

PENETROMETRE DYNAMIQUE ET INDICE DE DENSITE DES SABLES. APPLICATION A L'EVALUATION DU RISQUE DE LIQUEFACTION DES MASSIFS SABLEUX

DYNAMIC PENETROMETER AND SAND DENSITY INDEX. APPLICATION TO THE EVALUATION OF THE RISK OF LIQUEFACTION OF SANDY MASSES

Sebastian Lopez Retamales¹, Jean Canou¹, Jean Claude Dupla¹, Miguel Benz Navarrete²

¹ Ecole des Ponts ParisTech, Paris, France.

² Sol-Solution, Géotechnique Réseaux, Riom, France.

RÉSUMÉ – L'évaluation du risque de liquéfaction d'un site ou d'un ouvrage est nécessaire pour éviter des dégâts humains et économiques. Les méthodes actuelles d'évaluation sont principalement basées sur l'essai de pénétration, SPT ou CPT. Ces méthodes permettent de caractériser le sol et estimer un facteur de sécurité contre l'occurrence ou la non-occurrence d'une liquéfaction. Cet article présente les premiers résultats des essais de pénétration dynamique complètement instrumentés (le P.A.N.D.A.3®) sur des échantillons de sable fabriqués dans une chambre d'étalonnage (état K_0). Les résultats montrent une bonne corrélation entre la résistance à la pénétration dynamique q_d et l'indice de densité du sol I_d , permettant d'établir une équation générale qui relie ces paramètres et la contrainte de surcharge effective appliquée à l'échantillon.

ABSTRACT – The evaluation of the risk of liquefaction is necessary to avoid human and economic damage. The current evaluation methods are based on the application of on-site penetration tests such as SPT and CPT, to characterize the subsurface and calculate the safety factor against the occurrence or non-occurrence of liquefaction. This article presents the first results of PANDA3® tests on sand specimens made in a calibration mold (K_0 state). The results show a good correlation between the dynamic cone resistance q_d and the soil density index I_d . This allows a general equation to be established that relates the above parameters and the effective overburden stress applied to the specimen.

1 Introduction

La liquéfaction des sols (Lade & Yamamuro, 1999) génère des effets négatifs sur le sol et les structures, pouvant entraîner un risque non négligeable pour les personnes ainsi que des dégâts économiques importantes (Idriss & Boulanger, 2008; National Academies of Sciences Engineering and Medicine, 2016). Par conséquent et dû à la difficulté d'obtenir in-situ des échantillons de sol représentatifs (et au coût élevé des essais au laboratoire), l'évaluation du potentiel de liquéfaction sur le terrain devient une étape importante et nécessaire dans le cadre de l'étude de la susceptibilité sismique d'un site (Chang et al., 1987; Idriss & Boulanger, 2008; Javelaud, 2015).

Pour répondre à ce besoin, différentes méthodes pour l'évaluation in-situ ont été développées. La grande majorité s'appuie sur l'exécution des essais de pénétration soit dynamiques (SPT) soit statiques (CPT). D'autres méthodes plus récentes, mais faisant moins d'unanimité, se basent sur la mesure d'ondes de cisaillement (Andrus et al., 2004).

Pour ce qui concerne les méthodes pénétrométriques, chaque équipement présente des avantages et des inconvénients lorsqu'on considère, par exemple, les différentes conditions du terrain, l'accessibilité, l'équipement en lui-même, son mode opératoire, le temps et le coût de l'essai ... ce qui rend leur utilisation impossible dans des terrains de difficile accès ou pour des ouvrages dont le budget alloué aux investigations resté modéré.

Il s'avère donc nécessaire de développer de nouvelles techniques permettant de répondre à ces besoins, basées sur d'autres équipements qui soient légers, rapides et peu traumatisants, tout en s'appuyant sur la démarche générale de la méthode pénétrométrique (Idriss & Boulanger, 2008). C'est pourquoi le pénétromètre dynamique léger à énergie variable français, P.A.N.D.A. (Gourvès, 1991), semble un outil bien adaptée.

Par ses caractéristiques, le P.A.N.D.A. (acronyme français pour Pénétrromètre Autonome Numérique Dynamique Assisté par ordinateur) permet en effet de caractériser le sol en surface assez finement facilitant ainsi l'étude de la variabilité spatiale (Jurado et al., 2020), mais aussi le couplage avec d'autres techniques conventionnellement plus acceptées (CPT, SPT, PMT...) au profit du budget et de la maîtrise du risque dans le cadre d'une étude géotechnique de cette nature. L'usage de l'appareil est aujourd'hui très répandu en France et dans différents pays du monde, où il est utilisé dans un large éventail d'applications géotechniques.

