



HAL
open science

Modèle simplifié 3D de l'interaction sol-structure : application au génie parasismique

Stéphane Grange, Panagiotis Kotronis, J. Mazars

► **To cite this version:**

Stéphane Grange, Panagiotis Kotronis, J. Mazars. Modèle simplifié 3D de l'interaction sol-structure : application au génie parasismique. XXVIe Rencontres Universitaires de Génie Civil (AUGC 2008), Jun 2008, Nancy, France. hal-01008450

HAL Id: hal-01008450

<https://hal.science/hal-01008450>

Submitted on 7 Jan 2020

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.

Modèle simplifié 3D de l'interaction sol-structure : application au génie parasismique

Stéphane Grange

Laboratoire 3S-R – Grenoble Universités – Domaine Universitaire – St Martin d'Hères
– BP53 38041 Grenoble Cedex 9

RESUME. Dans le domaine du génie parasismique, l'interaction du sol avec la structure (ISS) est un phénomène important à considérer pour espérer rendre compte du comportement réel d'une structure et donc évaluer sa vulnérabilité. Ce travail présente la construction d'un élément d'interface 3D modélisant une fondation superficielle de forme circulaire, rectangulaire ou filante reposant sur un massif de sol semi infini et permettant de prendre en compte l'ISS en considérant la plasticité du sol et le décollement de la fondation. Basé sur la méthode des macro-éléments, cet élément permet de travailler en variables globales (forces et déplacements) et permet ainsi de simplifier le modèle et d'obtenir des temps de calculs très réduits. Il est implémenté dans FEDEASLab, un code élément finis développé dans Matlab. Après une description mathématique, des comparaisons avec des résultats expérimentaux d'une fondation soumise à des chargements cycliques, ainsi que dynamiques montrent le bon fonctionnement du macro-élément 3D d'ISS.

MOTS-CLÉS : macro-élément; décollement; interaction sol-structure.

ABSTRACT. In structural engineering, Soil-Structure Interaction (SSI) is an important phenomenon that has to be taken into account. This paper presents a 3D non linear interface element able to compute SSI. Several approaches exist to reproduce this phenomenon: the following work is based on the "macro-element" concept. The particularity of the macro-element lies in the fact that the movement of the foundation is entirely described by a system of generalised variables (forces and displacements) defined in the foundation centre. The non linear behaviour of the soil is reproduced using the classical theory of plasticity. The failure surface is defined using an adequate overturning mechanism. The element is able to simulate the 3D behaviour of a rigid shallow foundation under static and dynamic loadings considering uplift. It is implemented into FEDEASLab, a finite element Matlab toolbox. Comparisons with experimental results under cyclic and dynamic loadings show the good performance of the approach.

KEYWORDS : macro-element; uplift; soil-structure interaction.

1. INTRODUCTION

Par le passé, différentes expérimentations sur table sismique ont été réalisées sur des structures élancées de type bâtiment multi-étages reposant sur des fondations superficielles - Camus IV (Combescure *et al.*, 2000). Ces essais ont montré que les non linéarités présentes dans le comportement du sol, ou encore dans le décollement de la fondation, jouaient le rôle d'isolateur en réduisant les efforts en base. En contre partie des déplacements plus importants sont observés, ce qui nécessite une étude approfondie de ces phénomènes. Ce travail présente la description mathématique d'un élément d'interface 3D modélisant une fondation superficielle reposant sur un massif de sol semi infini et permettant de prendre en compte l'interaction sol-structure en considérant la plasticité du sol et le décollement de la fondation. Il est basé sur la méthode des macro-éléments (Novat *et al.*, 1991), et plus particulièrement s'inspire du modèle 2D réalisé par (Crémer, 2001).

Son implantation dans un code élément finis a permis de réaliser des comparaisons avec des résultats expérimentaux d'une fondation soumise à des chargements cycliques et ceux issus de programme Camus IV et ainsi de valider son fonctionnement.

2. TYPE DE FONDATION UTILISEES ET CINEMATIQUE ASSOCIEE

La fondation est supposée infiniment rigide et toutes les non-linéarités sont condensées en son centre. Ainsi il est approprié de travailler avec les variables généralisées (ou globales) suivantes : l'effort vertical V , les forces horizontales H_x , H_y , et les moments M_x , M_y mais aussi les déplacements correspondants : le tassement vertical u_z , les déplacements horizontaux u_x , u_y , et les rotations θ_x , θ_y . Le moment de torsion (M_z) n'est pas pris en compte dans le modèle. Une représentation de ces variables généralisées est donnée par la figure 1 à titre d'exemple pour une fondation circulaire.

