

IDENTIFICATION DES SOLS LIQUEFIABLES PAR PENETROMETRE STATIQUE : PRINCIPE ET MODELISATION NUMERIQUE

IDENTIFICATION OF LIQUEFIABLE SOILS FROM STATIC PENETROMETER TEST: METHODOLOGY AND NUMERICAL MODELLING

Hamid Hosseini-Sadrabadi^{1,2}, Bruno Chareyre¹, Luc Sibille¹, Pierre Riegel²

¹ Grenoble-INP, UGA, CNRS, Laboratoire 3SR, F-38000 Grenoble, France

² Equaterre : Bureau d'études géotechniques, 74960 Meythet, France

RÉSUMÉ – On souhaite étudier l'application du principe de double mesure mise en œuvre au cours d'essais de pénétration statique à l'identification directe des sols liquéfiables. Pour cela un modèle numérique discret intégrant un couplage fluide-solide sera développé. Cet article présente la stratégie de modélisation et l'étape préliminaire de mise en place d'une chambre d'étalonnage virtuelle.

ABSTRACT – In order to identify in the field liquefiable soils we suggest to use static penetration test for which double measurement of cone resistance is performed. To study the possibility of application of such a method, a discrete numerical model involving fluid-solid coupling will be developed. This paper presents the modeling strategy and the preliminary step of setting up a virtual calibration chamber.

1. Introduction

Les essais in-situ, tels que le pressiomètre ou le pénétromètre statique par exemple, sont très utilisés pour caractériser les sols en géotechnique d'un point de vue mécanique. Le pénétromètre statique a été fréquemment utilisé lors de campagnes de reconnaissance dans le cadre du dimensionnement de fondations, de contrôles de compactage, ou de caractérisations du risque de liquéfaction (Mayne, 2007).

Depuis 20 ans le bureau d'étude Equaterre dans le sillage de l'expérience de ses créateurs lance des campagnes d'investigation du sol en utilisant le pénétromètre statique avec un appui dynamique pour traverser les terrains très hétérogènes en sub-surface, comme par exemple des terrains post-glaciaires (moraine...). L'antériorité de la pratique du pénétromètre a conduit à maintenir l'usage de la double mesure à l'aide d'une pointe du type « Gouda », soit la mesure de la résistance de pointe à une vitesse d'enfoncement de $2\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$, $Q_c^{2\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}}$ et la mesure de la même résistance de la pointe à l'arrêt, $Q_c^{\text{arrêt}}$. En effet par analogie avec le chargement du sol d'une fondation, la mesure statique à l'arrêt ($Q_c^{\text{arrêt}}$) est notablement plus proche du comportement du futur ouvrage étudié, que la mesure en déplacement ($Q_c^{2\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}}$). L'expression de la double mesure varie notablement en fonction des terrains rencontrés. L'expérience montre également une réponse particulière de la double mesure dans le contexte des matériaux liquéfiables.

La présente contribution s'inscrit dans le développement d'une méthode d'interprétation des résultats de double mesure afin d'identifier les sols liquéfiables. On décrit dans un premier temps le principe de la mesure, puis la méthodologie numérique mise en place pour étudier la relation entre réponse et comportement du matériau en place.

2. Principe de l'essai de pénétration statique avec double mesure

2.1. Fonctionnement de la pointe « Gouda »

Le schéma de principe d'une pointe type Gouda est présenté sur la Figure 1 en position ouverte et en position fermée. La pointe du pénétromètre est solidaire d'une tige intérieure mobile en translation (sur une longueur de 4 cm) par rapport au train de tubes. Ainsi, en connectant, en tête du train de tubes, la tige intérieure à une cellule de mesure de force, on accède directement à la résistance de pointe Q_c en évitant tout frottement latéral.

