



**HAL**  
open science

## Modélisation physique et numérique des séismes : application sur stratigraphies réelles

Alberto Bretschneider, Sandra Escoffier, Luca Lenti, Jean François Semblat

### ► To cite this version:

Alberto Bretschneider, Sandra Escoffier, Luca Lenti, Jean François Semblat. Modélisation physique et numérique des séismes : application sur stratigraphies réelles. Journées Nationales de Géotechnique et de Géologie de l'Ingénieur JNGG2014, Jul 2014, France. 12p. hal-01071532

**HAL Id: hal-01071532**

**<https://hal.science/hal-01071532>**

Submitted on 6 Oct 2014

**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.

## **MODELISATION PHYSIQUE ET NUMERIQUE DES SEISMES : APPLICATION SUR STRATIGRAPHIES REELLES**

### ***PHYSICAL AND NUMERICAL MODELLING OF EARTHQUAKES: APPLICATION ON REAL STRATIGRAPHIES***

Alberto BRETSCHEIDER, Sandra ESCOFFIER, Luca LENTI, Jean-François SEMBLAT

*IFSTTAR, Département Géotechnique, Environnement, Risques naturels et Sciences de la Terre, Laboratoire Séismes et Vibrations*

**RÉSUMÉ** — Le laboratoire ‘Séismes et Vibrations’ de l’IFSTTAR dispose d’une centrifugeuse géotechnique avec simulateur de séismes embarqué. En géotechnique sismique, la modélisation physique en macro-gravité est un outil avancé permettant notamment l’étude de la propagation des ondes sismiques dans les sols (en champ libre et en présence de structures) et l’évaluation du potentiel de liquéfaction des sols. L’avantage de cet outil est de pouvoir mesurer, sur des configurations simples, des grandeurs physiques d’intérêt, directement dans les sols et sur les structures représentées à l’échelle réduite en conditions contrôlées. Les données expérimentales permettent la calibration, puis la validation, de modèles numériques simples. La modélisation numérique est utilisée par la suite pour l’analyse de situations plus complexes. Une étude de propagation d’ondes sismiques sur quatre stratigraphies réelles, alliant modélisation physique et numérique, est présentée ici. Les stratigraphies, caractérisées par différentes alternances de couches de sable et d’argile saturés, ont été reconstruites à l’échelle réduite en utilisant des sols à paramètres contrôlés en termes de granulométrie, densité relative, saturation, propriétés statiques et dynamiques. Pour chaque configuration, trois signaux sismiques ont été appliqués à la base des modèles : un séisme réel, un signal sinusoïdal, un signal multi-fréquentiels équivalent. La réponse de chaque colonne de sol a été enregistrée au travers d’un réseau vertical d’accéléromètres. La modélisation numérique a été utilisée à deux échelles différentes : une première modélisation à l’échelle modèle (échelle réduite) a considéré les conditions expérimentales en termes de lithologies, conditions aux limites, accélération centrifuge (55g), contraction du temps et des distances; une deuxième modélisation, à l’échelle prototype, a considéré les conditions réelles en termes de propriété des sols, accélération terrestre(1g), géométrie, durée et fréquences prototypes (échelle 1:1). Cette étude expérimentale et numérique de la propagation des ondes sismiques, a validée l'utilisation de la modélisation en centrifugeuse pour comprendre les effets d’un séisme sur stratigraphies réelles, afin de prévoir le risque associé à un site donné et d’établir des stratégies pour sa réduction.

**ABSTRACT** — The laboratory "Earthquake and vibrations" of IFSTTAR has a geotechnical centrifuge equipped with a shaking table device. In earthquake geotechnical engineering, physical modelling is an advanced tool to study seismic wave propagation in soils (under free-field conditions as well as in presence of structures), and for the evaluation of liquefaction potential. The advantage of physical modelling is the possibility to measure the parameters of interest, on simplified configurations, directly into the soil and on the structures that are reproduced at the reduced scale. The experimental data allow the calibration and validation of simple numerical models. Numerical modelling is then useful to analyse more complex situations. Seismic wave propagation analysis, performed on four different stratigraphies, is here presented. The stratigraphies, characterized by the alternation of saturated sand and clay layers, have been reconstituted using soils with controlled granulometry, relative density, saturation degree, physical and mechanical properties. For each soil configuration, three seismic signals have been applied at the base: a real earthquake signal, a sinusoidal (monofrequential) signal, an equivalent multifrequential signal. The response of each soil column has been recorded by accelerometers. Numerical modelling has been performed at two different scales: at the reduced scale considering the experimental conditions in terms of lithologies, boundary conditions, gravity acceleration and time-space contraction, and at the prototype scale considering the real soil properties, gravity, duration and frequency of prototypes. This experimental and numerical study of the wave propagation of seismic waves in soils validated the applicability of centrifuge tests to study the effects on real stratigraphies, to define the risk associated to a specific site to design strategies for its reduction.