En effet, à l'heure actuelle il est couramment utilisé au Chili pour le contrôle et l'évaluation du risque de liquéfaction des barrages miniers (R Espinace, Villavicencio, & Lemus, 2013; R Espinace, Villavicencio, Palma, et al., 2013; Raul Espinace et al., 2007; Gabriel Villavicencio et al., 2016) où même une norme a été publiée pour ce faire (NCh 3261-2012). Malgré tout, dans la plupart d'applications rapportées dans la littérature, l'analyse des résultats a été basée sur des essais effectués pour des faibles profondeurs, inférieures à 6 mètres. Très peu d'expériences insitu ou en laboratoire ont été rapportées en considérant une contrainte de confinement verticale plus grande, permettant d'analyser le comportement du sol vis-à-vis du phénomène de la pénétration dynamique à de plus grandes profondeurs. Les seules expériences ayant été identifiées, sont celles de (Villavicencio et al., 2018), qui restent malgré tout, des expériences assez sommaires.

Cette étude vise ainsi à analyser l'essai de pénétration dynamique à l'énergie variable français P.A.N.D.A., en prenant en compte les effets de la densité relative (I_d) et de la contrainte verticale (σ'_{vc}). Ces résultats permettent d'évaluer l'utilisation de ce type de pénétromètres dans l'auscultation des sols susceptibles aux phénomènes de liquéfaction sous différentes conditions. La connaissance de la relation entre la résistance à la pénétration dynamique (q_d), l'indice de densité (I_d) et la contrainte verticale (σ'_{vc}), permet d'analyser le comportement du sol dans des conditions similaires et de développer une évaluation plus précise du comportement du sol.

Pour la réalisation de ce travail, le pénétromètre dynamique à énergie variable de troisième génération, le P.A.N.D.A. 3, a été employé. Une description détaillée de son fonctionnement ainsi que du principe de mesure est fournie par (Benz, 2009; Esteban Julio Escobar Valencia, 2015) et repris dans la section suivante.

Dans ce travail, une série d'essais de pénétration dynamique a été réalisée sur des échantillons de sable de Fontainebleau, reconstitués dans une chambre d'étalonnage (dite chambre à état K_0), à différents indices de densité (I_d). La chambre d'étalonnage utilisée est celle décrite par (Le Kouby et al., 2008; Muhammed et al., 2016), permettant d'appliquer différentes contraintes verticales (σ'_{vc}).

Pour les essais de pénétration réalisés dans le cadre de ces expériences, le pénétromètre a été muni d'une pointe de 4cm^2 de section (débordante par rapport au train de tiges, dont le diamètre est de 14mm). Ceci afin de réduire d'une part les effets du frottement latéral le long de tiges et d'autre part d'homogénéiser les efforts et la mesure pour les essais réalisés sur des échantillons à faible état de densité.

Cet article présente les résultats des essais de pénétration dynamique P.A.N.D.A. 3® réalisés en chambre d'étalonnage K_0 , sur des échantillons de sable (Fontainebleau) à différentes densités relatives (I_d) et contraintes verticales effectives (σ'_{vc}). Les résultats obtenus ont permis de présenter une équation générale qui met en relation la résistance de pointe (q_d), l'indice de densité (I_d) et la contrainte verticale effective (σ'_{vc}).

2 Description des essais au laboratoire en chambre d'étalonnage

2.1 Matériau utilisé : le sable de Fontainebleau

Le sable de Fontainebleau est un sable de granulométrie fine et de couleur beige clair. Il est principalement composé de silicium ($SiO_2 > 98\%$), avec une graduation uniforme (Benahmed, 2001). Les grains composant le sable ont une forme arrondie ou semi-arrondie et sont très résistants à la rupture. Les propriétés de ce sable sont résumées dans la Figure 1, et par ses caractéristiques, il s'agit d'un matériau susceptible à la liquéfaction si toutes les conditions sont réunies (densité, contrainte vertical, saturation, séisme...).

