



**HAL**  
open science

## Evaluation des efforts d'origine inertielle dans les 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. Evaluation des efforts d'origine inertielle dans les inclusions rigides. 11ème Colloque National de l'AFPS (Association Française du Génie Parasismique ), Nov 2023, Le Gosier, France. hal-04478311

**HAL Id: hal-04478311**

**<https://hal.science/hal-04478311>**

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.

# Evaluation des efforts d'origine inertielle dans les inclusions rigides

Yuxiang Shen<sup>1\*</sup>, Jesús Pérez-Herreros<sup>2</sup>, Fahd Cuira<sup>3</sup>, Jean-François Semblat<sup>4</sup>,  
Sébastien Burlon<sup>5</sup>

<sup>1</sup> 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

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

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

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

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

---

**Résumé.** La technique de renforcement avec inclusions rigides est considérée comme une solution de fondation pratique et économique pour les ouvrages sur sol compressible. Plusieurs études ont récemment examiné le comportement statique de ce type de fondation. Toutefois, son comportement sismique n'a pas encore été largement exploré. Dans cette étude, une série de modélisations linéaires pseudo-statiques de différentes configurations (inspirées de projets réels) ont été réalisées pour approfondir les connaissances sur les effets d'interaction inertielle d'une semelle sur inclusions rigides. Des abaques sont fournis pour améliorer la compréhension de ces effets et peuvent être utilisés dans les phases initiales d'un projet. En outre, cette étude a pour objectif de vérifier les capacités et les limites des méthodes de calcul couramment utilisées dans les bureaux d'études.

**ABSTRACT.** The reinforcement technique with rigid inclusions is considered as a practical and economical foundation solution for structures founded on compressible soil. Several studies have recently examined the static behaviour of this type of foundation. However, its seismic behaviour has not yet been widely explored. In this study, a series of linear pseudo-static numerical models of different configurations (inspired by real projects) were conducted to investigate the inertial interaction effects of a footing on rigid inclusions. Abaqus curves are also provided to improve understanding of these effects and allow for rapid use in the pre-design step of project. Moreover, the objective of this study is to verify the capacities and limitations of calculation methods commonly used in engineering studies.

**Mots Clés :** Effet d'interaction inertielle, fondation sur inclusions rigides, Projet National ASIRI+

---

## 1. INTRODUCTION

La technique de renforcement des sols par inclusions rigides (illustrée dans la figure 1) est une solution alternative de fondation qui présente des avantages techniques et économiques significatifs par rapport au concept conventionnel de fondation sur pieux. Au cours des vingt dernières années, cette technique a fait l'objet de plusieurs études et travaux de recherche, ce qui a permis l'élaboration de recommandations pratiques pour la profession telles que celles du Projet National ASIRI [1]. Jusqu'à présent, les études ont surtout porté sur le comportement statique des fondations, tandis que le comportement sous charge sismique n'a pas encore reçu beaucoup d'attention. L'objectif de cet article, conduit dans le cadre de la tâche 8 et du

volet ANR du PN ASIRI+, est de quantifier les effets d'interaction inertielle sous séisme en termes de sollicitations dans les inclusions.