## **1. Introduction**

La propagation des ondes de cisaillement dans un sol induit des transformations du signal, et notamment de son contenu fréquentiel, dûes à l'action de filtrage par le terrain lui-même. Les essais sismiques en centrifugeuse peuvent contribuer à l'analyse de la propagation des ondes dans un contexte expérimental, et donc contrôlé, mesurable et reproductible. Plusieurs études ont été précédemment menées sur l'analyse de la propagation des ondes en centrifugeuse en considérant différentes sources. Semblat et Luong (1998), Itho et al. (2003) ont réalisés des essais avec une source ponctuelle en surface; une source ponctuelle interne au modèle a été considérée pour les essais de Weissman et Provost (1989), enfin une sollicitation sismique appliquée à la base de la colonne de sol a été considérée pour les essais de Li et al. (2013). Les essais en centrifugeuse ont été également utilisés pour étudier la transmission des signaux dans des multicouches de sables (couches de densités relatives différentes), ou dans des multicouches d'argiles (couche d'argile d'indices de consistance différents, Rayhani et El Naggar, 2007; 2008). Cependant dans la pratique, le sous-sol est souvent formé de couches de sables, de limons, et d'argiles et, de plus, la géométrie peut être complexe avec notamment la présence de lentilles, de discordances angulaires etc. Dans le cadre de cette étude la

transmission des ondes de cisaillement est analysée dans le cas d'une colonne de sol multicouche présentant une alternance de couches de sable et d'argile de différentes épaisseurs en utilisant une procédure couplée expérimentale-numérique. Quatre colonnes stratigraphiques, de 20 m à l'échelle prototype, ont été analysées (Fig. 1a): i) colonne homogène de sable; ii) colonne homogène d'argile; iii) multicouche avec 5 m d'argile; iv) multicouche avec 10 m d'argile. Sur chaque colonne, trois signaux sismiques (Fig. 1b) ont été utilisés: i) un séisme réel; ii) un signal sinusoïdal mono-fréquentiel équivalent, iii) un signal multi-fréquentiel équivalent selon la procédure LEMA\_DES (Lenti et Martino, 2010). On présente ici des résultats préliminaires décrivant la comparaison des modélisations physique et numérique sur la transmission des différents inputs sismiques sur les différentes colonnes de sol.

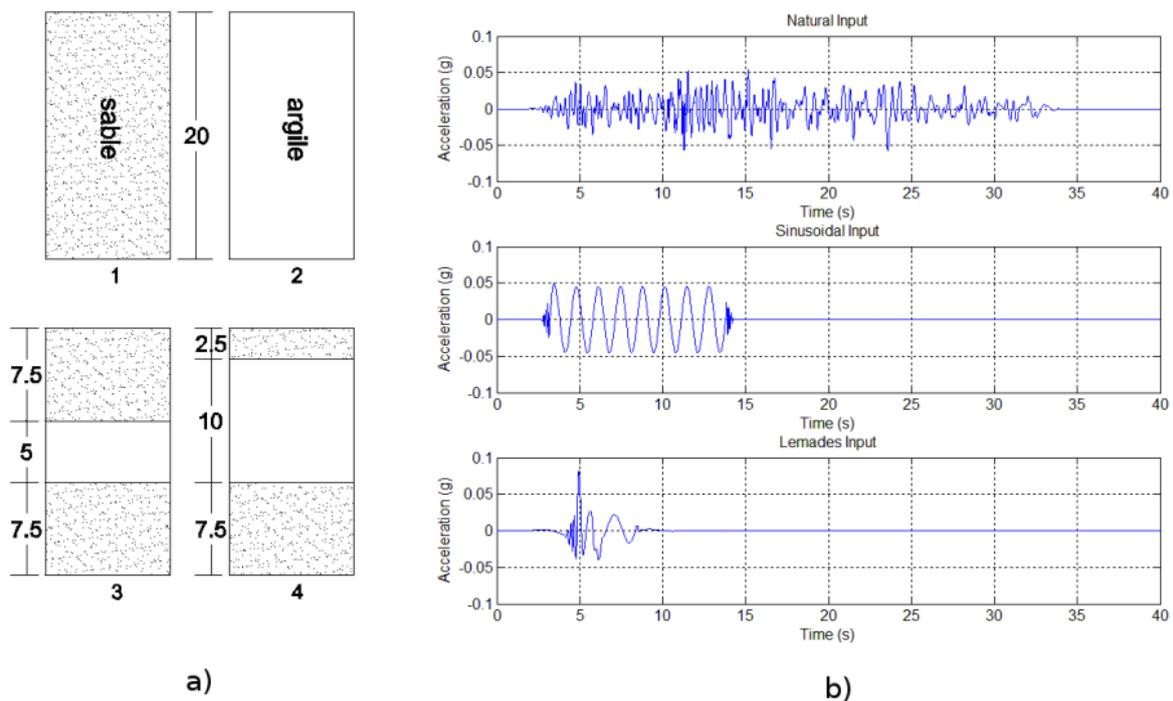


Figure 1 - a: Colonnes des sols examinées (côtes en m, échelle prototype); b: signaux sismiques à l'échelle prototype.

