

MODELISATION DU BATTAGE DYNAMIQUE D'UN PENETROMETRE EN DIFFERENCES FINIES

FINITE DIFFERENCE MODELING OF DYNAMIQUE PENETROMETER DRIVING

Caroline FORESTTI OLIVEIRA^{1,2}, Pierre BREUL¹, Bastien CHEVALIER¹, Miguel Angel BENZ-NAVARRETE², Quoc-Anh TRAN², Claude BACCONNET¹

¹Institut Pascal, Université Clermont-Auvergne, Clermont-Ferrand, France

²Sol Solution, Service Recherche et Innovation, Riom, France

RÉSUMÉ – On simule le battage d'un pénétromètre dans un sol homogène avec la méthode aux différences finies. L'objectif est de mettre au point un modèle simple mais qualitativement représentatif de cet l'essai Panda 3®. On analyse l'influence des paramètres effort-déformation du modèle rhéologique choisi dans les courbes charge-enfoncement de la réponse du modèle.

ABSTRACT – Penetrometer dynamic driving is simulated in a homogeneous soil with the finite difference method. The objective is to develop a simple but qualitatively representative the Panda 3® test. Additionally, the influence of stress-strain parameters of constitutive model applied to soil on numerical load-settlement curves is analyzed.

1. Introduction

La compréhension du phénomène de battage dynamique dans les sols reste un des problèmes les plus délicats en géotechnique et sa modélisation reste complexe. Il s'agit d'un problème fortement non-linéaire et qui entraîne des déformations très importantes (Nazem et al., 2012). On trouve dans la littérature des modèles numériques simulant l'essai de pénétration dynamique par le biais des méthodes aux éléments discrètes (DEM) (Zhang et al., 2019 ; Tran et al. 2017 ; Escobar 2015 ; Benz-Navarrete, 2009, Zhou, 1997). Les modèles dits continus (e.g. méthode des éléments finis, méthode des différences finies) appliqués à la pénétration dynamique sont moins fréquents et pour la plupart ceux-ci s'intéressent au battage des pieux (Nath, 1990 ; Fakharian et al., 2014 ; Chatterjee et al., 2015) et non à l'essai pénétrométrique.

L'essai au pénétromètre dynamique Panda 3® consiste à enfoncer par battage une tige munie d'une pointe conique dans le sol. Pour chaque impact, on mesure et découple les ondes se propageant dans les barres pendant l'enfoncement de la pointe. Cela permet d'obtenir une courbe de chargement dynamique en pointe σ_p - s_p (contrainte en pointe σ_p en fonction de l'enfoncement en pointe s_p). Celle-ci est qualitativement comparable à celle obtenue par les essais de chargement de pointe (*Cone Loading Test*) (Gourvès et Mirat, 1977 ; Arbaoui, 2003 ; Reiffsteck et al., 2009). Au-delà de la résistance de pointe, l'exploitation de la courbe σ_p - s_p par différentes approches permet de caractériser le sol ausculté à partir d'un certain nombre de paramètres.

On souhaite mettre au point un modèle numérique en différences finies qualitativement et quantitativement représentatif de l'essai Panda 3® qui pourrait nous aider à mieux comprendre cet essai et mettre au point d'un modèle d'interprétation de la courbe σ_p - s_p .