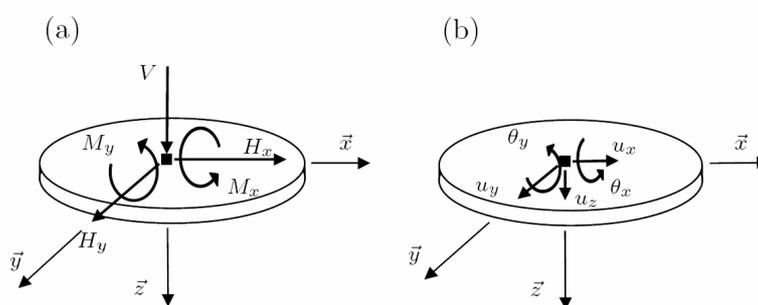


Figure 1 : Type de fondation et variables globales: (a) forces et (b) déplacements

Tous les développements présentés après ont été effectués en considérant dans un premier temps une fondation circulaire. Toutefois le modèle est également capable de simuler le comportement de fondations rectangulaires et filantes. L'adaptation de ces géométries dans le modèle s'effectue au moyen d'un adimensionnement des variables approprié permettant de passer d'une géométrie à une autre (Grange, 2008).

3. DEUX MECANISMES NON LINEAIRES : LA PLASTICITE ET LE DECOLLEMENT

Trois mécanismes différents dont deux non-linéaires doivent être pris en compte dans le macro-élément d'ISS 3D : l'élasticité, la plasticité du sol ainsi que le décollement de la fondation. Le décollement de la fondation caractérise le fait qu'une partie de la fondation se décolle du sol, ce qui n'implique pas forcément que le centre de la fondation se soulève par rapport à sa position initiale. Il peut en effet y avoir décollement et tassement du sol sous le centre de la fondation. Dans le cas contraire, lorsqu'il y a décollement du centre de la fondation, on parle alors de soulèvement de la fondation. Ce soulèvement ne peut être calculé que grâce à ce mécanisme de décollement. Le déplacement total est décomposé en la somme des déplacements élastique, plastique et de décollement.

La plasticité et le décollement sont deux mécanismes couplés car la partie de la fondation qui ne touche plus le sol ne subit plus aucune contrainte de la part du sol. Ainsi la plastification du sol dépend fortement de cette composante de décollement. Inversement, le comportement de décollement dépend aussi de l'état de plastification du sol. En effet dans un cas extrême, le décollement n'intervient pas de

la même manière sur un sol élastique que sur un sol plastique (Crémer, 2001). En conclusion, l'implémentation de ces deux mécanismes distincts doit prendre en compte ce couplage.

4. DESCRIPTION MATHÉMATIQUE DU MACRO-ELEMENT 3D

4.1. COMPORTEMENT ELASTIQUE

La loi de comportement élastique peut s'écrire: $\vec{F} = K^{el}(\vec{u} - \vec{u}^{pl})$ où les déplacements et les efforts sont des grandeurs adimensionnées:

$$\vec{F} = (V' \quad H'_x \quad M'_y \quad H'_y \quad M'_x), \quad \vec{u} = (u'_z \quad u'_x \quad \theta'_y \quad u'_y \quad \theta'_x) \quad [\text{Eq. 1}]$$

La matrice de raideur est considérée diagonale, c'est-à-dire qu'il n'existe pas de couplages entre les différentes directions de chargements dans le domaine élastique. Ces grandeurs sont adimensionnées de manière différente en tenant compte de la géométrie de la fondation. L'adimensionnement est aussi fait de telle manière que les variables d'efforts et de déplacements sont conjuguées du point de vue du travail des efforts appliqués à la fondation (Grange *et al.*, 2007) et (Grange, 2008). Il va permettre d'utiliser les mêmes modèles de plasticité et de décollement et surtout les mêmes équations quelles que soient les formes de fondations.