## 2. Configuration des essais en centrifugeuse

L'objectif de la série d'essais était, pour chaque configuration (figure 1.a), de mesurer la réponse sismique de la colonne de sol, en termes d'accélération et de pression interstitielle, lorsque celle-ci était soumise à sa base à l'un des trois inputs sismiques (figure 1.b). La réalisation de la série d'essais a ainsi permis de réaliser une étude paramétrique sur l'effet de la variabilité de la stratigraphie sur la réponse de la colonne de sol. L'ensemble des essais ont été réalisés sous une accélération centrifuge de 55.55g, de façon à représenter la réponse d'une colonne de sol de 20m de hauteur (36cm à l'échelle prototype). Afin de limiter les effets de bord, et de se rapprocher de la réponse de la colonne de sol en champs libre, un conteneur flexible a été utilisé (équivalent shear beam box, ESB, Zeng et Schofield, 1996).

Dans le cas de la colonne de sable, ainsi que des couches de sable pour les configurations multicouches, du sable de Fontainebleau NE34 a été utilisé. Dans un premier temps les couches ont été reconstituées par pluviation à sec à l'aide d'un système avec trémie (Garnier et al., 1993). Cette technique a permis d'obtenir des couches homogènes avec une densité relative de 57%. Dans un second temps, la saturation de chaque couche de sable a été effectuée à l'aide d'un dispositif spécialement mise en place dans le cadre de cette étude. Après une phase de mise sous vide, puis de circulation de CO<sub>2</sub> la saturation est réalisée sous vide. Au cours de cette phase, le dispositif permet la mesure et le contrôle de la différence de charge hydraulique entre le conteneur ESB et une cuve contenant le fluide de saturation. Du fait de la perméabilité des colonnes de sable ainsi reconstituées il est nécessaire de saturer les colonnes à l'aide d'un fluide visqueux (55 cSt) afin d'éviter un conflit de loi de similitude entre le phénomène de diffusion de pression et les variations de pressions interstitielles induites par les déformations du sol au cours d'un chargement sismique.

Dans le cas de la colonne d'argile, ainsi que de la couche d'argile dans les configurations multicouches, une kaolinite a été utilisée (Speswhite clay). La colonne d'argile (Figure 1a configuration 2) est, dans un premier temps, consolidée à 1g directement dans le conteneur à l'aide d'une presse. Le procédé comprend la consolidation successive de trois couches d'argile dont la hauteur finale cumulée est de 36 cm. Chaque couche d'argile est consolidée sous une contrainte verticale effective égale à la contrainte verticale effective à mi-hauteur de la couche sous une gravité centrifuge de 55.55g. Dans le cas de la couche d'argile pour les configurations multicouches celle-ci est consolidée dans un conteneur annexe sous une contrainte verticale de 300 kPa pour obtenir, en considérant les contraintes existantes dans les modèles, une argile faiblement surconsolidée ( $OCR \sim 1.5 \div 2$ ). Cette faible surconsolidation peut être représentative des matériaux récents de vallées alluviales. Une fois la couche de sable sous-jacente saturée la couche d'argile est prélevée dans le conteneur annexe à l'aide d'un emporte-pièce adapté, puis mis en place dans le conteneur. La seconde couche de sable est ensuite réalisée selon le processus décrit précédemment.

Au cours de leur reconstitution les colonnes de sol ont été instrumentées à l'aide d'accéléromètres, pour mesurer la réponse de la colonne de sol, et de capteur de pression interstitielle. On notera que dans le cadre de cette première phase d'analyse les mesures de pressions interstitielles ne sont pas prises en compte.

La figure 2 montre un exemple de disposition des réseaux accélérométriques dans une colonne de sable. La présence d'accéléromètres proches des extrémités du conteneur avait pour objectif de mettre en évidence d'éventuels effets de réflexion ou de création d'ondes à l'interface sol/conteneur.

L'ensemble des essais ont été réalisés à l'aide de la centrifugeuse et du simulateur de séisme de l'IFSTTAR (Chazelas et al., 2008). Le simulateur de séisme embarqué permet de simuler des signaux mono et multi-fréquentiels dans des plages respectivement de 20-200Hz et de 20-350Hz à l'échelle modèle (soit 0,36-3,6 et 0,36-6,3 à 55g). Au total 12 essais ont été réalisés. Chacune des configurations

(figure 1a) a été soumise aux trois signaux sismiques "natural", "sinusoidal" et "LEMADES".

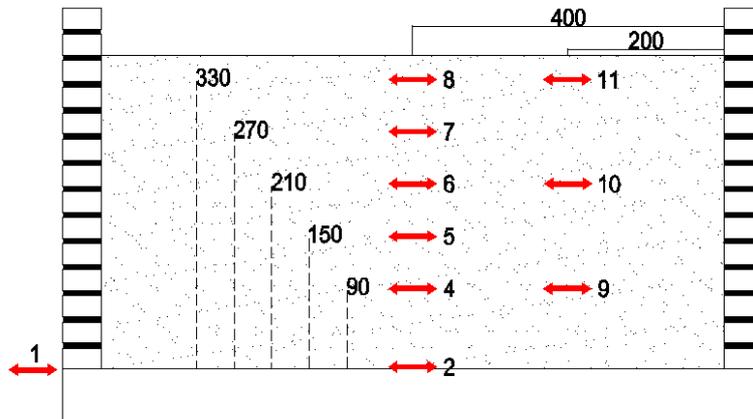


Figure 2 - Coupe longitudinale du conteneur ESB. Positions des accéléromètres (flèches rouge) dans le massif de sable (colonne 1). Cotes en mm, échelle modèle.

