



**HAL**  
open science

## Simulation numérique des essais de liquéfaction sur table vibrante

Reine Fares, Evelyne Foerster, Crozet Vincent

► **To cite this version:**

Reine Fares, Evelyne Foerster, Crozet Vincent. Simulation numérique des essais de liquéfaction sur table vibrante. 11ème colloque scientifique de l'AFPS, Nov 2023, Gosier (Guadeloupe), France. pp.166-171. hal-04355492

**HAL Id: hal-04355492**

**<https://hal.science/hal-04355492>**

Submitted on 20 Dec 2023

**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.

# Simulation numérique des essais de liquéfaction sur table vibrante

Fares Reine<sup>1\*</sup>, Foerster Evelyne<sup>2</sup>, Crozet Vincent<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Université Paris-Saclay, CEA, Service d'Études Mécaniques et Thermiques, 91191 Gif-sur-Yvette, France, reine.fares,vincent.crozet@cea.fr, \* *Corresponding author*

<sup>2</sup>Université Paris-Saclay, CEA, Département de Modélisation des Systèmes et des Structures, 91191 Gif-sur-Yvette, France, evelyne.foerster@cea.fr

---

**Résumé.** Cet article traite de la représentativité des simulations numériques pour les études de liquéfaction des sols. Tout d'abord, les essais sur table vibrante menés dans le cadre du projet ANR ISOLATE et visant à liquéfier un massif de sable homogène, sont brièvement présentés. Ensuite, deux solveurs éléments finis basés sur des modèles constitutifs différents sont utilisés pour comparer les résultats expérimentaux et numériques et montrer la capacité des modèles constitutifs à capturer les principales caractéristiques du comportement des sols saturés pendant la liquéfaction.

**ABSTRACT.** This paper discusses the reliability of numerical simulations for soil liquefaction studies. Firstly, shaking table tests, part of the ISOLATE ANR project and aiming at triggering liquefaction in clean sand, are briefly presented. Secondly, two finite element solvers based on different constitutive models are used to compare experimental and numerical results and show the capability of constitutive models to capture main characteristics of soil behavior during liquefaction.

**Mots Clés :** Liquéfaction, modèles constitutives, méthode des éléments finis, essais expérimentaux, table vibrante.

---

## 1. INTRODUCTION

Un sol granulaire saturé soumis à un séisme, tend à se compacter du fait du réarrangement des grains sous l'effet du cisaillement cyclique, ce qui induit une augmentation de la pression de l'eau interstitielle et donc une diminution de la contrainte moyenne effective. Lorsque cette dernière s'annule, le sol de fondation se liquéfie et perd ses capacités de portance, ce qui induit des conséquences dévastatrices sur les structures impactées. De nombreux exemples de ce phénomène complexe sont rapportés dans la littérature (par exemple [1–4]).

La liquéfaction a donc fait l'objet de nombreuses recherches, et au niveau français, on peut notamment citer les projets ANR BELLEPLAINE (« Etude des Sols Liquéfiables dans des Conditions Réelles ; Site Pilote et Modèles Prédicatifs », 2007-2010) et plus récemment ISOLATE (« Improving SOiLs Against liquefaction » [5]). Concernant ce dernier projet, un objectif était d'évaluer la représentativité des moyens de caractérisation et d'étude (échelle matériau-échelle ouvrage) en visant la complémentarité des équipements en termes d'échelles et de sollicitations. Dans ce cadre, des essais sur éprouvettes (appareil triaxial cyclique) et sur massif de fondation (centrifugeuse, tables vibrantes) ont été réalisés en utilisant du sable d'Hostun HN 31 propre et/ou avec différents pourcentages et différents types de fines [6–8].

Dans le cadre de cet article, les résultats de deux solveurs éléments finis basés sur les modèles constitutifs de Manzari-Dafalias [9] et de Hujeux [10] sont comparés aux résultats expérimentaux des essais 1-g sur table vibrante réalisés au CEA Paris-Saclay. L'objectif est de discuter de la capacité de modèles non linéaires complexes à capturer les principales caractéristiques de la liquéfaction des sols. L'inter-comparaison de modèles constitutifs permettra également d'évaluer les incertitudes inhérentes à ce genre d'analyse.

## 2. PRESENTATION DES ESSAIS SUR TABLE VIBRANTE

Dans le cadre du projet ANR ISOLATE, une campagne d'essais a été réalisée au moyen de la table vibrante Azalée de la plateforme expérimentale TAMARIS du CEA Paris-Saclay entre avril et juin 2022. L'objectif était de reproduire le phénomène de liquéfaction à l'échelle d'un massif de sable de fondation avec un conteneur de grandes dimensions.

