

RECONNAISSANCE DYNAMIQUE DES SITES FERROVIAIRES A L'AIDE DU PENETROMETRE PANDA 3®

DYNAMIC RAILWAY SITES CHARACTERIZATION USING A PANDA 3® PENETROMETER

Esteban ESCOBAR¹, Miguel Angel BENZ¹, Younes HADDANI¹, Francisco LAMAS-LOPEZ², Nicolas CALON³, Sofia COSTA D'AGUIAR²

1 Sol-Solution, Pôle Innovation, Riom, France.

2 Direction de l'innovation et de la recherche - SNCF, Paris, France.

3 Direction de l'ingénierie - SNCF, Paris, France.

RÉSUMÉ — Dans cet article on présente le Panda 3®, il s'agit d'un pénétromètre dynamique instrumenté qui permet de fournir une information plus riche du comportement à la rupture et la déformation du sol. Des nombreux essais ont été réalisés montrant la faisabilité et la validité des résultats obtenus. Toutefois, très peu de tests ont été réalisés dans des conditions réelles permettant de valider son utilisation dans le contexte d'une problématique dynamique. C'est dans ce cadre que deux campagnes d'essais in-situ ont été réalisées sur deux sites ferroviaires. L'objectif est de valider la faisabilité des essais réalisés avec le nouveau pénétromètre Panda 3® et de comparer les résultats avec ceux obtenus par d'autres essais. Les résultats obtenus mettent en évidence la faisabilité d'un tel essai. De même, ceux-ci sont bien corrélés avec les résultats obtenus par le biais d'autres techniques. Cela permettra dans l'avenir d'améliorer la caractérisation géomécanique des premiers mètres sous la voie.

Mots-clefs — Pénétromètre dynamique, Panda 3®, propagation d'ondes, vitesse d'ondes, courbe charge-enfoncement.

ABSTRACT — In this paper we present the Panda 3®, the instrumented dynamic penetrometer which allows us to provide complete information of soil behavior at failure as well as its deformation. Numerous tests have been carried out showing the feasibility and validity of the results. However, very few tests were carried out in situ to validate its use in the context of a dynamic problem. That is why two in-situ testing campaigns were carried out on two railway sites. Their objective is to validate the feasibility of the new Panda 3® penetrometer tests and compare the results with those obtained with other investigation techniques. The obtained results demonstrate the feasibility of such a test. These tests are well correlated with the results obtained with other techniques. This will allow to improve in the future the characterization of the first meters under the railway track.

Keywords — Dynamic penetrometer, Panda 3®, wave propagation, wave velocity, load-penetration curve.

1. Introduction

La caractérisation dynamique des voies ferrées constitue un enjeu majeur. D'une part, en amont dans le cadre des reconnaissances géotechniques préalables à la conception de nouvelles voies et d'autre part dans le cadre de leur maintenance. Dans ce contexte, l'essai au pénétromètre dynamique est un outil très intéressant pour l'étude du comportement dynamique des sols. Toutefois, ces appareils ne permettent d'obtenir qu'une information sur le sol, la résistance de pointe q_d ; de même la compréhension du mécanisme de pénétration fait encore l'objet de nombreuses études (Rahim et al., 2004).

Néanmoins, des efforts de recherche importants ont été réalisés rendant possible le développement d'une nouvelle génération de pénétromètres dynamiques, le Panda 3® (Benz et al., 2011). Il s'agit d'un pénétromètre dynamique équipé de différents capteurs permettant de déterminer d'une part la résistance de pointe q_d et d'autre part des paramètres supplémentaires gouvernant le comportement mécanique du sol lors de l'enfoncement de la pointe, tels que le module de déformation dynamique notée $EdP3$, la vitesse des ondes notée $CpP3$ et $CsP3$. Des nombreux essais ont été réalisés montrant la faisabilité et la validité des résultats obtenus (Benz et al., 2013). Toutefois, très peu de tests ont été réalisés dans des conditions réelles permettant de valider son utilisation dans le contexte d'une problématique dynamique. C'est dans ce cadre que deux campagnes d'essais in-situ ont été réalisées sur deux sites ferroviaires. L'objectif était de valider la faisabilité d'un tel essai mais aussi de comparer les résultats obtenus avec ceux obtenus par le biais d'autres techniques de caractérisation (essais géophysiques, géotechniques...). Dans cet article on présente le nouveau pénétromètre Panda 3® ainsi que les résultats obtenus lors de ces campagnes d'essais sur voies ferrées.

