

LE GRIZZLY 3® A ÉNERGIE VARIABLE : NOUVEAUX DÉVELOPPEMENTS DE L'ESSAI DE PÉNÉTRATION DYNAMIQUE

THE GRIZZLY 3® VARIABLE ENERGY: NEW DEVELOPMENTS OF DYNAMIC CONE PENETRATION TESTING (DPSH)

Esteban ESCOBAR¹, Miguel BENZ¹, Roland GOURVÈS¹, Pierre BREUL², Bastien CHEVALIER².

¹ Sol-Solution Géotechnique Réseaux, 63204 Riom Cedex, France

² Institut Pascal, 63170 Aubière Cedex, France

RÉSUMÉ – Dans cet article nous présentons le Grizzly 3®, pénétromètre dynamique DPSH à énergie variable assisté par ordinateur et permettant de mesurer une courbe charge-enfoncement en pointe pour chaque impact du mouton. L'application des méthodes d'analyse développées à partir du Panda 3® permet de déterminer la résistance en pointe dynamique (q_d) et pseudo statique (q_s), le module d'élasticité (E_{kd}^{P3}) pénétrométrique, la vitesse des ondes de compression (V_p^{P3}) et le coefficient d'amortissement du sol (J_s). L'asservissement de l'énergie de battage, permet d'adapter automatiquement l'énergie de battage en fonction de la raideur du sol rencontré et d'améliorer ainsi la sensibilité de mesures réalisées en sols meubles.

ABSTRACT – In this article, we are presenting the Grizzly3®, a computer-assisted dynamic DPSH cone penetrometer with variable energy which allows the measure a load-penetration curve for each impact of the anvil. The implementation of the Panda3® analysis method enables to determine the dynamic (q_d) and pseudo-static (q_s) cone resistances, the penetrometric elasticity modulus (E_{kd}^{P3}), the wave compression velocity (V_p^{P3}) and the damping coefficient of the soil (J_s). Adjusting the driving force allows to adapt the hammering energy according to the stiffness of the soil and therefore improve the accuracy of the measurement of soft soils.

1. Introduction

Bien qu'en France, environ 75% des fondations soient dimensionnées sur la base du pressiomètre et le reste à partir du CPT, l'essai de pénétration dynamique n'en est pas moins intéressant. En effet, à l'exception des quelques pays d'Europe, cet essai est la technique d'auscultation la plus utilisée à travers le monde. Son usage concerne non seulement la reconnaissance géotechnique, mais aussi le contrôle d'ouvrages en terre et le dimensionnement de fondations.

Toutefois, les pénétromètres dynamiques présentent différents inconvénients. En effet, on peut constater qu'il s'agit d'une technique qui n'a pas su intégrer les avancées technologiques des capteurs et des chaînes d'acquisition associées. De même, l'interprétation et l'exploitation de la valeur la plus significative, la résistance de pointe q_d , demeurent largement empiriques.

Par ailleurs, le caractère fortement dynamique des pénétromètres lourds est considéré comme un désavantage important pour l'auscultation de sols meubles ou saturés.

Depuis plus d'une vingtaine d'années maintenant, Sol Solution et l'Institut Pascal de Clermont-Ferrand travaillent ensemble afin d'améliorer la technologie, l'interprétation et l'exploitation du pénétromètre dynamique. Les travaux réalisés autour du pénétromètre

Panda® (Gourvès, 1991) et du Panda 3® (Benz, 2009) ont permis de montrer que l'on peut aller beaucoup plus loin dans l'interprétation d'un tel essai.

Dans cet article nous présentons le Grizzly 3®, pénétromètre dynamique DPSH à énergie variable assisté par ordinateur et permettant de mesurer une courbe charge-enfoncement en pointe pour chaque impact du mouton. L'application des méthodes d'analyse développées à partir du Panda 3® permet de déterminer les résistances en pointe dynamique (q_d) et pseudo statique (q_s), le module d'élasticité pénétrométrique (E_{kd}^{P3}), la vitesse des ondes de compression (V_p^{P3}) et le coefficient d'amortissement du sol (J_s). L'asservissement de l'énergie de battage, permet d'adapter automatiquement l'énergie de battage en fonction de la raideur du sol rencontré et d'améliorer ainsi la sensibilité des mesures réalisées en sols meubles.