Ainsi un massif de 28 m<sup>3</sup> de sable de Hostun HN31 complètement saturé en eau et contenu dans un conteneur rigide en acier de dimensions internes de 4.3 m × 3.9 m × 2.17 m, a été soumis à des sollicitations sismiques à l'aide de la table vibrante Azalée (figure 2.1). Pour chaque essai, le chargement sismique a été appliqué suivant une seule direction horizontale. Le lecteur est invité à lire la thèse de Zhehao Zhu pour plus de détails sur le protocole expérimental utilisé [8].

La campagne expérimentale comprenait plusieurs essais avec des sollicitations de nature différente : un signal sismique naturel (composante 000 enregistrée à la station Tolmezzo lors du séisme de Friuli du 6 mai 1976) et un signal sinusoïdal de fréquence 2 Hz multiplié par une enveloppe temporelle trapézoïdale et d'accélération maximale correspondant à 0.4 g (figure 2.2).

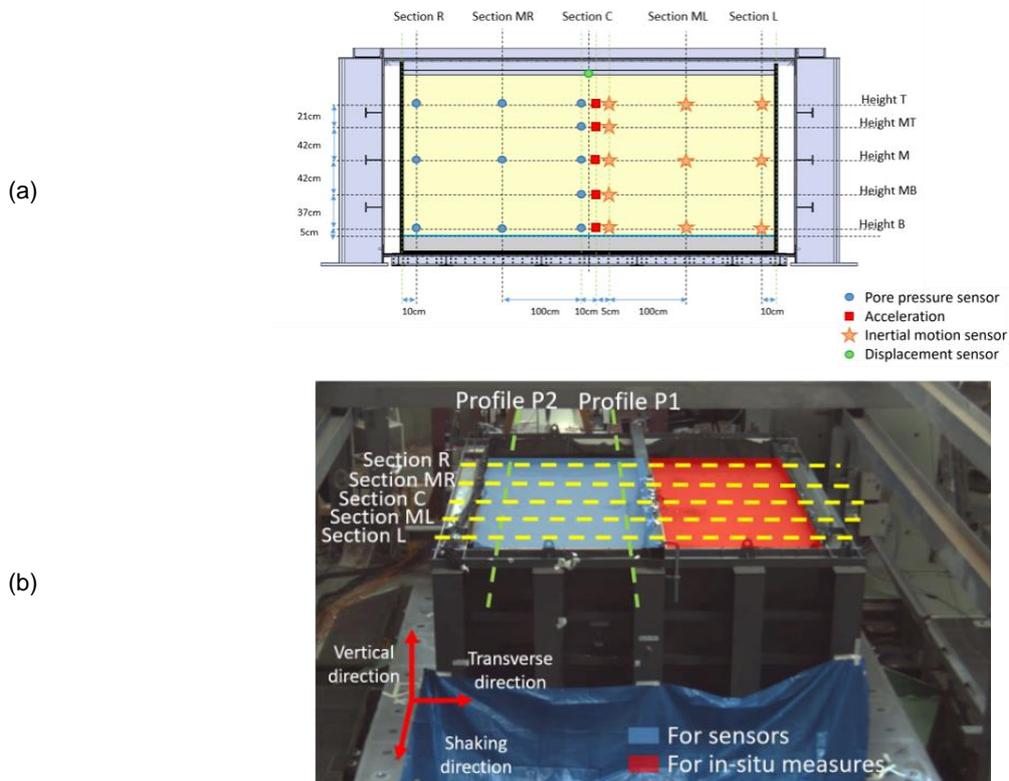


Figure 2.1: Localisation des capteurs dans le sol (a), de la moitié du massif dédiée à l'installation de capteurs et de celle dédiée à la réalisation de mesures in situ (b).