L'approche utilisée par Equaterre depuis quelques années consiste à mesurer la résistance de pointe Q_c , dite « statique », lorsque le pénétromètre est enfoncé à une vitesse de 2 cm.s^{-1} et d'arrêter l'enfoncement à différentes profondeurs pour suivre l'évolution de Q_c , c'est la double mesure. Dans cet état fixe, l'évolution dans le temps de la résistance de pointe est variable, en présentant une décroissance, ou dans certains cas particuliers une augmentation, jusqu'à une stabilisation à une valeur finale que l'on dénomme « $Q_c^{\text{arrêt}}$ ». La valeur de $Q_c^{\text{arrêt}}$ pourrait être en relation avec l'évolution des pressions interstitielles au voisinage de la pointe et ainsi être représentative dans une certaine mesure de la sensibilité à la liquéfaction des sols traversés. Notons que pour un tel essai il n'y a pas de mesure directe de la pression interstitielle comme cela est fait au cours d'un essai de dissipation réalisé avec un piézocône.

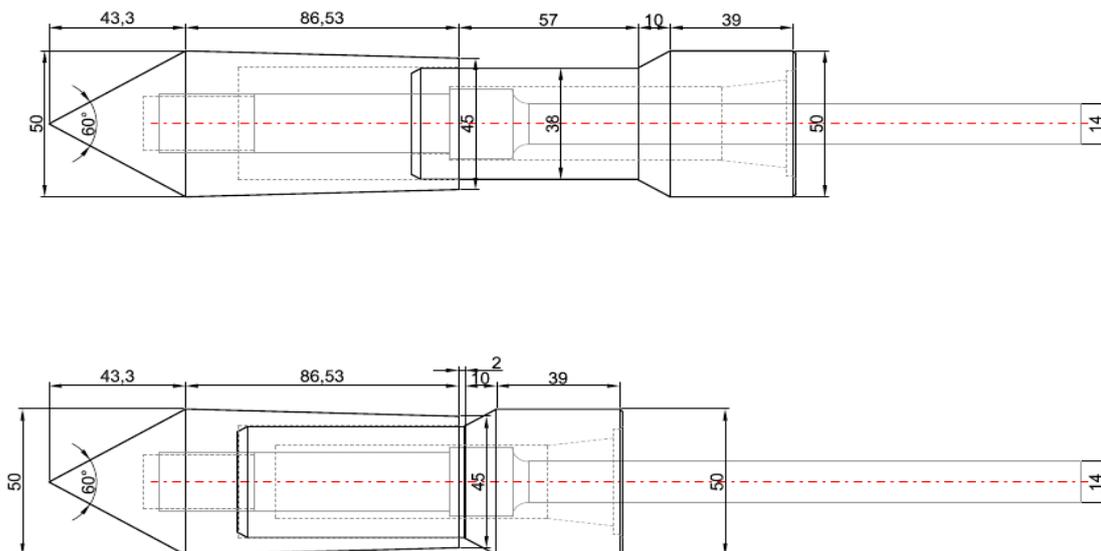


Figure 1. Schéma de principe d'une pointe Gouda, en position ouverte en haut, et fermée en bas : la pointe est solidaire de la tige intérieure et peut coulisser sur une longueur de 4 cm par rapport au corps du pénétromètre (cotes en mm).

2.2. Interprétation envisagée de l'essai de double mesure

La première partie de ce projet de recherche consiste à comprendre et décrire les phénomènes physiques mis en jeu pendant la relaxation de la résistance de pointe Q_c , lorsqu'on passe de l'enfoncement à vitesse constante à l'arrêt, afin d'être en mesure de proposer une méthodologie d'interprétation de l'essai de double mesure. Cette approche vise à permettre l'identification des sols potentiellement liquéfiables et de les classer en fonction de leur sensibilité. A titre d'exemple, on présente sur la figure 2 un profil de résistance de pointe avec double mesure obtenu par Equaterre. Le profil de droite montre la différence relative entre la valeur de $Q_c^{2\text{cm.s}^{-1}}$ dite « statique » (en trait continu vert sur le profil de gauche) et la valeur de $Q_c^{\text{arrêt}}$ (en trait continu orange), définie telle que :

$$\Delta Q_c = \frac{Q_{c^{2cm.s^{-1}}} - Q_{c^{arrêt}}}{Q_{c^{2cm.s^{-1}}}} \quad (1)$$

