

# IDENTIFICATION DES SOLS LIQUEFIABLES PAR PENETROMETRE STATIQUE CYCLIQUE (CPT-CYCLIQUE) : APPROCHES NUMERIQUES ET EXPERIMENTALES

## IDENTIFICATION OF SOIL LIQUEFACTION BY CYCLIC STATIC PENETROMETER (CYCLIC-CPT): NUMERICAL AND EXPERIMENTAL APPROACHES

Hamid Hosseini Sadrabadi<sup>1,2</sup>, Ankit Sharma<sup>1</sup>, Bruno Chareyre<sup>1</sup>, Luc Sibille<sup>1</sup>, Christophe Dano<sup>1</sup>, Pierre Riegel<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Univ. Grenoble Alpes, CNRS, Grenoble INP, 3SR, 38000 Grenoble, France

<sup>2</sup> Equaterre, Bureau d'étude ingénierie 74960 Meythet, France

**RÉSUMÉ** – Le présent projet vise à présenter les résultats d'un essai pénétrométrique innovant pour la reconnaissance des sols liquéfiables (sans mesure de la pression interstitielle). Nous présentons des approches numériques et expérimentales explorant la possibilité d'utiliser des données issues d'un chargement cyclique de la pointe d'un pénétromètre pour évaluer le potentiel de liquéfaction du sol.

**ABSTRACT** – This project aims to present the results of an innovative penetrometer test for the investigation of liquefiable soils (without pore pressure measurement). We present numerical and experimental approaches exploring the possibility of using data from a cyclic loading of the tip of a penetrometer to assess the liquefaction potential of soil layers.

### 1. Introduction

L'essai au pénétromètre statique (CPT) est couramment utilisé pour l'étude in situ des couches superficielles du sol. Les corrélations empiriques basées sur les essais CPT ou des essais de pénétration plus avancés comme le CPTU permettent d'évaluer le potentiel de liquéfaction des sols (Robertson et Wride, 1998). Dans cet article, des approches à la fois numériques et expérimentales, explorant la possibilité d'utiliser des données résultant d'une sollicitation cyclique de l'extrémité de la pointe du pénétromètre, sont présentées pour évaluer le potentiel de liquéfaction. La partie expérimentale, réalisée dans une chambre de calibration, est basée sur une comparaison entre des essais CPTU et des essais avec un pénétromètre cyclique original spécialement développé par Equatech.R&D (groupe Equaterre) (Riegel, 2017).

Le modèle numérique du CPT associe la méthode des éléments discrets, qui décrit la phase solide, et une méthode de volumes finis définis à l'échelle des pores (Catalano et al., 2014), pour résoudre l'écoulement de l'eau interstitielle en conditions saturées. En plus de la résistance de pointe, ce modèle donne accès aux champs de contraintes, de déplacements, de pression interstitielle et de vitesse du fluide dans l'ensemble du volume de sol.

Les résultats expérimentaux et numériques sont analysés de manière complémentaire pour mettre en évidence : premièrement, les informations clés qui peuvent être fournies par un CPT cyclique dans des sables fins lâches ou denses et, deuxièmement, comment ces informations pourraient être utilisées pour évaluer le potentiel de liquéfaction d'un sol.

## 2. Test pénétromètre statique cyclique Equatech.R&D

Depuis plus de 20 ans, le groupe Equaterre réalise des campagnes d'étude des sols, en particulier dans des terrains post-glaciaires (moraine...). La pratique a conduit à l'utilisation d'une double mesure grâce à une pointe "Gouda" (Figure 1), qui consiste à mesurer successivement la résistance de la pointe à une vitesse d'avancement de 2 cm.s<sup>-1</sup> ( $Q_{C2cm/s}$ ) et la force stationnaire sur la pointe mesurée après arrêt dans une position donnée ( $Q_{Cstop}$ ) (Hosseini et al, 2016; Riegel et Hosseini, 2014). Après évaluation des sols éventuellement liquéfiables par comparaison de  $Q_{C2cm/s}$   $Q_{Cstop}$ , le potentiel de liquéfaction est précisé en effectuant un chargement direct de l'horizon étudié avec un pénétromètre cyclique. Le dispositif cyclique (Riegel, 2017) comprend un module additionnel innovant pour imposer un chargement cyclique directement sur l'extrémité de la pointe et suivre la réponse du sol à ce chargement. Le module cyclique peut être utilisé soit en mode « force contrôlée », soit en mode « déplacement contrôlé ». La fréquence peut être choisie entre 0,5 et 25 Hz. Dans cette étude, elle a été réglée à 1 Hz. Pour des raisons de simplicité et de robustesse du dispositif cyclique, ce dernier ne comprend pas de cellule de pression interstitielle.