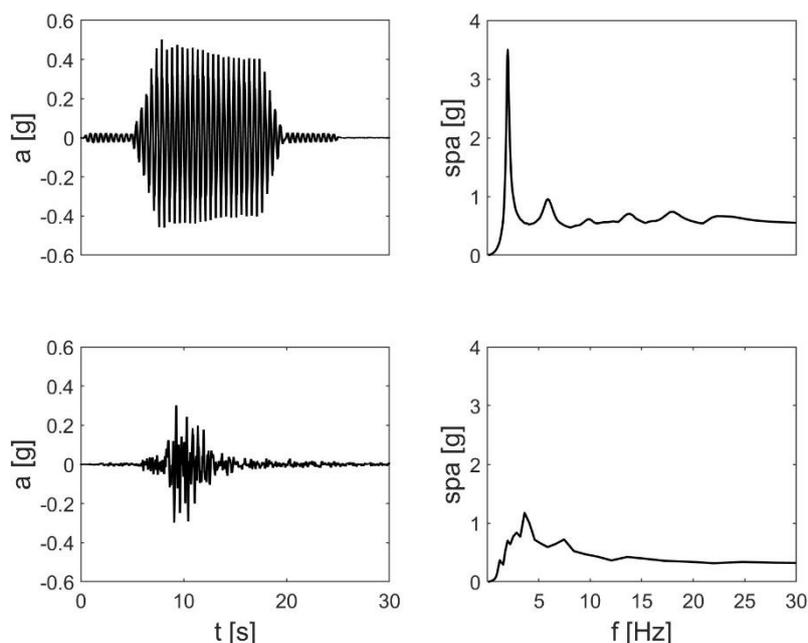


Figure 2.2: Chargement sismique de type sinus imposé sur la table vibrante ; réponse de la table en accélération (à gauche) et en spectre de réponse (à droite)

### 3. PRESENTATION DE LA CAMPAGNE NUMERIQUE

Les simulations numériques des essais sur table vibrante du sable HN31, conduisant à sa liquéfaction sont effectuées à l'aide des codes par éléments finis OpenSees [11], CyberQuake [12] et GEFDYN [13], respectivement avec la loi de comportement proposé par Dafalias-Manzari [9] et Hujeux [10].

Le maillage employé dans OpenSees suit le critère de discrétisation proposé dans [14]. En outre, la discrétisation sera contrainte par la position des capteurs dans la campagne expérimentale pour obtenir les récepteurs des résultats numériques calés sur les points de mesures expérimentaux. Le schéma d'intégration de Newmark est adopté pour la résolution en temps de l'équilibre dynamique.

Les calculs sont effectués dans le domaine temporel en supposant un comportement non linéaire pour le sol avec un pas de temps égal à  $\Delta t = 0.001$  s. Aux frontières du maillage 1D, réalisé dans le code OpenSees, une condition de périodicité est employée pour assurer la dissipation d'onde. Le chargement est imposé sous forme de déplacement à la base en supposant un mouvement rigide des nœuds du sol en interface avec le conteneur. Le développement de la pression interstitiel est empêché aux nœud en surface du sol pour assurer une condition de drainage par le haut. La campagne numérique est résumée dans le tableau 3.1.

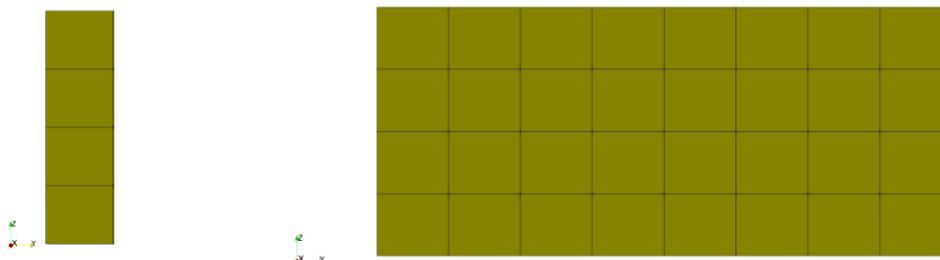


Figure 3.1: Maillage du modèle 1D (à gauche) et 2D (à droite)

Tableau 3.1: Présentation de la campagne numérique

nomenclature	Loi de comportement	Signal	Dimension
MD-S-E	Elastique	sinus	1D
H-S-E	Elastique	sinus	1D
MD-S-1D	Manzari-Dafalias	sinus	1D
H-S-1D	Hujeux	sinus	1D
MD-F-1D	Manzari-Dafalias	Friuli	1D
H-F-1D	Hujeux	Friuli	1D
MD-S-2D	Manzari-Dafalias	sinus	2D
H-S-2D	Hujeux	sinus	2D
MD-F-2D	Manzari-Dafalias	Friuli	2D
H-F-2D	Hujeux	Friuli	2D

### 3.1 Calibration des paramètres des lois constitutives

Le modèle proposé par Dafalias-Manzari [9], développé pour la modélisation du comportement des sables, est un modèle de plasticité contrôlé en fonction du rapport entre la contrainte volumique et déviatorique développé pour des sables. La loi de Hujeux [10] est un modèle multi-surfaces à écrouissage combiné (volumique, cinématique), généralisant les modèles de Mohr-Coulomb et Cam-Clay, et utilisable pour modéliser tout type de sols. Les deux modèles utilisés ici incorporent le principe d'état critique et sont écrits en contraintes effectives permettant de représenter des phénomènes physiques caractéristiques de la liquéfaction des sols. La capacité de ces modèles à modéliser le comportement non linéaire des sols sous séisme a été évaluée notamment dans le cadre du Benchmark international PRENOLIN [15].