### 3. Etude numérique

La modélisation numérique, effectuée en utilisant le code FDM FLAC 7.0, avait pour objectifs de: i) comparer les résultats expérimentaux et numériques sur les colonnes de sol à l'échelle modèle afin de valider la faisabilité des expérimentations avec une interface sable-argile; ii) comparer les résultats expérimentaux, obtenus sur un sable et une argile connus avec un input sismique mesuré avec ceux d'une modélisation numérique de colonnes de sol réelles soumises à un input de référence tel que le calcul serait réalisé dans la pratique afin d'évaluer si les résultats expérimentaux sont extrapolables à une analyse classique d'un cas réel.

La modélisation à l'échelle modèle a simulé les essais en centrifugeuse. Les propriétés physiques et mécaniques des sols sont celles du sable de Fontainebleau NE34 et de l'argile Speswhite (Giorgiannou et al., 2008, Li et al., 2013), qui sont des matériaux de référence (Tableau 1). Les inputs sismiques sont obtenus à partir des enregistrements des accéléromètres situés à la base du conteneur ESB, et reproduisent donc les signaux qui ont été effectivement transmis aux colonnes de sol. Aucune calibration numérique des paramètres des sols n'a été réalisée.

La modélisation numérique à l'échelle prototype est basée sur une approche classique d'analyse de réponse d'un site. Pour les sables et les argiles, les propriétés des sols sont issues de résultats d'essais de laboratoire (Bozzano et al., 2012, Castelli et al., 2013). Les inputs considérés sont des signaux de référence qui dans ce cas correspondent aux signaux de référence envoyés, via le système de contrôle-commande, au simulateur de séisme.

De l'échelle modèle à l'échelle prototype la taille de la maille est passée de 0.5x0.5 cm à 27.5x27.5 cm. Les conditions aux limites utilisées pour les deux échelles de calculs sont identiques: les conditions limites latérales simulent les conditions de champ libre, alors que pour la base de la colonne de sol une limite de type "quite

boundary", qui absorbe partiellement les ondes se propageant vers le bas, est considérée. Cette dernière condition a permis d'éliminer les réflexions des ondes à la base de la colonne de sol permettant ainsi d'analyser exclusivement la propagation des ondes du bas vers le haut. L'input sismique, exprimé en contraintes de cisaillement, est appliqué à la base du modèle.

Afin d'évaluer la possibilité future d'utiliser la modélisation numérique de façon prédictive par rapport aux essais en centrifugeuse, on a choisi pour ces premiers modèles une loi de comportement simple s'appuyant sur un faible nombre de paramètres d'entrée. Les sols sont caractérisés par un modèle elastoplastique parfait avec un critère de rupture Mohr-Coulomb. Une variation de la déformabilité en fonction de la profondeur a été considérée, de plus pour chacun des sol un amortissement matériel a été introduit selon le critere de Hardin et Drnevich (1972). L'interprétation des résultats permettra de justifier la validité des lois constitutives simples dans le cadre de cette analyse.

	Poids Volumique (kN/m <sup>3</sup> )	Frottement	Module cisaillement statique G (Pa)	Bulk modulus statique (Pa)	Module cisaillement dynamique Gmax (Pa)	Bulk modulus dynamique (Pa)
Sable de Fontainebleau	19.45	37°	$6.62 \cdot 10^6$	$1.08 \cdot 10^7$	$6.92 \cdot 10^7$	$1.5 \cdot 10^8$
Argile Speswhite	17	21°	$2.32 \cdot 10^7$	$2.24 \cdot 10^8$	$2.25 \cdot 10^8$	$2.18 \cdot 10^9$

Tableau 1 - Paramètres des sols utilisés dans la modélisation numérique.

La figure 3 montre la comparaison en termes de vitesse entre l'input sinusoïdal et sa reproduction au niveau de base du modèle numérique représentée à l'échelle prototype. Pendant les calculs les vitesses, accélérations et déplacements horizontaux ont été enregistrés aux nœuds correspondants aux positions des capteurs dans les modèles physiques.