Lors de cette campagne de reconnaissance, les couches de sol situées entre 0 - 2 m et 8 - 11 m de profondeur ont été identifiées, à partir d'essais de dissipation au piézocône et d'analyses granulométriques dédiées sur carottes, comme liquéfiables. Ici, ces couches de sol sont caractérisées par des valeurs ΔQ_c atteignant voire dépassant les 50 % (forte diminution de $Q_{c^{arrêt}}$ par rapport à $Q_{c^{2cm.s^{-1}}}$). Cet exemple semble montrer que le principe de double mesure de la résistance de pointe pourrait être utilisée pour localiser les zones potentiellement liquéfiables pour ensuite concentrer sur ces zones, si nécessaire, des moyens plus fins de caractérisation de la sensibilité à la liquéfaction.

Toutefois, la possibilité d'une telle interprétation de la double mesure reste à confirmer à l'heure actuelle. C'est pourquoi nous développons un modèle numérique du pénétromètre statique dans lequel les phases solides et fluides sont toutes deux explicitement représentées. Ce modèle permettra de multiplier aisément les expériences numériques et d'accéder à des données indispensables pour la mise en place de la méthodologie d'interprétation (champs de pression interstitielle, de déformation volumique, ...), contrairement aux essais de terrain, voire aux modèles physiques de laboratoire.

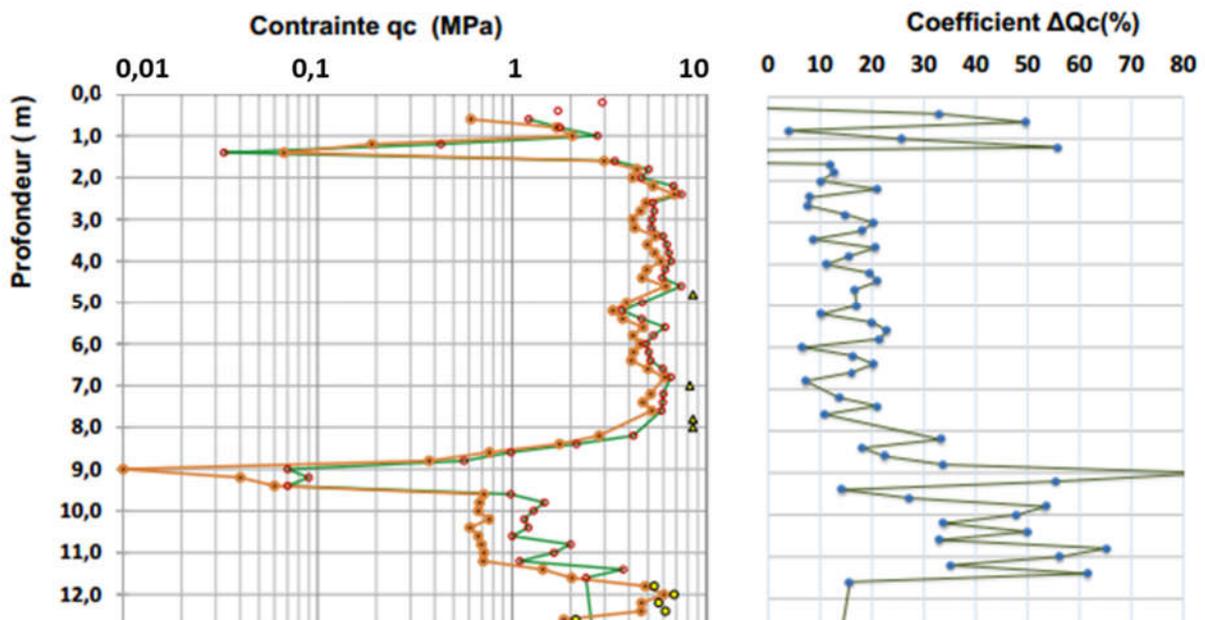


Figure 2. Exemple de résistances de pointe mesurées lors d'un essai de pénétration statique avec double mesure.

