

MODELISATION D'ESSAI DE LIQUEFACTION DE FONDATION SUPERFICIELLE SUR TABLE VIBRANTE AVEC CODE_ASTER

Modeling liquefaction tests of shallow foundations on uniaxial shaking table with code_aster

Nagham A. A. CHEHADE¹, Vinicius ALVES FERNANDES^{2,3,4}, François HAMON², Fernando LOPEZ-CABALLERO^{1,4}

¹ Laboratoire MSS-Mat, CNRS UMR 8579, CentraleSupélec, Université Paris-Saclay

² EDF R&D, Lab Paris Saclay, Palaiseau

³ IMSIA UMR EDF-CNRS-CEA-ENSTA 9219, Palaiseau

⁴ Institut SEISM, <http://www.institut-seism.fr>

RÉSUMÉ – La modélisation numérique du benchmark international PEER (2018) sur l'effet de la liquéfaction des sols sur une fondation superficielle a été réalisée à l'aide du code éléments finis code_aster. Les résultats permettent de conforter les méthodologies disponibles pour la prédiction de la susceptibilité des sols à se liquéfier lors des chargements sismiques, ainsi que la réponse sismique des fondations sur sol liquéfiable.

ABSTRACT – A numerical model of the PEER (2018) international benchmark about liquefaction-induced settlements of shallow foundations is developed with the FE code_aster. The numerical results contribute to the validation of the developed methodologies to study soil liquefaction susceptibility and the effects on shallow foundations.

1. Introduction

La liquéfaction induite par les tremblements de terre dans les sols granulaires saturés est un phénomène pouvant entraîner de graves dommages dans les ouvrages environnants. Les fondations superficielles, couramment utilisées pour soutenir diverses constructions du bâti courant et parfois construites sur un dépôt granulaire lâche, présentent une vulnérabilité particulièrement critique, surtout quand elles sont situées dans des zones à fort risque de liquéfaction. C'est surtout après le séisme de Nigata au Japon (1964) et celui d'Alaska aux Etats Unis (1964), que les recherches sur la liquéfaction du sol ont commencé (Seed et Lee, 1966). Cependant, l'estimation de la réponse sismique des fondations superficielles sur sol liquéfiable au cours d'un séisme est difficile à modéliser du fait de la forte non linéarité du comportement du sol lorsqu'il est soumis à de grandes contraintes cycliques, notamment liées à l'augmentation importante des pressions d'eau lors du chargement cyclique non drainé. Le tassement sismo-induit est souvent le critère d'évaluation du risque de liquéfaction du sol afin d'estimer les conséquences sur la stabilité et l'intégrité des ouvrages.

La pratique d'ingénierie pour l'évaluation du potentiel de liquéfaction des sols est basée sur des essais au laboratoire et in-situ. Une meilleure compréhension du phénomène à différentes échelles (laboratoire, centrifugeuse, table vibrante) est en cours via les travaux du projet ANR ISOLATE, qui vise à identifier l'impact de la présence des fines dans le potentiel de liquéfaction des sols granulaires et à quantifier les gains apportés par la méthode de mitigation par biocalcification à ces différentes échelles.

Dans ce contexte, le *Pacific Earthquake Engineering Research Center* (PEER) a réalisé en 2018 un benchmark international autour des essais au cours desquels un

conteneur laminaire, contenant une fondation superficielle posée sur sol liquéfiable, a été excité par une table vibrante. L'objectif de ce travail est de proposer une modélisation robuste de l'essai objet du benchmark PEER, à l'aide du code éléments finis code_aster, en intégrant à la fois la réponse sismique de la fondation et le calcul des tassements sismo-induits, dans un cadre de modélisation hydromécanique couplée. Les résultats de l'essai n'étant pas encore publiés, on propose dans ce travail de se comparer aux résultats de l'équipe gagnante du benchmark (Tamari et Nakagama, 2019).

