

DEVELOPPEMENT D'UN MACROELEMENT 3D POUR L'ETUDE DU COMPORTEMENT SISMIQUE DES FONDATIONS SUPERFICIELLES

A 3D MACROELEMENT TO MODEL THE SEISMIC BEHAVIOUR OF SHALLOW FOUNDATIONS

Youssef ABBOUD¹, Sébastien BURLON¹, Jean-François SEMBLAT¹

¹ IFSTTAR, Marne-La-Vallée, France

RÉSUMÉ – Cet article présente le développement d'un macroélément tridimensionnel pour étudier l'interaction sol fondation sous sollicitations sismiques tenant compte des non-linéarités du sol et de l'interface sol-fondation. Ce macroélément est implémenté dans CESAR-LCPC. Nous nous intéressons notamment à la variation temporelle du coefficient de sécurité durant la sollicitation sismique, et aux effets de la prise en compte des non-linéarités sur le dimensionnement des structures.

ABSTRACT – In this article, a 3D macroelement to model the seismic behavior of shallow foundations is formulated, taking into account the non-linearities in the soil and the soil-foundation interface. This macroelement is implemented in CESAR-LCPC, a finite element analysis software developed by IFSTTAR. The temporal variation of the safety factor during the seismic event is highlighted, as well as how non linearities affect the design requirements.

1. Introduction

La justification des fondations superficielles sous chargement sismique nécessite la prise en compte de l'interaction sol-structure et notamment des non-linéarités qui peuvent apparaître dans le sol. Cette interaction résulte de l'impossibilité pour la fondation de suivre le mouvement imposé par le sol et des effets liés à l'inertie de la superstructure. Les non-linéarités matérielles (plasticité dans le sol) et géométriques (glissement et/ou décollement à l'interface sol-fondation) sont quant à elles souvent mises en évidence lors des observations post-sismiques et des expériences menées sur modèles réduits.

D'autre part, l'usage des approches linéaires et linéaires équivalentes pour les justifications sous séismes entraîne une majoration des efforts induits sur la fondation et dans la superstructure. La prise en compte des non-linéarités s'avère importante pour développer des analyses moins conservatrices.

Plusieurs méthodes existantes permettent d'étudier l'interaction sol-fondation et ses non-linéarités. L'approche basée sur le macroélément consiste à diviser le sol en deux zones : une zone proche où sont concentrées les différentes non-linéarités, et une zone suffisamment lointaine où le comportement du sol peut être supposé linéaire. La formulation du macroélément en variables généralisées favorise son utilisation pour les vérifications de portance et de tassement des fondations superficielles.

Plusieurs travaux ont visé à construire des macroéléments dans les années récentes, parmi lesquels on peut citer : Nova & Montrasio (1991), Crémer (2001), Crémer, Pecker, et Davenne (2002), Chatzigogos (2007), Grange (2008) et Li (2014). Dans ces études, le champ proche est limité au centre de la fondation, ou à des points particuliers de l'interface sol-fondation.

2. L'approche macroélément

2.1. Généralités

Du point de vue rhéologique, un macroélément est un assemblage de lois de comportement non linéaires liant des déplacements et des rotations à des forces et des moments pour lesquelles les théories classiques de l'élastoplasticité s'appliquent. Les domaines élastiques et plastiques sont séparés par des surfaces de charge susceptibles d'évoluer selon les mécanismes d'érouissage considérés. Les expressions de ces surfaces, ainsi que leurs évolutions sont obtenues grâce à des adaptations des critères prescrits dans les normes en vigueur (cf. § 3).

Les paramètres de ces expressions sont calés par comparaison avec le comportement d'une fondation soumise à un chargement statique monotone jusqu'à la rupture, ou bien à partir de résultats expérimentaux. Le calage permet de connaître le seuil de déclenchement des mécanismes plastiques ainsi que les évolutions des variables d'érouissage et les valeurs limites des charges verticale ou horizontale et des moments.

Les valeurs des raideurs élastiques de la fondation sont prises égales à celles établies par Gazetas (1991) pour un radier de surface de forme quelconque.