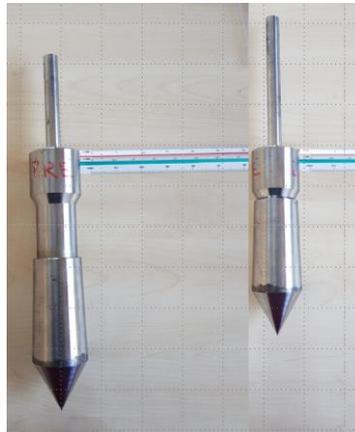


Figure 1. Pointe Gouda (position ouverte et fermée), la sollicitation cyclique est appliquée directement sur l'extrémité coulissante de la pointe

## 3. Essais de pénétration en chambre de calibration

L'objectif de cette section est de présenter le montage expérimental et les étapes opératoires effectuées pendant le programme d'essais dans la grande chambre de calibration du laboratoire 3SR. Des essais CPTU et au pénétromètre cyclique ont été réalisés sur des échantillons de sable siliceux fin dans deux états de densité différents (appelés par la suite états lâche et moyennement dense).

### 3.1. Sable de Fontainebleau

Le sable de Fontainebleau GA39 ( $e_{min} = 0,56$ ,  $e_{max} = 1,01$ ) a été choisi en raison de sa finesse ( $d_{50} = 190\mu m$ ), de son uniformité ( $C_u = 1,2$ ), propriétés qui en font un bon candidat vis-à-vis de la liquéfaction dans des conditions appropriées. Un échantillon moyennement dense (densité relative de 55%) a été reconstitué par damage à sec de couches de sable de 100 kg, tandis qu'un échantillon lâche (densité relative < 40%) a été obtenu par pluviation du sable dans de l'eau à hauteur de chute nulle.

### 3.2. Chambre de calibration

Les principaux avantages de la chambre de calibration sont de pouvoir créer des échantillons de sol de grandes dimensions avec des paramètres d'état spécifiques, de contrôler indépendamment différentes conditions limites et de suivre des chemins de contraintes typiques des essais in-situ. Dans le cas présent, les conditions aux limites latérales sont similaires aux conditions œdométriques, soit aucun déplacement latéral. La chambre de calibration du laboratoire 3SR (Silva, 2014) est illustrée schématiquement sur la figure 2. Elle se compose de trois profilés cylindriques rigides en acier de 0,5 m de hauteur et de 1,20 m de diamètre intérieur superposés l'un sur l'autre pour atteindre une hauteur totale de 1,5 m. Une membrane pressurisée exerce une contrainte verticale sur la surface supérieure, juste en dessous du chapeau supérieur muni d'un trou central, permettant le passage du pénétromètre. Dans le cadre de nos essais, une fuite inattendue dans l'anneau intermédiaire supérieur a entraîné une saturation incomplète des échantillons, comme le montrent les mesures de pression interstitielle lors de la traversée du CPTU (Figure 3). Par conséquent, seules les mesures effectuées dans la zone entièrement saturée, dans la partie inférieure des échantillons, sont présentées.