3. Modèle numérique par éléments discrets

Le modèle numérique est basé sur la Méthode des Eléments Discrets (MED) pour décrire le squelette solide du sol. La MED sera dans le modèle final, couplée avec le méthode PFV (Pore scale Finite Volume) pour résoudre la dynamique de la phase fluide à l'échelle des pores (Catalano et al., 2014), toutes deux implémentées dans le code libre YADE (Šmilauer

et al., 2015). Le modèle vise à représenter une Chambre d'étalonnage Virtuelle (virtual calibration chamber, VCC) au sein de laquelle seront simulés des essais de double mesure.

3.1. Géométrie du modèle et traitement des conditions aux limites

Afin de s'affranchir des effets de bord sur la résistance de pointe le rapport entre le diamètre de la chambre d'étalonnage et le diamètre de la pointe du pénétromètre doit être suffisamment grand, idéalement supérieur à 70 (Salgado et al., 1998 ; Butlanska et al., 2010). Par conséquent, une représentation complète tridimensionnelle d'une chambre d'étalonnage conventionnelle représenterait un coût en calcul prohibitif étant donné le grand nombre de particules qu'il serait nécessaire d'utiliser avec la MED (le coût en calcul étant en direct relation avec le nombre de particules). Il a alors été choisi de tirer avantage de la symétrie de révolution du problème pour ne représenter numériquement qu'un secteur angulaire (Figure 3). Le modèle numérique se présente donc sous la forme d'un prisme dont une des hauteurs de ce dernier est confondu avec l'axe de symétrie, soit l'axe du pénétromètre (voir la figure 3). Les limites du prisme sont constituées de parois rigides fixes non frottantes.

Par ailleurs, toujours afin de contrôler le coût en calcul nous avons opté pour un raffinement variable de la discrétisation du sol en éléments discrets en fonction de la distance à la pointe. En effet, au voisinage de la pointe le sol est remanié de manière très importante et il est indispensable d'utiliser une description fine de celui-ci. En revanche, à une distance suffisante de la pointe, le réarrangement granulaire est absent et les déformations restent faibles et essentiellement élastiques. Une discrétisation grossière du milieu est alors suffisante pour rendre compte de ce type de comportement. Il en résulte la représentation discrète du sol telle que présentée sur la figure 3, et pour laquelle le rapport entre le diamètre de la pointe et la taille des grains est de 8,5 à proximité de la pointe. Notons qu'il est indispensable, dans un modèle comme celui-ci comportant un raffinement de discrétisation variable d'utiliser des lois de contact inter-particules ainsi qu'une conductivité hydraulique locale qui rendent les propriétés effectives (porosité, rigidité, résistance au cisaillement, perméabilité) invariantes vis à vis des tailles de particules.

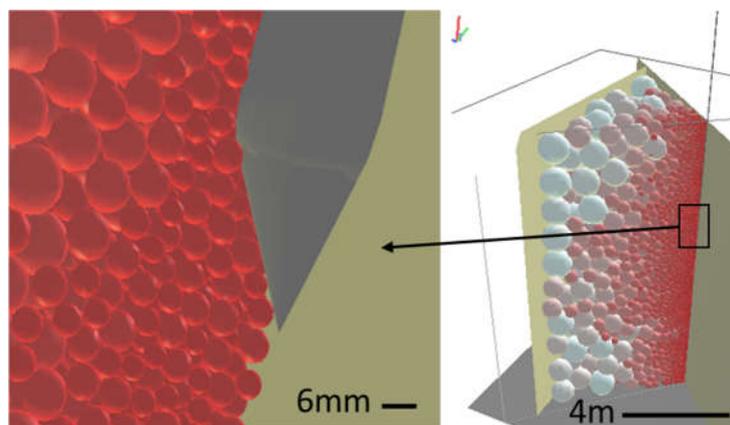


Figure 3. Vue du modèle numérique discret pour un angle d'ouverture du prisme de 90° , un « rayon » de 4 m et une hauteur de 10.4 m.