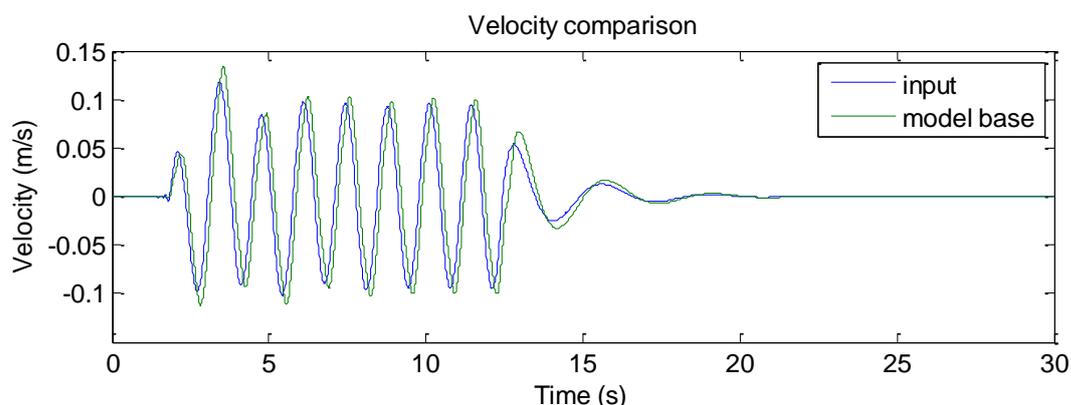


Figure 3 - Comparaison des vitesses entre l'input numérique sinusoïdal et l'enregistrement à la base de la colonne de sol (Echelle prototype).

#### 4. Analyse des résultats

Si la comparaison des résultats obtenus pour les essais en centrifugeuse, les modèles numériques à l'échelle modèle et à l'échelle prototype peut porter sur de nombreux aspects, dans le cadre de cette étude l'attention est focalisée sur deux objectifs: i) l'évaluation de la représentativité des conditions d'interface des configurations multicouches en centrifugeuse, en sachant que les erreurs expérimentales sont liées à la complexité des modèles physiques réalisés; ii) l'évaluation de la représentativité des essais en centrifugeuse par rapport à une analyse telle qu'elle serait réalisée sur un site vis-à-vis de la transmission des ondes de cisaillement.

Pour le premier point, des comparaisons ont été faites entre les résultats expérimentaux et les résultats numériques à l'échelle réduite. La figure 4 donne la représentation temporelle et fréquentielle des accélérations à la base et à la surface de la colonne sable homogène sollicitée par le signal sinusoïdal. Le signal est bien reproduit numériquement en termes de contenu fréquentiel. De plus, les résultats expérimentaux et numériques de la transmission du signal entre le bas et le haut de la colonne de sol sont comparables. Dans le cas du signal 'lemades', on obtient également une bonne reproduction numérique du signal à la base de la colonne de sol. Au sommet de la colonne il commence à y avoir un faible déphasage entre les signaux expérimental et numérique à partir de 5 s. Enfin, la figure 6 montre que le signal 'natural' est bien reproduit à la base, cependant on observe une sous-estimation du modèle numérique d'environ 0.05g. Aucune calibration des paramètres n'a été effectuée par obtenir la convergence.

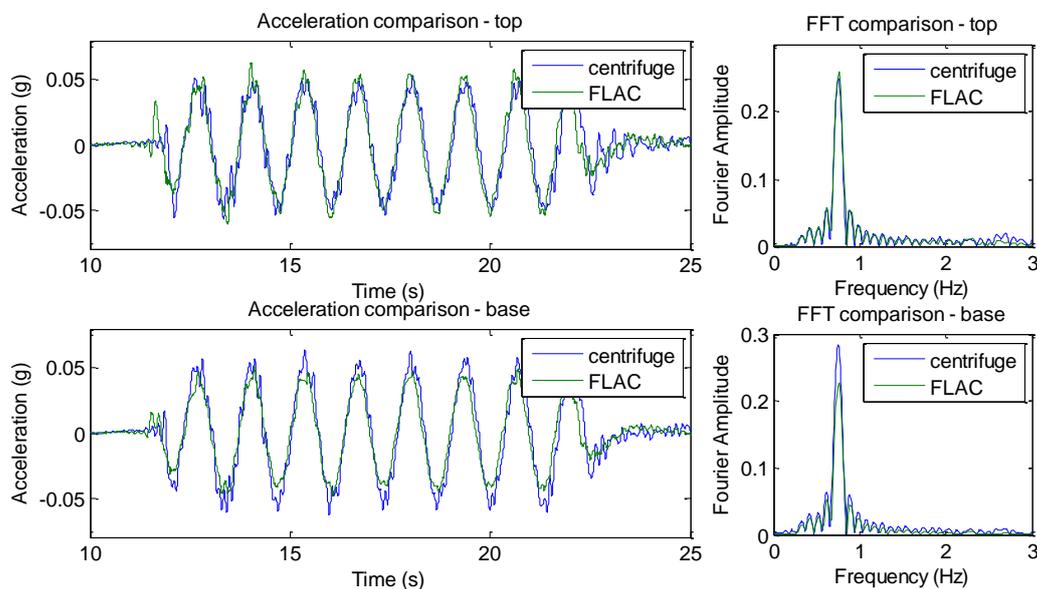


Figure 4 - Signal 'sinusoïdal'- colonne de sable, représentations temporelles et fréquentielle des accélérations expérimentales et numériques au niveau de la base et proche de la surface (échelle prototype).