2. Le Grizzly 3® à énergie variable

Ce modèle propose une option, sur le pénétromètre dynamique lourd Grizzly® (Benz et al. 2012), qui permet d'adapter automatiquement l'énergie de battage du marteau en fonction de la compacité du sol lors de la réalisation d'un sondage.

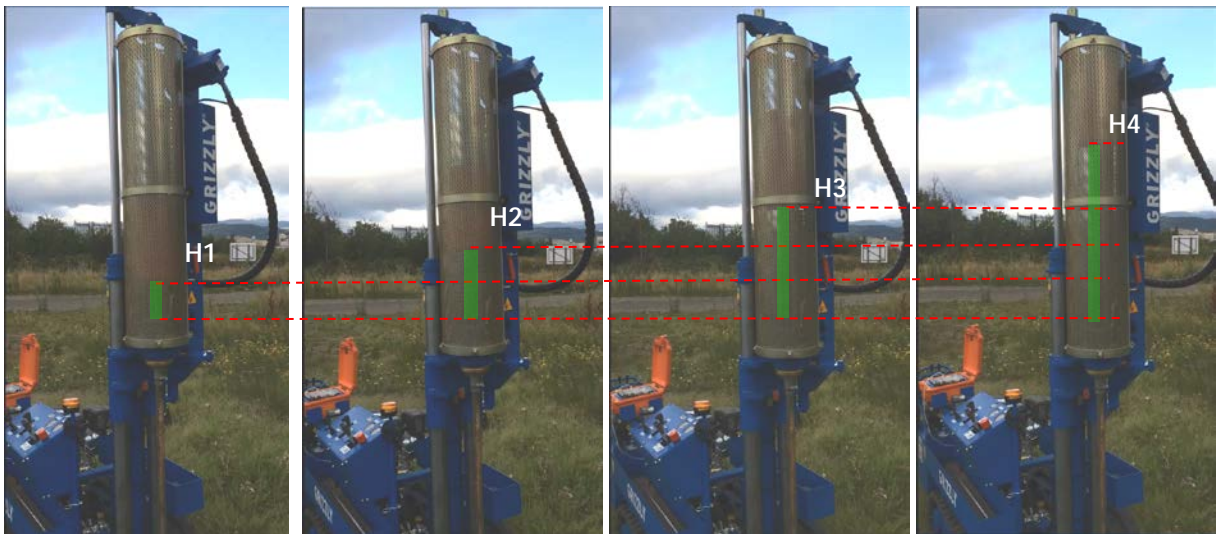


Figure 1 : Séquence du système de battage à énergie variable selon les 4 niveaux de hauteur de chute H_i

2.1. Principe

La solution technologique proposée repose sur le fait de conserver en permanence la même masse de battage M mais de faire varier uniquement la hauteur de chute H de cette dernière. 4 hauteurs de chute sont disponibles : H_1 , H_2 , H_3 et H_4 . Tout cela étant automatiquement piloté et asservi par l'ordinateur embarqué sur le Grizzly® (Figure 1).

En fonction de l'importance de l'enfoncement mesuré au dernier coup de battage, l'ordinateur, paramétré au préalable, décide instantanément la hauteur de chute pour le coup d'après, de manière à s'adapter en temps réel à la résistance du sol rencontré et obtenir des enfoncements compris entre 2mm et 20 mm/coup par exemple. Plus le sol présentera des variations de résistances, plus les changements de hauteurs de chute seront fréquents. Cela, sans aucune intervention de la part de l'opérateur sur la machine et sans interruption du battage. L'opérateur doit ainsi sélectionner le mode de battage en début d'essai :

- soit le battage classique à énergie constante (DPSH-B),
- soit l'option à énergie variable asservie (4 énergies disponibles).

Comme le montre le tableau 1, les 4 hauteurs de chute disponibles ont été calculées pour correspondre aux énergies de battage ramenées à la surface de la pointe selon la norme européenne (ISO 22476-2), des pénétromètres DPL, DPM, DPH, DPSH (respectivement Dynamic Penetrometer Light, Medium, Heavy, Super Heavy).