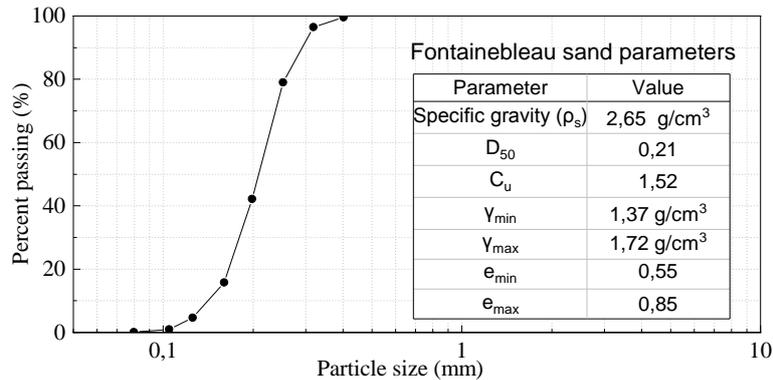


Figure 1. Propriétés géotechniques des sables de Fontainebleau.

2.2 Le pénétromètre dynamique à énergie variable instrumenté P.A.N.D.A. 3®

Le P.A.N.D.A. 3® (Benz Navarrete, 2009) est un pénétromètre dynamique à énergie variable qui outre le fait d'incorporer différents capteurs (accéléromètres, jauges de contrainte, capteurs de déplacement...) associe une méthode pour l'analyse des mesures effectuées lors du battage basée sur la résolution de l'équation de l'onde, la reconstruction des signaux de force, vitesse et déplacement en pointe et par l'application d'un modèle d'interaction pointe-sol elasto-visco-plastique parfait. Un des principaux résultats obtenus avec cette nouvelle technique de mesure est l'obtention d'une courbe charge enfoncement dynamique. Une description complète de l'appareil, du principe de mesure ainsi que des résultats obtenus est fournie par (Benz Navarrete, 2009; Benz Navarrete et al., 2013; E. J. Escobar Valencia et al., 2013, 2016).

De manière générale, le pénétromètre est composé d'un train de tiges muni d'une pointe conique débordante de 4cm² de section dans son extrémité inférieure, et d'une tête de battage entièrement instrumentée qui est installée dans la partie supérieure. Il est également composé d'une unité centrale d'acquisition de données (UCA). La tête de battage est équipée de capteurs de déformation et d'accélération permettant d'obtenir des enregistrements de force $F(t)$ et de vitesse $v(t)$ pour chaque impact. Ceux-ci sont envoyés et enregistrés directement à l'UCA. L'unité centrale d'acquisition de données est reliée à l'ordinateur où des algorithmes ad-hoc sont préprogrammés pour analyser, découpler, reconstruire et calculer l'ensemble de grandeurs cinématiques au niveau de la pointe du pénétromètre (Figure 2a).

2.2.1 Propagation des ondes dans le pénétromètre

Phénoménologiquement, lors du battage d'un pénétromètre et tel qu'il a été décrit par (Gonin, 1996), lorsque le marteau frappe la tête du pénétromètre, deux ondes de contrainte sont générées. Une onde remonte le marteau jusqu'à son extrémité libre et l'autre onde descend le pénétromètre jusqu'à la pointe.

Dans le cadre de la théorie des ondes unidimensionnelles, Benz (2009), a développé une méthode d'analyse du test de pénétration dynamique (P.A.N.D.A. 3®), qui permet de

construire une courbe de résistance-pénétration dynamique (Figure 2C). Benz (2009) a utilisé un pénétromètre équipé de capteurs de déformation et d'accélération qui permettent d'en déduire la force $F(t)$ de l'onde et la vitesse $v(t)$ dans le point de mesure situé dans les tiges au voisinage du casque de frappe de la tête de battage (Figure 2A). Pour reconstruire les signaux au niveau de la pointe du pénétromètre, on utilise les enregistrements des capteurs situés près de la tête du pénétromètre et on applique une méthode de découplage des ondes descendantes et ascendantes (Casem et al., 2003), puis on reconstruit les signaux à tout point où un changement d'impédance se produit (Carlsson et al., 1990; Karlsson et al., 1989). Un des points de changement d'impédance est ainsi l'interface sol-pointe.