2. Principe de l'essai : obtention et exploitation de la courbe σ_p - s_p

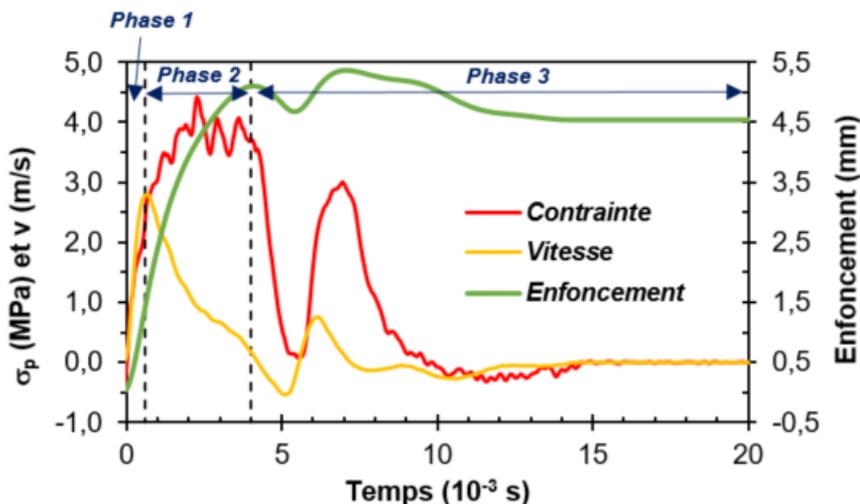
Le pénétromètre est composé d'un train de tige de 14 mm de diamètre, d'une pointe conique de 22,5 mm et d'une tête de battage instrumentée. Il est enfoncé à l'aide d'un marteau (Figure 2a). Au cours du battage, les mesures de déformation $\varepsilon(x,t)$ et d'accélération $a(x,t)$ sont enregistrés. L'exploitation consiste à découpler les ondes de contraintes descendantes $\varepsilon_d(t)$ et remontantes $\varepsilon_r(t)$ le long du train de tiges suite à l'impact (Casem et al., 2003) selon l'Equation 1.

$$\varepsilon_d(t) = \frac{1}{2} \left[\varepsilon_A(t) - \frac{v_A(t)}{c_t} \right] \text{ et } \varepsilon_r(t) = \frac{1}{2} \left[\varepsilon_A(t) + \frac{v_A(t)}{c_t} \right] \quad (1)$$

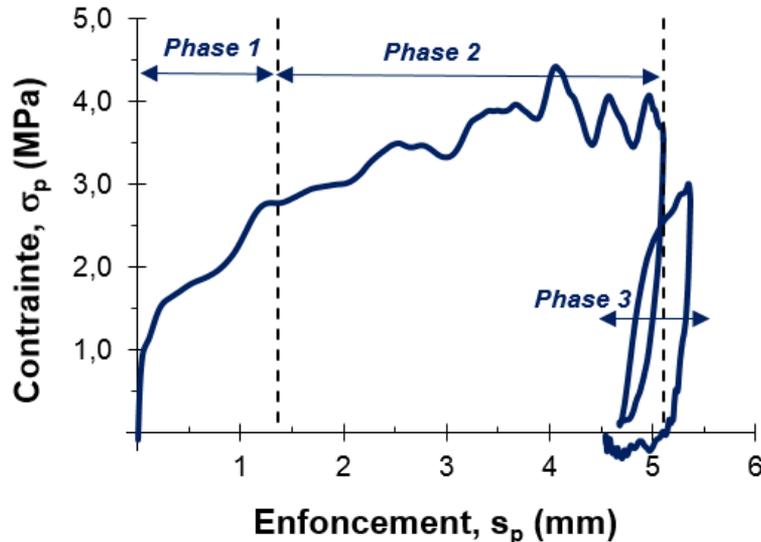
Avec c_t la célérité d'ondes dans la tige, $\varepsilon_A(t)$ et $v_A(t)$ les enregistrements respectivement de déformation et de vitesse réalisés en un point A au voisinage de la tête. Par la suite, en supposant les efforts externes nuls le long des tiges, la force $F(t)$ et la vitesse $v(t)$ peuvent être calculées pour tout point situé en dessous du point de mesure, et donc notamment dans la pointe (Karlsson et al., 1989). En calculant la force $F_p(t)$ et la vitesse $v_p(t)$ au niveau de la pointe et en intégrant la vitesse $v_p(t)$, on obtient la courbe charge enfoncement (σ_p - s_p).