2. Le Panda 3®

Il a été conçu sur la base du pénétromètre Panda® (Gourvès, 1991). Le principe de l'essai est très simple (figure 1) : au cours du battage, on vient mesurer dans la tige 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, sous condition de découpler les ondes descendantes et remontantes ε_d et ε_r on calcule l'enfoncement $sp(t)$ et la force $F_p(t)$ résultante en pointe lors de l'enfoncement du cône. En faisant certaines hypothèses simplificatrices, il est possible de tracer la courbe charge-enfoncement dynamique (σ_p - sp) pour chaque impact du marteau. Une méthodologie analytique d'exploitation de cette courbe permet de déterminer différents paramètres du sol tels que : la résistance à la pénétration (q_d), le module de déformation dynamique ($EdP3$), la vitesse d'ondes de compression et de cisaillement dans le sol ($CpP3$ et $CsP3$) (Benz, 2009).

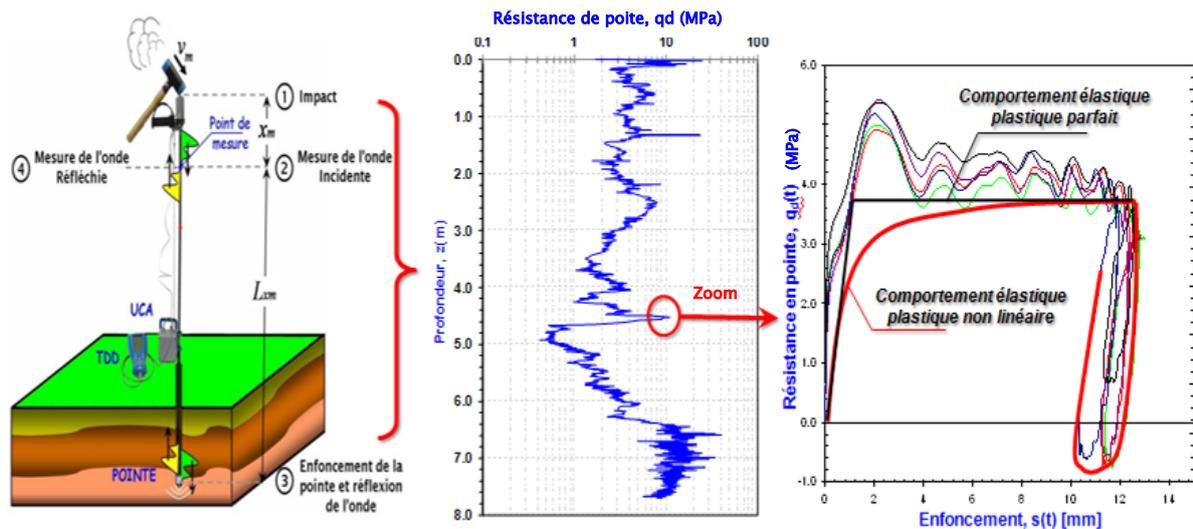


Figure 1 - Principe du Panda 3®, (a) propagation d'ondes, (b) pénétrogramme de résistance et (c) courbe charge-enfoncement en pointe.

A la fin d'un sondage réalisé au Panda 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 pénétrogramme tel que présenté dans la figure 3.