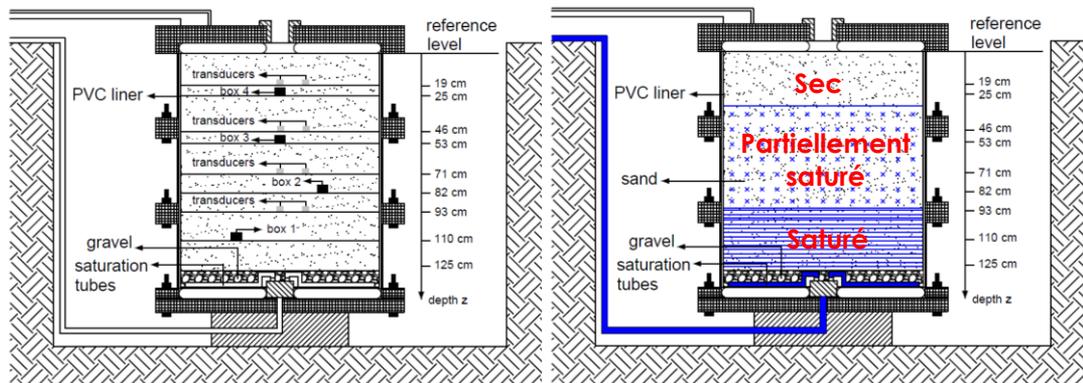


Figure 2. Position des capteurs (gauche) et état de saturation (droite) en grande chambre calibration.

### 3.3. Résultats des essais de pénétration

Des essais CPTU ont d'abord été effectués sur des échantillons consolidés verticalement à une contrainte verticale de 100 kPa pour valider le potentiel de liquéfaction des échantillons de sable. Ensuite, un deuxième échantillon a été testé dans les mêmes conditions (moyennement dense ou lâche) avec le pénétromètre cyclique d'Equerre. L'échantillon moyennement dense a été consolidé à une contrainte verticale de 100 kPa, alors qu'aucun confinement n'a été appliqué dans l'échantillon lâche, afin de favoriser la liquéfaction.

#### 3.3.1 CPTU en milieu dense et lâche

Les deux séries de CPTU dans les sables moyennement denses et lâches ont été réalisées avec une double mesure de résistance de pointe ( $Q_{C2cm/s}$  et  $Q_{Cstop}$ ), chaque 10 cm. La pression interstitielle a également été enregistrée. Les valeurs de résistance de pointe valident la nature liquéfiable des échantillons lâches et la nature non liquéfiable de l'échantillon de densité moyenne. Sur la Figure 3, on observe le comportement dilatant du sable moyennement dense avec réduction de la pression interstitielle pendant la poussée et récupération de la pression pendant l'arrêt. Au contraire, pour les sables lâches, le comportement contractant induit une augmentation de la pression interstitielle pendant la poussée et une dissipation pendant l'arrêt. L'évolution de la pression interstitielle observée expérimentalement sera confirmée dans les simulations numériques ultérieures.

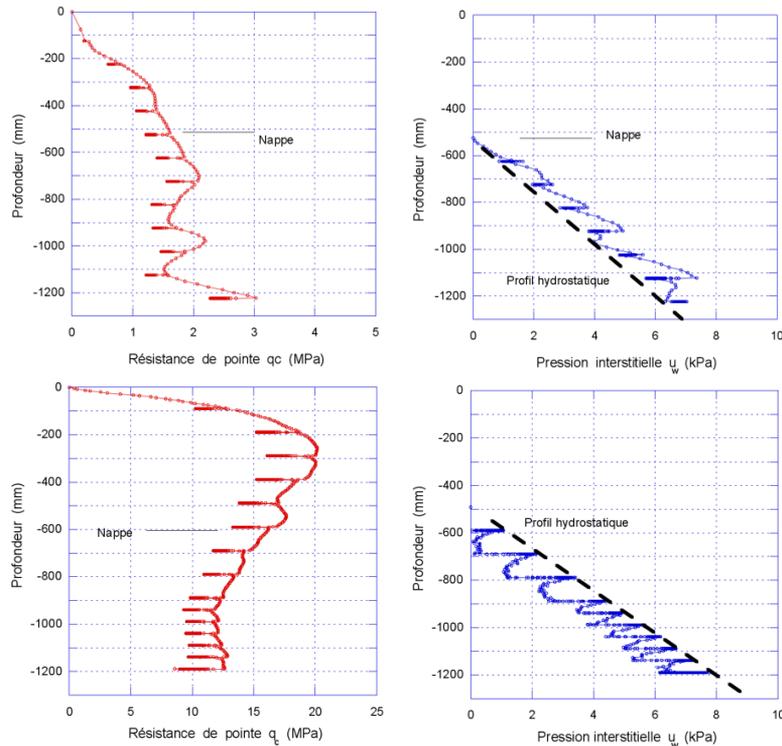


Figure 3. Résistance de la pointe et pression interstitielle en milieu lâche sans confinement vertical (haut) et dense avec un confinement vertical de 100 kPa (bas).