4.2. MÉCANISME DE PLASTICITE

4.2.1. Critère de rupture

Le critère de rupture est défini pour un mécanisme de renversement avec décollement (couplage). Il est issu du travail de (Pecker, 1997) et a déjà été utilisé dans le macro-élément 2D de (Crémer, 2001). Ce critère a été initialement développé pour une fondation superficielle filante. Toutefois (Gottardi *et al.*, 1999) ont montré que la forme des surfaces de rupture pour une fondation circulaire est très similaire. De plus, grâce à la symétrie de révolution du problème, l'adaptation en 3D est très simple et consiste à ajouter deux termes : l'un par rapport à l'effort horizontal réduit H'_x et l'autre par rapport au moment M'_y afin d'obtenir une surface de dimension 5:

$$f_{\infty} \equiv \left(\frac{H'_x}{aV'^c (1-V')^d} \right)^2 + \left(\frac{M'_y}{bV'^e (1-V')^f} \right)^2 + \left(\frac{H'_y}{aV'^c (1-V')^d} \right)^2 + \left(\frac{M'_x}{bV'^e (1-V')^f} \right)^2 - 1 = 0 \quad [\text{Eq. 2}]$$

Les coefficients: a, b, c, d, e et f définissent la taille et la forme de la surface dans les différents plans. Ces paramètres peuvent être calés sur différents résultats expérimentaux que l'on peut trouver dans la littérature.

4.2.2. Surface de charge et lois d'écrouissages

La surface de charge utilisée provient aussi du travail de (Crémer, 2001). Elle est donnée par l'équation 3 et est représentée par la figure 2. L'adaptation pour la fondation 3D est la même que pour le critère de rupture avec l'ajout de $\vec{\tau} = (\alpha, \beta, \delta, \eta)$ le vecteur composé des variables d'écrouissage cinématique, et ρ la variable d'écrouissage isotrope. La variable γ est choisie pour paramétrer le second point d'intersection de la surface de charge avec l'axe V' (l'autre point étant l'origine de

l'espace des forces). Cette dernière variable d'érouissage donne l'effort vertical maximum que la fondation a subi tout au long de son histoire.

$$f_c(F, \bar{\tau}, \rho, \gamma) \equiv \left(\frac{H'_x}{\rho a V'^e (\gamma - V')^d} - \frac{\alpha}{\rho} \right)^2 + \left(\frac{M'_y}{\rho b V'^e (\gamma - V')^f} - \frac{\beta}{\rho} \right)^2 + \left(\frac{H'_y}{\rho a V'^e (\gamma - V')^d} - \frac{\delta}{\rho} \right)^2 + \left(\frac{M'_x}{\rho b V'^e (\gamma - V')^f} - \frac{\eta}{\rho} \right)^2 - 1 = 0 \quad [\text{Eq. 3}]$$

Les variables d'érouissages cinématiques $\alpha, \beta, \delta, \eta$ permettent de déterminer le centre de l'ellipsoïde dans l'hyper plan (H'_x, M'_y, H'_y, M'_x) . L'évolution de ces variables a été obtenue en étudiant le comportement expérimental dans (Gottardi *et al.*, 1999) et à partir de simulations numériques de (Crémer, 2001) d'une fondation sous chargement cyclique. Une description détaillée de ces variables ainsi que du reste du modèle et notamment la loi d'écoulement est donnée dans (Grange *et al.*, 2007).

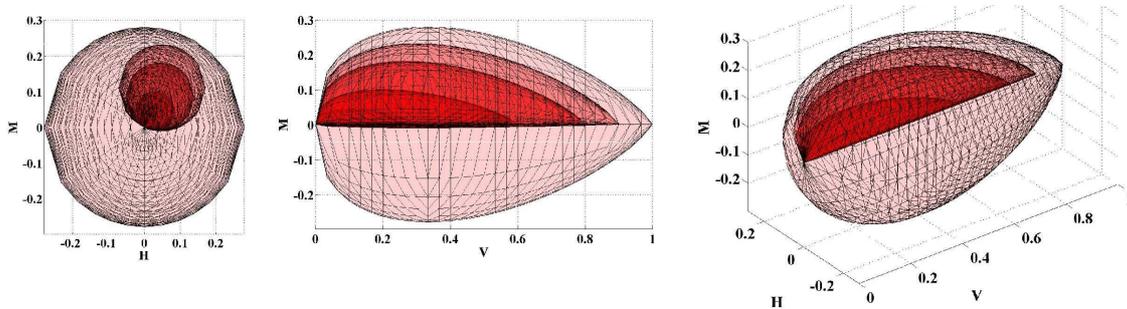


Figure 2. Représentation de quelques surfaces de charge et du critère de rupture projeté dans les plans $(H'_x-M'_y)$, (M'_y-V) et dans l'espace $(H'_x-M'_y-V)$