2.2. Implémentation numérique

Le macroélément est mis en place aux nœuds de l'interface sol-fondation où on suppose que les non-linéarités sont supposées concentrées. Afin d'assurer la reprise des efforts par le macroélément seul, les efforts internes aux nœuds du macroélément sont considérés comme nuls dans la procédure de résolution du problème d'équilibre par la méthode des éléments finis. En fait, c'est le macroélément qui apporte cette contribution en termes de forces internes et la non-linéarité du sol est prise en compte par ce dernier.

Le macroélément intervient dans le calcul au niveau itératif : le déplacement itératif est injecté dans le macroélément, Le macroélément, à son tour, retourne un torseur d'efforts représentant la réponse non linéaire de la fondation, ce torseur est ensuite injecté dans le calcul sous forme de forces nodales, puis on passe à l'itération suivante. Une fois l'équilibre global atteint, le processus itératif est arrêté et on passe à l'incrément suivant.

Le macroélément construit a été implémenté dans CESAR-LCPC, un logiciel de calcul par éléments finis développé par l'IFSTTAR. Le couplage des 3 mécanismes plastiques en jeu est traité en utilisant la méthode détaillée par Simo et Hughes (1998).

2.3. Repère associé à la fondation

Le schéma de la Figure 1 représente une fondation rectangulaire soumise à un torseur d'efforts généralisés dans son repère. Ce torseur d'efforts est constitué :

- de deux efforts horizontaux H_x et H_y , suivant les directions x et y respectivement,
- un effort vertical V suivant la direction z ,
- deux moments M_x et M_y autour des axes horizontaux de la fondation.

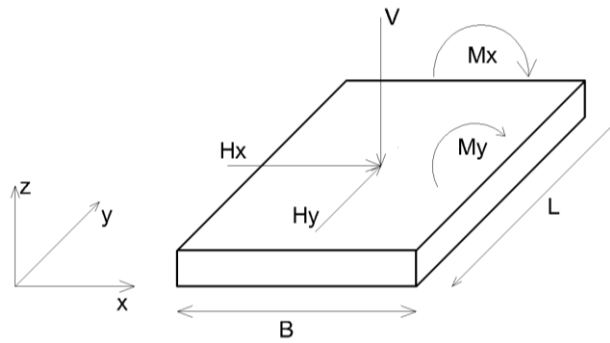


Figure 1. Semelle soumise à des efforts dans son repère local

3. Description du macroélément développé

Les surfaces de charge sont inspirées des critères prescrits dans l'Eurocode 7 (Eurocode 7, 2005). Des termes sont ajoutés pour adapter les critères à des chargements dans les deux directions x et y. Il en résulte 3 critères (Tableau 1).

Pour représenter l'évolution des surfaces de charge dans l'espace des efforts généralisés, des fonctions d'écroûissage sont ajoutées : il s'agit d'écroûissage cinématique non linéaire pour les surfaces de renversement et glissement, et un écroûissage isotrope pour la surface de poinçonnement. L'évolution des variables d'écroûissage est présentée dans le Tableau 1.

La loi d'écoulement donne la direction dans laquelle vont se développer les déplacements plastiques. Dans notre cas, des lois d'écoulement plastique associées ont été utilisées.