3.2. Principe de calibration du modèle

Les paramètres mécaniques du modèle numérique discret étant définis à l'échelle des contacts entre particules il est nécessaire de procéder à une calibration de ces paramètres en simulant des essais mécaniques homogènes sur un volume élémentaire représentatif, à partir desquels sont déduits les propriétés mécaniques macroscopiques (essentiellement, angle de frottement interne, angle de frottement résiduel, et angle de dilatance). La loi de contact inter-particule utilisée ici prend en compte une résistance au glissement du contact, représentée par l'angle de frottement au contact φ_c , ainsi qu'une résistance au roulement caractérisée le coefficient de frottement de roulement μ_r . L'introduction de cette résistance au roulement est une manière indirecte de prendre en compte l'angularité des grains réels alors que ces derniers sont représentés numériquement comme des sphères.

Des travaux précédents (Aboul Hosn et al., 2016) ont montrés que, pour des rigidités de contact (rigidité normale et rigidité de roulement) suffisamment grandes (par rapport à la pression moyenne), le comportement mécanique de l'assemblage granulaire est principalement piloté par φ_c , μ_r et la densité initiale. Il apparaît donc essentiel, comme pour un essai de laboratoire classique, de contrôler la densité initiale de l'assemblage granulaire en suivant une méthodologie « numérique » de création des assemblages granulaires qui permet d'accéder aux densités souhaitées. Pour cela il est adopté une procédure numérique de compactage de l'assemblage par grossissement progressif de grains, au cours de laquelle soit l'angle de frottement au contact est réduit pour atteindre des densités élevées (puis remis à sa valeur nominale après compactage), soit une adhésion inter-particule est ajoutée pour atteindre des densités faibles (et remis à zéro après compactage). On parvient ainsi à balayer une gamme d'indice des vides comprise entre 0,6 et 0,9.

Par ailleurs, le frottement de roulement est le seul paramètre dont dépend l'angle de frottement (macroscopique) à l'état résiduel (état critique), alors que l'angle de frottement interne dépend entre autres (mais pas uniquement) de l'angle de frottement au contact. Ainsi la procédure de calibration mise en place, à partir de la simulation d'essais triaxiaux est la suivante (Aboul Hosn et al., 2016) :

- 1/ calibration de μ_r par identification de l'angle de frottement résiduel,
- 2/ choix de la densité initiale par identification de l'angle de dilatance,
- 3/ calibration de φ_c par identification de l'angle de frottement interne (angle de frottement au pic du déviateur de contrainte).

Finalement, le comportement en sollicitations cycliques de l'assemblage granulaire sera confirmé par la simulation d'essais de compression triaxiale cyclique sur un VER.

3.3. Procédure de création de l'assemblage granulaire et résultat type d'un essai de pénétration statique

La pointe du pénétromètre, dont la géométrie est similaire à celle présentée sur la figure 1, est le premier élément à être généré à l'intérieur de la géométrie prismatique (représentant la VCC telle que définie sur la figure 3) à une profondeur légèrement inférieure à la mi-hauteur du prisme. La simulation des essais de pénétration seront donc limités à des déplacements de la pointe située uniquement dans la partie centrale du prisme, toujours dans le souci de se prévenir des effets de bord. L'assemblage granulaire représentatif du sol est ensuite généré à l'intérieure de la VCC sous la forme d'un nuage de grains sans contact, dont les positions sont générées aléatoirement mais avec des diamètres de grains croissant avec l'éloignement de la pointe. Il suit alors une phase de compactage par grossissement des grains (les parois limites du prisme étant gardées fixes) afin d'atteindre la densité recherchée (tel qu'expliqué dans la partie précédente) sous une pression moyenne représentative de l'effet de profondeur (l'ensemble des couches de sol depuis la surface n'étant pas représentées dans le modèle). Cette pression moyenne est déduite des

forces des contacts existant entre les grains et la paroi du prisme opposée au pénétromètre. Une fois l'assemblage à l'équilibre, l'essai de pénétration statique est simulé en imposant une vitesse d'enfoncement de la pointe de 2 cm.s^{-1} . La résistance de pointe Q_c est calculée à tout instant à partir des forces de contact grains-pointe.