### 3.3.2. Tests cycliques avec le pénétromètre statique cyclique Equaterre

Les essais cycliques avec le dispositif pénétrométrique d'Equaterre (sans mesure de pression interstitielle) consistent en un premier enfoncement monotone jusqu'à une profondeur donnée, puis en un relâchement de l'effort de la pointe jusqu'à une valeur cible inférieure à la résistance de pointe et maintenue pendant une minute. Ensuite, le chargement cyclique, contrôlé ici en force, est appliqué entre deux valeurs prescrites de la contrainte sur la pointe (Figure 4). Pendant le chargement cyclique, le « test 7 » réalisé dans le sable moyennement dense ne présente pas de déplacement significatif de la pointe. Au contraire, dans le sable lâche, l'accumulation de déplacements verticaux de la pointe s'est produite (tests 10 et 11 avec un confinement vertical de 100 kPa), voire jusqu'à un effondrement soudain après 13 cycles dans le cas de l'essai 17 réalisé sans confinement vertical, ce qui peut être interprété comme le résultat d'une instabilité du sol sous la pointe pénétrométrique.

## 4. Modélisation numérique

### 4.1. Méthode DEM-PFV

Le modèle numérique 3D est basé sur la combinaison de la méthode des éléments discrets (DEM) pour décrire le comportement mécanique du squelette solide du sol avec une méthode de volumes finis à l'échelle des pores (PFV) pour résoudre la dynamique du fluide interstitiel (Catalano et al., 2014). En ce qui concerne la partie DEM, les particules sont des sphères qui interagissent par l'intermédiaire de contacts élastiques avec frottement de glissement et de roulement. Concernant la partie PFV, le flux de fluide est supposé stokésien et incompressible (flux de Darcy). La maille fluide est faite de tétraèdres avec une particule solide à chaque sommet. Les tétraèdres sont conçus de manière lagrangienne pour suivre le mouvement des particules. L'application du solveur PFV donne le champ de pression interstitielle à chaque instant, à partir duquel les forces

exercées par le fluide sur les grains solides sont déduites et intégrées dans le cycle DEM. Le modèle comprend six paramètres mécaniques : rigidités de contact normale, tangentielle et de roulement, coefficients de frottement de contact et de roulement et la perméabilité. Catalano et al (2014) et Chareyre et al (2011) présentent en détail la méthode couplée DEM-PFV. Néanmoins, le modèle présenté ici diffère dans la description du flux de fluide défini par une conductivité macroscopique (conductivité de Darcy) indépendamment de la taille des particules. Une adaptation qui était nécessaire en raison de la méthode de discrétisation adaptative des particules, présentée ci-après, qui aurait causé un gradient de perméabilité de Darcy à travers le massif de sol chambre avec le modèle original.