Cette étude permet de valider et d'enrichir la validation des méthodologies disponibles avec code_aster pour l'évaluation de l'impact de la liquéfaction des sols dans le tassement des sols et des fondations.

2. Présentation de l'essai en boîte de cisaillement laminaire

L'essai a été réalisé à la boîte de cisaillement laminaire de l'UCSD (*University of California San Diego*) présente une longueur de 3.9 m, largeur de 1.8 m et hauteur de 2.9 m. Elle se compose de 43 cadres laminaires en profilés d'acier S3x5.7, qui sont séparés par un système de rouleaux en acier sur des bandes revêtues d'acier inoxydable, afin de permettre un mouvement unidirectionnel. Cela présente l'avantage que chaque cadre peut se déplacer par rapport aux cadres adjacents, minimisant ainsi l'effet de bord. Le poids des cadres en acier représente environ 10 à 13 % de celui du sol. La masse totale des cadres est 4229 kg.

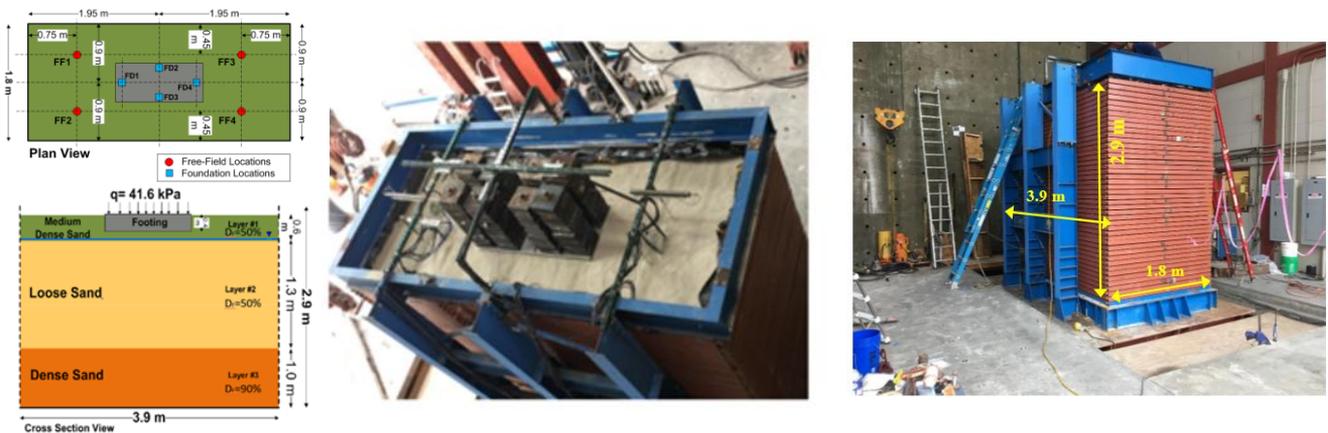


Figure 1. Boîte de cisaillement laminaire au laboratoire de UCSD (PEER blind context, 2018)

2.1. Propriétés mécaniques et hydrauliques du sol en place

Les propriétés du sable constituant le modèle physique et fournies dans le cadre du benchmark figurent dans le Tableau 1. D'après Parra Bastidas (2016), les coefficients d'uniformité et de courbure correspondant au sable d'Ottawa sont respectivement 1.61 et 0.96. Il est donc un sable uniforme susceptible de se liquéfier.

Tableau 1. Propriétés fournies par le benchmark et estimation de Vs.

Layer	ρ [kg/m ³]	e	Φ [deg]	K [cm/s]	Vs estimé [m/s]	Vs (Tamari et Nakagama, 2019) [m/s ²]
1	1970	0.7	30	0.022	[87.85,115.62]	96
2	1970	0.7	30	0.022	[107.7,125.18]	122
3	2068	0.542	30	0.01	[114.79,187.2]	152

La détermination de la vitesse de cisaillement (Vs) initial, essentielle pour la bonne description de la réponse dynamique du modèle physique, a été réalisé en se basant sur

des propriétés des matériaux préconfigurées du logiciel Cyclic1D¹ (selon leur nature et état initial).