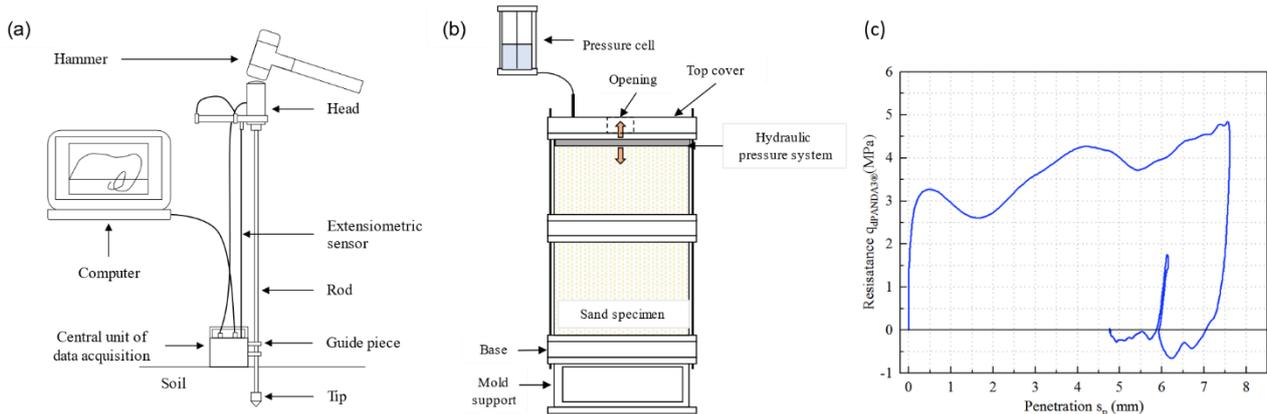


Figure 2. (a) Schéma du pénétromètre dynamique léger à énergie variable P.A.N.D.A 3, (b) Chambre d'étalonnage sous condition K_0 , (c) et de la courbe de chargement dynamique en pointe pénétrométrique

La courbe de chargement dynamique obtenue est exploitée à l'aide d'un modèle très simpliste dite de Smith, très utilisé dans le domaine des pieux (Smith, 1960). Il est ainsi possible d'obtenir différents paramètres caractéristiques des sols (Benz, 2009; Escobar et al., 2014, 2016; Esteban Julio Escobar Valencia, 2015). Par ailleurs, en considérant l'existence d'une relation biunivoque entre la résistance dynamique à la pénétration (q_d) et la densité sèche du sol (γ_d) (Chaigneau, 2001), il est donc également possible d'établir une corrélation entre la résistance à la pointe (q_d^{P3}) et la densité sèche du sol (γ_d) ou l'indice de densité (I_d). Pour le cas du pénétromètre dynamique P.A.N.D.A. 3 ®, cette corrélation peut être ajustée par le biais de l'équation 7.

$$\gamma_d = A \ln(q_d^{P3}) + B \quad (1)$$

Avec (γ_d) la densité sèche du sol, (q_d^{P3}) la résistance dynamique mesurée à l'aide du pénétromètre dynamique, A et B respectivement les coefficients de régression pour le sol étudié à ne certaine teneur en eau.

2.3 Chambre d'étalonnage et confection des éprouvettes

La chambre d'étalonnage utilisée pour la construction et la mise en place des éprouvettes simule les conditions au repos type K_0 par le biais de l'application d'une pression verticale effective (Figure 2b).

La chambre est composée d'une base cylindrique, composée de deux cylindres supplémentaires et d'un couvercle supérieur qui, ensembles, permettent la confection d'un échantillon de sol de 730 mm de hauteur et 547 mm de diamètre. Le système est fermé et ajusté au moyen de barres filetées qui sont fixées en haut et en bas par des écrous. En dessous du couvercle supérieur et sur le dessus de l'échantillon de sol, un système de pression hydraulique est installé. Celui-ci, composée d'une membrane en caoutchouc, se

dilate pour exercer la pression de consolidation verticale voulue. Le pilotage de la pression verticale de confinement appliquée est réalisé à l'aide cellule de charge, tel que schématisé dans la (Figure 2b). Une description plus détaillée de la chambre d'étalonnage, ainsi que du mode opératoire est présenté par (Le Kouby et al., 2008; Muhammed et al., 2016).

3 Protocole d'essais

Pour cette étude, la réalisation de chaque expérience est effectuée en trois étapes :

- (1) Construction de l'éprouvette.
- (2) Application de la contrainte verticale effective (σ'_{vc}).
- (3) Réalisation des essais de pénétration dynamique P.A.N.D.A. 3®.