La Figure 1a présente les signaux de force, de vitesse et d'enfoncement en pointe suite à l'impact et la courbe σ_p - s_p déduite. Celle-ci est composée de trois phases bien différentes :

- Phase I (accélération) : on observe une augmentation brusque des contraintes et des vitesses. Cette phase se termine lorsque la vitesse particulière atteint sa valeur maximale et l'accélération change de signal ;
- Phase II (décélération) : la résistance du sol réduit la vitesse particulière. La vitesse diminue jusqu'à zéro et la pointe arrête d'avancer. On observe une variation de la résistance de pointe qui atteint sa valeur maximale ;
- Phase III (déchargement-rechargement) : composée d'un ou plusieurs cycles de décharge et recharge. Pendant cette phase, le pénétromètre vibre avec le sol jusqu'à que la pointe se stabilise à sa position finale.



(a)



(b)

Figure 1. Exemple des résultats expérimentaux pour un impact : (a) suivi de force, de vitesse et d'enfoncement en pointe et (b) courbe σ_p - s_p déduite

3. Modèle numérique du pénétromètre aux différences finies

Pour modéliser l'essai, on utilise le logiciel FLAC^{3D} (*Fast Lagrangian Analysis of Continua in 3 Dimensions*) (Itasca, 2020). Il s'agit d'un code de calcul aux différences finies explicite permettant d'étudier le comportement mécanique d'un milieu continu en trois dimensions. A la différence de la méthode aux éléments finis, la méthode explicite intégrée ne requiert pas la création d'une matrice de rigidité. Par conséquent, le logiciel permet de suivre un chemin contrainte-déformation non-linéaire ainsi que de modéliser des grandes déformations sans une augmentation significative du temps de calcul (Itasca, 2020).

3.1. Description du modèle

On simule le battage à la demie hauteur d'un massif de sol homogène et isotrope. Considérant la symétrie du problème et comme le sol est considéré homogène et isotrope, on fait le choix de ne modéliser qu'un quart du problème (Figure 2b). Pour des raisons de simplification numérique, le pénétromètre est modélisé avec une section carrée pour la tige et la pointe. Toutefois, on sait que cette simplification influence de manière non négligeable les déformations entraînées au niveau de la pointe, le tassement du sol étant, entre autres, fonction de la forme de l'objet enfoncé (Mayne et al., 1999).

La géométrie est composée par un parallélépipède représentant le massif de sol et le pénétromètre est modélisé comme deux parallélépipèdes collés. Un parallélépipède représentant la pointe et l'autre parallélépipède la tige. La taille des éléments du maillage est de 12,5 mm afin de permettre l'insertion de la pointe. Le maillage est homogène et composé par des éléments parallélépipèdes ici nommés zones.

Une cavité est modélisée dans le sol représentant le forage laissé derrière la pointe. Les parois de cette cavité sont fixes donc il n'y a pas de frottement latéral entre le pénétromètre et le sol le long de la tige. Le pénétromètre est installé à la profondeur de 400 mm. Au niveau de la pointe, des éléments d'interfaces sont générés sur la surface extérieure de la pointe afin de modéliser le contact entre la pointe et le sol. Cette interface permet le glissement des parois de la pointe par rapport au sol et la transmission du choc.