4.3. MECANISME DE DECOLLEMENT SUR SOL PLASTIQUE

Le modèle de décollement énoncé ici décrit de manière phénoménologique le mécanisme de décollement développé dans (Crémer, 2001). Il ne prend pas en compte de changement de géométrie comme le changement de zone de contact entre la fondation et le sol, qui est en réalité le moteur des non linéarités. En effet le macro-élément n'est en réalité modélisé que par un point, un changement de géométrie n'est conceptuellement pas compatible avec ce type de description.

Le phénomène est donc pris en compte dans son ensemble en fonction d'une variable δ qui représente le pourcentage de semelle décollée (figure 3). Nous faisons l'hypothèse que l'effort horizontal n'influence pas le comportement de décollement.

4.3.1. Critère de rupture et surfaces de charges

Il y a rupture en décollement lorsque la fondation est totalement décollée, autrement dit lorsque $\delta=1$. Une analyse simple d'une fondation de n'importe quelle forme sur sol élastique permet de lier le moment de renversement en fonction d'un effort vertical donné. Ainsi nous obtenons $M'=V/2$. Cette équation constitue en réalité un critère de rupture. Sur sol plastique la relation est un peu plus compliquée et fait intervenir d'autres termes (Crémer, 2001). De plus l'expression dépend de la forme géométrique de la fondation. Ainsi nous obtenons, pour un chargement pouvant avoir lieu dans les 2 sens (pour $M'>0$ et $M'<0$) (Grange, 2008):

$$f_{\infty} \equiv M'^2 - \left(\frac{V'}{q_1} (e^{-AV'} + q_2) \right)^2 = 0 \quad [\text{Eq. 4}]$$

Où A est un paramètre constitutif de la loi, et q_1 et q_2 un couple d'entiers tenant compte de la géométrie de la fondation.

Le comportement d'une fondation soumise à un mécanisme de décollement est bien entendu non-linéaire mais aussi non réversible avec retour non élastique. C'est-à-dire que lors d'un déchargement, le retour n'est pas tout de suite élastique mais entre dans une phase de déchargement non linéaire (figure 4). Ceci est dû au fait que la fondation reprend progressivement contact avec le sol, ce qui augmente la rigidité au fur et à mesure du déchargement. L'évolution de la surface de charge est donc plus complexe que pour un modèle de plasticité classique puisqu'elle évolue même en déchargement.

Pour pouvoir l'activer, la surface de charge est donc choisie de telle sorte que son signe soit toujours positif quel que soit le sens de chargement. La variable d'écrouissage β qui est une fonction de δ et de δ_{max} (décollement maxi atteint lors du chargement) évolue donc en phase de chargement et en phase de déchargement. L'évolution des variables d'écrouissage est basée sur les travaux de (Crémer, 2001). L'expression de la surface de charge est représentée par l'équation 5. Elle est donnée pour le calcul des décollements dans le sens positif β^{\oplus} et pour le décollement dans le sens négatif β^{\ominus} (figure 3). Ces deux directions sont a priori indépendantes.

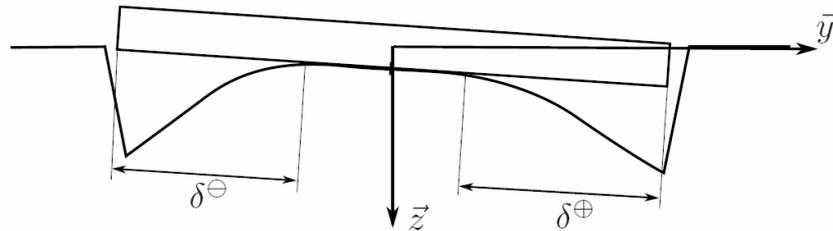


Figure 3. Représentation de la fondation décollée avec les 2 variables de décollement (cette configuration représente un décollement résiduel dans les deux sens de chargement)

$$\begin{cases} f^{\oplus} \equiv \left| M' - \left(\frac{V'}{q_1} (e^{-AV'} + q_2 \beta^{\oplus}) \right) \right| = 0 \\ f^{\ominus} \equiv \left| M' + \left(\frac{V'}{q_1} (e^{-AV'} - q_2 \beta^{\ominus}) \right) \right| = 0 \end{cases} \quad [\text{Eq. 5}]$$