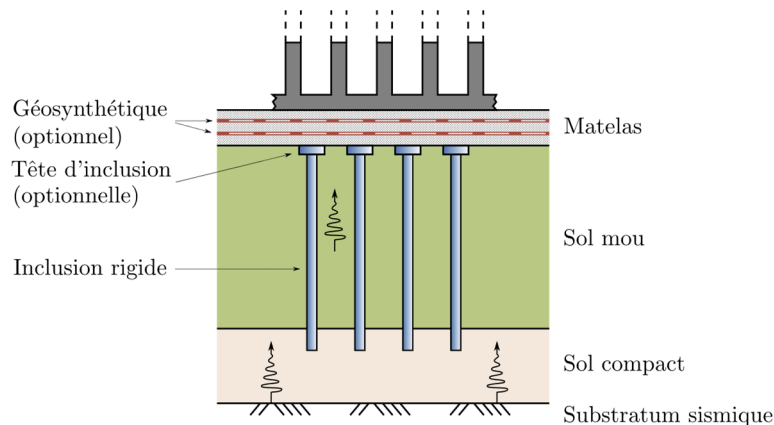


Figure 1 : Schéma d'une fondation sur inclusions rigides sous séisme

Le phénomène d'interaction inertielle est un mécanisme d'interaction sol-structure lié aux forces d'inertie développées au niveau de la structure et transmises à la fondation. Ce phénomène implique les effets suivants dans le cas des inclusions rigides :

- Une modification des conditions d'appui de la structure se traduisant en termes d'impédances dynamiques qui varient en fonction de fréquence de la sollicitation ;
- Des sollicitations additionnelles dans la longueur active des inclusions, en flexion et en cisaillement, qui deviennent souvent dimensionnantes.

Dans le cas de la plupart des renforcements par inclusions rigides, la présence d'une plate-forme de transfert de charge, communément appelée « matelas », permet la déconnexion entre la semelle et les inclusions, impactant à la fois les impédances dynamiques et le mécanisme de transfert de force. L'évolution des impédances dynamiques dans ce type de fondations a été étudiée dans Shen et al. [2,3]. La présente étude vise à comprendre les sollicitations additionnelles (d'origine inertielle) sur les inclusions rigides à l'aide de modélisations numériques couvrant différentes configurations inspirées de projets réels.

## 2. CAS ÉTUDIÉS

Dans le cadre de cette étude, le profil de sol considéré est constitué de deux couches de sol et d'un substratum. Plus précisément, le profil est composé d'une couche de sol mou d'épaisseur  $H$  variant entre 5 m, 10 m et 15 m ainsi que d'une couche de sol plus compact de 5 m reposant sur un substratum rocheux, comme illustré sur la figure 2. Les propriétés mécaniques du modèle sont fournies dans le tableau 1. La vitesse de propagation des ondes de cisaillement dans le sol mou varie entre 100 m/s, 150 m/s, 200 m/s, 250 m/s et 300 m/s. Le matelas est caractérisé par le rapport de sa propre vitesse de propagation des ondes de cisaillement et celle du sol mou, noté  $V_{s,PTC}/V_{s,sol\ mou}$ , dont la valeur varie entre 1 (le matelas est identique au sol mou) et 16.7 (le matelas est identique au béton).

Deux configurations sont examinées, comportant 4 (2x2) et 9 (3x3) inclusions rigides. Elles sont présentées sur les figures 2 (b) et 2 (c). Ces configurations sont constituées d'une semelle rigide carrée de largeur  $B$  égale à 3 m ou 5 m installée sur une plate-forme de transfert de charge d'une épaisseur de 0.5 m, avec un débord de 0.5 m. Les inclusions rigides ont un diamètre variant entre 0.32 m, 0.42 m et 0.52 m, ainsi qu'une longueur  $L$  variant selon l'épaisseur de la couche de sol mou  $H$ . Elles sont encastrées de 0.5 m dans le sol compact et leur espacement est de 2 m.

Tableau 1 : Propriétés mécaniques du sol et de la fondation utilisées dans les analyses

	Sol mou	Sol compact	Rocher	Matelas	Inclusions
Module de cisaillement $G$ (MPa)	20/45/80	320	2 500	45 à 12 500	12 500
Vitesse des ondes de cisaillement $V_s$ (m/s)	100/150/200	400	1 000	100 à 2 500	2 236
Coefficient de Poisson $\nu$ (-)	0.45	0.45	0.45	0.35	0.2
Masse volumique $\rho$ (t/m <sup>3</sup> )	2.0	2.0	2.5	2.0	2.5