3. Campagne expérimentale

3.1. Site Vernouillet

Le site se situe au niveau de la gare de triage sur la commune de Vernouillet au nord ouest de Paris dans le département des Yvelines. La zone d'étude est limitée au Nord par l'étang du Gallardon et se trouve à proximité de la Seine (figure 2). La gare de triage est composée d'une vingtaine de voies et nous avons travaillé plus précisément sur la zone 2 de la voie 32 (V32) (figure 2.a). Des travaux préalables ont été exécutés sur la V32 dans le cadre du projet Rufex où différents sondages de reconnaissance géotechnique et géophysique ont été réalisés dans deux zones le long de la voie (pénétrètres, identification visuelle, MASW, Cross-Hole...).

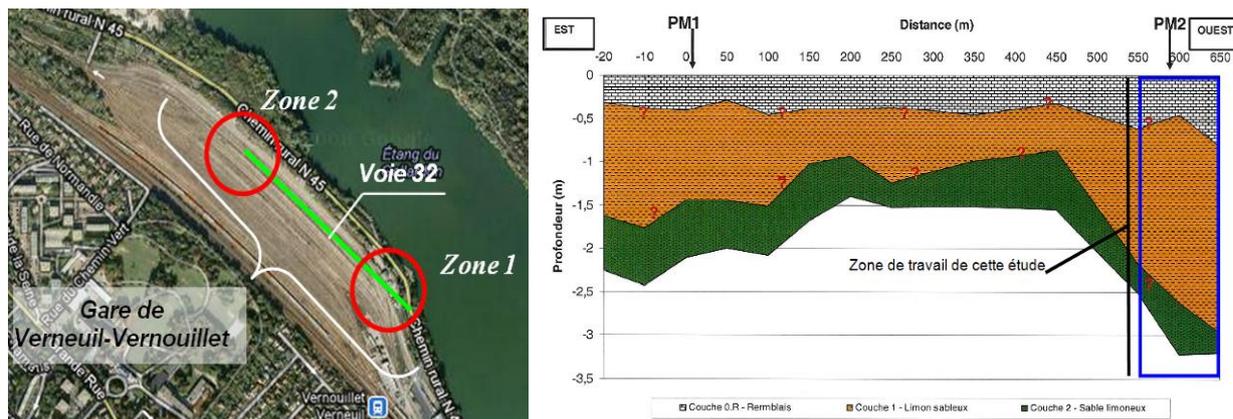


Figure 2. (a) le site d'étude – Gare de triage à Vernouillet V32 (c.f. Google earth) (b). Coupe géologique sous la V32 et tronçon étudié (en bleu)

Quant aux caractéristiques géotechniques du site, des essais de pénétration dynamique type Panda® et des essais à la mini-pelle (identification visuelle et prise d'échantillons) ont été effectués. L'analyse des pénétrogrammes couplée aux résultats de l'identification visuelle des fouilles a permis d'identifier trois horizons entre 0 à 3,5m de profondeur. La nature de ceux-ci et leur résistance moyenne à la pénétration (q_d) sont présentées dans le tableau 1. La coupe géologique du sol sous la voie ainsi que le tronçon étudié sont présentés dans la figure 2.b.

Tableau 1 - Synthèse des caractéristiques des couches de sol identifiées sur la V32

	Couche 0.R	Couche 1	Couche 2
Epaisseur (m)	0,29 à 0,82	0,54 à 2,52	> 2,52
Nature	Grave sableuse	Limon-sableux	Sable graveleux
Dmax (mm)	40	4	30
< 80µm (%)	-	72	18
VBS / IP	-	1,38	0,71
Classe GTR	D1	A1	B5
Résistance moy, q_d (MPa)	7	4	16

Quant aux essais réalisés, au total trois sondages Panda 3® ont été menés jusqu'au refus en atteignant 3,6m, 3,6m et 3,4m de profondeur. En même temps et dans les mêmes endroits, trois essais au Panda 2® ont été réalisés. Les résultats sont présentés dans ce qui suit.