Tableau 1. Formulation élastoplastique du macroélément

| | | |
|---------------|--|--|
| Glissement | Surface de charge | $f_1(H, V) = \sqrt{H_x^2 + H_y^2} - V \tan(\delta) - C(B - 2e_x)(L - 2e_y) \leq 0$ |
| | Loi d'écroûissage cinématique | $h_1(q_h) = H_h du_{h_{pl}} \exp(-\alpha u_{pl}^c)$ |
| | Surface de charge avec les variables d'écroûissage | $f_1(H, V) = \sqrt{(H_x - q_{hx})^2 + (H_y - q_{hy})^2} - V \tan(\delta) - C(B - 2e_x)(L - 2e_y) \leq 0$ |
| Poinçonnement | Surface de charge | $f_2(H, V, M) = V - V_{lim} \left(1 - \frac{4}{\pi} \arctan\left(\frac{H}{V}\right)\right)^2 \left(1 - 2\frac{M_x}{BV}\right) \left(1 - 2\frac{M_y}{LV}\right) \leq 0$ |
| | Règle d'écroûissage isotrope | $R(u_{vpl}) = (V_{ult} - V_{lim}) \frac{ u_{vpl} }{ u_{vpl} + u_0}$ |
| | Surface de charge avec les variables d'écroûissage | $f_2(H, V, M_x, M_y, q_v) = V - (V_{lim} + R) \left(1 - \frac{4}{\pi} \arctan\left(\frac{H}{V}\right)\right) \left(1 - 2\frac{M_x}{BV}\right) \left(1 - 2\frac{M_y}{LV}\right) \leq 0$ |
| Découlement | Surface de charge | $f_3(V, M) = \frac{1}{2} - \left(1 - 2\frac{M_x}{BV}\right) \left(1 - 2\frac{M_y}{LV}\right) \leq 0$ |
| | Loi d'écroûissage cinématique | $h_3(q_m) = M_0 \frac{\theta_0}{(\theta_0 + \theta_{pl})^2} du_{m_{pl}}$ |
| | Surface de charge avec les variables d'écroûissage | $f_3(V, M_x, M_y, q_{Mx}, q_{My}) = \left(\frac{1}{2}\right) - \left(1 - 2\frac{ M_x - q_{Mx} }{BV}\right) \left(1 - 2\frac{ M_y - q_{My} }{LV}\right) \leq 0$ |

4. Application à un modèle sol-fondation

Le macroélément est validé par comparaisons de résultats issus de simulations numériques par éléments finis réalisées au moyen du logiciel CESAR-LCPC avec ceux obtenus par le macroélément pour les mêmes paramètres de chargement.

Le maillage par éléments finis utilisé pour valider le macroélément représente une fondation rectangulaire de 3 m x 4 m posée sur un massif de sol qui s'étend de 3B (respectivement 3L) du bord de la fondation dans la direction x (respectivement y), et de 3B en profondeur. Le massif, maillé à l'aide d'éléments hexaédriques, est fixé à sa base et sur les côtés dans les 3 directions du mouvement.

La fondation est surmontée d'un portique en béton. Son rôle est de permettre la prise en compte de l'interaction inertielle entre le sol et la fondation.

Le portique consiste en une dalle en béton de 3m x 4m et d'épaisseur 20 cm, portée par 4 poteaux à chaque coin. Les poteaux ont une section carrée de 40cm x 40cm et une hauteur de 3m. Le maillage est présenté sur la Figure 2.

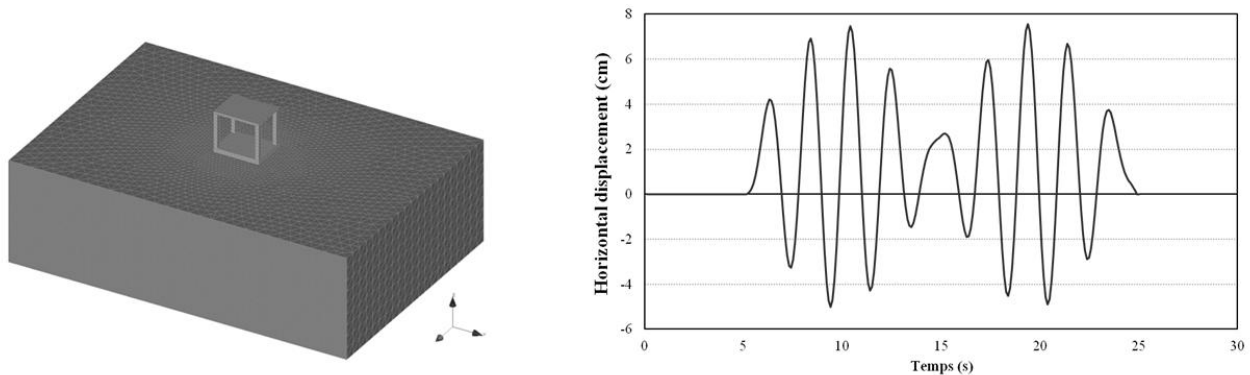


Figure 2. Maillage (à gauche) et excitation dynamique (à droite)

Le sol a une masse volumique de 1400 kg/m³, un module d'Young de 10 MPa et un coefficient de Poisson de 0.35. Le comportement plastique est défini par un critère de rupture de Mohr-Coulomb avec une cohésion c égale à 50 kPa et un angle de frottement interne ϕ égal à 10°. Ces propriétés sont destinées à représenter une argile raide non saturée.