La fourchette de valeurs du Tableau 1 permet de prendre en compte la dépendance de la vitesse de cisaillement avec la profondeur par couche, comme représentée dans la Figure 2. Les valeurs obtenues se situent dans la fourchette des valeurs utilisées par Tamari et Nakagama (2019).

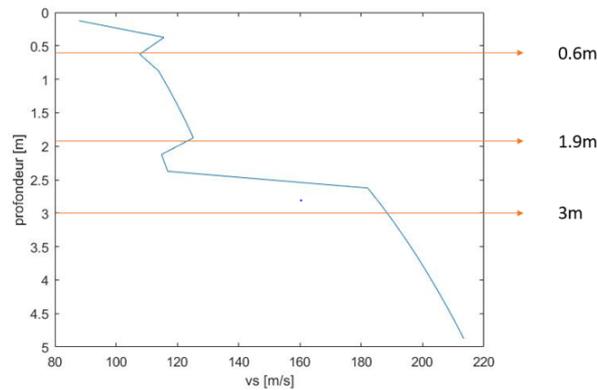


Figure 2. Evolution de la vitesse de cisaillement V_s avec la profondeur obtenue à l'aide de Cyclic1D.

2.2. Modélisation numérique du comportement du sable d'Ottawa-F65 avec la loi de Hujeux

La modélisation du comportement du sol est faite en utilisant la loi de Hujeux/ECP (Aubry et al., 1982, Hujeux, 1985). Il s'agit d'une loi de comportement élastoplastique, multimécanisme, basée sur le concept de l'état critique, adaptée pour des simulations numériques du comportement des sols sous chargement monotone et cyclique, pour différents chemins de chargement, en sec ou saturé.

En partant d'un jeu de paramètres pré-calibrés (Lopez-Caballero et al., 2003) pour un sable dense (DS) et un sable lâche liquéfiable (LS), la calibration des paramètres s'est concentrée à reproduire l'état initial du matériau, via la pression critique p'_{c0} de l'essai œdométrique et la distance d entre la droite d'état critique et de consolidation isotrope. Le sable en surface moyennement dense (MDS) est assimilé au sable lâche dans la modélisation. Les paramètres de Hujeux utilisés dans le modèle numérique sont présentés dans le Tableau 2. La Figure 3 montre une comparaison des courbes expérimentales des essais de cisaillement direct non drainé sur le sable d'Ottawa F-65 (Parra Bastidas, 2016) et celles résultant de la simulation numérique. La démarche de calibration adoptée, très rapide car faisant varier uniquement 2 paramètres du modèle (sur un total de 20), permet de réaliser les premières simulations numériques et d'identifier les différences entre les prédictions du modèle et des résultats expérimentaux. Les résultats de la calibration doivent être mis en perspective des difficultés et de la variabilité pour ce type de prédiction.

La Figure 4 montre une comparaison entre les courbes numériques et expérimentales de CSR en fonction du nombre de cycles N pour le sable lâche de densité relative 42% initialement consolidé à 100 kPa. Pour un même nombre de cycles de chargements, le modèle numérique présente un CSR plus grand que celui du test expérimental. On s'attend donc à ce que le sol utilisé dans la modélisation numérique soit moins liquéfiable que celui utilisé dans l'essai sur table vibrante.

¹ Interface au code éléments finis OpenSEES pour l'exécution des simulations de réponse de site (1D) non linéaires.

Tableau 2. Paramètres du modèle de Hujeux/ECP.