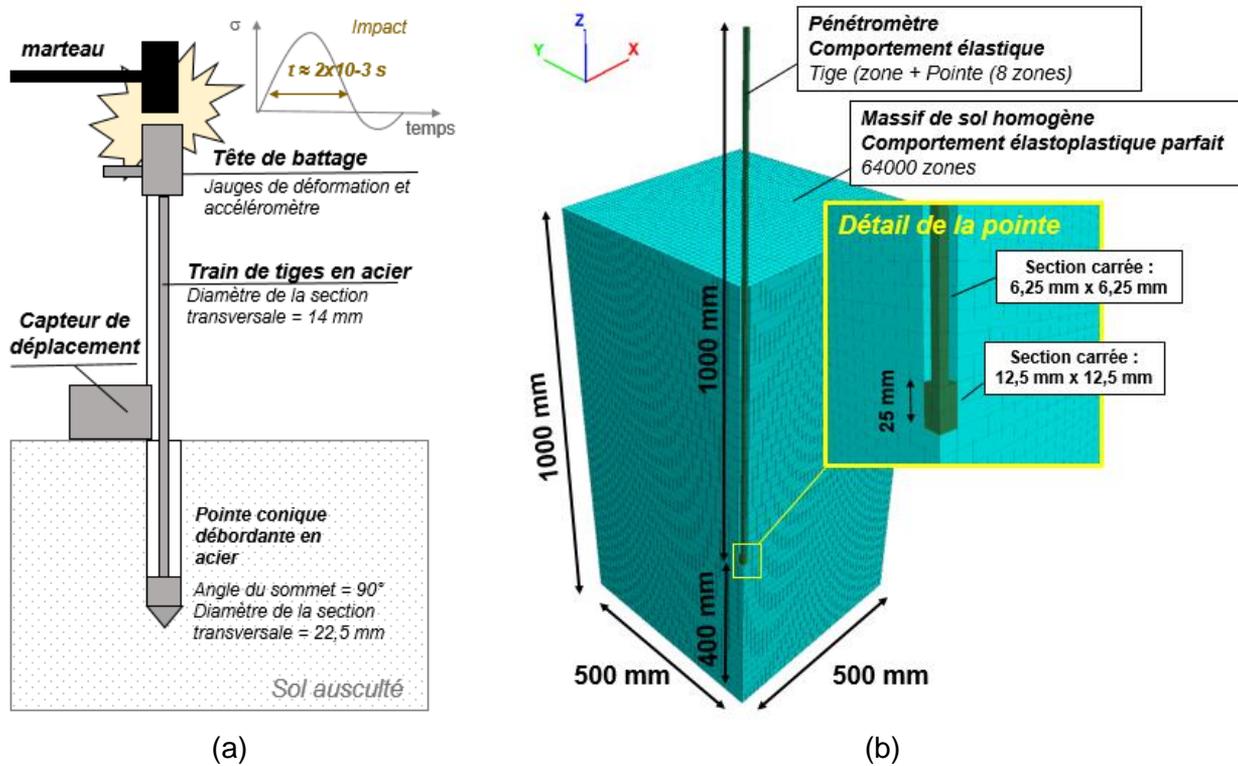


Figure 2. (a) Schéma illustrant la géométrie du problème et (b) géométrie adoptée dans le modèle numérique

Les conditions aux limites imposées au modèle sont : (a) les déplacements perpendiculaires aux frontières extérieures du modèle sont empêchés et (b) les déplacements perpendiculaires aux parois latérales de la cavité sont empêchés.

Le pénétromètre est associé à un comportement élastique parfait suivant la loi de Hooke, dont les paramètres sont ceux de l'acier. Le sol est représenté par une loi de comportement élastoplastique parfaite, de module E et de coefficient de poisson ν avec un critère de rupture Mohr-Coulomb, de cohésion c , d'angle de frottement ϕ et d'angle de dilatance ψ . Bien que simple, cette loi de comportement reste la plus courante dans la pratique et nous permet d'avoir une première évaluation de l'approche proposée.

