. H. (1999). Upper-bound solutions for bearing capacity of foundations. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 125(1), pp. 59-68.