Tableau 1. Hauteurs de chute du mouton Grizzly selon la norme NF EN ISO 22476-2

Caractéristiques du battage pénétrométrique	DPL	DPM	DPH	DPSH-B
Masse du mouton, M [kg]	10	30	50	63.5
Hauteur de chute, H [m]	0.5	0.5	0.5	0.76
Energie de battage, E_b [J]	49	147	245	473
Aire de la pointe, A_p [cm ²]	10	15	15	20
Energie sur la pointe, E_p [KJ/m ²]	49	98	163	236
Hauteurs du battage Grizzly à énergie variable [m]	0.16	0.32	0.54	0.76

2.2. Tête de mesure Grizzly 3® et interprétation de l'essai

Par ailleurs, nous avons conçu une tête de mesure équipée des différents capteurs permettant d'adapter la technologie et le principe de mesure du Panda 3® (Benz, 2009) au cas des pénétromètres lourds. L'ensemble ainsi constitué est le pénétromètre Grizzly 3®, permettant d'ausculter des formations superficielles jusqu'à des profondeurs de 10 à 15m.

Le principe de l'essai Grizzly 3® consiste à mesurer, dans la tête de mesure la variation de déformation $\varepsilon(t)$ et d'accélération $a(t)$ entraînée par le passage de l'onde de compression créée par l'impact. Pour chaque coup de marteau, après découplage des ondes descendantes et remontantes ε_d et ε_r , on calcul l'enfoncement $s_p(t)$ et la force $F_p(t)$ résultante en pointe lors de l'enfoncement de la pointe. En faisant certaines hypothèses simplificatrices (Escobar, 2015), il est possible de tracer la courbe charge-enfoncement dynamique (σ_p-s_p) pour chaque impact du mouton (figure 2).

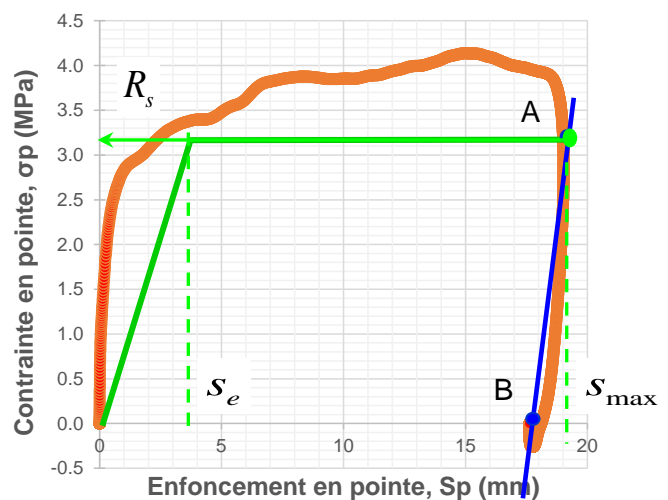


Figure 2 : Tête de mesure Grizzly 3® sur le terrain et exemple de courbe charge-enfoncement (σ_p-s_p) réalisées à l'aide de la tête de mesure Grizzly 3®.

Une méthodologie analytique d'exploitation de cette courbe permet de déterminer différents paramètres du sol tels que : la résistance à la pénétration dynamique (q_d) et pseudo statique (q_s), le module de déformation dynamique (E_{kd}^{P3}), la vitesse d'ondes de compression (V_p^{P3}) (Benz, 2009).

Une synthèse des paramètres exploités à partir de l'analyse des signaux enregistrés lors du battage est présentée dans ce qui suit.