5. Réponse sous sollicitations statiques et dynamique

5.1. Réponse sous charge verticale centrée

La première vérification consiste à charger la fondation verticalement jusqu'à la rupture (8000KN) avec le macroélément actif, et comparer la réponse obtenue à celle obtenue par la simulation par éléments finis sans macroélément pour les mêmes paramètres de chargement. La courbe de la Figure 3 montre la comparaison entre ces deux réponses.

5.2. Réponse sous charges inclinées et excentrées

Dans cette partie, une charge verticale de 3500 kN est appliquée à la fondation. Dans un premier cas, une charge horizontale $H = 1900$ kN est appliquée. Cette charge est divisée en deux composantes suivant x et y respectivement. Dans un deuxième cas, un moment

$M_y = 6000 \text{ kN.m}$ est appliqué. Les valeurs des charges appliquées sont calculées pour que le torseur d'efforts soit conforme aux critères de rupture courants.

La courbe de la Figure 4 montre la comparaison des deux réponses (simulation éléments finis et macroélément).

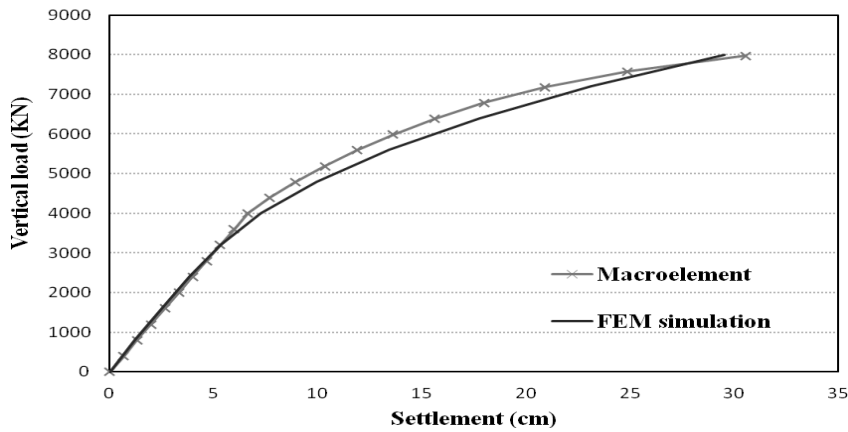


Figure 3. Réponse sous charge verticale monotone

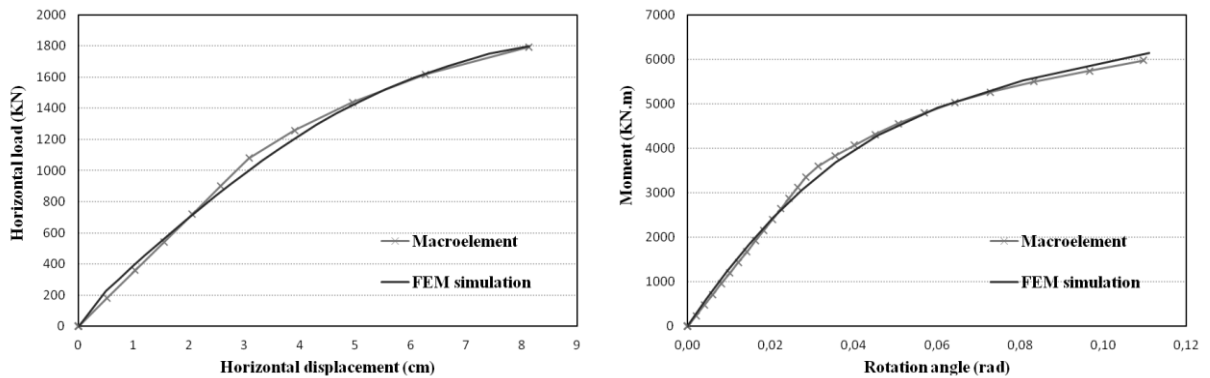


Figure 4. Réponse sous charge inclinée (à gauche) et sous charge excentrée (à droite)