Pour la construction de chaque éprouvette, l'indice de densité initial (I_d) du sable a été défini au préalable. Par la suite, le spécimen a été construit en déposant des couches d'épaisseur uniforme de sable sec, déposées chacune selon l'indice de densité spécifié. Des valeurs de l'inde I_d comprises entre 0,30 et 0,90 ont été prises en compte. Ceci principalement en raison de la difficulté de construire des spécimens de densité inférieure.

Une fois l'échantillon constitué et après avoir refermée la chambre de calibration, la contrainte verticale effective souhaitée a été appliquée à l'aide du système hydraulique décrit ci-avant. Une fois la charge ayant été homogènement répartie, et après quelques instants pour stabiliser l'échantillon, on procède à la réalisation de l'essai de pénétration.

Pour effectuer l'essai de pénétration, la pointe conique de celui-ci est insérée dans une ouverture circulaire du couvercle supérieur du moule d'étalonnage (Figure 2b). Une fois installée, le battage dynamique est débuté afin de faire pénétrer l'ensemble pour une certaine profondeur et sous une contrainte verticale effective initialement prédéfinie. A ce stade, le battage est arrêté et la contrainte verticale effective est modifiée soit à la hausse soit à la baisse selon le mode opératoire ayant été prédéfinie. L'essais de pénétration et donc le battage peuvent ainsi se poursuivre. Cette procédure est reproduite pour tous les niveaux de contrainte verticale ayant été préréglés dans le protocole d'essais et jusqu'à l'enfoncement total du pénétromètre dans l'échantillon.

Table 1 – Synthèse de la série d'essais réalisés

Test number	I_d	Vertical consolidation stress
Tests 1	0,3	10 Kpa
Tests 2	0,4	25 Kpa
Tests 3	0,5	50 Kpa
Tests 4	0,6	75 Kpa
Tests 5	0,7	100 Kpa
Tests 6	0,8	200 Kpa
Tests 7	0,9	300 Kpa
		400 Kpa

Par ailleurs, et pour réduire les effets de bord et du fond sur l'échantillon, l'essai est réalisé dans l'axe central vertical de la chambre de calibration et les mesures réalisées à moins de 100mm et plus de 100mm du bord supérieur et inférieur respectivement de la chambre ne sont pas pris en compte. A la fin du programme d'essais, au total 7 éprouvettes ont été effectuées et plus de 1000 mesures à l'aide du pénétromètre P.A.N.D.A 3 ont été effectuées. L'ensemble des expériences est résumé dans la Table 1.

4 Analyse des résultats

4.1 Influence de la densité relative

Dans différentes conditions de contrainte verticale et à différents taux de densité, on observe des comportements différents. Les relations entre q_d^{P3} et I_d présentées dans la Figure 5, montrent un bon ajustement de la corrélation, qui s'applique à toutes les conditions de contrainte verticale effective (σ'_{vc}). En considérant ceci, il est possible d'établir une corrélation représentée par l'équation 1. Les valeurs des coefficients de régression A et B pour les différentes conditions de contrainte verticale effective (σ'_{vc}) sont présentées dans la Figure 3.

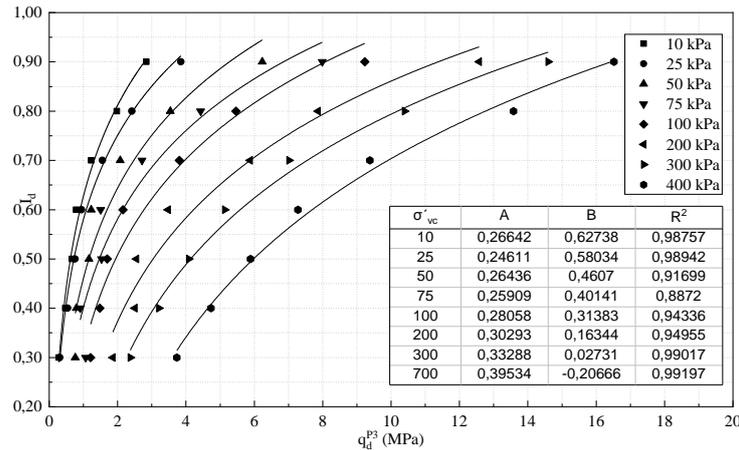


Figure 3 – Relation $q_d^{P3} - I_d$ sous différentes conditions de confinement vertical.