2.2.1. Paramètres de résistance et déformation

Pour l'interprétation de la courbe σ_p - s_p il a été proposé une méthodologie analytique fondée sur les travaux de (Smith, 1960). En supposant que la contrainte en pointe $q_d(t)$ est la résultante de :

- une composante statique R_s (obéissant à une loi élastoplastique parfaite), et
- une composante dynamiques $R_d(t)$ (proportionnelle à la vitesse d'enfoncement $v_p(t)$);

On détermine la valeur de R_s en admettant que lorsque $v_p(t)$ est nulle la composante dynamique $R_d(t)$ s'annule et R_s est donc égale à $q_d(t)$. Les valeurs de $R_d(t)$ et du coefficient d'amortissement de Smith J_s sont ainsi déterminés dans l'intervalle d'enfoncement $[s_e; s_{max}]$, avec s_e et s_{max} les enfoncements élastique et maximal, en écrivant que $R_d(t) = q_d(t) - R_s$ et $J_s = R_d(t) / (R_s v_p(t))$ (Fig. 2.b).

Une fois l'enfoncement maximal s_{max} atteint, nous admettons que le sol et le pénétromètre se mettent à vibrer ensemble dans un régime pseudo-élastique. Dans cette partie de la courbe σ_p - s_p , un module de déchargement E_d^{P3} (droite AB) est ainsi défini (Fig.2.b). En assimilant la pointe à une petite plaque encastree à l'intérieur d'un massif élastique semi-infini, nous calculons la valeur de E_d^{P3} en appliquant l'équation de Boussinesq (1) modifiée et proposée par (Arbaoui, 2006).

$$E_d^{P3} = (1 - \mu^2) \frac{\Delta q_d}{\Delta s_p} \frac{\pi d_p}{4} \frac{1}{k_M} \quad (1)$$

Avec μ est le coefficient de poisson supposé égal à 0,33, d_p le diamètre de la pointe et k_M le coefficient d'encastrement de Mindlin.

2.2.2 Raideur dynamique en basse fréquence

Une autre méthode permettant d'exploiter les signaux enregistrés lors du battage pénétrométrique Grizzly 3® est celle proposée par (Benz et al, 2014) et inspirée des travaux de (Paquet, 1968). En effet, l'onde de choc entraînée par l'impact du marteau et les vibrations du système pénétromètre/sol peuvent être décrites par les fonctions d'impédance, obtenus par les méthodes classiques de transformée Fourier permettant d'obtenir les fonctions de transfert et de tracer ainsi les courbes d'accélération et de mobilité. A partir de ces courbes, il est possible d'obtenir la raideur dynamique K_d^{P3} pour la gamme de fréquences comprises entre 0 et 100 Hz. En supposant la pointe pénétrométrique comme plaque encastree dans un milieu élastique semi-infini, il est possible, par le biais des expressions proposées par Boussinesq de calculer le module de déformation E_{kd}^{P3} en basse fréquence d'après les expressions (2) et (3).

$$K_d^{P3} = 2\pi \frac{\Delta\omega}{\Delta M} \quad (2)$$

$$E_{kd}^{P3} = \frac{(1 - \mu^2)}{\phi_p} K_d^{P3} \quad (3)$$

Avec K_d^{P3} la raideur dynamique déterminée à partir des courbes de transfert, $\Delta\omega$ la variation de fréquence et ΔM variation de mobilité dans la plage 0-100 Hz, μ le coefficient de poisson (0,33) et ϕ_p le diamètre du pénétromètre.

2.2.3. Vitesse d'ondes

La vitesse des ondes de compression V_p^{P3} dans le sol est calculée par le biais des polaires de choc préconisées par (Aussedat, 1970). Pour chaque impact nous mesurons les pics des ondes descendantes et remontantes dans un espace de temps $t_0 + 2L_t/c_t$ où L_t est la longueur de tige et c_t la vitesse de propagation d'ondes dans l'acier. La valeur de la vitesse d'ondes de cisaillement V_s^{P3} est calculée d'après l'expression (4) en supposant la valeur de μ égale à 0,45 en compression dynamique.

$$V_s^{P3} = \sqrt{\frac{1-2\mu}{2(1-\mu)}} V_p^{P3} \quad (4)$$

A la fin d'un sondage réalisé au Grizzly 3®, les résultats obtenus pour chaque impact, et donc pour chaque courbe σ_p-s_p obtenue, sont présentés en fonction de la profondeur (z) sous forme de pénétrogrammes tel que présenté dans la Figure 4.