L'onde de contrainte engendrée par l'impact se propage le long de la tige et se dissipe graduellement au sein du massif. Il est important d'empêcher la possible réflexion des ondes dans les parois frontières du modèle qui pourraient perturber les résultats. Pour ce faire, on introduit des frontières dites « absorbantes ». Celles-ci fonctionnent comme des amortisseurs dans les deux directions perpendiculaires des nœuds des bords. Ces amortisseurs apportent des forces normales (t_n) et transversales (t_s) appliquées aux nœuds des éléments des bords afin d'empêcher la réflexion des ondes. Ces forces sont fonction des vitesses normales (v_n), et transversales (v_s), de la masse volumique ρ et de la célérité d'onde de compression (c_p) et cisaillement (c_s) des matériaux où l'onde se propage (Equations 2 et 3).

$$t_n = -\rho c_p v_n \quad (2)$$

$$t_s = -\rho c_s v_s \quad (3)$$

Les éléments d'interface sont caractérisés par des raideurs normale et tangentielle et des paramètres de rupture décrivant un critère de Mohr-Coulomb. Suite à différents tests, les raideurs de l'interface ont été choisies de façon à minimiser leur influence dans les

résultats. Celles-ci sont fonction du module d'élasticité du sol et de la taille des éléments de maillage. Les paramètres de rupture de l'interface sont les mêmes que ceux du sol. De manière similaire à certains travaux rapportés dans la littérature (Fakharian, K. et al., 2014 ; Pinto et al., 2008), l'impact est simulé comme une force verticale appliquée au niveau supérieur de la barre. Celle-ci est caractérisée par une fréquence de 500 Hz et une amplitude équivalente 1 kN (Figure 2b). La sollicitation est qualitativement comparable à la contrainte observée expérimentalement. Dans le modèle, la sollicitation est appliquée pour l'intervalle de temps $[0 ; 2 \times 10^{-3} \text{ s}]$. Les étapes de la simulation sont les suivantes :

- création du massif de sol et stabilisation sous son poids propre ;
- création du pénétromètre à la profondeur de l'essai et stabilisation ;
- les déplacements sont remis à zéro ;
- application d'une force verticale simulant l'impact à l'extrémité supérieure de la tige (décrit au-dessus) ;
- enregistrement des forces, des vitesses et des déplacements verticaux en pointe pour l'intervalle correspondant à 20 millisecondes suite à l'application de la force. Le pas de temps de calcul est de 10^{-8} s . Le temps total nécessaire pour chaque calcul est de l'ordre de 2 heures.

3.2. Interaction sol-pointe et obtention de la courbe σ_p-s_p

Dans un premier temps, on souhaite vérifier la propagation de l'onde de contrainte le long de la tige et la transmission/réflexion au niveau de la pointe. Afin de faciliter l'analyse, on utilise un train de tige assez long dans le but d'empêcher le chevauchement des ondes descendantes et remontantes. Ensuite, l'évolution de la force et de la vitesse après l'impact est suivie en trois points du pénétromètre : à l'extrémité supérieure de la tige, à la demie hauteur et au niveau de l'interface sol-pointe. La Figure 3(a) présente la force F et le produit Zv de la vitesse d'onde v et de l'impédance mécanique Z en fonction du temps. L'impédance est définie par $Z=EA/c$, avec E le module, A la section et c la célérité d'ondes dans l'acier.

On constate une bonne correspondance entre ces deux signaux F et Zv pour un intervalle de temps plus court que le temps de retour de l'onde $2L/c$. A l'interface sol-pointe, le signal de force est inversé et on observe la superposition de l'onde de compression incidente et de l'onde de traction réfléchi. Si l'extrémité de la barre était libre, la force résultante au niveau de la pointe serait nulle. Dans notre cas, la force observée en pointe correspond à réponse du sol c'est-à-dire à la force transmise. A partir de la force transmise et connaissant la section de la pointe, on peut déterminer la contrainte au niveau de la pointe σ_p . En suivant également l'enfoncement de la pointe s_p pour le même intervalle de temps, on obtient la courbe σ_p-s_p (Figure 3b).