Les modèles constitutifs impliquent la définition d'un certain nombre de paramètres, pour certains sur base physique (ils peuvent être caractérisés expérimentalement) et d'autres purement numériques. Ils nécessitent la mise en œuvre de procédures efficaces de calage voire d'optimisation, la qualité de la prédiction des modèles constitutifs dépendant directement de la calibration précise des paramètres du modèle sur une grande variété de données. Pour notre étude, différentes approches sont utilisées, et notamment l'optimisation par essais particuliers (PSO) [16].

## 4. DISCUSSION ET PERSPECTIVES

Dans le but de mener une série de simulations numériques permettant de calculer la réponse en contrainte totale du sol saturé, la vérification du choix du modèle numérique et de la dimension du problème est importante.

Pour proposer une amélioration de la prise en compte du phénomène de liquéfaction des sols saturées sous sollicitations sismiques des essais maîtrisées en laboratoires sont menés. Ces essais à petite échelle servent, entre autre, pour la calibration des lois de comportement. La représentativité de cette approche sera donc évaluée en comparant le résultat des simulations avec ceux obtenus par les essais sur table vibrante. Cette dernière offre un moyen expérimental à plus grande échelle contrôlé qui s'approche de la réponse in-situ. Les analyses et inter-comparaisons seront faites sur la base de diverses hypothèses de modélisation pour obtenir la réponse du massif de sol sur base rigide : comparaisons 1D/1D (colonnes de type free-field), 2D/1D et 3D/1D (résultats de colonnes extraites des modèles 2D/3D du conteneur).

## 5. REFERENCES

- [1] Oldham RD (1899) "Report of the great earthquake of 12th June, 1897". Office of the Geological survey.
- [2] Lombardi D, Bhattacharya S (2014) "Liquefaction of soil in the Emilia-Romagna region after the 2012 Northern Italy earthquake sequence". *Nat Hazards* 73:1749–70. <https://doi.org/10.1007/s11069-014-1168-6>.
- [3] Lawson AC, Reid HF (1908) "The California earthquake of April 18, 1906: Report of the state earthquake investigation commission". Carnegie institution of Washington.
- [4] Numata R (1925) "Pillars of a bridge projected above ground level by the shock of the Kwanto earthquake". *Reikishi-Chiri*, vol 4, pp 197.
- [5] Foerster E, Modaressi H, Heitz J-F, Canou J, Foray P, Gueguen P, et al. (2007) "Etude des Sols Liquéfiables dans des Conditions Réelles : site pilote et modèles prédictifs (Guadeloupe)", 7ème Colloque National Génie Parasismique AFPS07, July 4-6, Paris.
- [6] Gobbi S, Santisi d'Avila MP, Lenti L, Semblat J-F, Reiffsteck P (2022) "Liquefaction assessment of silty sands: Experimental characterization and numerical calibration". *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 159:107349
- [7] Gobbi S, Reiffsteck P, Lenti L, Santisi d'Avila MP, Semblat J-F (2022) "Liquefaction triggering in silty sands: effects of non-plastic fines and mixture-packing conditions". *Acta Geotech*, 17:391–410. <https://doi.org/10.1007/s11440-021-01262-1>.
- [8] Zhu Z (2022) "Influence des particules fines sur les propriétés de liquéfaction des sables. Application à la réponse à la liquéfaction d'une colonne de sol sur table vibrante." <http://www.theses.fr/s207127>.
- [9] Dafalias YF, Manzari MT (2004) "Simple plasticity sand model accounting for fabric change effects". *Journal of Engineering Mechanics*, 130:622–34.
- [10] Aubry D, Hujeux JC, Lassoudiere F, Meimon Y (1982) "A double memory model with multiple mechanisms for cyclic soil behaviour". *Proceedings of the Int. Symp. Num. Mod. Geomech*, pp 3–13.
- [11] Mazzoni S, McKenna F, Scott MH, Fenves GL (2006) "OpenSees command language manual". Pacific Earthquake Engineering Research (PEER) Center, 264:137–58..
- [12] Foerster E, Modaressi H (2007) "Nonlinear numerical method for earthquake site response analysis II- case studies", *Bulletin of Earthquake Engineering*, 5 (3): 325-345.
- [13] Aubry D., Modaressi A, (1996). "GEFDYN, Manuel scientifique", Ecole Centrale Paris.
- [14] Fares R, Santisi d'Avila MP, Deschamps A (2019) "Soil-structure interaction analysis using a 1DT-3C wave propagation model". *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 120:200-13. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2019.02.011>.
- [15] Régnier J, Bonilla LF, Bard P-Y, Kawase H, Bertrand E, Hollender F, et al. (2018) "PRENOLIN: international benchmark on 1D nonlinear site response analysis - Validation phase exercise", *Bull. Seismological Society of America*, BSSA-D-17-00210R2, DOI: 10.1785/0120170210.
- [16] Chollet F (2021) "Deep learning with Python". Simon and Schuster.