	LS/MDS	DS
Etat critique et plasticité		
Φ'_{pp} [°]	30	30
β	30	17
d	3	2
b	0.2	0.2
p'_{c0} [MPa]	0.05	0.4
Loi d'écoulement et écoulement		
Ψ [°]	30	30
α_{ψ}	1	1
a1	0.0001	0.0002
a2	0.017	0.018
c1	0.08	0.0001
c2	0.04	0.00005
m	1	1
Domaines de comportement		
r_{ela}	0.01	0.005
r_{hvs}	0.05	0.25
r_{mob}	0.9	0.9
r_{iso}	0.0001	0.0001

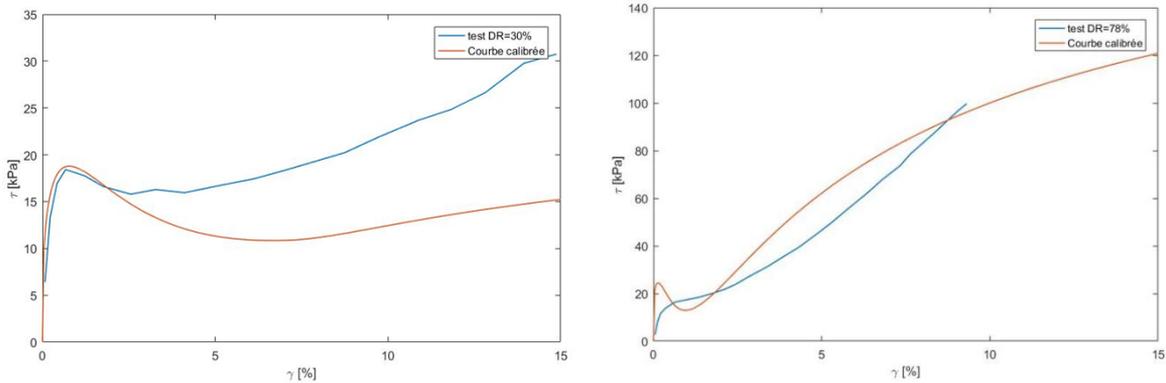


Figure 3. Calibration numérique des essais de cisaillement monotone non drainé du sable d'Ottawa F-65

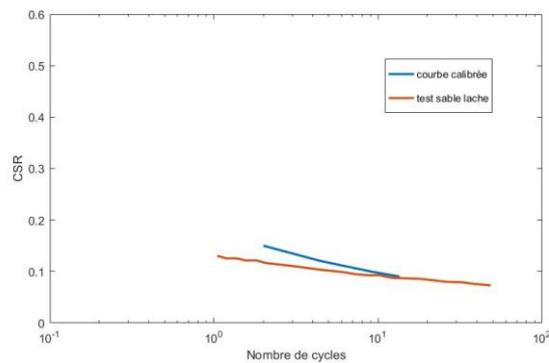


Figure 4. CSR en fonction du nombre de cycles conduisant à la liquéfaction

3. Mise en place du modèle numérique

3.1 Maillage et discrétisation spatiale

On considère le maillage de la Figure 5 à gauche. On s'assure que la taille de la maille est suffisante pour éviter la distorsion numérique selon l'expression suivante :

$$\Delta z = \frac{\lambda}{a} \quad (1)$$

Un choix de modélisation hydro-mécanique couplé classique en petites déformations (HPP) d'ordre 2 pour les degrés de liberté mécanique et d'ordre 1 pour l'hydraulique a été adopté. Afin d'optimiser le temps de calcul, une méthode de sous-intégration sur 4 points de Gauss pour la mécanique a été utilisée.

3.2 Mise en place de l'équilibre statique

La méthode de construction par couches est utilisée pour la mise en place du sol. Elle consiste à considérer à chaque étape de construction uniquement les couches déjà construites ou en cours de construction, les champs d'équilibre de l'étape précédente étant considérés comme champs initiaux de l'étape suivante. Une condition de pression d'eau nulle à la surface est imposée pour chaque couche saturée à construire. Les contraintes dans la couche à construire sont obtenues en augmentant progressivement le champ de pesanteur dans cette couche, afin de limiter le plus possible le déséquilibre causé par les variations brusques du chargement. Le champ de déplacement à l'intérieur de la couche à construire est initialisé comme l'interpolation linéaire entre une valeur nulle au sommet et le déplacement au sommet de la dernière couche construite.

