

EVALUATION DES PERFORMANCES D'UN PENETROMETRE DYNAMIQUE LEGER DANS DES MASSIFS DE SABLE EN CHAMBRE D'ETALONNAGE

EVALUATION OF THE PERFORMANCE OF A LIGHT DYNAMIC PENETROMETER IN SAND SPECIMEN IN A CALIBRATION CHAMBERS

Sebastian López Retamales¹, Jean-Claude Dupla², Jean Canou³, Miguel Benz⁴

¹ Ecole des Ponts ParisTech, Laboratoire NAVIER, France

² Laboratoire Navier – IFSTTAR, CNRS : UMR8205, Ecole des Ponts ParisTech (ENPC), Université Paris Est (UPE) – France

³ Laboratoire Navier (NAVIER) – IFSTTAR, CNRS : UMR8205, Ecole des Ponts ParisTech (ENPC), Université Paris Est (UPE), France

⁴ Sol Solution – Bureau d'études Géotechniques et Géophysiques – Riom, France

RÉSUMÉ – En raison de la difficulté de prélèvement d'échantillons non remaniés de sable, la possibilité d'évaluer directement sur site, à partir d'essais in situ, des paramètres de comportement contrainte-déformation pour les sables constitue un enjeu important en géotechnique. Récemment, un nouveau type d'essai au pénétromètre dynamique léger, à énergie variable, associé à une méthode d'analyse dynamique spécifique, a été développé. Le dispositif est entièrement instrumenté et le principe de base est d'analyser le phénomène de propagation d'ondes dans les tiges au cours de l'impact en vue d'obtenir, pour chaque impact, la courbe de chargement force-déplacement de la pointe et d'en tirer des paramètres élémentaires du sol. Dans ce contexte, un programme expérimental a été réalisé à l'aide de ce dispositif évalué en chambre d'étalonnage sur un sable de référence, le sable de Fontainebleau NE34. On a, en particulier, étudié l'influence de paramètres tels que l'état de densité du sable, l'état de contraintes appliqué au massif et l'état du sable (sec ou saturé) sur les résultats obtenus à l'aide de ce dispositif. Sur la base de l'analyse de ces résultats, on donne quelques pistes de réflexion concernant l'utilisation de ce dispositif pour l'évaluation du risque de liquéfaction des sables.

ABSTRACT – Due to the difficulty of collecting undisturbed sand samples, the possibility of directly evaluating the stress-strain behavior parameters of sands in situ is an important issue in geotechnical engineering. Recently, a new type of lightweight dynamic penetrometer test, with variable energy, associated with a specific dynamic analysis method has been developed. The device is fully instrumented and the basic principle is to analyze the phenomenon of wave propagation in the rods during impact in order to obtain, for each impact, the force-displacement load curve of the tip and to derive the elementary parameters of the soil. In this context, an experimental program was carried out with this device, evaluated in a calibration chamber on a reference sand, the Fontainebleau NE34 sand. In particular, the influence of parameters such as the state of sand density, the state of stress applied to the bed and the state of the sand (dry or saturated) on the results obtained with this device was studied. From the analysis of these results, some reflections on the use of this device for the evaluation of the liquefaction risk of sands are presented.

1 Introduction

Les équipements de pénétration permettent une évaluation rapide et économique de la réponse du sol à la pénétration par une pointe conique ou un échantillonneur activé par une énergie constante ou dynamique. Cependant, l'effet de l'état du sol et les conditions

de compactage du sol sont complexes à évaluer avec les méthodes conventionnelles actuellement utilisées.

L'évaluation des résultats de ces essais est généralement basée sur l'expérience antérieure et les essais en laboratoire, ces derniers étant complexes en raison de la difficulté de reproduire les conditions du sol. En revanche, les méthodes d'évaluation des résultats basés sur les taux de pénétration sont limitées à un seul paramètre et à l'application de facteurs de correction généralisés..