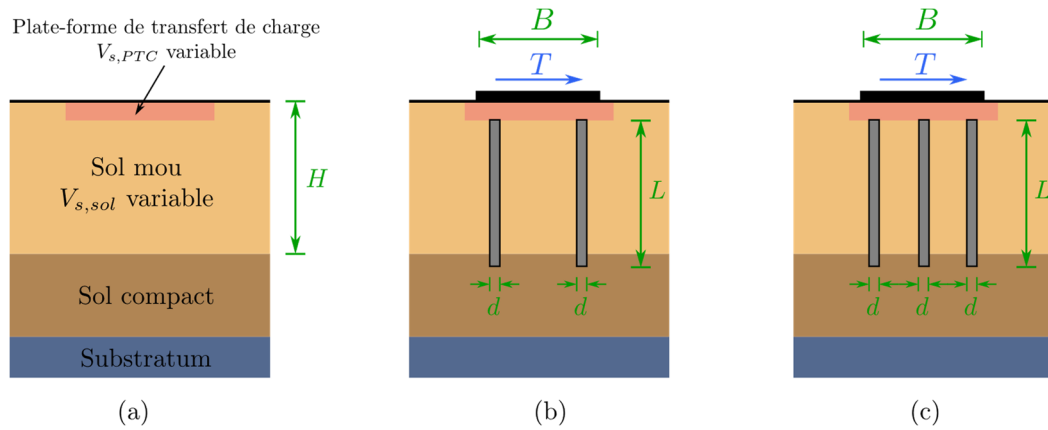


Figure 2 : Schéma des configurations étudiées : (a) profil de sol, (b) configuration avec 4 (2x2) inclusions rigides, (c) configuration avec 9 (3x3) des inclusions rigides

Les calculs pseudo-statiques sont menés sur ces deux configurations pour évaluer les sollicitations d'origine inertielle sur les inclusions rigides lorsque la semelle sur le sol renforcé est soumise à un chargement sismique.

### 3. MODELISATION NUMERIQUE PAR ELEMENTS FINIS

Le modèle utilisé a été élaboré à l'aide du logiciel EF PLAXIS 3D v22 [4]. L'ensemble de la semelle ainsi que les 4 ou 9 inclusions ont été modélisés. Les dimensions du modèle sont de 50 m x 50 m afin de garantir que les bords se trouvent à une distance supérieure à 10 fois le diamètre de l'inclusion la plus proche pour éviter les effets de bord. Un comportement élastique linéaire est retenu dans la modélisation de l'ensemble des constituants du problème. Le matelas et le sol sont modélisés de manière explicite en éléments volumiques de type C3D10. Les inclusions ont été également modélisées par des éléments volumiques de module  $E$  correspondant à celui du béton sous charge dynamique (30 GPa). Afin de récupérer les efforts se développant dans les inclusions (compression, moment, cisaillement), une poutre fictive avec une raideur 1 000 fois plus faible que celle des inclusions, a été introduite au centre des inclusions volumiques. La semelle est modélisée en éléments de plaque à 6 nœuds non-pesants et avec un module très élevé pour simuler une semelle très rigide. Une visualisation du modèle EF est présentée sur la figure 3.

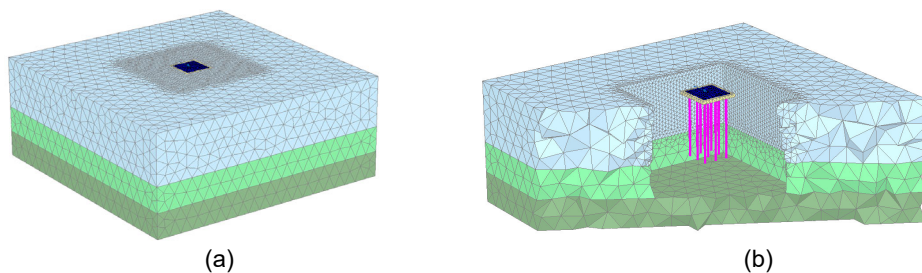


Figure 3 : Modèle EF d'une semelle sur inclusions rigides

## 4. TRANSFERT DE CHARGES EN TETE DES INCLUSIONS

Dans cette étude, nous examinons la notion de taux de concentration des contraintes verticales  $E_V$  et horizontales  $E_H$  sous sollicitation inertielle. Ce taux est défini comme le rapport entre la totalité des charges verticales reprises en tête des inclusions et la charge appliquée sur la semelle, et peut servir à décrire l'efficacité du transfert de charge vers les inclusions rigides.