Sur les figures 4 et 5 sont présentées les résistances de pointe typiques obtenues avec le modèle numérique, pour une pression moyenne de 100 kPa et un angle d'ouverture du prisme de 90° . La hauteur (H) du prisme est variable de 1.3 à 10.4 m et le rayon (R) de 0,5 à 4m. A titre indicatif pour $H = 1.3$ et $R = 0.5$ m le nombre de particules est $N = 7013$; et pour $H = 10.4$ et $R = 4$ m, $N = 53469$. L'angle de frottement au contact est fixé à 30° et le frottement de roulement est désactivé, se traduisant à l'échelle macroscopique par un angle de frottement interne φ' voisin de 20° .

Par ailleurs, une estimation de la résistance de pointe peut être déduite de la contrainte limite de pointe q_{pl} telle que déterminée selon le DTU 13.2 pour le calcul des fondations profondes. Pour un ancrage supérieur à l'ancrage critique :

$$q_{pl} = a. N_{qmax} + \lambda. c. N_{cmax} \quad (2)$$

avec $a = 0.05 \text{ MPa}$, $N_{qmax} = 13$ (pour $\varphi' = 20^\circ$), et une cohésion $c' = 0$ dans notre cas. Soit une valeur de $q_{pl} = 0,65 \text{ MPa}$. Cette valeur est tout à fait en accord avec la résistance de pointe obtenue avec le modèle (sans utiliser aucun paramètre de calage) qui malgré de fortes oscillations (liées à la nature discrète du mode de représentation du sol) présente une valeur moyenne située entre 0,60 et 0,70 MPa, par exemple dans le cas de dimensions extrême de la VCC où $H = 10.3$ et $R = 4$ m (figure 5).

Sur la figure 4 sont présentés les profils de $Q_c^{2cm.s^{-1}}$ pour un hauteur H de VCC constante et un rayon de cette dernière variable de $R = 0,5$ à 2 m. Bien que $Q_c^{2cm.s^{-1}}$ soit légèrement supérieur à l'initiation de l'enfoncement pour le rayon le plus grand ($R = 2$ m), cette différence semble s'estomper au cours du déplacement de la pointe, et il n'apparaît pas ici, pour les valeurs de R testées, d'influence claire du rayon de la VCC sur la résistance de pointe. De la même manière, on montre sur la figure 5 les profils de $Q_c^{2cm.s^{-1}}$ obtenus pour une hauteur de la VCC variable de $H = 1.3$ à 10.4 m alors que le rayon est gardé constant ($R = 2$ m), ainsi que dans le cas de dimensions extrêmes de la VCC avec $H = 10.4$ et $R = 4$ m. Ici encore, il ne se dégage pas à partir de ces résultats d'effets notables de la dimension de la VCC sur $Q_c^{2cm.s^{-1}}$ (du moins pour les jeux de valeurs testées). L'étude paramétrique est donc à poursuivre afin d'identifier les limites du modèle numérique vis-à-vis de taille du domaine représenté.