4.2 Relationship $q_d^{P3} - \sigma'_{vc}$

Les résultats de résistance dynamique (q_d^{P3}) à la pénétration montrent une tendance à augmenter avec l'augmentation de la contrainte verticale (σ'_{vc}). On peut également observer que plus l'indice de densité (I_d) est élevé, plus l'augmentation de la résistance dynamique (q_d^{P3}) est prononcée.

À des niveaux de densité faibles, l'augmentation de la résistance dynamique à la pénétration (q_d^{P3}) est moins prononcée, approchant même une relation presque linéaire (Figure 4A). L'ensemble des résultats obtenus pour ce cas de figure peuvent cependant être ajustés par une équation comme celle présentée dans l'équation 2.

$$\sigma'_{vc} = A \cdot (q_d^{P3})^B \quad (2)$$

Par le biais d'une analyse itérative pour le calage des résultats, il a été possible d'obtenir une équation qui relie la contrainte verticale effective (σ'_{vc}), l'indice de densité (I_d) et la résistance dynamique à la pénétration (q_d^{P3}). Celle-ci est exprimée par l'équation 3.

$$I_d = \log_A \left(\frac{\sigma'_{vc}}{B(q_d^{P3})^C} + D \right) \quad (3)$$

Avec I_d l'indice de densité, (σ'_{vc}) la contrainte verticale effective, (q_d^{P3}) la résistance de pointe dynamique et A, B, C et D les coefficients d'ajustement égaux à 0.016, 137.64, 1.9 et 0.011. Les résultats et l'abaque obtenus sont présentés dans la (Figure 4).

La corrélation ici obtenue est valable pour le matériau considéré (sable de Fontainebleau), pour un état d'humidité sec et pour une gamme de densité dont l'indice de densité est compris entre $0,3 \leq I_d \leq 0,9$.

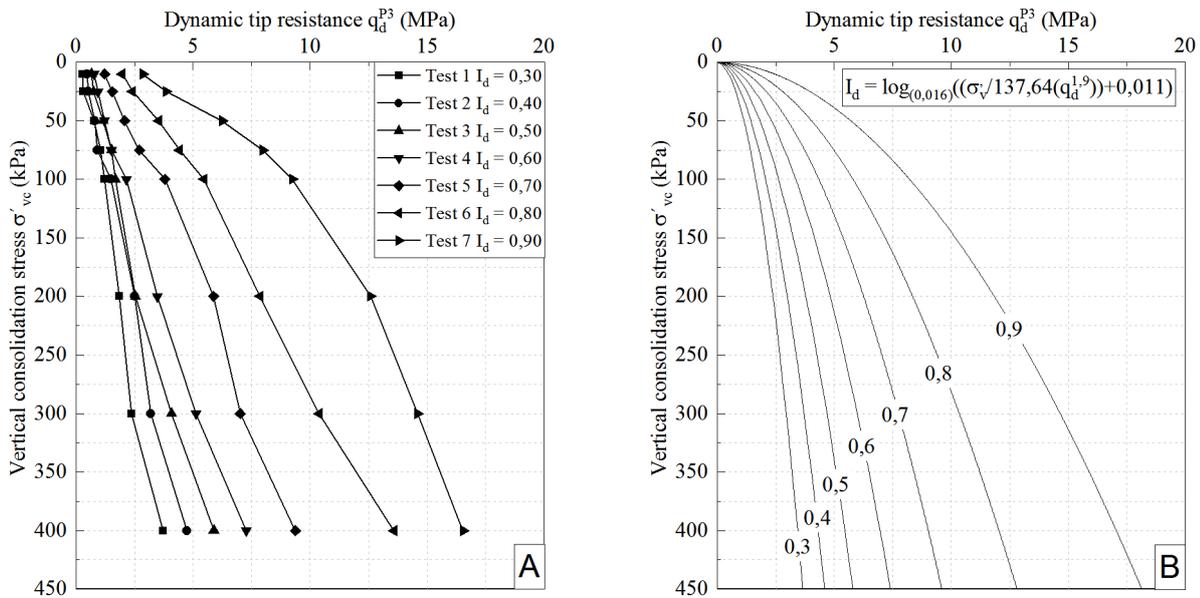


Figure 4 – Résultats obtenus en chambre d'étalonnage, condition K_0 , pour un sable de Fontainebleau sec avec le pénétromètre dynamique à énergie variable P.A.N.D.A 3®