L'étude d'une charge verticale (pseudo-statique) appliquée au centre de la semelle est conduite en premier. Dans cette étude, la vitesse de propagation des ondes de cisaillement du sol mou est fixée tandis que celle de la plate-forme de transfert de charge varie entre la vitesse du sol mou (qui correspond au cas sans matelas) et celle du béton (qui correspond à un cas extrême dans lequel la semelle en béton est encastrée dans une profondeur de matelas). Les abaques, basés sur les résultats de plusieurs calculs paramétriques indiqués dans le tableau 1, sont présentés sur la figure 4 en termes du rapport entre le taux de concentration des contraintes verticales  $E_V$  et le taux de substitution  $\alpha$ . Avec l'augmentation du contraste de rigidité entre le matelas et le sol mou, le taux de concentration des contraintes verticales présente une tendance croissante suivie d'une stabilisation vers 60% pour des inclusions de diamètre 0.52 m et vers 44% pour un diamètre de 0.32 m, dans le cas de la configuration avec 2x2 inclusions. Une évolution similaire avec des rapports de 47% et de 64% est observée pour la configuration 3x3.

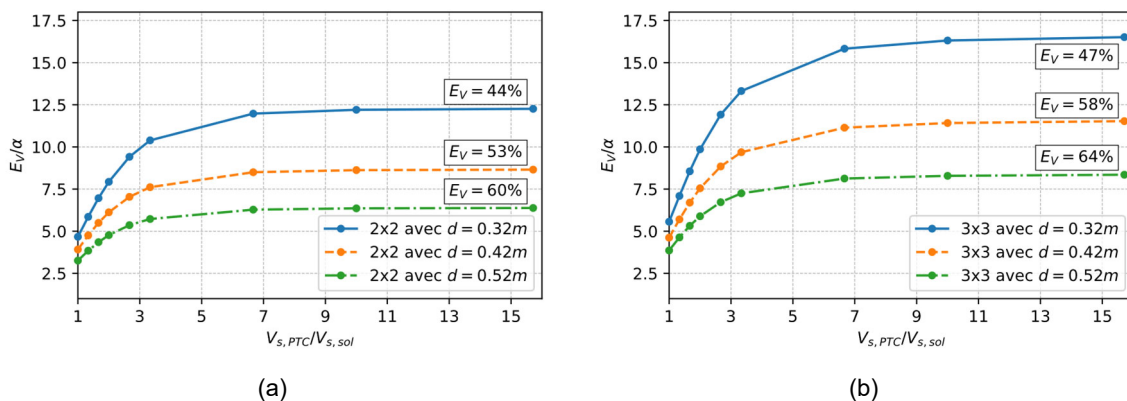


Figure 4 : Taux de concentration de contraintes verticales en tête des inclusions  $E_V$ : (a) configuration 2x2, (b) configuration 3x3