Le but de cet article est de présenter les résultats de l'analyse comportementale d'un sol granulaire, soumis à un essai dynamique avec un pénétromètre dynamique léger à énergie variable (PANDA 3) (AFNOR, 2000; M. Benz, 2009). L'analyse des résultats est effectuée en appliquant l'équation des ondes à l'aide des enregistrements de force et de vitesse (M. Benz, 2009; M. A. Benz et al., 2013; Escobar et al., 2016; Escobar Valencia, 2015; López et al., 2018, 2019; Navarrete et al., 2018). Les enregistrements sont obtenus à partir d'essais réalisés sur des spécimens reconstitués à différents niveaux d'indice de densité et soumis à différents niveaux de surcharge effective verticale, qu'il est possible de contrôler dans une chambre d'étalonnage K0.

Les résultats montrent que l'essai est sensible à l'indice de densité, aux contraintes effectives de surcharge et qu'en analysant la courbe charge-déplacement, il est possible de décrire un phénomène de liquéfaction locale.

Cet article présente l'équipement utilisé pour les essais de pénétration, la chambre d'étalonnage utilisée pour la reconstitution des spécimens, le programme expérimental réalisé, les résultats obtenus et quelques conclusions tirées de ceux-ci.

2 Campagne expérimentale

2.1 Dynamic Penetrometer Test (DPT)

Un pénétromètre dynamique léger à énergie variable (PANDA 3) a été utilisé pour évaluer la résistance à la pénétration dynamique. (M. Benz, 2009; M. A. Benz et al., 2013; Escobar et al., 2016; Escobar Valencia, 2015; López et al., 2018, 2019; Navarrete et al., 2018). L'équipement de pénétration est instrumenté avec des accéléromètres et des capteurs de déformation. Cette fonction permet d'appliquer des techniques d'analyse sur les signaux pour évaluer la réponse du sol, en se basant sur l'analyse de l'équation des ondes. (M. Benz, 2009).

L'équipement consiste en une pointe conique de 4 cm² qui est vissée à des barres de 14 mm de diamètre. Les barres sont vissées à une tête de taraudage, dans laquelle sont installés l'accéléromètre et le capteur de déformation.

Pour obtenir les signaux de résistance et de déplacement à l'interface cône-sol, sur la base de l'analyse des ondes, on a utilisé la méthode proposée par Benz (2009), qui, par le biais d'un processus itératif de reconstruction du signal de force et de la vitesse des ondes, permet d'obtenir la résistance dynamique à l'interface sol-pointe.

La méthode de reconstruction consiste à enregistrer les signaux de force et de vitesse (en intégrant le signal d'accélération) (figure 2(a)). Ensuite, si les caractéristiques du pénétromètre sont connues, il est possible d'appliquer une méthode de découplage des ondes incidentes et réfléchies pour reconstruire les signaux. (Casem et al., 2003) (Figure 2(b)).