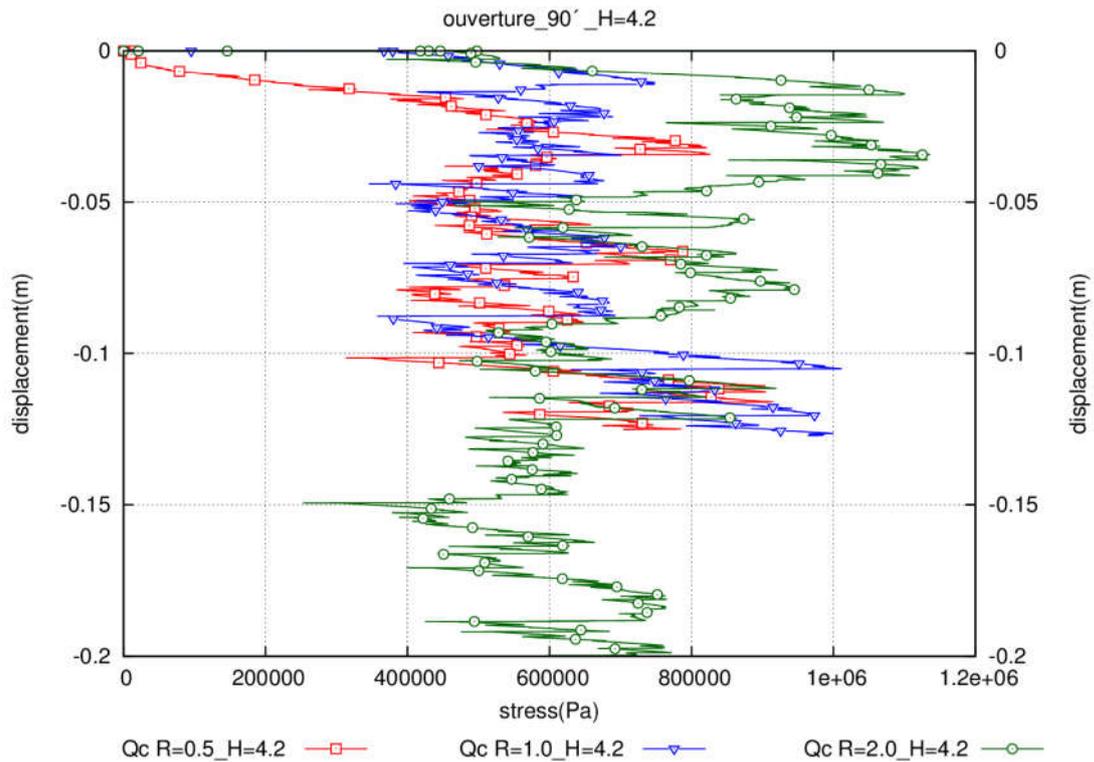


Figure 4. Profils de résistances de pointe $Q_c^{2cm.s^{-1}}$ simulés pour une hauteur de la VCC fixée à $H = 4.2$ m un rayon croissant de $R = 0.5$ à 2.0 m