3.1.1. Résultats

Les résultats obtenus lors de cette campagne sont présentés sous forme de pénétrogramme. Dans la figure 3 on présente un exemple de résultat. On obtient ainsi les profils de résistance de pointe q_d , du poids volumique sec g_s , de vitesses d'ondes C_pP3 et C_sP3 et du module pénétrométrique $EdP3$. En ce qui concerne le pénétrogramme de résistance de pointe, pour chaque sondage nous avons confronté

les résultats obtenus à l'aide du Panda 3® avec ceux obtenus avec le Panda 2®. Il est possible de constater que les résultats sont très proches et très bien corrélés. Par ailleurs nous avons calculé la variation du poids volumique sec γ_d . Pour ce faire nous avons pris en compte les relations proposées par (Chaigneau, 2001) pour :

$$\text{- grave sableuse (D1)} \quad \gamma_d = 0,74 * Ln(qd) + 15,44 \quad (1)$$

$$\text{- limon sableux (A1m)} \quad \gamma_d = 1,72 * Ln(qd) + 14,50 \quad (2)$$

$$\text{- sable graveleux (B5m)} \quad \gamma_d = 1,73 * Ln(qd) + 16,10 \quad (3)$$

Par ailleurs, nous avons confronté les résultats obtenus en termes de vitesses de propagation d'onde de cisaillement $CsP3$ du Panda 3® à ceux estimés à partir de la corrélation proposée par (Mayne et al. ,2007) et adaptées au cas du Panda. Pour ce faire nous avons considéré que la résistance de pointe dynamique qd est égale à la résistance de pointe statique qc (Vachon, 1998) et que le frottement latéral (fs) était négligeable (rapport $fs/qd < 5\%$). Cela a été validé conforme à la Norme XP P 94-105.

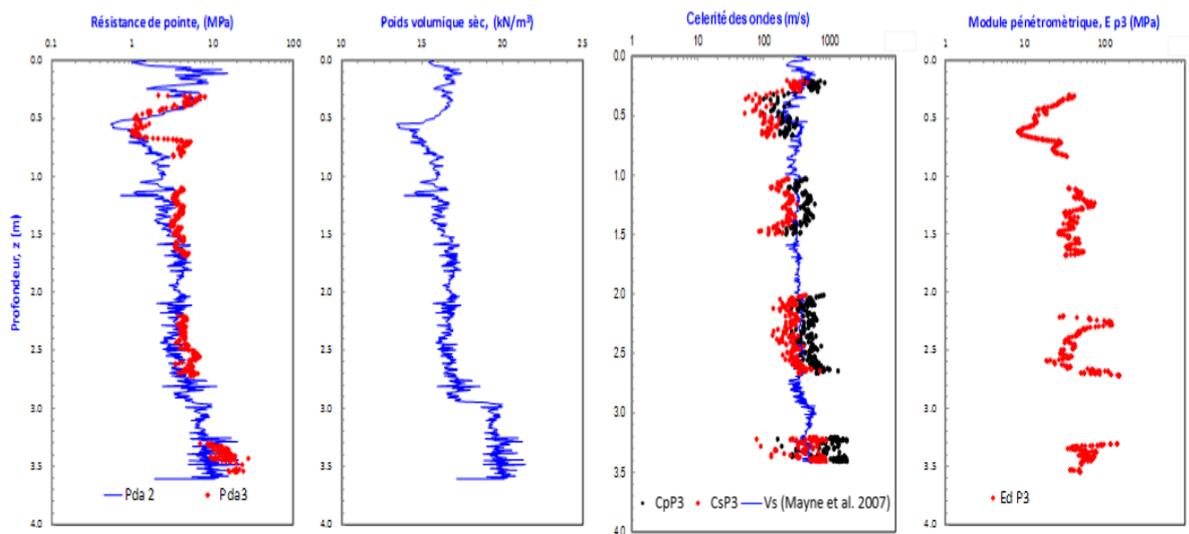


Figure 3. Résultats Panda 3® obtenus sous voie ferrée. Sondage n°3 (Vernouillet)