3. Campagne expérimentale in situ

Afin de montrer l'intérêt de cette nouvelle technique d'auscultation, nous avons réalisé des essais in situ, permettant de tester la sensibilité du système de battage à énergie variable et d'obtenir ainsi la courbe charge-enfoncement et son exploitation.

Dans ce cadre, nous avons eu la possibilité de réaliser des essais expérimentaux sur la commune de Cournon-d'Auvergne (63). L'intérêt de ce site pour notre étude est lié principalement aux caractéristiques géomécanique variables des sols rencontrés. En effet, des études géotechniques préalables ont révélé trois horizons géotechniques:

Formation « 1 » - Remblais et terre noires moyennement fermes (z = 0 - 3m)

Formation « 2 » - Colluvions argileuses, localement sableuses peu fermes (z = 3 - 11m)

Formation « 3 » - Marnes et marnes argileuses, compactes (z > 11m)

3.1. Sensibilité de l'énergie variable

Nous avons réalisé un sondage Grizzly 3® à énergie variable dont la profondeur d'investigation était d'environ 12 m. Au total, 829 mesures ont été acquises au cours du sondage dont l'énergie de battage a été ajustée automatiquement par l'ordinateur en fonction de la raideur du sol rencontré. Sur la Figure 3.a, on montre l'histogramme de fréquence du nombre d'impacts effectués selon les 4 niveaux d'énergies.

Il est possible de constater que la plupart des impacts ont été réalisés avec le niveau d'énergie le plus faible (658 impacts). Cela permet de remarquer la sensibilité du système de battage pour s'adapter aux conditions du terrain car sur la majorité du sondage la résistance de pointe est de l'ordre de quelques MPa (sols de faible portance). De même, la Figure 3.b permet de constater la finesse de l'acquisition des mesures en comparant les pénétrogrammes de la résistance de pointe dynamique du Grizzly à énergie variable à celui obtenu par un essai de pénétration dynamique DCP (Masse du mouton:20 kg , Hauteur de chute : 0,53m, Section pointe : 9,6 cm²). On peut également noter la bonne correspondance avec le pénétrogramme obtenu avec le DCP (dont qd a été calculé avec la formule des Hollandais).

3.2. Résultats Grizzly 3®

Les mesures acquises par la tête de mesure ont été enregistrées en continu. Pour chaque impact, nous avons calculé la courbe charge-enfoncement ainsi que les paramètres extraits de cette courbe.

Sur la Figure 4, on présente les résultats obtenus à l'aide du Grizzly 3® où on trace en fonction de la profondeur la résistance de pointe, le module de déformation, la vitesse d'onde de cisaillement et de compression. De même, une représentation graphique des divers horizons (couches de sols) est présentée à droite de la figure.