La discontinuité entre le sol et la fondation est considérée comme point dur dans la modélisation, car il s'agit d'une discontinuité forte de rigidité et un lieu où il y a possibilité de dissipation d'énergie par frottement. Pour ce faire, de éléments de joint sont pris en compte dans la modèle, au niveau de l'interface fondation-sol. Ces éléments permettent de considérer le frottement via un critère de type Mohr-Coulomb et le décollement, par une approche de pénalisation.

Concrètement, les étapes de la construction sont considérées de la manière suivante :

- Construction par couches du sol en dessous de la fondation et mise en place des éléments joint entre la fondation et le sol
- Mise en place de la fondation et du chargement représentant le poids des sols autour de la fondation (Figure 5)
- Application de la surcharge sur la fondation

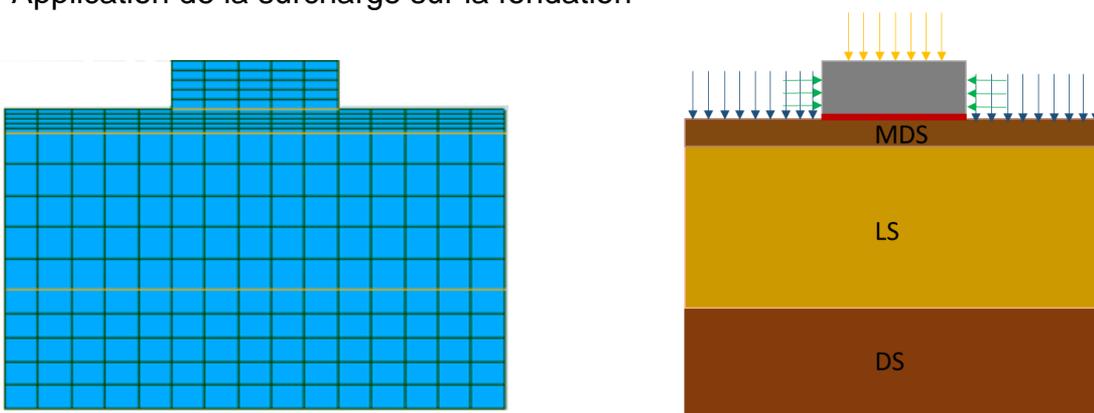


Figure 5. Gauche : maillage éléments finis du modèle numérique utilisé. Droite : Hypothèse de modélisation du sol autour de la fondation dans le modèle

La Figure 6 présente les champs de contraintes effectives verticales (à gauche) et hydrostatique (à droite). On voit la répartition hétérogène des contraintes dans le modèle due à la mise en place de la fondation pesante.

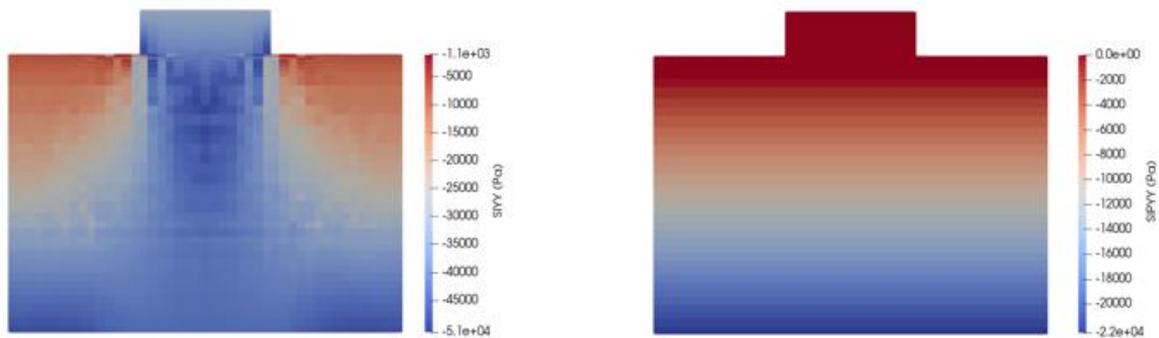


Figure 6. Champ de contraintes avant l'application de la dynamique pour le modèle 2D. A droite : champ de contraintes effectives vertical ; à droite : champ de pression d'eau.