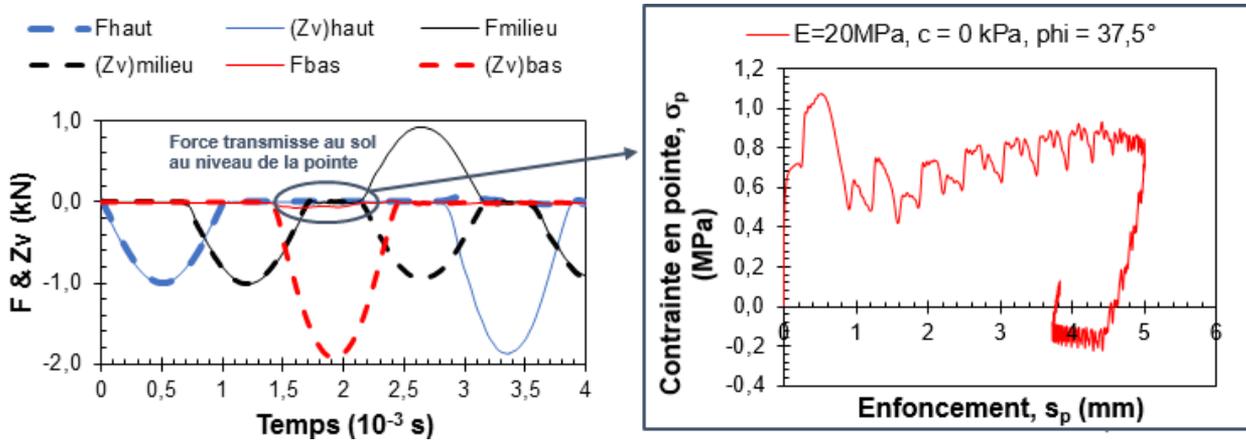


Figure 3. A gauche les signaux de force et produit de la vitesse et de l'impédance mesurés à l'extrémité supérieure, à la demie hauteur et au niveau de l'interface sol-pointe et à droite la courbe σ_p - s_p numérique obtenue en pointe pour un matériau purement frottant.

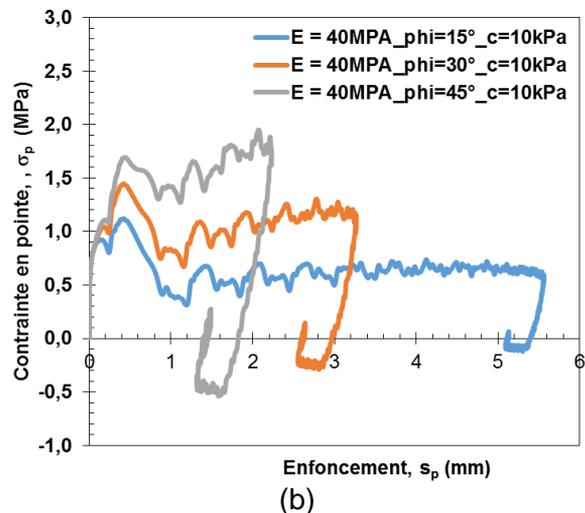
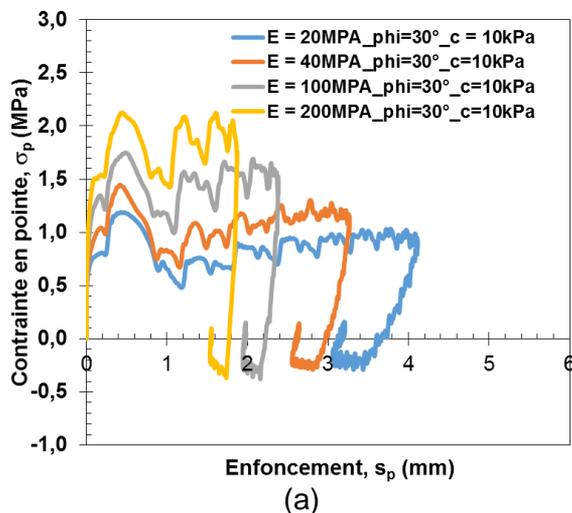
On constate que la courbe σ_p - s_p numérique est conforme aux différentes phases décrites dans la Section 2 et que l'enfoncement et les contraintes observés sont du même ordre de grandeur que les résultats expérimentaux pour un matériau purement frottant (Figure 1b).