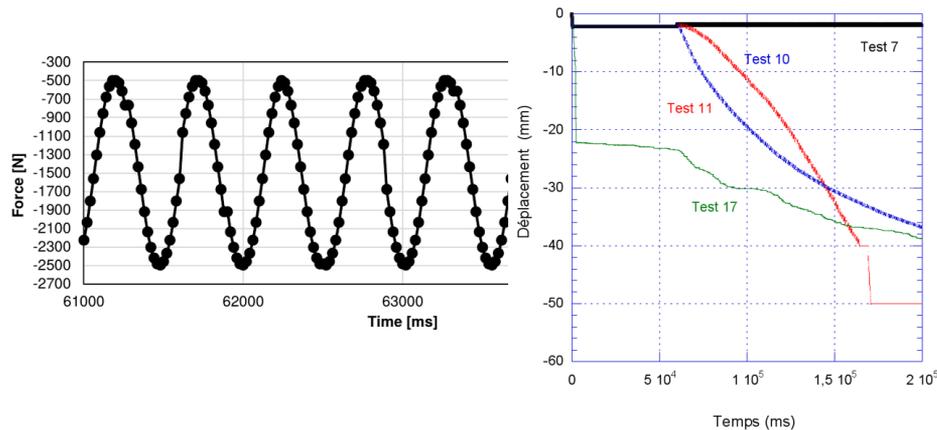


Figure 4. Chargement cyclique contrôlé en force dans le sable lâche (gauche) ; déplacement cumulé de la pointe au fil des cycles dans les milieux dense, test 7, et lâche, tests 10, 11 et 17 (droite)

#### 4.2. Chambre de calibration virtuelle

Grâce à la symétrie de révolution de la chambre de calibration, seul un quart de la géométrie réelle a été représenté dans les simulations numériques pour limiter le coût en calcul (Hosseini et al., 2016, Hosseini. 2020). Le domaine de simulation est de forme prismatique. Une des arêtes du prisme correspond à l'axe de symétrie du problème, qui est également l'axe du pénétromètre (Figure 5). Les bords du prisme sont constitués de parois rigides fixes (aucun frottement entre les particules et les parois) et imperméables au fluide. Le rapport  $R_d$  entre le rayon de la pointe et le rayon de la chambre de calibration a été fixé à 60 afin de limiter les effets de bord sur la résistance de la pointe. Enfin, pour optimiser à nouveau le coût en calcul, une adaptation du raffinement de la discrétisation du sol en particules élémentaires en fonction de la distance de la pointe a été mise en œuvre (Figure 5). En remplissant les zones éloignées de la pointe avec des particules plus grosses, la puissance de calcul peut être utilisée pour calculer plus précisément les interactions sol-pointe avec des particules relativement fines. L'assemblage granulaire est d'abord généré sous la forme d'un nuage aléatoire de particules sans contact, avec un gradient de taille moyenne des particules reflétant la distance à la pointe, et compacté par un procédé de croissance des grains sphérique préservant la forme de la distribution granulométrique. En réglant le frottement de contact ou l'adhérence pendant la phase de compactage, deux états initiaux différents ont été générés, denses et lâches respectivement (l'adhérence est éliminée, et le frottement de contact est restauré à une valeur nominale après le processus de compactage). Les porosités des assemblages denses et lâches sont respectivement de 0,35 et 0,45. La

perméabilité est fixée à  $10^{-7}$  m/s. Cette valeur de perméabilité numérique relativement faible a été choisie afin de souligner l'effet de la pression interstitielle dans le modèle numérique. Le rapport entre le diamètre de la pointe et le diamètre des particules est de 18 près de la pointe. Un confinement initial de 100 kPa est appliqué à l'ensemble granulaire, avant l'enfoncement du pénétromètre, reflétant l'effet de la profondeur.