4. Modélisation de la réponse dynamique du sol et de la fondation

4.1 Chargement sismique et paramètres de calcul

Pour simuler le chargement sismique, l'accélérogramme fourni dans le cadre du benchmark a été utilisé (Figure 7). La résolution se fait en utilisant le schéma d'intégration en temps HHT (Hilber et al., 1977) de paramètre alpha égal à -0.1, ce qui permet d'atténuer le contenu haute-fréquence sans pour autant nuire à la réponse de la structure dans la plage de fréquences d'intérêt. Le chargement sismique est appliqué en repère relatif, le mouvement d'entraînement étant celui fourni par le benchmark et mesuré à la base de la table vibrante.

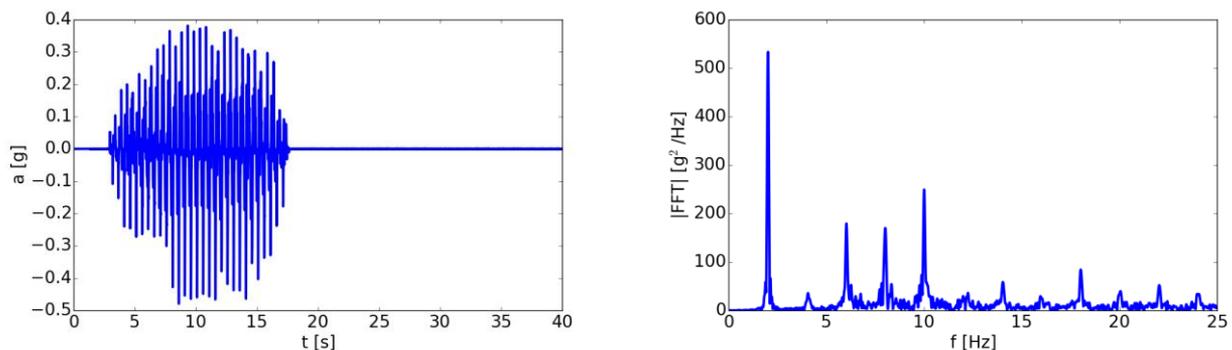


Figure 7. Signal appliqué à la base du modèle. A droite : représentation temporelle ; à gauche : représentation fréquentielle.

4.2 Analyse des résultats

La Figure 8 (à droite) montre que le sol en champ libre (capteurs FF1 et FF2) se déplace vers le haut d'une valeur proche de 10 cm. Au niveau de la fondation (capteurs FD1, FD2 et FD4, à gauche), le sol se tasse pendant l'application du chargement sismique, pour atteindre une valeur permanente d'environ 30 cm. Ces résultats sont proches de ceux obtenus par Tamari et Nakagama (2019), correspondant à une valeur allant de 20 à 30 cm à la fondation, et à un soulèvement de 10 à 15 cm en champ libre (valeurs en pointillé dans la Figure 8).