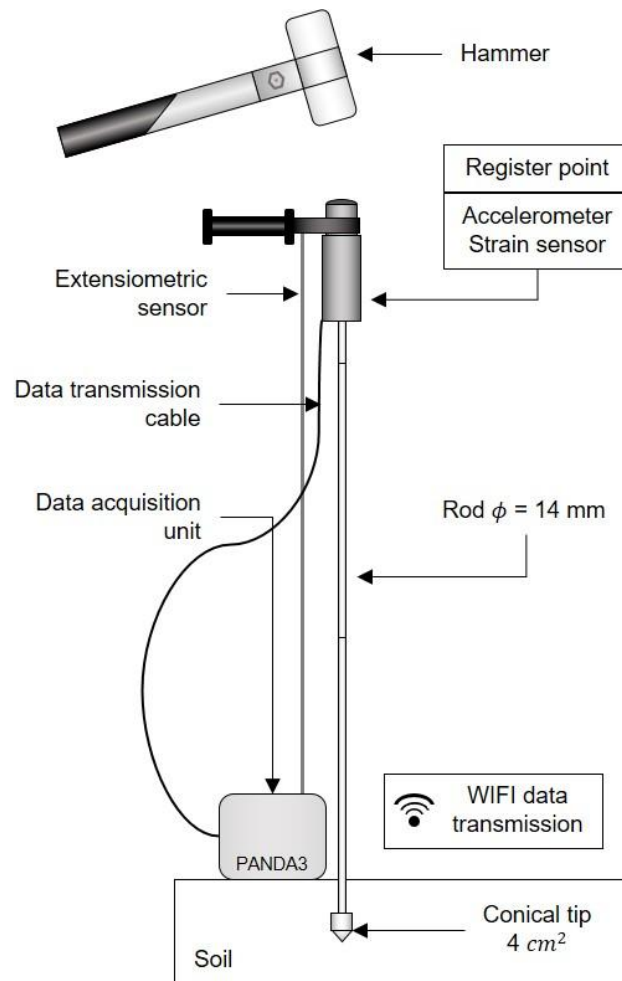


Figure 1- Schéma d'un pénétromètre dynamique PANDA 3®.

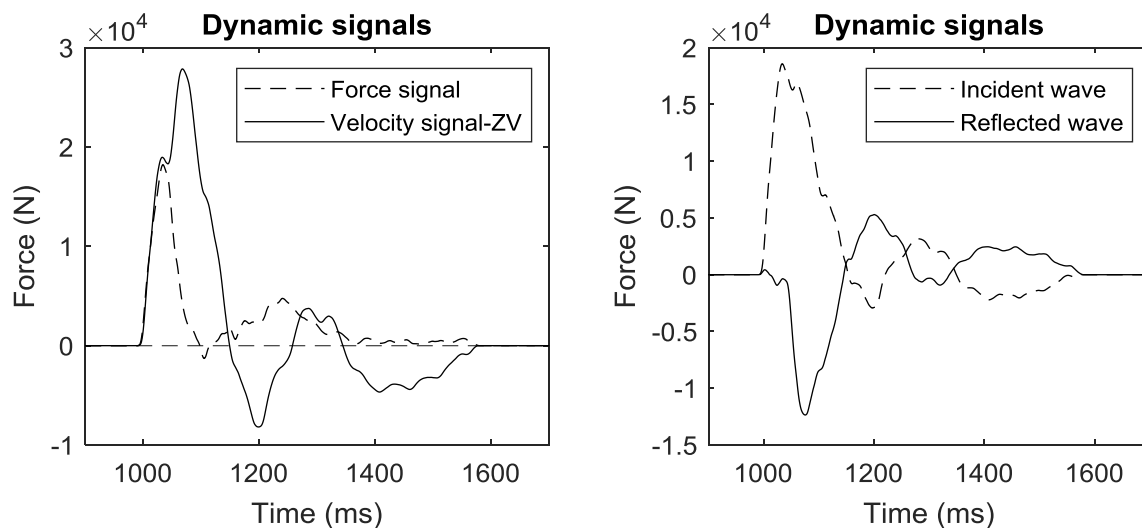


Figure 2- Signaux de force et de vitesse enregistrés au niveau de la tête de frappe (a). Les ondes incidentes et réfléchies sont découplées.

Le signal de force reconstruit à l'interface cône-sol permet d'obtenir la réponse de résistance dynamique du sol, et les déplacements dans le cône peuvent être obtenus en intégrant le signal de vitesse. Ensuite, si le signal de résistance est disponible et que le signal de vitesse est déplacé, il est possible d'obtenir le déplacement dans le cône en

intégrant le signal de vitesse. Ensuite, si le signal de résistance et de déplacement est disponible, il est possible de construire une courbe dynamique charge-déformation.

A partir de l'analyse de la courbe dynamique reconstituée, il est possible d'évaluer les paramètres de résistance, d'énergie élastique et de pénétration, entre autres. Il est également possible d'observer des phénomènes tels que la liquéfaction dans les sols saturés.

2.2 Essais en laboratoire

Une chambre d'étalonnage k_0 a été utilisée pour les essais en laboratoire. La chambre se compose d'une base cylindrique avec un couvercle supérieur et deux cylindres supérieurs supplémentaires qui permettent de placer un échantillon de sol de 730 mm de hauteur et 550 mm de diamètre dans la chambre.