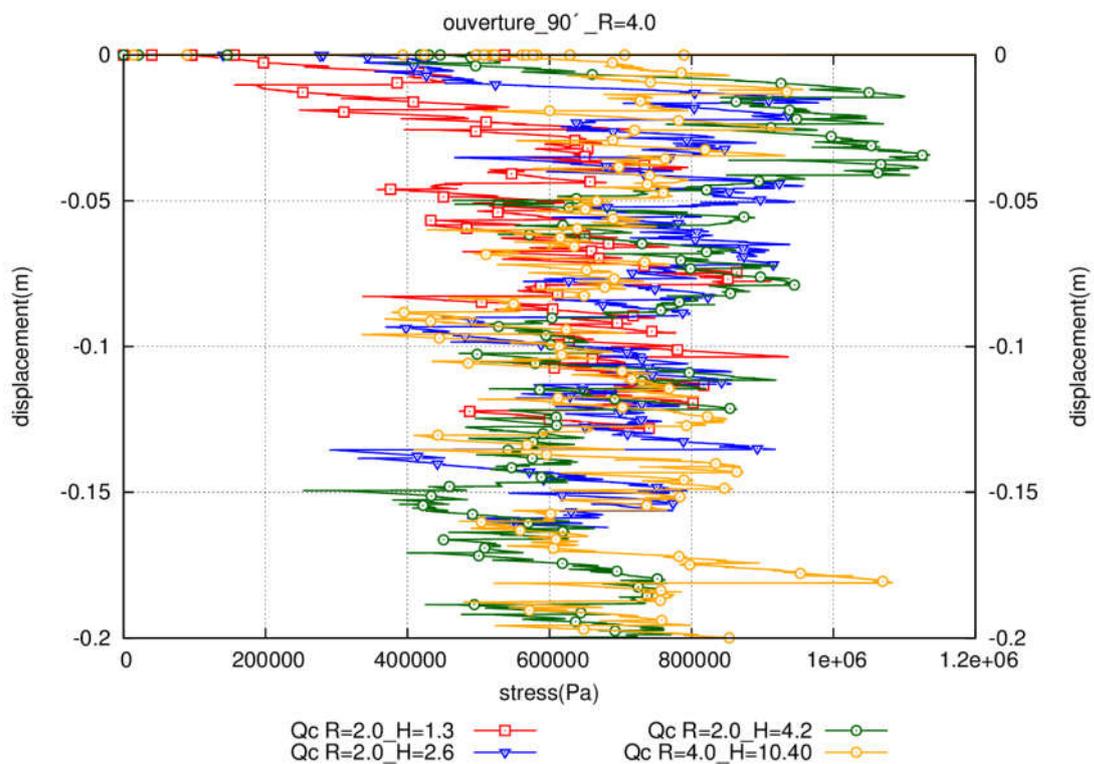


Figure 5. Profils de résistance de pointe $Q_c^{2cm.s^{-1}}$ simulés pour un rayon de VCC fixé à $R = 2$ m et une hauteur croissante de $H = 1.3$ à 4.2 m ainsi que pour un jeu de dimensions extrêmes : $H = 10.4$ et $R = 4$ m

4. Conclusions et perspectives

Dans cette publication nous avons défini les bases d'un modèle numérique discret destiné à étudier la possibilité d'utiliser le principe de la double mesure de la résistance de pointe au pénétromètre statique pour caractériser la sensibilité à la liquéfaction des sols.

L'étude paramétrique initiée n'a pas permis d'identifier, dans un premier temps, d'effet de la taille du domaine représenté sur la résistance de pointe. Elle est donc à poursuivre. Il sera également nécessaire de caractériser l'influence du rapport entre la taille des grains et de la pointe toujours sur la résistance de pointe simulée.

Une seconde étape, avant de procéder à la simulation d'essais de pénétration avec double mesure en condition saturée (avec couplage fluide-solide), sera de calibrer le modèle numérique sur différents types de comportement de sol caractéristiques (contractant/dilatant, très perméable/peu perméable, ...).

Les données acquises numériquement seront complétées par des essais de laboratoire sur modèle physique et confrontée à des mesures obtenues sur des essais réels in-situ. L'ensemble des données devrait permettre de décrire, caractériser et expliquer des réponses types de sols à des essais de double mesure.

5. Références bibliographiques

- Aboul Hosn R., Sibille L., Benahmed N., Chareyre B. (2016) Discrete numerical modeling of loose soil with spherical particles and interparticle rolling friction, *Soumis à Granular Matter*.
- Butlanska J., Arroyo M., and Gens A. (2010). Size effects on a virtual calibration chamber. *7th European Conference on Numerical Methods in Geotechnical Engineering, NUMGE 2010, Trondheim*, pp. 225–230.
- Catalano, E., Chareyre, B., & Barthélemy, 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.
- DTU 13.2.(1992).AFNOR , fondations profondes pour le batiment, pp.66.
- Gibbs H.J., Bara J.P. (1962). Predicting surface subsidence from basic soil tests. *ASTM STP 322*, pp. 277-283.
- Mayne P .(2007). In-situ test calibrations for evaluating soil parameters. Characterisation and engineering properties of natural soils, 3. *London: Taylor & Francis*; p. 1601–52.
- Salgado R., Mitchell J. K., Jamiolkowski M. (1998), Calibration chamber size effects on penetration resistance in sand. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 124(9):878-888.
- Šmilauer V. et al. (2015), Using and programming. In Yade Documentation 2nd ed. *The Yade Project* , DOI 10.5281/zenodo.34043 (<http://yade-dem.org/doc/>)