5 Conclusions

L'article rapporte les premiers résultats des essais de pénétration dynamique P.A.N.D.A. 3® effectués sur des échantillons de sable de Fontainebleau dans une chambre d'étalonnage (état K_0). Les résultats montrent que ce pénétromètre est capable de caractériser assez bien un sol sableux granulaire en ce qui concerne sa densité et sa contrainte de confinement verticale. L'équation qui met en relation la résistance de la pointe, l'indice de densité et la contrainte de confinement verticale ici proposée, permet une première caractérisation de ce type de matériau (sable) sous les conditions ici étudiées.

De cette manière, les aspects et les apports plus importants de ce travail sont :

- Etablissement d'une relation empirique entre la résistance dynamique (q_d), l'indice de densité (I_d) et la contrainte verticale (σ'_{vc}) ;
- Mise au point d'un mode opératoire pour la calibration du P.A.N.D.A. au laboratoire à grandes contraintes de confinement ; et
- Utilisation, pour la première fois, du pénétromètre dynamique léger à énergie variable tout instrumenté, dit P.A.N.D.A. 3, pour ce type d'études.

Toutefois, des investigations supplémentaires sont nécessaires pour étendre le potentiel de l'équipement de pénétration ici employée mais aussi la prise en compte d'autres conditions de sol qui peuvent se présenter sur site.

6 Bibliography

- Andrus, R. D., Stokoe, K. H., & Juang, C. H. (2004). Guide for shear-wave-based liquefaction potential evaluation. *Earthquake Spectra*, 20(2), 285–308. <https://doi.org/10.1193/1.1715106>
- Benahmed, N. (2001). *Comportement mécanique d'un sable sous cisaillement monotone et cyclique : application aux phénomènes de liquéfaction et de mobilité y cyclique*. Ecole Nationale des Pont et Chaussées.
- Benz, M. (2009). *Mesures dynamiques lors du battage du penetrometre panda 2*. Université Blaise Pascal Clermont II.
- Benz Navarrete, M. A. (2009). *Mesures dynamiques lors du battage du pénétromètre Panda 2*. Phd thesis of Université Blaise Pascal, Clermont II (Clermont Ferrand, France).
- Benz Navarrete, M. A., Escobar Valencia, E. J., Gourvès, R., Haddani, Y., Breul, P., & Bacconnet, C. (2013). Mesures dynamiques lors du battage pénétrométrique – Détermination de la courbe charge-enfoncement dynamique en pointe. *Proceedings of the 18th International Conférence on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, 499–502.