Le système est fermé et fixé avec des tiges filetées qui sont vissées en haut et en bas avec des écrous. Sous le couvercle supérieur et sur le dessus de l'échantillon, un système de pression hydraulique est installé, constitué d'une membrane en caoutchouc ayant la possibilité de se dilater sous l'effet de la pression hydraulique pour exercer une tension de consolidation verticale. Le contrôle de la pression de consolidation verticale est généré par une cellule de charge, comme le montre la Figure 3.

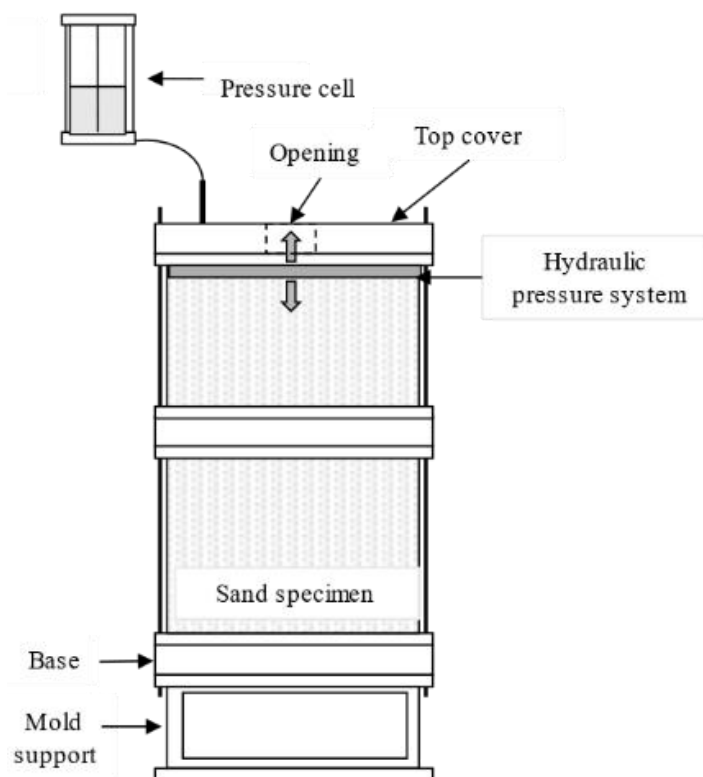


Figure 3- Schéma de la chambre d'étalonnage k_0 .

Pour analyser l'effet de l'état de densité du sol sur la réponse du sol à la pénétration dynamique, des essais ont été réalisés sur des éprouvettes de sable reconstitué de Fontainebleau NE34 à des indices de densité de 0,30, 0,60 et 0,90. Pour évaluer les effets de la pression verticale, une série de charges verticales de 10 kpa à 400 kpa ont été appliquées.

Tabla 1- Configuration de l'essai de pénétration dynamique dans la chambre d'étalonnage k_0.

Nombre de essais	I_d	Contrainte de consolidation verticale (kPa)
essais 1	0.3	10 - 25 - 50 - 75 - 100 – 200 - 300 - 400
essais 2	0.6	
essais 3	0.9	

3 Résultats et discussion

Les figures 1 (a) et (b) présentent les résultats des courbes dynamiques et des signaux d'affleurement reconstitués à l'interface cône-sol pour des impacts sur un spécimen reconstitué de sable NE34 de Fontainebleau à un indice de densité de 0,60 et sous différents niveaux de surcharge.