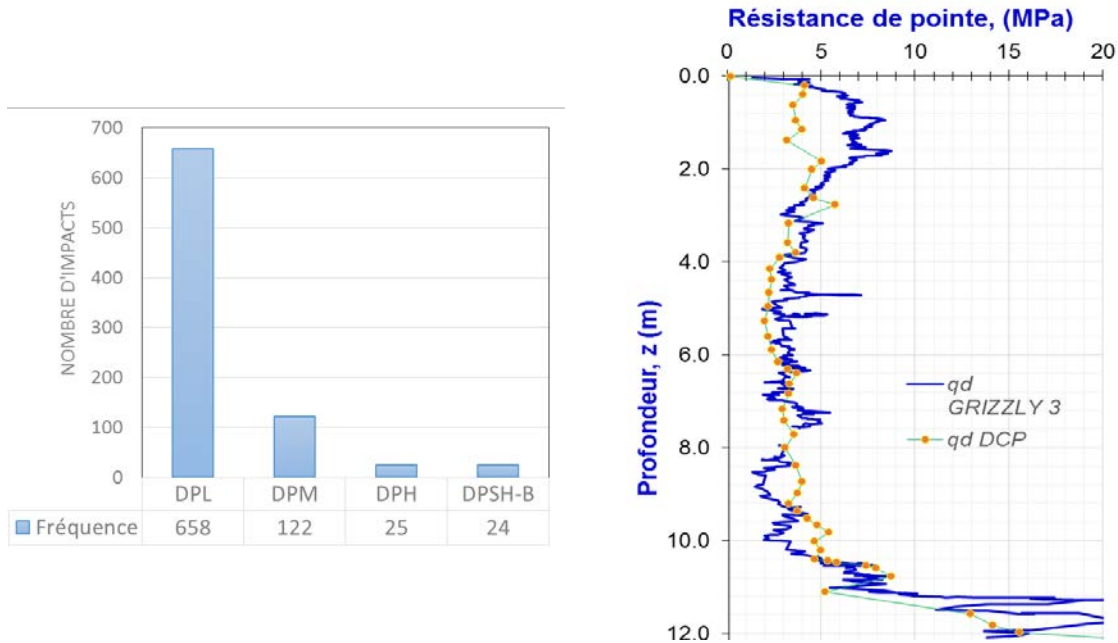


Figure 3 : (a) Histogramme de fréquence du nombre d'impacts effectués selon les 4 niveaux d'énergie et (b) comparatif des pénétrogrammes $q_d(z)$ Grizzly 3® à énergie variable et DCP.

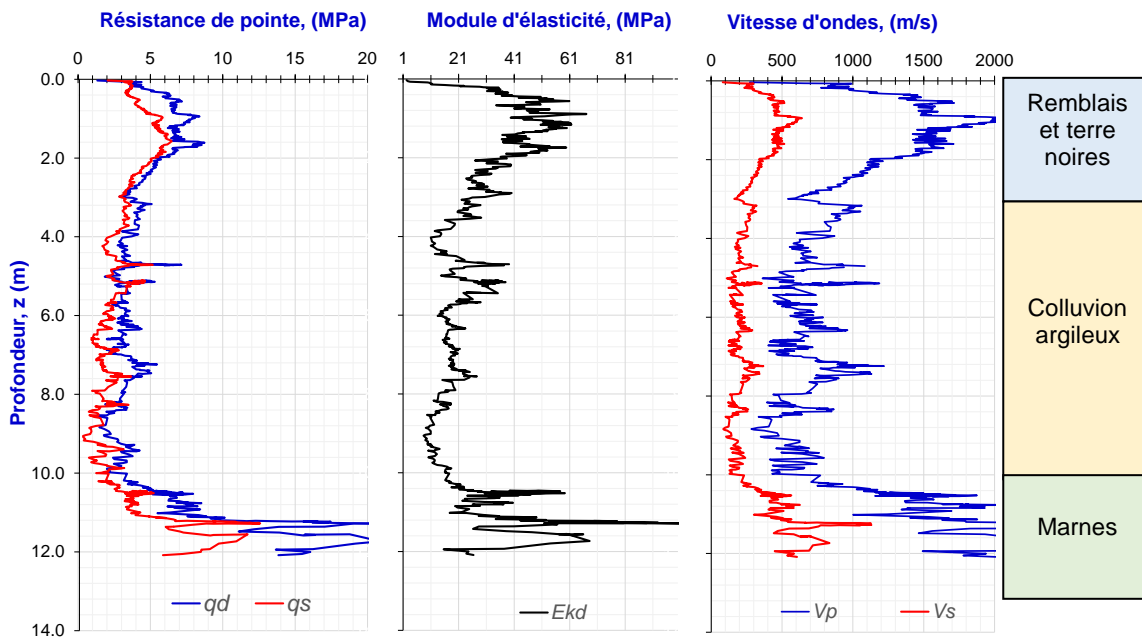


Figure 4 : Résultats du sondage Grizzly 3® à énergie variable – Site Cournon-d'Auvergne: (a) Résistance de pointe dynamique q_d et pseudo-statique q_s , (b) Module pénétrométrique E_{kd}^{P3} , (c) Vitesse d'ondes de cisaillement V_s^{P3} et de compression V_p^{P3}

La sensibilité des mesures obtenues en fonction du sol rencontré permet de confirmer les horizons de couches géotechniques obtenus lors de l'étude réalisée au préalable. Une synthèse de ces résultats est présentée pour chacun des horizons dans le tableau 2. Les résultats présentés correspondent aux valeurs moyennes pour chaque paramètre et pour chaque horizon.