- Carlsson, J., Sundin, K. G., & Lundberg, B. (1990). A method for determination of in-hole dynamic force-penetration data from two-point strain measurement on a percussive drill rod. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences And*, 27(6), 553–558. [https://doi.org/10.1016/0148-9062\(90\)91006-S](https://doi.org/10.1016/0148-9062(90)91006-S)
- Casem, D. T., Fournay, W., & Chang, P. (2003). Wave separation in viscoelastic pressure bars using single-point measurements of strain and velocity. *Polymer Testing*, 22, 155–164.
- Chaigneau, L. (2001). *Caractérisation des milieux granulaires de surface à l'aide d'un penetrometre*. Université Blaise Pascal - Clermont II.
- Chang, N. Y., Lien, B. H., & Huang, M. J. (1987). Soil Dynamics and Liquefaction. In *Developments in Geotechnical Engineering* (Vol. 42). <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-98958-1.50016-9>
- Escobar, E., Benz, M. A., Haddani, Y., Lamas, F., Calon, N., Aguiar, S. C. D., & Innovation, P. (2014). Reconnaissance dynamique des sites ferroviaires à l'aide du penetrometre PANDA 3®. *Journées Nationales de Géotechnique et de Géologie de l'ingénieur*.
- 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., Benz Navarrete, M. A., Gourvès, R., & Breul, P. (2013). Dynamic Cone Penetration Tests in Granular Media: Determination of the Tip's Dynamic Load-Penetration Curve. *AIP Conference Proceedings*, 1542, 389–392. <https://doi.org/10.1063/1.4811949>
- Escobar Valencia, E. J., Benz Navarrete, M. A., Gourvès, R., Breul, P., & Chevalier, B. (2016). In-situ determination of soil deformation modulus and the wave velocity parameters using the Panda 3®. In Acosta-Martínez & Kelly (Eds.), *5th Geotechnical and Geophysical Site Characterisation, ISC5* (pp. 279–284). Australian Geomechanics Society.
- Escobar Valencia, Esteban Julio. (2015). *Mise au point et exploitation d'une nouvelle technique pour la reconnaissance des sols: le PANDA 3*. Université Blaise Pascal.
- Espinace, R., Villavicencio, G., & Lemus, L. (2013). The PANDA technology applied to design and operation of tailings dams. *Tailings 2013. First International Seminar on Tailings Management, August 2013*. <https://doi.org/10.13140/2.1.4228.2568>
- Espinace, R., Villavicencio, G., Palma, J., Breul, P., Bacconnet, C., Benz, M. A., & Gourvès, R. (2013). *Stability of Chilean's tailings dams with the Panda® penetrometer*. *Bolton*, 519–522.
- Espinace, Raul, Palma, J., Peña, Á., Villavicencio, G., Boissier, D., Bacconnet, C., & Gourvès, R. (2007). *The Panda penetrometer: A new alternative for the compaction control of tailing dams*.
- Gabriel Villavicencio, A., Breul, P., Bacconnet, C., Fourie, A., & Raúl Espinace, A. (2016). Liquefaction potential of sand tailings dams evaluated using a probabilistic interpretation of estimated in-situ relative density. *Revista de La Construcción*, 15(2), 9–18. <https://doi.org/10.4067/s0718-915x2016000200001>
- Gonin, H. (1996). Du pénétromètre dynamique au battage des pieux. *Revue Française de Géotechnique*, 76, 10.
- Gourvès, R. (1991). *Le PANDA : pénétromètre dynamique léger à énergie variable pour la reconnaissance des sols*.
- Idriss, I. M., & Boulanger, R. W. (2008). Soil Liquefaction during Earthquakes. In *Earthquake Engineering Research Institute* (Vol. 1). <https://doi.org/10.1109/MIA.2007.322261>
- Javelaud, E. (2015). *Etat de l'art des méthodes d'évaluation du risque de liquéfaction. Cas des ouvrages à risques normal et spécial en France*. 1–11.
- Jurado, C. S., Breul, P., & Bacconnet, C. (2020). Georisk : Assessment and Management of Risk for Engineered Systems and Geohazards Probabilistic 3D modelling of shallow soil spatial variability using dynamic cone penetrometer results and a geostatistical method. *Georisk*, 0(0), 1–13. <https://doi.org/10.1080/17499518.2020.1728558>
- Karlsson, L. G., Lundberg, B., & Sundin, K. G. (1989). Experimental study of a percussive process for rock fragmentation. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences And*, 26(1), 45–50. [https://doi.org/10.1016/0148-9062\(89\)90524-X](https://doi.org/10.1016/0148-9062(89)90524-X)
- Lade, P. V., & Yamamuro, J. A. (1999). Physics and Mechanics of Soil Liquefaction. *Proceedings of the International Workshop on the Physics and Mechanics of Soil Liquefaction*.
- Le Kouby, A., Canou, J., & Dupla, J.-C. (2008). Contribution à l'étude du comportement des pieux. Etude en chambre d'étalonnage. *JNGG 2006*, 1(42), 129–136.
- Muhammed, R. D., Canou, J., Dupla, J.-C., & Delmi, H. (2016). Etude en chambre d'étalonnage du frottement sol-pieu dans une argile saturée sous grand nombre de cycles. *JNGG 2016, 2013*, 1–8.
- National Academies of Sciences Engineering and Medicine. (2016). *State of the Art and Practice in the Assessment of Earthquake-Induced Soil Liquefaction and Its Consequences*. The National Academies Press. <https://doi.org/10.17226/23474>
- Smith, E. A. L. (1960). Pile driving analysis by the wave equation. *J. Soil Mech. Found. ASCE*, 86, 35–61.
- Villavicencio, G., Suazo, G., Rojas, S., Zuñiga, R., Universidad, P., & Valparaíso, C. De. (2018). The Effects of Confining Pressure , Density and Tailings Water Content on the Cone Resistance of Dynamic

Lightweight Penetrometers. *Tailings 2018*, 1–9.