5.3. Réponse sous chargements cycliques

Dans cette partie, des chargements cycliques sont appliqués à la fondation comme suit : la fondation est chargée verticalement, puis une sollicitation cyclique (1 cycle) est appliquée. La réponse obtenue avec le macroélément actif est comparée à celle obtenue à partir d'une simulation éléments finis sans macroélément. Il s'agit d'une comparaison des valeurs de l'énergie dissipée au cours des cycles de chargement. Une charge verticale de 3500 kN est appliquée à la fondation, suivie, dans un premier cas, d'un cycle de chargement horizontal d'amplitude 1900 kN ; et dans un deuxième cas, d'un cycle de moment d'amplitude 5200 kN.m. La courbe de la Figure 5 montre la comparaison des deux réponses (simulation éléments finis et macroélément).

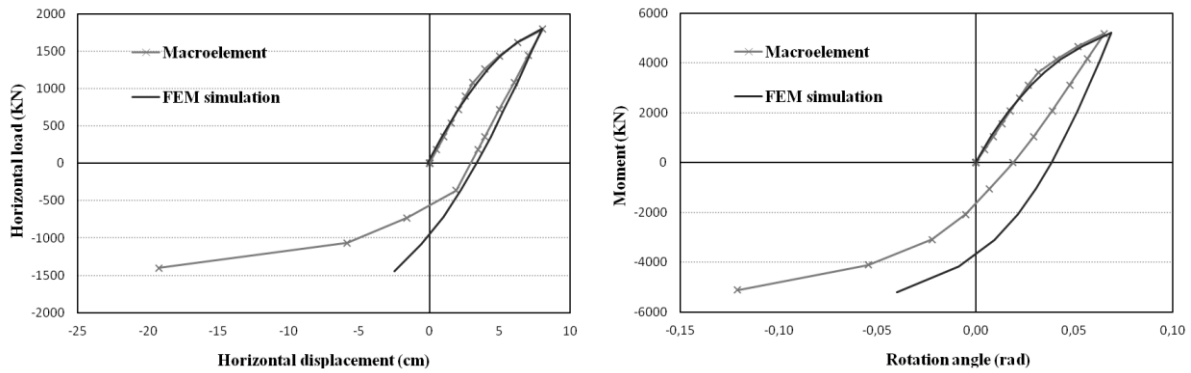


Figure 5. Réponse sous charge cyclique inclinée (à gauche) et sous charge cyclique excentrée (à droite)

5.4. Réponse sous excitation dynamique

Dans cette partie, une excitation dynamique [Figure 2] est appliquée au système sol fondation. Il s'agit d'un signal artificiel, réparti en deux bouffées d'énergie, d'amplitude 8 cm, et de fréquence 0.5 Hz. Avant d'appliquer ce signal, un effort vertical de 3500 kN est appliqué à la fondation.

La Figure 6(a) montre l'évolution de l'effort induit sur la fondation en fonction du déplacement engendré par celle-ci, dans les deux cas d'analyse linéaire et d'analyse tenant compte des non-linéarités. L'évolution de l'effort horizontal induit au cours de l'excitation dans les deux cas est représentée sur le graphe de la Figure 6(b). Celle du déplacement horizontal irréversible est représentée sur la Figure 6(c).

Le macroélément peut être utilisé pour suivre l'évolution temporelle des paramètres du comportement de la fondation (p.ex. inclinaison ou excentrement de l'effort induit, surface comprimée, glissement permanent, etc.), et comparer leurs valeurs aux limites imposées par les normes en vigueur. A titre d'exemple, l'évolution temporelle de l'angle d'inclinaison de l'effort induit sur la fondation, vis-à-vis une limite choisie conformément au critère de glissement est représentée sur la Figure 6(d). Cette limite est dépassée pendant 8 secondes réparties sur le temps de l'excitation. Des analyses plus fines de ce type pourraient introduire un paramètre temporel pour la justification des ouvrages sous séisme. La tolérance d'un tel dépassement est jugée selon la sensibilité de l'ouvrage en question.

6. Analyse des résultats

Les comparaisons des réponses sous chargements monotones montrent que l'outil développé est capable de modéliser la réponse de la fondation pour des chemins de chargement différents. En effet, on observe un écart de 8%, 0.5% et 3% entre les deux réponses pour les chemins de charge centrée, inclinée et excentrée respectivement.