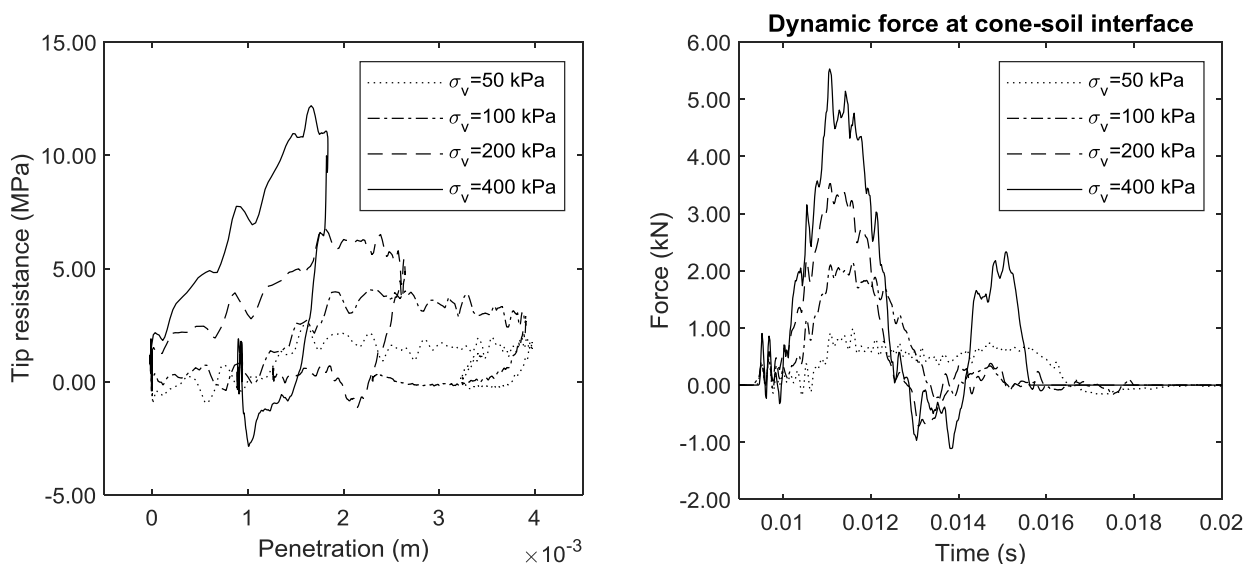


Figure 4- Courbes dynamiques charge-déplacement (a). Signaux de force reconstitués.

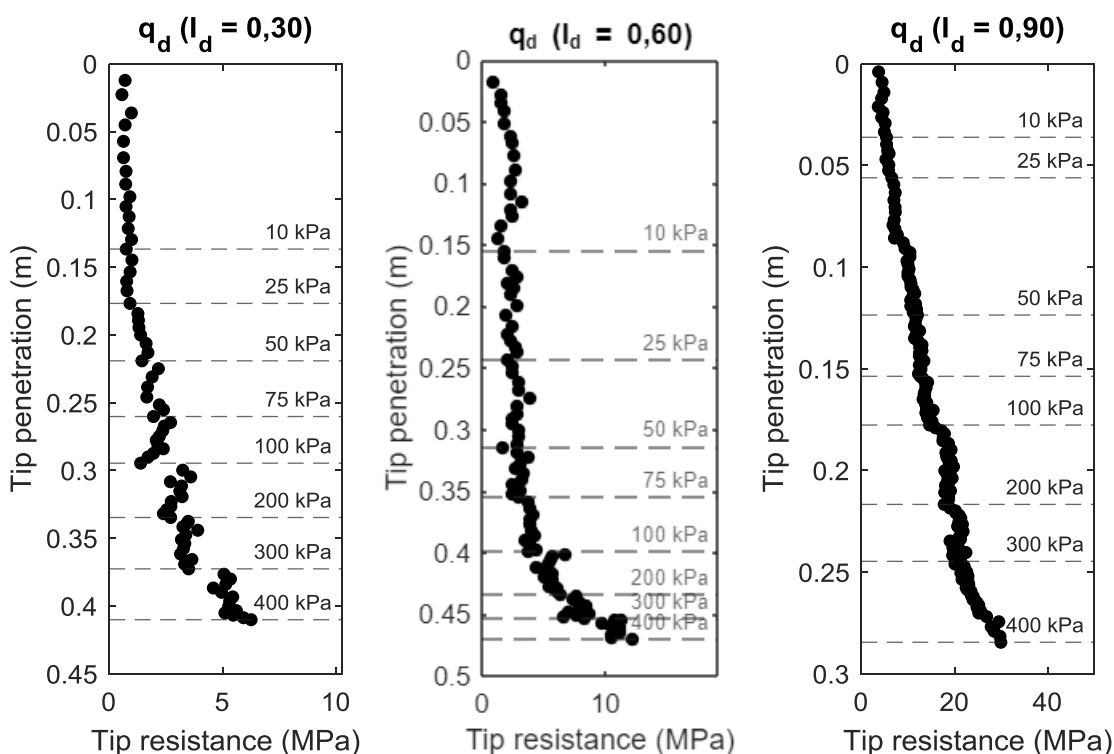
Les courbes dynamiques montrent une augmentation de la résistance maximale de pénétration associée à une augmentation de la surcharge effective, de même, on observe que plus la surcharge effective est faible, plus le niveau de pénétration est élevé sous un niveau de résistance autour de la résistance dynamique maximale.