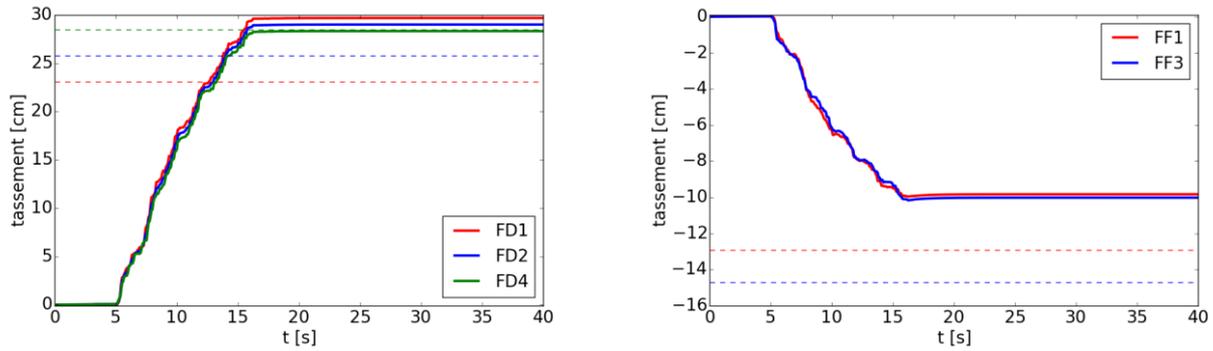


Figure 8. Tassement obtenu en champ libre et à la fondation. En pointillé : Valeur finales obtenues par Tamari et Nakagama (2019).

La Figure 9 (à gauche) montre les iso-déplacements obtenus en fin de chargement sismique, où il y a tassement de la fondation et soulèvement du sol en champ libre, en lien avec les conditions aux limites latérales de la boîte de cisaillement laminaire. La Figure 9 (à droite) montre la déformation de cisaillement maximale obtenue dans le modèle pendant le chargement sismique. On voit que les valeurs maximales obtenues sont très élevées, notamment à proximité des coins inférieurs de la fondation (sol MDS et LS). En effet, sur cette zone, le sol est initialement faiblement confiné (Figure 6) et subit un fort poinçonnement de la fondation et tassement pendant le chargement sismique. La zone inférieure, de sol dense, subit des déformations de cisaillement beaucoup plus faibles.

Les forts niveaux de déformations observées peuvent remettre en question l'hypothèse petites déformations initialement adoptée, et une approche adaptée pour une cinématique des transformations finies (Miehe et al., 2002) pourrait être envisagée par la suite.

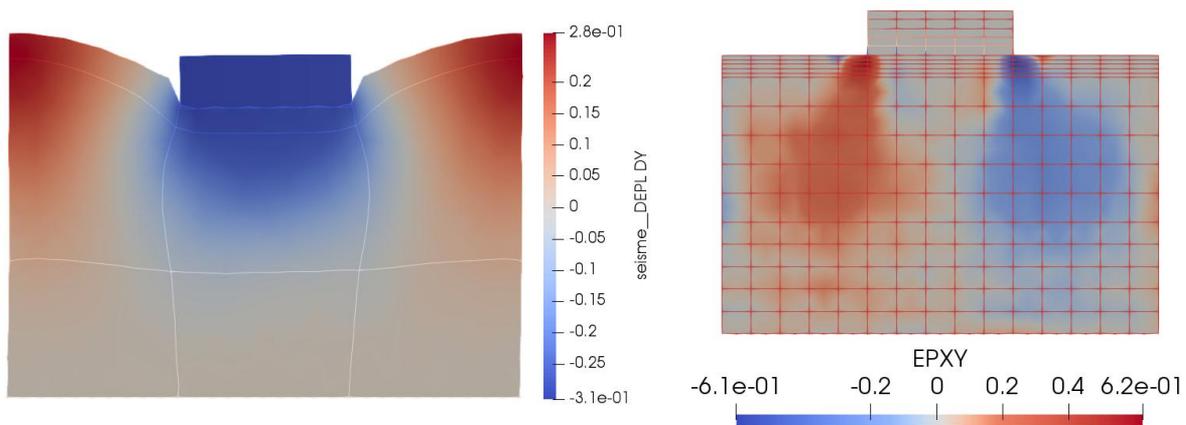


Figure 9: A gauche : Iso-déplacements obtenue à la fin du chargement sismique. A droite : Champ de déformation maximales pendant le chargement sismique