D'autre part, pour les chemins de chargement cycliques (Figure 5), le macroélément permet de représenter la dissipation de l'énergie à l'interface sol-fondation, accompagnée de l'apparition de déformations irréversibles. Ces déplacements (resp. rotations) plastiques permanents sont dus à l'évolution de l'état du contact sol-fondation à l'interface après le glissement (resp. décollement). Dans le macroélément, cette évolution est représentée par les lois d'écrouissage cinématique qui permettent le déplacement des surfaces de charge correspondantes dans l'espace des efforts généralisés.

Dans le cas de l'excitation dynamique, la comparaison entre les analyses linéaires et non linéaires montre que la prise en compte des non-linéarités permet une diminution des efforts, réduisant ainsi des surdimensionnements éventuels. Ceci est accompagné d'une génération de déplacements plastiques et d'une dégradation de l'état du contact, gérées par la loi d'écroutissage cinématique du macroélément. La tolérance des déplacements irréversibles générés est jugée selon la sensibilité de l'ouvrage en question, et la probabilité d'occurrence de l'évènement sismique considéré. Un suivi temporel du coefficient de sécurité durant l'excitation sismique considérée peut être réalisé.

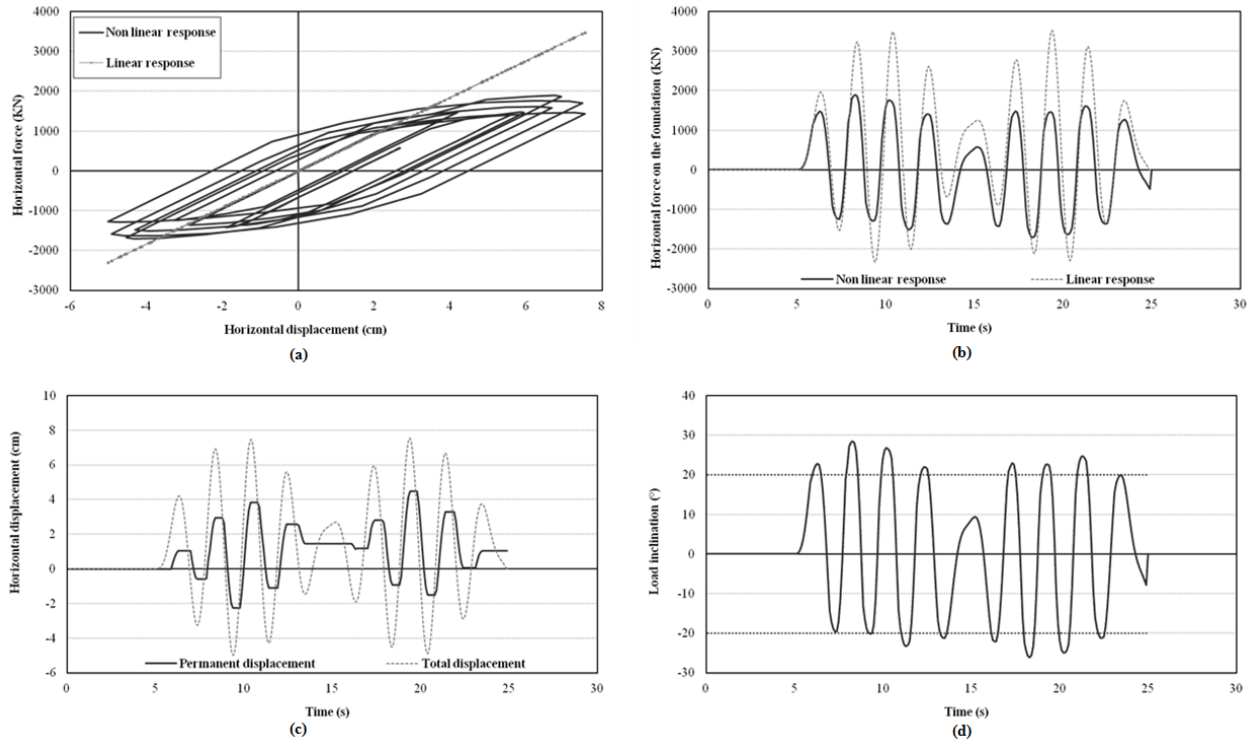


Figure 6 Résultats dynamiques: (a) $H-u_h$, (b) suivi temporel de la force induite à la fondation, (c) du déplacement horizontal, (d) de l'inclinaison de l'effort induit