Dans les signaux de force reconstitués à l'interface cône-sol, des pics de résistance de faible amplitude sont observés au début de l'enregistrement. Ces pics sont liés au bruit produit par les interférences externes liées à l'interaction du pénétromètre avec les éléments environnants, ainsi qu'au rebondissement du front d'onde à l'intérieur de la tête de taraudage du pénétromètre.

Dans tous les dossiers, il est possible d'observer l'apparition de coups de marteau secondaires dus au qutof. Dans le cas des courbes dynamiques, ces pics associés aux coups de marteau secondaires sont perçus comme des cycles de chargement secondaires dans la phase de résistance élastique du sol.

La Figure 5 montre les pénétrogrammes résultant des essais réalisés sur des éprouvettes de sables de Fontainebleau NE34, reconstituées à des indices de densité de 0,30, 0,60 et 0,90, soumises à différents niveaux de surcharge verticale effective.

Les résultats montrent une sensibilité à la fois au niveau de l'indice de densité et à la contrainte verticale effective. Plus le niveau de l'indice de sensibilité est élevé, plus la résistance enregistrée augmente et plus le niveau de surcharge effective est élevé, plus la résistance à la pénétration est élevée.

Figure 5-Penetragrams of tests in K_o calibration chamber

Il est important de noter que les valeurs de résistance ne varient pas sensiblement sous des pressions verticales effectives de surcharge inférieures à 50 kPa dans les échantillons de densité faible à moyenne. Au-dessus de 50 kPa, les valeurs de résistance dynamique montrent une augmentation régulière et progressive, facilement perceptible.

La Figure 6 présente des sections transversales dynamiques charge-déplacement obtenues à partir d'un essai dynamique de battage de pieux sur une éprouvette de sol saturé et d'un autre sur une éprouvette sèche. Les deux spécimens ont été reconstruits avec un indice de densité de 0,30 et les enregistrements ont été obtenus avec le spécimen soumis à une contrainte verticale effective de 100 kPa.

La Figure 6 montre une courbe charge-déplacement obtenue dans un sol sec et une autre dans un spécimen saturé. Les deux spécimens ont été reconstitués à un indice de densité de 0,30 et la charge effective verticale appliquée était de 100 kPa.

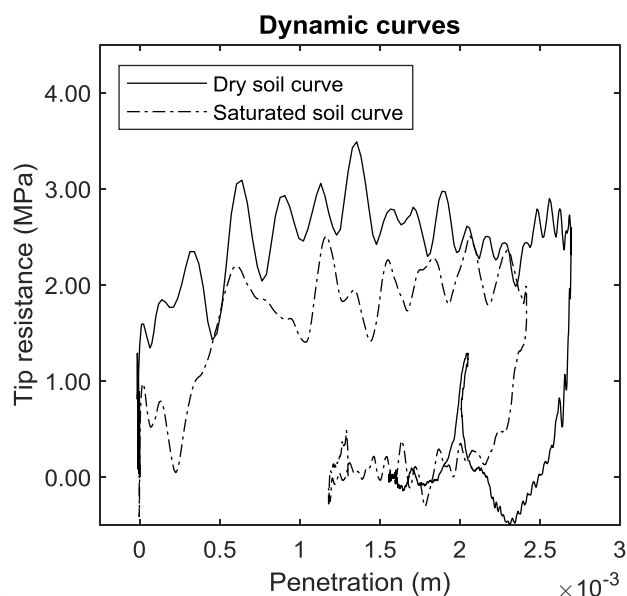


Figure 6 - Courbes dynamiques charge-déplacement pour un sol sec et saturé.