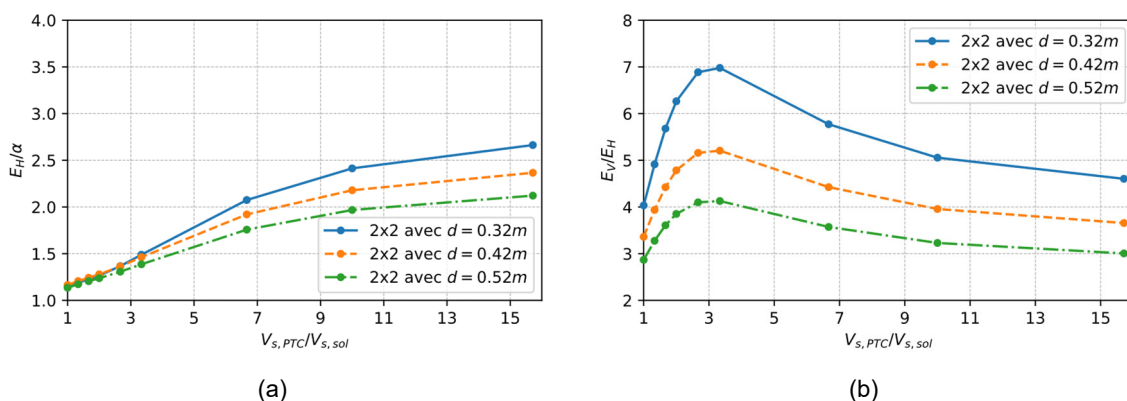


Figure 5 : Transfert de charges horizontales en tête des inclusions pour la configuration 2x2: (a) taux de concentrations de contraintes  $E_H$ , (b) rapport entre  $E_V$  et  $E_H$

L'étude s'intéresse ensuite au taux de concentration de contraintes horizontales  $E_H$  en appliquant une charge horizontale représentant l'effort d'inertie de la masse de la superstructure au centre de la semelle. Les résultats sont présentés sur les figures 5 et 6.

Des valeurs faibles du rapport  $E_H/\alpha$  attestent que les efforts horizontaux sont principalement transmis au terrain support. Lorsque la charge est horizontale, le taux de concentration des contraintes est de 3 à 7 fois inférieur à celui qui serait obtenu pour une charge verticale. En conséquence, l'inclinaison des contraintes d'origine inertielle transitant par le terrain est plus importante que celle des charges appliquées sur la semelle. Par rapport à la portance du sol support, l'influence de l'inclinaison de la charge sur le sol porteur est moindre dans le cas d'une semelle avec des inclusions que dans celui sans inclusions.

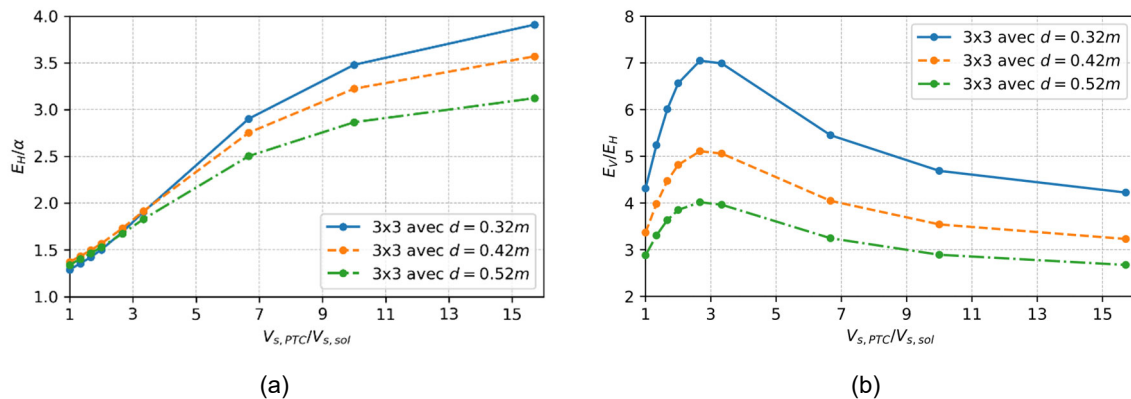


Figure 6 : Transfert de charges horizontales en tête des inclusions de la configuration 3x3: (a) taux de concentration de contraintes  $E_H$ , (b) rapport entre  $E_V$  et  $E_H$