La surface définissant la limite élastique est ici importante à définir. En effet la surface de charge est toujours positive, il nous faut donc effectuer un test pour savoir dans quel régime (chargement ou déchargement) se trouve le modèle. La limite élastique évoluant en fonction du chargement maximal atteint est donnée par l'équation 6:

$$\begin{cases} f_{el}^{\oplus} \equiv M' - \frac{V'}{q_1} q_2 \delta_{max}^{\oplus} (1 - \eta) - \frac{V'}{q_1} e^{-AV'} = 0 \\ f_{el}^{\ominus} \equiv M' - \frac{V'}{q_1} q_2 \delta_{max}^{\ominus} (1 - \eta) + \frac{V'}{q_1} e^{-AV'} = 0 \end{cases} \quad [\text{Eq. 6}]$$

De plus au cours du chargement et suivant l'intensité du chargement maximal de la fondation, le domaine élastique peut totalement disparaître (Figures 4 et 5 (b)). Ceci se traduit physiquement par l'apparition d'un décollement résiduel de part et d'autres de la fondation dû à la plastification du sol (représenté par la configuration de la figure 3).

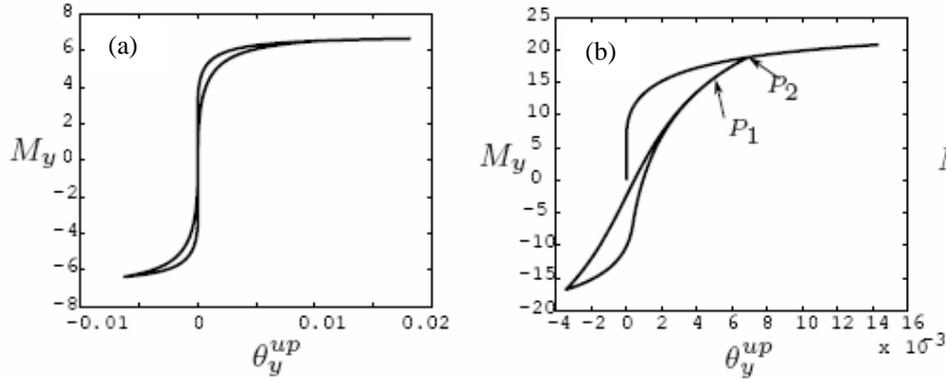


Figure 4. Lois moment-rotation de décollement. (a) cas où la zone élastique existe, (b) cas où la zone élastique n'existe plus

Une représentation symbolique de toutes ces surfaces est donnée par la figure 5.

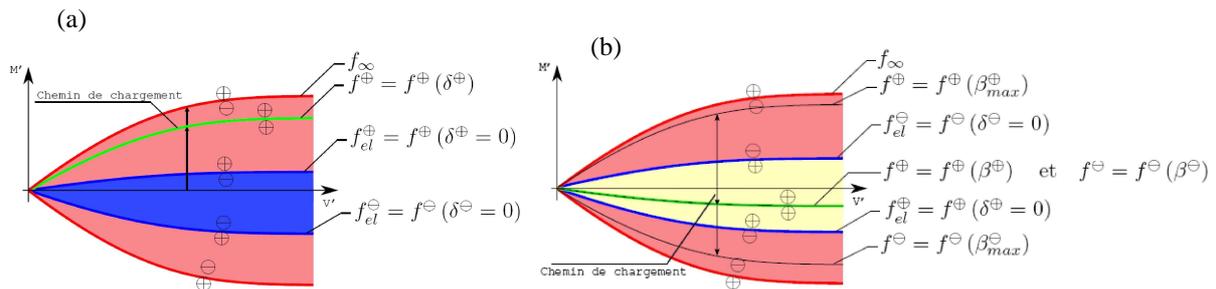


Figure 5. Représentation des surfaces de charge, critère de rupture avec le signe de chaque fonction dans les différents domaines. (a) cas où la zone élastique existe, (b) cas où la zone élastique n'existe plus