3.3. Influence des paramètres rhéologiques dans les courbes

On souhaite vérifier la sensibilité du modèle numérique aux paramètres rhéologiques des lois de comportement choisies. Pour ce faire, on teste différents jeux de paramètres pour des matériaux non-dilatants ($\psi = 0$) ayant une masse volumique fixe $\gamma_d = 1800 \text{ kg/m}^3$. On ne tient pas compte de la présence d'eau dans le modèle. On fait varier un paramètre à la fois tandis que les autres restent fixes. Les cas étudiés sont présentés dans le Tableau 1.

Tableau 1 – Paramètres du pénétromètre et du sol

Matériau	E (MPa)	ν (-)	c (kPa)	ϕ (°)
Acier (penetromètre)	210 000	0,3	-	-
Milieu ausculté	20 / 40 / 100 / 200	0,4	10	30
	40	0,4	10	15 / 30 / 45
	40	0,4	10 / 50 / 100	30



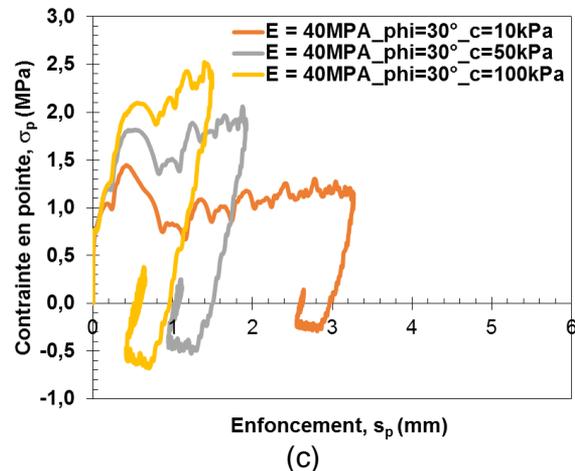


Figure 4 – Courbes de chargement numériques obtenues en étudiant la variation : (a) du module d'élasticité, (b) de l'angle de frottement et (c) de la cohésion du milieu ausculté

La Figure 4 présente les courbes σ_p-s_p obtenues pour les différents cas étudiés. Sur Figure 4a, on constate que la pente de la partie en décharge est sensible au module d'élasticité introduit. Concernant les paramètres de rupture (Figure 4b et 4c), on observe une augmentation de la résistance en pointe avec l'augmentation de c et de ϕ , tandis que la pente en phase de décharge reste constante (le module E est constant). Or, on constate une augmentation de la pente du palier plastique avec l'augmentation de c et de ϕ . Ces constatations sont confirmées les résultats expérimentaux d'Escobar (2015) et numériques de Zhou (1997). Ces auteurs ont rapporté le fait que la pente de la zone plastique est fortement liée à l'angle de frottement du sol mais ils n'ont pas évalué sa sensibilité à la cohésion.

4. Conclusion et perspectives

A l'aide d'un modèle numérique aux différences finies, on a simulé le battage d'un pénétromètre au sein d'un matériau homogène. L'impact a été simulé par l'application d'une contrainte sinusoïdale à l'extrémité de la tige du pénétromètre. Le massif représentant le sol a été modélisé comme un matériau élastoplastique parfait associé à un critère de rupture de Mohr-Coulomb. Ce travail a permis de :

- démontrer qu'on est capable de reproduire les principaux phénomènes mis en jeu lors de l'essai de pénétration dynamique : propagation de l'onde de contrainte à travers la tige et sa réflexion et transmission à l'interface sol/pointe. Les courbes charge-enfoncement numériques sont qualitativement comparables aux résultats expérimentaux ;
- mettre en évidence la sensibilité de la courbe charge-enfoncement aux paramètres rhéologiques du sol modélisé (*i.e.* E , ϕ et c).