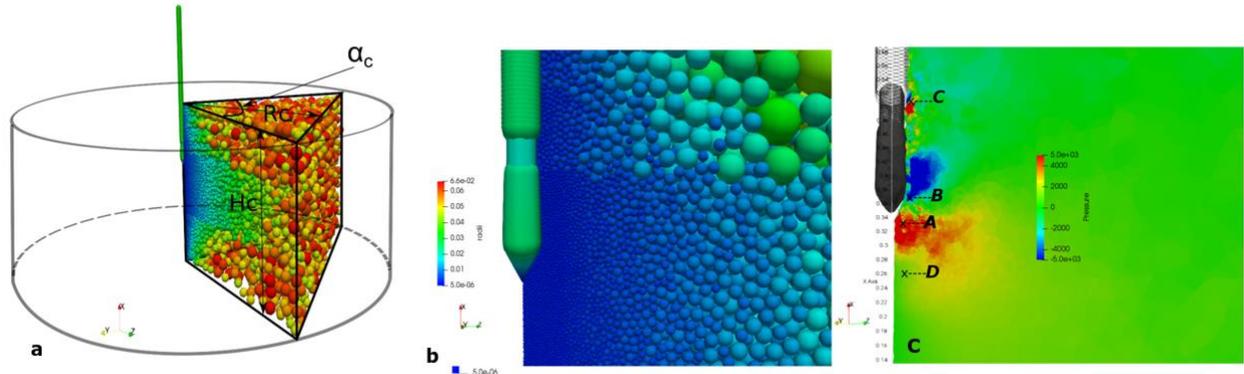


Figure 5. Géométrie de chambre de calibration virtuelle (a), raffinement de la discrétisation du sol autour de la pointe (b) et champ de pression interstitielle autour de la pointe simulé pour une pénétration statique dans le milieu lâche (c)

### 4.3 Chargement monotone

Un test pénétrométrique est simulé à un taux de pénétration. La vitesse d'avancement est de 1 m/s (chargement monotone). Ce taux de pénétration est plus élevé que dans des conditions in situ, mais une étude paramétrique a montré que, pour le modèle numérique, l'effet de la vitesse d'avancement sur  $Q_c$  (résistance de la pointe) était négligeable jusqu'à ce taux de pénétration (mais pas au-delà). La pression interstitielle est suivie en quatre points A, B, C et D, définis sur la Figure 5 par rapport à la position de la pointe et se déplacent avec cette dernière. La figure 6 présente l'évolution de la pression interstitielle dans les sables denses et lâches avec le déplacement de la pointe. Comme observé avec le test CPTU dans la chambre de calibration, une réduction de la pression interstitielle dans la zone la plus proche de la pointe (points A & B) est simulée pour l'assemblage granulaire dense, en accord avec le comportement dilatant des sables denses. Pour l'assemblage granulaire lâche, l'augmentation de la pression interstitielle, par rapport au comportement contractant du sol, se retrouve également numériquement autour de la pointe. Le point B est une exception où la pression, même si elle est plus élevée que dans le cas dense, n'est pas toujours positive. Cela peut être la conséquence de la forme

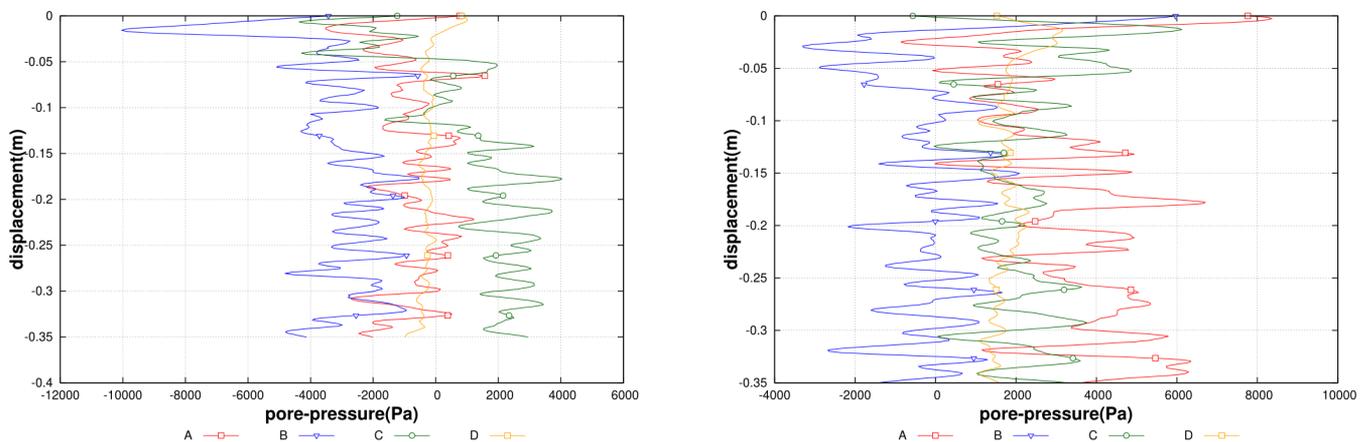


Figure 6. Profils de pression interstitielle en milieu dense (gauche) ; et lâche (droite)

particulière de la pointe Gouda (cf. Figures 1 et 5b) reproduite numériquement, avec une réduction de diamètre au-dessus de la pointe qui ne se retrouve pas sur une pointe CPTU classique.