Si des décollements résiduels apparaissent des 2 côtés de la fondation, cela veut dire que le domaine élastique du mécanisme a complètement disparu (cas (b) des figures 4 et 5). Les mécanismes \oplus et \ominus peuvent donc a priori être actifs simultanément. Les conditions permettant de choisir les mécanismes actifs sont données par les inéquations :

$$\begin{cases} f_{el}^{\oplus} \leq 0 \cup f^{\oplus} = 0 \Leftrightarrow \text{élasticité} \\ f_{el}^{\oplus} \geq 0 \cap f^{\oplus} > 0 \Leftrightarrow \text{décollement} \end{cases}$$

$$\begin{cases} f_{el}^{\ominus} \leq 0 \cup f^{\ominus} = 0 \Leftrightarrow \text{élasticité} \\ f_{el}^{\ominus} \geq 0 \cap f^{\ominus} > 0 \Leftrightarrow \text{décollement} \end{cases}$$

L'évolution des mécanismes est telle que lorsqu'un mécanisme (\oplus ou \ominus) se désactive (parce que le décollement s'annule dans ce sens), le comportement reprend exactement le chemin de

déchargement (point P1 de la figure 4 (b) où un seul mécanisme était actif), puis reprend le chargement vierge au point P2.

L'adaptation 3D du décollement nécessite le développement du même modèle pour l'autre direction transversale. Le décollement dans cette nouvelle direction est couplé à la première en projetant les efforts dans la base principale de rotation de la fondation. Par ailleurs, le couplage avec le mécanisme de plasticité vu plus haut est aisé car le formalisme de plasticité utilisé pour ces 2 mécanismes permet d'utiliser la théorie des multi-mécanismes (Simo *et al.*, 1998).

5. SIMULATIONS NUMERIQUES ET COMPARAISONS EXPERIMENTALES

5.1. COMPORTEMENT CYCLIQUE

Dans le cadre d'un programme Européen (TRISEE, 1998), des essais cycliques et pseudo-dynamiques sur une fondation superficielle carrée reposant sur un massif de sable ont été réalisés. Deux essais sont présentés ici avec deux sables de densité différentes (haute densité HD et faible densité LD). Les courbes de la figure 6 confrontent le modèle numérique et l'expérience pour les lois moment-rotation, effort horizontal-déplacement horizontal et tassements en fonction du temps.

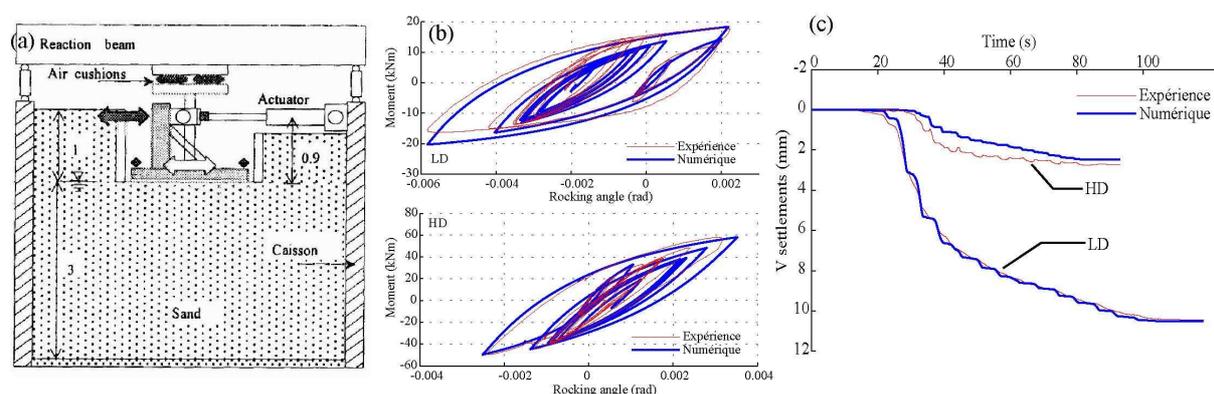


Figure 6. Essais TRISEE, (a) Schéma de la structure, (b) courbes Moment-rotation et (c) tassements en fonction du temps pour 2 types de sable

5.2. COMPORTEMENT DYNAMIQUE

Une simulation numérique des essais dynamiques Camus IV (Combescure *et al.*, 2000] est donnée par la figure 7. Ces essais consistent à étudier le comportement d'une structure élancée (bâtiment de 5 étages) reposant sur un bac de sable via une fondation superficielle et le tout excité par la table sismique du CEA à Saclay. La figure 7 montre que les résultats expérimentaux et numériques sont relativement proches en termes de valeurs maximales mais aussi en termes de fréquences.