$$Vs = (10,1 * Log(qc) - 11,47)^{1,67} (100 fs / qd)^{0,3} \quad (4)$$

A partir du pénétrogramme de vitesse d'ondes de cisaillement présenté dans la figure 4 on peut constater la bonne correspondance des valeurs obtenues à l'aide du Panda 3® par rapport à celles estimés par la corrélation proposée (équation 4). Par ailleurs, nous avons confronté les résultats obtenus en termes de vitesse de propagation d'ondes Vs aux résultats MASW obtenus lors des campagnes de reconnaissance géotechnique/géophysique réalisés au préalable sur la voie. Dans la figure 4 on présente les cartographies de vitesse d'onde obtenues avec la méthode MASW et celle calculées à l'aide du logiciel Surfer8 à partir des sondages Panda 3®.

De manière générale, on peut constater qu'il existe une bonne correspondance entre les valeurs obtenues à partir de chaque méthode.

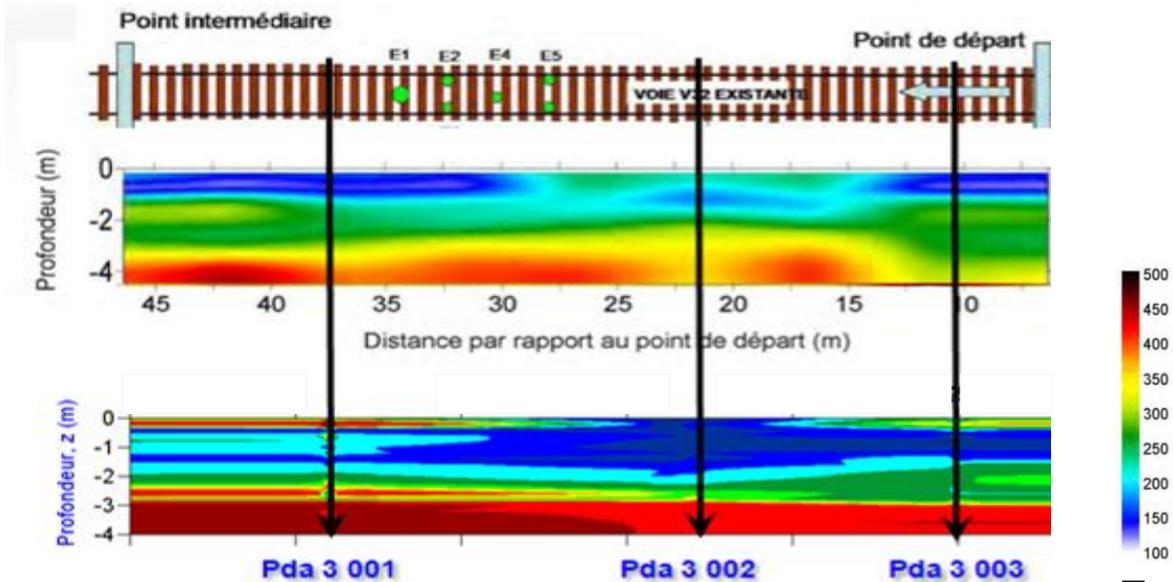


Figure 4. Cartographies de vitesse d'ondes de cisaillement estimées à partir des campagnes géophysiques MASW et Panda 3®

Les valeurs obtenues à partir de chaque sondage au Panda 3® sont récapitulées en fonction des trois horizons identifiés dans le tableau 2 ci-après. De manière générale, les valeurs de vitesse de propagation d'ondes (C_{sP3}) et du module pénétrométrique (E_{dP3}) sont en accord avec ceux annoncés dans la littérature pour le type de sol ausculté (Shahrour et al. , 2005; Arbaoui, 2003).