La figure 7 présente une comparaison des accélérogrammes dans le cas d'une colonne multicouche sollicitée par le signal sinusoïdal. On note qu'un phénomène de liquéfaction s'est produit dans la couche supérieure de sable. Ce phénomène est mis en évidence par une chute brutale de l'accélération mesurée en surface au cours de la sollicitation. Dans le même temps, l'analyse de l'histoire temporelle de l'accélération au niveau de la couche d'argile montre qu'en ce qui concerne la transmission du signal jusqu'à cette couche les résultats expérimentaux et numériques sont en accord. On notera cependant un faible déphasage du signal numérique par rapport au signal expérimental qui correspond au début de la liquéfaction au niveau de la couche sus-jacente. La concordance des résultats avant cette phase de liquéfaction montre, en conséquence, que le protocole de reconstitution des massif multicouche permet d'obtenir des conditions d'interface sable-argile permettant une bonne transmission des ondes de cisaillement au niveau du modèle expérimental lorsque celui-ci est soumis à la gravité centrifuge (absence de discontinuité d'état contrainte). On notera que le phénomène de liquéfaction n'est pas reproduit numériquement, la loi de comportement choisie pour ces premières modélisations ne considérant pas l'effet de la pression interstitielle. Celle-ci sera considérée lors de prochaines simulations numériques.

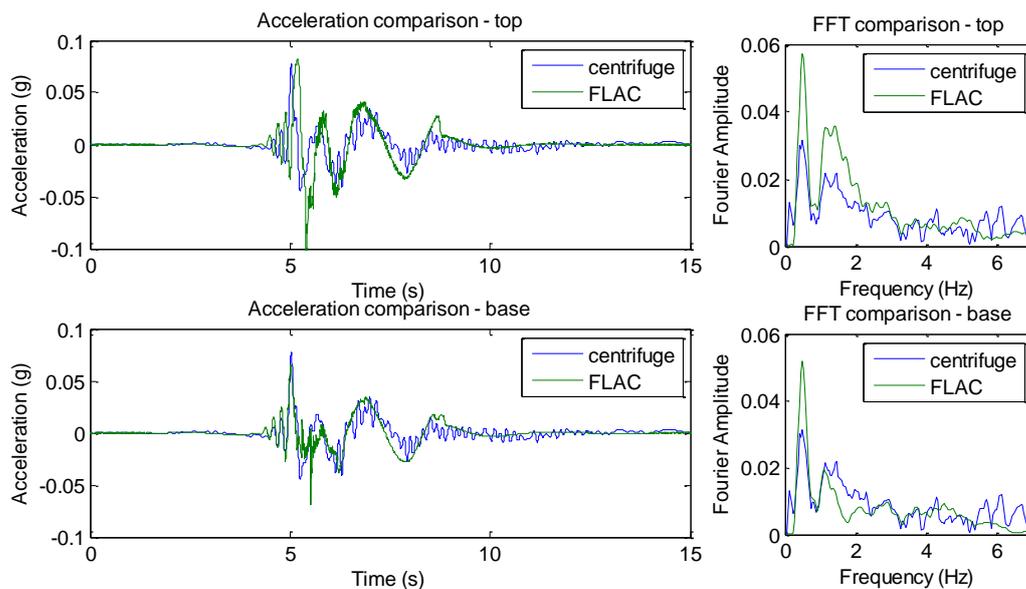


Figure 5 - Signal 'lemades'- colonne de sable, représentations temporelles et fréquentielle des accélérations expérimentales et numériques au niveau de la base et proche de la surface (échelle prototype).

Des comparaisons ont également été réalisées entre les résultats numériques à l'échelle modèle et à l'échelle prototype en exprimant toutes les valeurs à l'échelle prototype. La figure 8 montre un exemple de comparaison entre les deux modèles pour un signal de type lemades sur une colonne de sable homogène. Les différences entre les signaux sont limitées et montrent que le comportement, en termes de propagations des ondes, des sols utilisés en modélisation physique est bien

représentatif de ceux des sols réels. En général on ne note pas le développement des déformations plastiques.

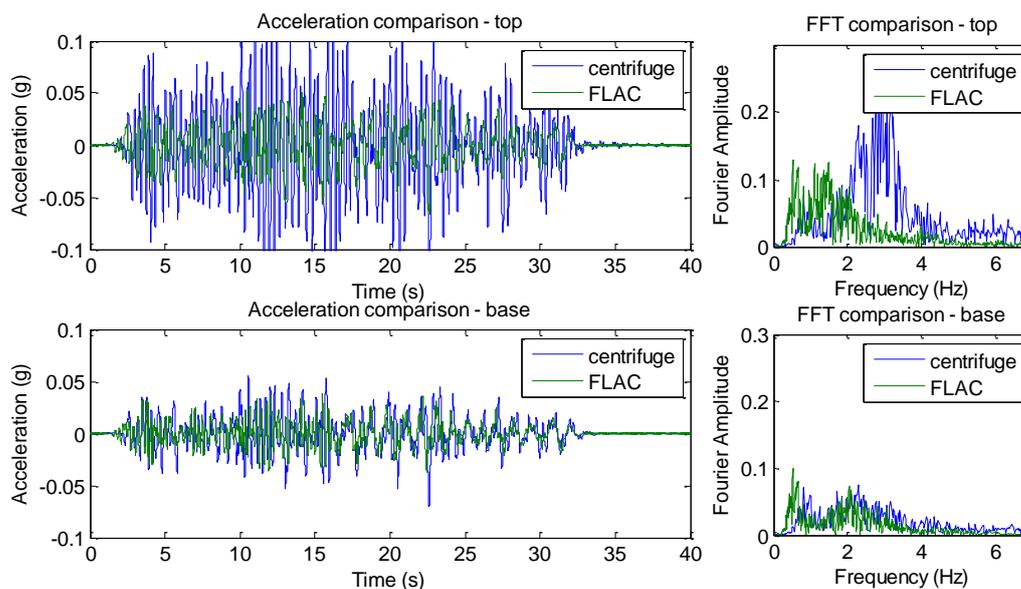


Figure 6 - Signal 'naturel' - colonne de sable, représentations temporelles et fréquentielle des accélérations expérimentales et numériques au niveau de la base et proche de la surface (échelle prototype).