Les résultats montrent que dans les deux cas, il y a une augmentation rapide de la résistance, ce qui démontre une réponse très rigide. Après avoir atteint un point critique, la résistance du sol sec continuera à augmenter jusqu'à atteindre une valeur maximale. Dans le cas de l'éprouvette saturée, l'augmentation rapide est suivie d'une diminution rapide associée à la liquéfaction du sol. Ce phénomène de liquéfaction est produit par l'augmentation rapide des pressions sur la masse du sol, qui est initialement soutenue par le squelette granulaire et ensuite transférée au fluide, cependant, la vitesse de drainage n'est pas suffisante pour détendre la pression interstitielle et le phénomène de liquéfaction est déclenché. (Iskander et al., 2015; Seed & Lundgren, 1954). Après la perte de résistance, il y a une augmentation graduelle de la résistance jusqu'à ce qu'une résistance stable autour d'une valeur à peu près constante soit atteinte, similaire au comportement de l'échantillon sec.

4 Conclusions

Les résultats obtenus à partir des tests effectués permettent de tirer les conclusions suivantes:

- La courbe dynamique charge-déplacement obtenue à partir des essais représente la réponse du sol granulaire sous une charge de pointe conique et est affectée par les paramètres de densité, de contrainte effective verticale et d'état de saturation de l'échantillon.
- L'équipement de pénétration et la méthode d'analyse des résultats basée sur l'analyse de l'équation des ondes sont sensibles à l'indice de densité du sol, cette sensibilité augmentant avec l'augmentation de la contrainte effective verticale.
- Lorsque la contrainte effective verticale augmente, la magnitude de la résistance générée par le sol augmente également, ceci est dû à l'augmentation des contraintes de confinement générées.
- Dans les sols saturés, il est possible d'observer l'apparition du phénomène de liquéfaction, mais la durée du phénomène est limitée. Ce phénomène de liquéfaction est limité au contour immédiat de l'interface sol-cône car les charges à leur amplitude maximale se produisent presque au début du chargement et les chaînes de force ne se développent pas en extension.

5 Références bibliographiques

- Contrôle de la qualité du compactage, 36 (2000).
- Benz, M. (2009). Mesures dynamiques lors du battage du penetrometre panda 2.
- Benz, M. A., Escobar, E., Haddani, Y., Breul, P., & Bacconnet, C. (2013). Charge-Enfoncement Dynamique En Pointe Penetration Curve. Proceedings of the 18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, 499–502.
- Casem, D. T., Fourney, W., & Chang, P. (2003). Wave separation in viscoelastic pressure bars using single- point measurements of strain and velocity. Polymer Testing, 22, 155–164.
- Escobar, E., Navarrete, M. B., Gourvès, R., Breul, P., & Chevalier, B. (2016). Dynamic Characterization of the Supporting Layers in Railway Tracks using the Dynamic Penetrometer Panda 3 ®. International Conference on Transportation Geotechnics (ICTG 2016), 143(Ictg), 1024–1033. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.06.099>

Escobar Valencia, E. J. (2015). Mise au point et exploitation d'une nouvelle technique pour la reconnaissance des sols: le PANDA 3.

Iskander, M., Bless, S., & Omidvar, M. (2015). RAPID PENETRATION INTO GRANULAR MEDIA Visualizing the Fundamental Physics of Rapid Earth Penetration.

López, S., Benz, M., & Moustan, P. (2019). Comparación de los ensayos de penetración de cono dinámico (DCP) y penetrómetro de cono dinámico de energía variable PANDA®. XVI Pan-American Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. <https://doi.org/10.3233/STAL190206>

López, S., Benz, M., Navarro, J., & Zamora, D. (2018). Control geotécnico de obras viales mediante penetrómetro dinámico ligero de energía Variable PANDA 2. X Congreso Chileno de Geotecnia.

Navarrete, B., Moustang, P., Haddani, Y., Breul, P., & Villavicencio A, G. (2018). The PANDA , Variable Energy Lightweight Dynamic Cone Penetrometer: a quick state of art.

Seed, H. B., & Lundgren, R. (1954). Investigation of the effect of transient loading on the strength and deformation characteristics of saturated sands. Proceedings-American Society for Testing and Materials, 1288–1306.