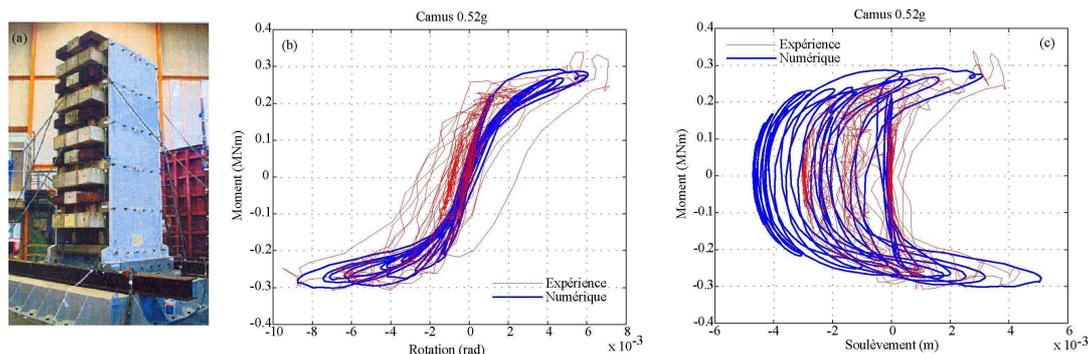


Figure 7. Essais CAMUS IV, (a) Photographie de la maquette, (b) courbes Moment-Rotation, et (c) Moment-soulèvement pour l'accélérogramme Nice 0.52g

6. CONCLUSIONS

Le macro-élément 3D d'interaction sol-structure développé dans cet article donne des résultats satisfaisants pour simuler le comportement non linéaire d'une fondation superficielle rigide reposant sur un massif de sol semi infini et soumise à des chargements cycliques et dynamiques. L'utilisation de variables globales permet de réduire significativement le temps de calcul. Il a été implanté dans FEDEASLab, un code éléments finis développé dans Matlab. Tous les résultats présentés ici ne sont que pour des chargements plans. Le caractère 3D du modèle n'a pas été présenté compte tenu de la difficulté d'obtenir des résultats expérimentaux pour des chargements dans 2 directions horizontales. Ceci constitue une validation future du modèle.

7. BIBLIOGRAPHIE

- Crémer C. (2001) « Modélisation du comportement non linéaire des fondations superficielles sous séismes », *Thèse de 3^{ème} cycle*, LMT Cachan - ENS Cachan France, 2001.
- Combescure, D., et Chaudat, Th. (2000) « ICONS european program seismic tests on r/c walls with uplift; CAMUS IV specimen » - Individual Study, ICONS project Rapport, SEMT/EMSI/RT/00-27/4, CEA, Direction des Réacteurs Nucléaires, Département de Mécanique et de Technologie, 2000, Paris, France, 2000.
- Gottardi G., Houlsby G.T., Butterfield R. (1999) « Plastic response of circular footings under general planar loading ». *Géotechnique*. Vol. 49, No. 4, 1999, pp. 453-469.
- Grange, S., Kotronis, P., Mazars, J. (2007) « A 3D macro-element for soil-structure interaction », *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 2007 (accepted).
- Grange, S. (2008) « Risque sismique: stratégie de modélisation pour simuler la réponse des structures en béton et leurs interactions avec le sol », *Thèse de 3^{ème} cycle de l'INPG*, (en préparation).
- Nova R., Montrasio L. (1991) « Settlements of shallow foundations on sand », *Géotechnique*, Vol. 41, No. 2, 1991, pp 243-256.
- Pecker A. (1997) « *Analytical formulae for the seismic bearing capacity of shallow strip foundations* ». *Seismic Behavior of Ground and Geotechnical Structures*. (ed Seco e Pinto), pp 261-268, Balkema, Rotterdam, Netherlands, 1997.
- TRISEE (1998) 3D Site Effects and Soil-Foundation Interaction in Earthquake and vibration Risk Evaluation. Part 4 « Large-scale geotechnical experiments on soil-foundation interaction » European Commission, Directorate General XII for science, Res. and Dev, 1998.