## 5. MOMENT FLECHISSANT MAXIMUM

Il est intéressant d'examiner l'évolution du moment fléchissant maximum en partie supérieure des inclusions rigides du fait des effets d'interaction inertielle. Les études ont été menées sur la base des configurations illustrées sur la figure 2 détaillées sur le tableau 2, tenant en compte de plusieurs diamètres et longueurs des inclusions ainsi que de différents contrastes de rigidité entre le matelas et le sol mou à renforcer. Pour un pieu isolé articulé en tête, la référence [4] propose une expression donnant le moment fléchissant maximum dans le pieu dans le domaine élastique en fonction de trois paramètres : la longueur effective  $l_0 = \sqrt[4]{4E_{IR}I_{IR}/E_{sol}}$ , la force horizontale appliquée en tête du pieu  $T$  et un coefficient numérique  $\beta = 0.32$ . Sur la base de cette formulation, il semble possible de retrouver le coefficient  $\beta$  permettant de retrouver le moment maximum dans les inclusions rigides et ce tenant compte également du nombre d'inclusions.

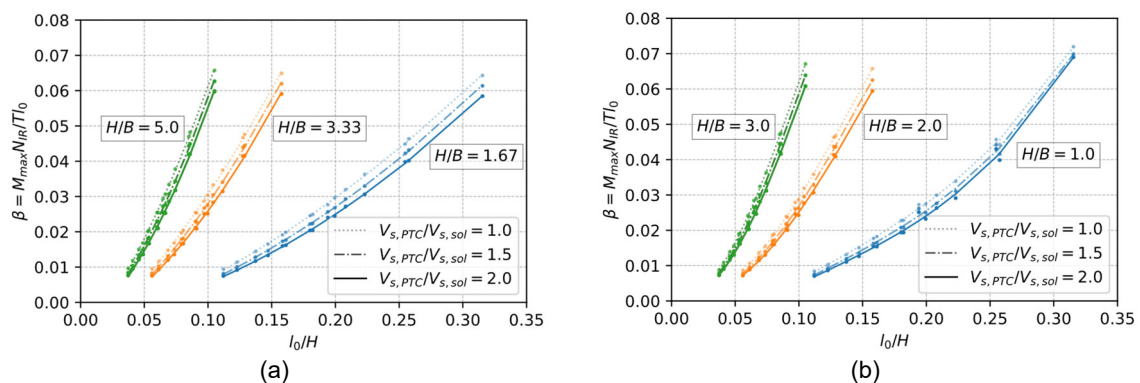


Figure 7 : Moment fléchissant maximum dans les inclusions pour (a) la configuration 2x2 et (b) 3x3

Les résultats montrent que les valeurs maximales de moment fléchissant dans les inclusions sont considérablement inférieures à celles dans un pieu isolé. Il est également intéressant de noter que le contraste de rigidité représenté par le rapport  $V_{s,PTC}/V_{s,sol}$  a un impact faible sur le moment fléchissant maximal.

## 6. COMPARAISON AVEC L'APPROCHE BIPHASIQUE PROPOSEE DANS LES RECOMMANDATIONS ASIRI

Dans cette section, nous comparons les moments fléchissants et les efforts tranchants obtenus à partir de l'approche semi-analytique biphasique MH2 proposée dans les recommandations ASIRI [1] et calculé avec FoXta [6] (voir figures 8(a) et (b)) avec ceux issus d'un calcul 3D FEM réalisé avec PLAXIS 3D. Les résultats sont présentés sur la figure 8(c). La comparaison montre que l'approche MH2 est capable de saisir les moments fléchissants et les efforts tranchants, ainsi que les déformations le long des inclusions. Ces résultats confirment, pour le cas traité, que les sollicitations internes ( $T$ ,  $M$ ) peuvent être valablement évaluées à partir de la déformation du sol non renforcé soumis à l'effort sismique horizontal transmis par la superstructure.