#### 4.4 Chargement cyclique

Une sollicitation cyclique de la pointe du pénétromètre a été simulée de la même manière qu'avec le pénétromètre cyclique d'Equerre réalisé dans la chambre de calibration. Après avoir foncé la pointe de façon monotone jusqu'à une profondeur donnée, la sollicitation cyclique de la pointe est contrôlée en imposant la contrainte de la pointe entre deux valeurs prescrites (toutes deux inférieures à la résistance de pointe) avec une période  $T = 0.004s$ . Cette période est relativement faible par rapport à la période utilisée dans la chambre de calibration. Elle a été choisie pour limiter le coût de calcul en limitant le temps physique à simuler. Une étude paramétrique réalisée sur une période de 0,004s à 0,4s a montré que l'effet sur la résistance de la pointe est négligeable avec les paramétrages actuels. Cette étude paramétrique doit être complétée au-delà de 0,4s. La Figure 7 présente l'évolution du déplacement de la pointe dans les assemblages granulaires denses et lâches respectivement. Les résultats sont en accord avec ceux obtenus dans la chambre de calibration. Le modèle numérique n'a pas encore été étalonné sur le comportement mécanique du sable utilisé dans la chambre de calibration. Par conséquent, nous nous concentrons sur la tendance générale du modèle numérique et la comparaison n'est que qualitative. Le déplacement vertical de la pointe est presque réversible pour l'assemblage dense alors qu'une accumulation du déplacement est obtenue dans l'assemblage lâche. Les comportements réversibles et irréversibles du système pointe-sol, respectivement pour les assemblages denses et lâches, sont mis en évidence à la figure 7, qui montrent la relation contrainte-déplacement de la pointe. Aucun effondrement du sol sous la pointe n'a été observé numériquement pour le milieu lâche, contrairement à l'essai réalisé dans la chambre de calibration.

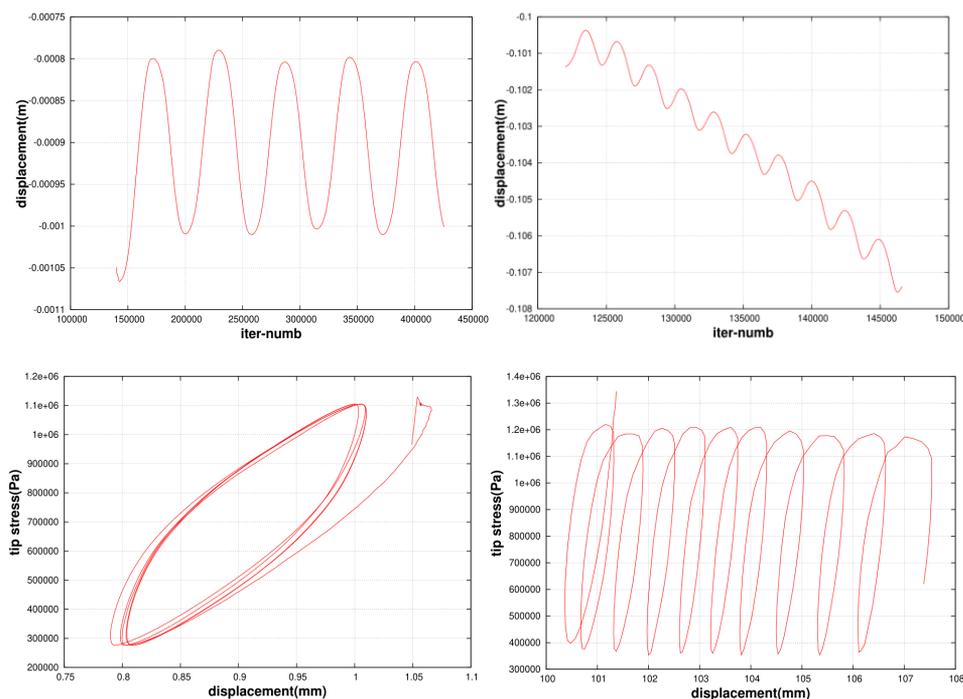


Figure 7. (Haut) déplacement de la pointe pendant le chargement cyclique imposé en force dans le milieu dense (gauche) ; et lâche (droite) ; (Bas) contrainte sur la pointe en fonction de son déplacement au cours des cycles dans le milieu dense (gauche) et lâche (droite)