5. Conclusions et Perspectives

La modélisation numérique de l'impact de la liquéfaction des sols sous séisme sur une fondation superficielle, basée sur le benchmark international organisé par le Pacific Earthquake Engineering Research Center (PEER blind contest, 2018) a été réalisée au moyen du code éléments finis code_aster. La loi de comportement de Hujeux/ECP a été utilisée, car permettant la prise en compte du comportement non linéaire des sols sur un large panel des chemins de charge. Le modèle intègre à la fois une approche de construction par couches du sol et de la fondation, ainsi qu'un traitement de l'interface entre la fondation et le sol. Ceci permet d'obtenir un état de contraintes statiques hétérogène et cohérent avec les conditions aux limites de l'essai. L'interprétation des

résultats dynamiques obtenus sur le tassement de la fondation et au champ libre permet de valider les outils numériques développés dans code_aster, car les résultats obtenus sont proches de ceux de l'équipe victorieuse du benchmark et dans la marge d'incertitude de ce type de modélisation numérique.

L'étape de calibration des paramètres a été raccourcie, car un jeu de paramètres initiaux pour des matériaux de nature et comportement similaire à ceux de l'essai a été utilisé et seulement 2 paramètres ont été recalibrés. Disposer des jeux de paramètres pour le modèle de Hujeux/ECP pertinents pour un large panel de natures et comportements des sols permettrait donc de réduire le temps de mise en place de ce type de simulation numérique.

En perspective, il serait intéressant d'utiliser des méthodes adaptées pour une cinématique en transformations finies, vu les grands niveaux de déformations obtenus dans les simulations numériques. Aussi, il faut faire une analyse quant à la dépendance au maillage sur le mode de rupture du sol, notamment dans la zone à proximité des coins de la fondation et où une concentration des déformations a été observée dans les simulations.

6. Remerciements

Ces travaux sont réalisés dans le cadre du projet ANR Isolate (ANR-17-CE22-0009) soutenu par l'Agence Nationale pour la Recherche.

7. Références bibliographiques

- Aubry D., J.C. Hujeux, F. Lassoudière & Y. Meimon: (1982) A double memory model with multiple mechanisms for cyclic soil behaviors, Int. Symp. Num. Models in Geomechanics, Zürich, vol. 1, pp 3-13.
- code aster. General public licensed structural mechanics finite element software. <http://www.code-aster.org>
- Hilber, H. M., Hughes, T. J. R., Taylor, R. L. (1977) Improved numerical dissipation for time integration algorithms in structural dynamics. Earthquake Engineering & Structural Dynamics. 5(3) pp. 283-292.
- Hujeux, J.-C. (1985) Une loi de comportement pour le chargement cyclique des sols. In V. Davidovici, editor, Génie Parasismique, Presses ENPC, France, pp. 278–302.
- Lopez-Caballero, F., A. Modaresi, & F. Elmi (2003) Identification of an elastoplastic model parameters using laboratory and in-situ tests. In Deformation characteristics of geomaterials / comportement des sols et des roches tendres. Edited by H. Di Benedetto, T. Doanh, H. Geoffroy, C. Sauzeat.
- Miehe C., Apel. N., Lambrecht. M (2002) Anisotropic additive plasticity in the logarithm strain space: modular kinematic formulation and implementation based on incremental minimization principles for standard materials. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 191(147-48), pp. 5383-5425.
- Parra Bastidas, A. M. (2016), Ottawa F-65 Sand Characterization, PhD Dissertation, University of California Davis.
- PEER blind contest (2018) <https://peer.berkeley.edu/news-and-events/blind-prediction-contest-2018>
- Seed H. B., Lee K. L. (1966) Liquefaction of Saturated Sands During Cyclic Loading, Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, 92(6), pp. 105-134.
- Tamari Y., Nakagama Y. (2019) Class B Prediction of spread foundation settlements in large-scale shaking table experiment, PEER blind prediction contest 2018.