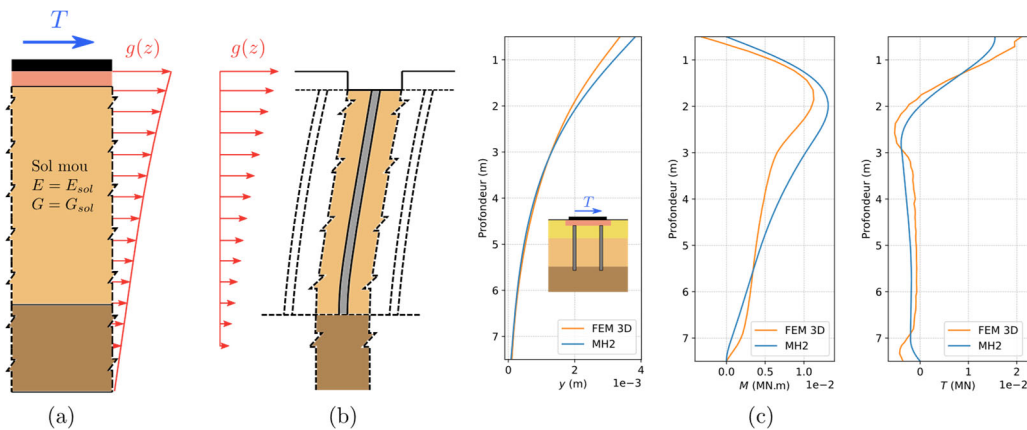


Figure 8 : Approche analytique MH2 – (a) étape 1 et (b) étape 2 et (c) comparaison avec l'approche FEM 3D

## 7. CONCLUSIONS

Cette étude numérique avait pour objectif d'étudier l'évolution des effets dus aux sollicitations d'origine inertielle sur les inclusions rigides et de vérifier que les méthodes de calcul proposées dans les recommandations ASIRI restent applicables pour les quantifier. Les transferts de charges et les moments fléchissants maximaux ont été étudiés à travers d'un nombre important de calculs paramétriques. Les résultats ont montré que la charge horizontale transférée aux inclusions est largement limitée par rapport au cas sous charge verticale. Des abaques présentant l'évolution des moments fléchissants maximaux en fonction de plusieurs paramètres adimensionnels ont été fournies pour plusieurs configurations de semelles renforcées par inclusions rigides. En outre, cette étude a mis en évidence la capacité de l'approche biphasique MH2, proposée par les recommandations ASIRI, à capturer la réponse des inclusions sous charge inertielle (via une modélisation pseudo-statique). Nous prévoyons de poursuivre cette étude en examinant d'autres configurations et d'autres approches simplifiées, en particulier, l'approche MH3.

## 8. REFERENCES

- [1] PN ASIRI (2012) *Recommandations pour la conception, le calcul, l'exécution et le contrôle des ouvrages sur sols améliorés par inclusions rigides verticales*. Presses des Ponts, Paris, France
- [2] Shen Y., Pérez-Herreros J., Cuira F., Semblat J.F., Burlon S (2021). « Dynamic response of shallow foundations on reinforced soil with rigid inclusions ». *17th World Conference on Earthquake Engineering*. Sendai, Japan.
- [3] Shen Y, Pérez-Herreros J, Cuira F, Semblat JF, Burlon S (2022). « Interaction inertielle sol-structure d'un massif renforcé par inclusions rigides ». *11emes Journées Nationales de Géotechnique et de Géologie de l'Ingénieur*. Lyon, France.
- [4] Bentley Systems (2022). *PLAXIS3D (Version 22) [Software]*. Plateforme de distribution: Windows.
- [5] Brûlé S., Cuira F (2018). *Pratique de l'interaction sol-structure sous séisme*. AFNOR, Paris, France.
- [6] Terrasol (2022). *FoXta (Version 4) [Software]*. Plateforme de distribution : Windows.