Cela peut être dû au nombre trop faible de cycles simulés numériquement. Les réponses du modèle numérique sur un plus grand nombre de cycles doivent encore être étudiées.

## 5. Conclusion

Des essais préliminaires dans une grande chambre de calibration, couplés à des simulations numériques réalisées à l'échelle des particules, ont été effectués afin de développer et de valider les performances attendues d'un pénétromètre cyclique original. Les résultats expérimentaux et numériques montrent que le pénétromètre cyclique d'Equaterre pourrait être un outil prometteur pour évaluer le potentiel de liquéfaction des sols sablonneux, sans mesurer directement la pression interstitielle, comme avec un CPTU. En particulier, on observe une accumulation de déplacements verticaux irréversibles de la pointe au cours des cycles de chargement de la pointe contrôlés en force dans le sable fin lâche, évoluant éventuellement, dans la chambre de calibration, vers une perte de contrôle du chargement de la pointe lors de la liquéfaction du sol. Les résultats présentés dans cet article donnent un premier aperçu de la façon dont les données du pénétromètre cyclique pourraient être utilisées pour caractériser les couches de sol rencontrées. Néanmoins, ils doivent être confirmés et complétés par des essais plus approfondis en chambre de calibration, de plus amples simulations numériques, mais aussi des essais sur le terrain en conditions réelles.

## 6. Remerciements

Ces travaux ont été partiellement soutenus par le LabEx Tec 21 (Investissement d'Avenir - convention de subvention n° ANR-11-LABX-0030).

## 7. Références

- Butlanska, J. 2014. Cone penetration test in a virtual calibration chamber. PhD Thesis, Universitat Politècnica de Catalunya.
- Catalano, E., Chareyre, B., Barthélémy, E. 2014. Pore-scale modeling of fluid-particles interaction and emerging poromechanical effects. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics* 38(1), 51–71.
- Chareyre, B., Cortis, A., Catalano E., Barthélemy, E. 2011. Pore-scale modeling of viscous flow and induced forces in dense sphere packings. *Transport in Porous Media* 92(2), 473–493.
- DTU, 13.2. 1992.AFNOR, fondations profondes pour le bâtiment, pp.66.
- Hosseini, S.H., Chareyre, B., Sibille, L., Riegel, P. 2016. Identification des sols liquéfiables par pénétromètre statique : principe et modélisation numérique. JNGG 2016, 6-8 juillet 2016, Nancy. <https://jngg2016.science.conf.org/78564/document>.
- Hosseini, S.H. 2020.Thèse : Identification in-situ des sols liquéfiables par pénétromètre statique cyclique : modélisations physiques et numériques. <http://www.theses.fr/2019GREAI078/document>
- Riegel, P. 2017. Pénétromètre statique pour l'évaluation du caractère liquéfiable d'un sol et procédés associés. Dépôt de brevet FA841687. 18 août 2017.
- Riegel, P., Hosseini, S.H. (2014). L'usage du pénétromètre statique dans l'approche des tassements sous ouvrage. Retour d'expérience en milieu compressible par suivi du comportement du sol sous remblai de préchargement validité et amélioration des corrélations modules/qc. JNGG 2014, 8-9 juillet 2014, Beauvais.
- Robertson, P. K., & Wride, C. E. (1998). Evaluating cyclic liquefaction potential using the cone penetration test. *Canadian Geotechnical Journal*, 35(3), 442-459.
- Silva, M. 2014. Experimental study of ageing and axial cyclic loading effect on shaft friction along driven piles in sand. Ph.D. Thesis, University of Grenoble.