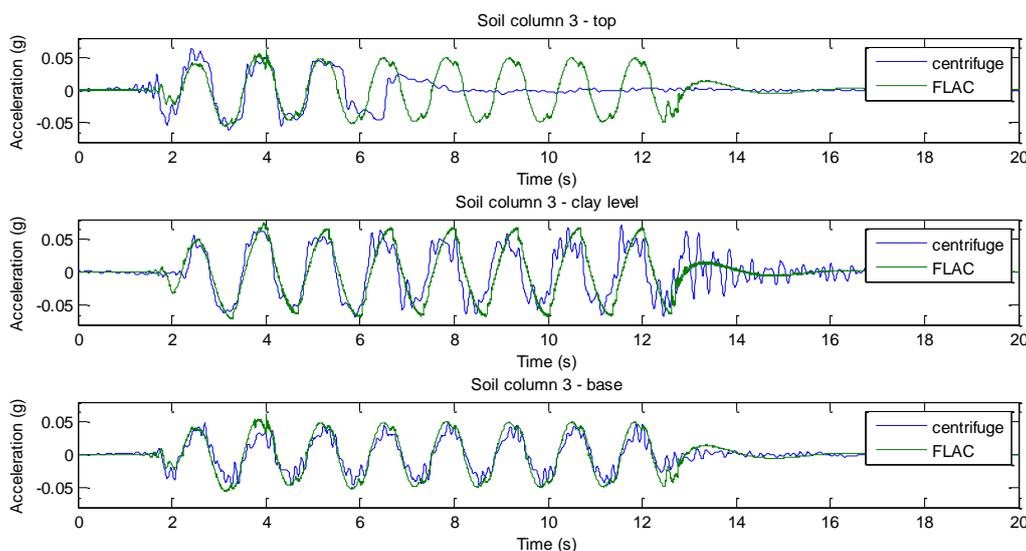


Figure 7 - Signal 'sinusoïdal' - multicouche configuration 3 (Figure 1a)- Comparaison des accélérations expérimentales et numériques (échelle prototype).

## 5. Conclusions

L'analyse des résultats des modélisations physique et numérique sur la propagation des ondes de cisaillement dans des colonnes de sol mono et multicouche a montré que les essais sismiques en centrifugeuse peuvent être utilisés pour étudier la réponse sismique des colonnes de sol multicouche avec alternance de couches de sable et d'argile. En effet, la comparaison avec les modèles numériques, développé dans le cadre de la mécanique des milieux continus a montré que les accélérations

enregistrées à différents niveaux dans la colonne de sol, et a fortiori la transmission des ondes, étaient comparables, et les matériaux utilisés sont représentatifs des sols réels. L'erreur expérimentale pouvant être induite par la technique de superposition de couches de sol de nature différentes (maîtrise des conditions d'interface sable/argile) est négligeable lors d'essais réalisés sous macrogravité. Pour les différentes configurations testées, la reproduction numérique des signaux utilisés en centrifugeuse à la base des modèles est en accord avec les données expérimentales. Pour ce qui concerne l'aptitude du modèle numérique à reproduire la transmission des signaux par le sol on note, toutefois, que si le type de colonnes de sol ne semble pas avoir d'influence, la convergence des modèles est meilleure pour les signaux équivalents ('sinusoïdal' et 'lemades'), qui sont plus propres au niveau du contenu fréquentiel que dans le cas du signal 'natural'. Cette différence peut être due à la difficulté qu'aurait la loi de comportement du sol choisie à reproduire correctement le comportement du sol dans le cas d'un input sismique multifréquentiel complexe.