L'étude montre l'intérêt de l'approche numérique aux différences finies afin de mieux comprendre l'essai et d'aider la mise au point d'un modèle d'interaction adapté à cet essai permettant d'exploiter les courbes σ_p-s_p . Pour ce faire, même si qualitativement les courbes sont représentatives de l'essai, il s'avère nécessaire de les valider vis-à-vis des résultats expérimentaux. Cela requiert de prendre en compte certains aspects importants : (a) les différents types d'amortissements agissants, (b) la non-linéarité du comportement mécanique du sol et (c) l'amélioration de la géométrie du modèle.

5. Références bibliographiques

- Arbaoui, H. (2003). Mesure de la déformabilité des sols en place avec un Pénétrromètre. Thèse de l'Université Blaise Pascal. Clermont Ferrand, France.
- Benz-Navarrete, M. A. (2009). Mesures dynamiques lors du battage du pénétromètre PANDA 2®. Thèse de l'Université Blaise Pascal. Clermont Ferrand, France.
- Casem, D., Fourney, W. et Chang, P. (2003), Wave separation in viscoelastic pressure bars using single-point measurements of strain and velocity, *Polymer testing* 22, pp. 155-164.
- Chatterjee, K., Choudhury, D., Rao, V. D., Mukherjee, S. P. (2015). Dynamic analyses and field observations on piles in Kolkata city.
- Escobar, E. (2015). Mise au point et exploitation d'une nouvelle technique pour la reconnaissance des sols: le PANDA 3. Clermont Ferrand, France: Thèse de l'Université Blaise Pascal - Clermont-Ferrand II.
- Fakharian, K., Feizee Masouleh, S. and Mohammadlou, A. S. (2014). Comparison of end-of-drive and restrike signal matching analysis for a real case using continuum numerical modelling, *Soils and Foundations*. Elsevier, 54(2), pp. 155–167. doi: 10.1016/j.sandf.2014.02.007.
- Gourvès, R. ; Mirat J. M. (1979). Brevet n° 77 19351. Institut National de la Propriété Industrielle, Paris.
- Itasca Consulting Group, FLAC^{3D}. (2020). Fast Lagrangian Analysis of Continua in 3-dimensions, version 6.0 Manual. Minnesota, US.
- Pinto, P. L., J. C. Grazina, and J. C. Lourenço. (2008). Evaluation of 1D and 2D numerical modelling techniques of dynamic pile testing. Proc. of the 8th Int. Conf., On Application of Stress Wave Theory to Piles.
- Karlsson L.G., Lundberg B., Sundin K.G. (1989). Experimental study of a percussive process for rock fragmentation, *Int J Rock Mech Min Sci Geomech*, pp.45-50.
- Mayne, P. W. ; H. G. Poulos. (1999). Approximate displacement influence factors for elastic shallow foundations. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 125.6. pp 453-460.
- Nath, B. (1990). A continuum method of pile driving analysis: Comparison with the wave equation method. *Computers and Geotechnics*, 10(4), 265-285.
- Reiffsteck, P., Thorel, L., Bacconnet, C., & Gourves, R. (2009). Measurements of soil deformation by means of cone penetrometer. *Soils and foundations*, 49(3), pp. 397-408.
- Tran, Q. A., Chevalier, B., Benz, M., Breul, P., & Gourves, R. (2017). Modeling of light dynamic cone penetration test–Panda 3® in granular material by using 3D Discrete element method. In *EPJ Web of Conferences* (Vol. 140, p. 16003). EDP Sciences.
- Zhang, N., Arroyo, M., Ciantia, M. O., Gens, A., Butlanska, J. (2019). Standard penetration testing in a virtual calibration chamber. *Computers and Geotechnics*, 111, 277-289.
- Zhou, Shuhua. (1997). "Caractérisation des sols de surface à l'aide du pénétromètre dynamique léger à énergie variable type PANDA." Thèse de l'Université Blaise Pascal - Clermont-Ferrand II.