7. Conclusions et perspectives

Cet article présente le développement d'un macroélément 3D pour étudier le comportement des fondations superficielles sous chargement sismique. Les premières vérifications montrent la fiabilité de cet outil pour représenter le comportement statique et dynamique, linéaire et non linéaire. De plus, la nécessité de la prise en compte des non-linéarités dans la phase de conception s'avère de plus en plus importante, afin de réduire les conservatismes et par suite des surcoûts dans la construction. Le macroélément développé permet la prise en compte de ces non-linéarités, à l'aide d'équations représentant le comportement plastique de la fondation, et de l'interface sol-fondation. Des améliorations peuvent être apportées à l'outil : la prise en compte de l'effet des forces d'inertie induites dans le sol, et de l'encastrement de la fondation peuvent être envisagées. Des résultats d'essais en centrifugeuse viendront valider complètement le macroélément.

8. Bibliographie

- Chatzigogos, C. (2007). Comportement sismique des fondations superficielles: Vers la prise en compte d'un critère de performance dans la conception. *Thèse de doctorat. France: Ecole Polytechnique.*
- Crémer, C. (2001). Modélisation du comportement non linéaire des fondations superficielles sous séismes. *Thèse de doctorat. Cachan- France: LMT Cachan - ENS.*
- Crémer, C., Pecker, A., & Davenne, L. (2002). "Modelling of nonlinear dynamic behaviour of a shallow strip foundation with macro-element". *Journal of Earthquake Engineering* 6(2) ,175–211.
- Eurocode7-Partie 1 (2005). Norme NF EN 1997-1 : Calcul géotechnique. AFNOR.
- Eurocode 8-Partie 5 (2005). Norme NF EN 1998-5 : Conception et dimensionnement des structures pour leur résistance aux séismes. AFNOR.
- Gazetas, G. (1991). Foundation Engineering Handbook, Chapter 15. New York: Fang H-Y, Van Nostrand Reinhold:.
- Grange, S. (2008). Modélisation simplifiée 3D de l'interaction sol-structure : application au génie parasismique, *thèse de doctorat. Grenoble: Institut Polytechnique de Grenoble.*
- Li, Z. (2014). Etude expérimentale et numérique de fondations profondes sous chargement sismique:pieux verticaux et pieux inclinés. *Nantes: Ecole Centrale de Nantes.*
- Nova, R., & Montrasio, L. (1991). "Settlements of shallow foundations on sand". *Géotechnique* 41(2) , 243–256.
- Simo, J., & Hughes, T. (1998). Computational Inelasticity. *Springer.*

9. Remerciements

Ces travaux sont réalisés dans le cadre d'un contrat de recherche partenariale financé par EDF pour la justification des fondations superficielles sous charge sismique.

10. Liste des symboles

- B, L : largeur et longueur de la fondation (m)
C : cohésion du sol (kPa)
 φ : angle de frottement interne du sol (rad)
 H_x, H_y : efforts horizontaux suivant la direction x et y respectivement (kN)
 u_h, u_{hpl} : déplacement horizontal total et irréversible (m)
V : effort vertical appliqué à la fondation (kN)
 u_v, u_{vpl} : déplacement vertical total et irréversible (m)
 M_x, M_y : moments renversants autour de l'axe x et y respectivement (kN.m)
 θ, θ_{pl} : rotation totale et irréversible (rad)
 e_x, e_y : excentrement dans la direction x et y respectivement (m)
 q_{hx}, q_{hy} : variables d'écroûissage cinématique liées au glissement
 q_{Mx}, q_{My} : variables d'écroûissage cinématique liées à la rotation
 V_{lim} : seuil d'activation de l'écroûissage isotrope (kN)
 V_{ult} : charge de rupture de la fondation (kN)
 H_h : module d'écroûissage cinématique horizontal
 α : facteur de mémoire pour la loi d'écroûissage en H
 M_0, θ_0 : moment d'initiation du décollement (KN.m) et rotation correspondante (rad)