Tableau 2. Synthèse des résultats obtenus in-situ. Site Cournon-d'Auvergne.

	Couche 1	Couche 2	Couche 3
Nature	Remblais et terre noires	Colluvions argileuses localement sableuses	Marnes et marnes argileuses
Profondeur, z (m)	(0,0 – 3,0)	(3,0 – 10,0)	(z > 10,0)
q_d (MPa)	6,0	3,4	8,3
q_s (MPa)	4,7	2,4	4,9
E_{kd}^{P3} (MPa)	38	19	57
V_s^{P3} (m/s)	408	209	491
V_p^{P3} (m/s)	1354	695	1629

4. Conclusions

Cet article a présenté un nouveau type de pénétromètre dynamique lourd intégrant deux aspects novateurs. Tout d'abord un système de battage à énergie variable s'adaptant automatiquement à la résistance du sol rencontré et permettant ainsi d'obtenir un plus grand échantillonnage de mesures notamment dans les sols de faible portance et une meilleure sensibilité du signal enregistré aux variations du sol. Par ailleurs, cet essai intègre une tête de battage équipée de capteurs permettant de mesurer la variation de déformation $\varepsilon(t)$ et d'accélération $a(t)$ entraînée par le passage de l'onde de compression créée par l'impact. Ce système permet d'obtenir une courbe charge-enfoncement dynamique (σ_p - s_p) du sol pour chaque impact du mouton. A partir de cette courbe, plusieurs paramètres caractéristiques du sol traversé peuvent être analysés et leur évolution en fonction de la profondeur mesurée.

Le présent travail a fait l'objet du dépôt des brevets WO 124426 du 29 Aout 2013 et EP 2963184 du 03 juillet 2015.

5. Références bibliographiques

- Arbaoui, Gourvès R., Bressolette Ph., Bodé L. (2006). Mesure de la déformabilité des sols in situ à l'aide d'un essai de chargement statique d'une pointe pénétrométrique, *Revue Canadienne de géotechnique* 43(4), pp. 355-369.
- Aussedat, G. (1970), *Sollicitations rapides des sols*, Phd Thesis, Faculté de sciences de l'Université de Grenoble, Grenoble, France.
- Benz Navarrete M. A. (2009). *Mesures dynamiques lors du battage du pénétromètre Panda 2*. Thèse de doctorat de l'Université Blaise Pascal, Clermont-Ferrand.
- Benz Navarrete M.A., Gourvès R., Escobar E., Breul P., Haddani Y., Belien A., Chabanat D. (2012). Le Grizzly 2® - Automatisation des pénétromètres dynamiques et mesures d'énergie lors du battage, In *Proceedings of Journées Nationales de Géotechnique et de Géologie de l'ingénieur*, Bordeaux, France, pp 157-164.
- Benz-Navarrete M.A., Gourvès R., Escobar E., Haddani Y., Calon N., Costa D'Aguiar S. et Robinet A. (2014). Détermination de la raideur dynamique des plateformes ferroviaires à l'aide de l'essai pénétrométrique Panda 3®, 2ème Symposium International en Géotechnique Ferroviaire, Marne la Vallée, France.

- Escobar E. (2015). Mise au point et exploitation d'une nouvelle technique pour la reconnaissance des sols : le Panda 3. Thèse de doctorat de l'Université Blaise Pascal, Clermont-Ferrand.
- Gourvès R. (1991). Le PANDA – pénétromètre dynamique léger à énergie variable LERMES CUST, Université Blaise Pascal, Clermont-Ferrand, France.
- Norme ISO 22476-2 (2005). Reconnaissance et essais géotechniques -- Essais en place -
- Partie 2 : Essais de pénétration dynamique. Norme européenne.
- Paquet J.(1968). Etude vibratoire des pieux en béton, réponse harmonique et impulsionnelle. Application au contrôle. Annales de l'ITBTP, n°245.
- Smith, E. (1960). Pile driving analysis by wave equation. Soil Mech. ASCE. Paper No. 3306, Volume 127, Partie I, pp 1145-1193.