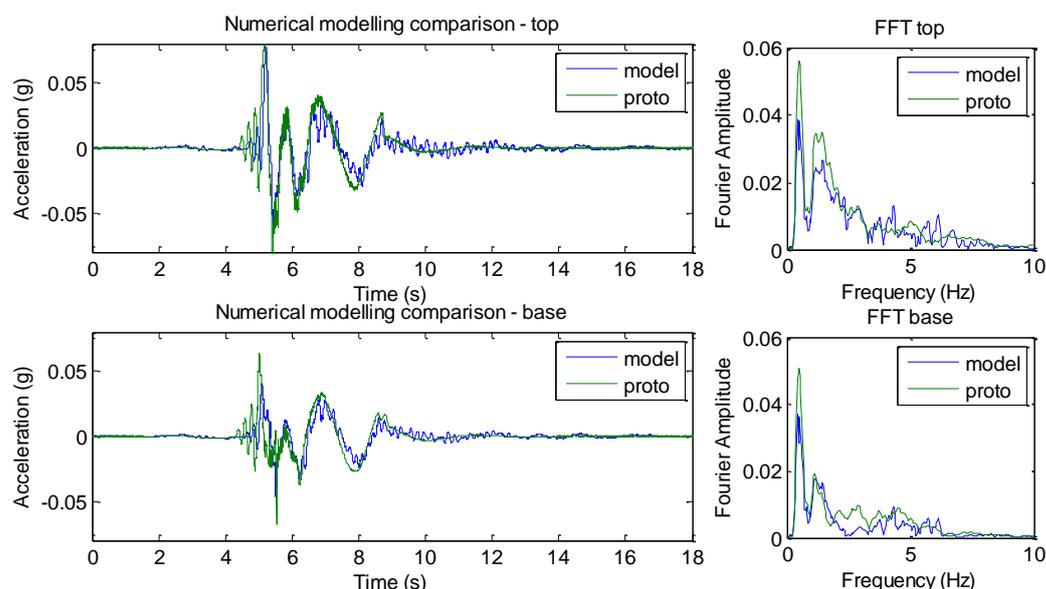


Figure 8 - Signal 'Lemades' - colonne de sable - Comparaison des résultats numérique à l'échelle modèle et prototype.

## Remerciements

Les essais en centrifugeuse ont été réalisés dans le cadre du projet européen SERIES-ENINALS [FP7/2007-2013] en vertu de la convention de subvention n°227887 (SERIES). On remercie l'équipe des techniciens de la centrifugeuse de l'IFSTTAR de Nantes et les étudiants qui ont travaillé sur ce sujet.

## Références bibliographiques

Bozzano F., Bretschneider A., Giacomi A.C., Lenti L., Martino S., Scarascia-Mugnozza G., Stedile L., Tacita J-L. (2012). Undrained behaviour of the sandy-silty level of the Tiber river alluvial deposits in Rome (Italy). Italian Journal of Engineering Geology and the Environment, 2:47-61

Castelli F., Castellano E., Contino F., Lentini V. (2013). Caratterizzazione dinamica dei terreni nell'area del nuovo laboratorio di dinamica strutturale e geotecnica L.E.D.A. di Enna. Comptes Rendus du congrés ANIDIS, Padoue.

Chazelas J.-L., Escoffier S., Garnier J., Thorel L., Rault G. (2008). Original technologies for proven performances for the new LCPC earthquake simulator. Bulletin of Earthquake Engineering. Vol.6 n°4, pp 723-728.

Garnier J., Kus B., Levacher D. (1993). Cartographie des densités de massifs de sable reconstitués par pluviation. 6ème colloque Franco-Polonais de mécanique des sols, Douai, pp.105-112.

Georgiannou V. N., Tsomokos A., Stavrou K. (2008). Géotechnique 58, No. 2, 113–124.

Hardin, B. O., V. P. Drnevich. (1972). Shear Modulus and Damping in Soils: I. Measurement and Parameter Effects, II. Design Equations and Curves. Journal of Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE, Vol. 98, No. 6, pp.603-624 and No. 7, pp. 667-691.

Itoh K., Koda M., Takahashi A., Lee K.I., Murata O., Kusakabe O. (2003). Centrifuge simulations of wave propagation using a moving load system. Proceedings of the International Workshop WAVE 2002, Okayama, Japan, 193-200, 2003.9

Itho K., Zeng X., Koda M., Murata O., Kusakabe O. (2005). Centrifuge simulation of wave propagation due to vertical vibration on shallow foundations and vibration attenuation countermeasures. Journal of Vibration and Control, 11:781-800.

Lenti L., Martino S. (2010). New procedure for deriving multifrequential dynamic equivalent signals (LEMA\_DES): a test study based on Italian accelerometric records. Bulletin of Earthquake Engineering, 8:813-846.

Li Z., Escoffier S., Kotronis P. (2013). Using centrifuge tests data to identify the dynamic soil properties: Application to Fontainebleau sand. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Vol. 52, pp77-87

Luong M.P. (1996). Centrifuge modelling of a seismic barrier using soil energy dissipation. XI World Conference on Earthquake Engineering, paper n°358.

Rayhani M.H.T., El Naggar M.H. (2007). Centrifuge modeling of seismic response of layered soft clay. Bull Earthquake Eng 5: 571-589.

Rayhani M.H.T., El Naggar M.H. (2008). Seismic response of sands in centrifuge tests. Canadian Geotechnical Journal, 45:470-483.

Semblat J-F., Luong M.P. (1998). Wave propagation through soils in centrifuge testing. Journal of Earthquake Engineering 2, 147-171.

Weissman K., Prevost J.H. (1989). Centrifugal modelling of dynamic soil-structure interaction. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 18, 1145-1161.

Zeng, X., Schofield, A.N. (1996). Design and performance of an Equivalent Shear Beam (ESB) model container for earthquake centrifuge modelling, Geotechnique, Vol.46, No.1, pp 83-102.