Tableau 2 - Synthèse des résultats Panda 3®

	Couche 0.R	Couche 1	Couche 2
Epaisseur (m)	0,55m à 0,93m	2,20m	> 1,00m
Nature	Grave sableuse	Limon sableux	Sable graveleux
Résistance qd (MPa)	4,4	3,8	11,3
Poids volumique sec (kN/m ³)	16,41	16,51	19,91
Vitesse C_{pP3} (m/s)	668	492	1626
Vitesse C_{sP3} (m/s)	321	236	792
Module, E_{dP3} (MPa)	29	40	41

3.2. Site Vierzon

Ce site fait partie du tracé de la ligne Aubrais-Orléans à Montauban-Ville-Bourbon. Le tronçon étudié concerne la zone comprise entre les Pk 187+150 au Pk 187+180, au niveau de l'aire de service de Salbris-Theillay/Salbris la Loge sur l'autoroute A71 (E9), proche des villes de Salbris et du Theillay. Le site est relativement plat et il se trouve dans une zone de déblai. Le tronçon étudié est composé des deux voies, V1

et V2. Les essais ont été effectués sur l'axe de chaque voie ainsi que sur les pistes d'un côté et de l'autre.



Figure 5. Campagne d'essais réalisés, sondages : a) pénétrométriques Panda 3®, b) géoendoscopiques, c) MASW et d) plaque dynamique sur la ligne Aubrais - Orléans.

Lors de cette campagne nous avons réalisé principalement des essais Panda 2® et Panda 3®. Des essais de caractérisation sismique MASW, des essais d'identification visuelle (géoendoscopie) et des essais à la plaque dynamique légère ont été également réalisés (figure 5). Chaque sondage a respecté les procédures suivantes :

- Essais MASW : 4 profils de profondeur d'investigation maximale 15m. Longueur du dispositif 54m et 1,2m d'espacement entre les géophones.
- Essais pénétrométriques Panda 2® : 31 sondages pénétrométriques sur différents profils espacés les uns des autres de 5m. Dix essais sur la piste, dont la profondeur moyenne d'investigation était de 3,8m.
- Essais géoendoscopiques : 12 essais ont été réalisés, la profondeur maximale d'investigation était de 1,4m.
- Essais pénétrométriques Panda 3® : 3 sondages pénétrométriques ont été menés jusqu'au refus sur la piste et 1 sondage a été réalisé sur l'axe de la voie 2.
- Essais à la plaque dynamique légère : 24 essais ont été réalisés. 12 essais sur la piste et 12 essais sur l'axe des voies.

3.2.1. Résultats

Les résultats obtenus après interprétation et couplage de l'ensemble des méthodes employées sont synthétisés dans le tableau 3.

Tableau 3 – Synthèse des résultats de l'étude

	Couche 1	Couche 2	Couche 3	Couche 4	Couche 5
Nature	Ballast sain	Ballast Pollué	Couche Intermédiaire	Sous couche	Plateforme
Cote	0,0– 0,30m	0,30–0,41m	0,41-0,52m	0,52-1,40m	>1,40m
qd (MPa)	15	38	51	56	18
Vs (m/s)	-	244	256		
Evd (MPa)	47	-	-	-	-
Ev2 (MPa)	102	-	-	-	-
CBR(%)	11	-	-	-	-
Résultats Panda 3®					
qdP3 (MPa)	12	32	55	61	17
Cp (m/s)	1778	1411	1185	1415	1079
Cs (m/s)	373	296	249	298	227
EdP3 (MPa)	53	35	71	78	33

En ce qui concerne les couches sous la voie, il est possible d'identifier une première couche assez compacte ($q_d > 40 \text{ MPa}$) entre les cotes 0,40m et 1,40m. Au-delà, on retrouve le terrain naturel (sol support en plateforme) pour lequel les résistances de pointe q_d sont de l'ordre de 10MPa voire 20MPa.

Quant aux résultats obtenus avec le Panda 3®, nous avons réalisé quatre essais. Néanmoins, les contraintes techniques (champ électromagnétique) et le temps d'intervention sur la voie ne nous ont permis la réalisation que d'un seul essai dans les conditions souhaitées. L'essai en question a été réalisé dans l'axe de la voie 2 jusqu'à une profondeur de 1,86m par rapport au plan de roulement (figure 6).

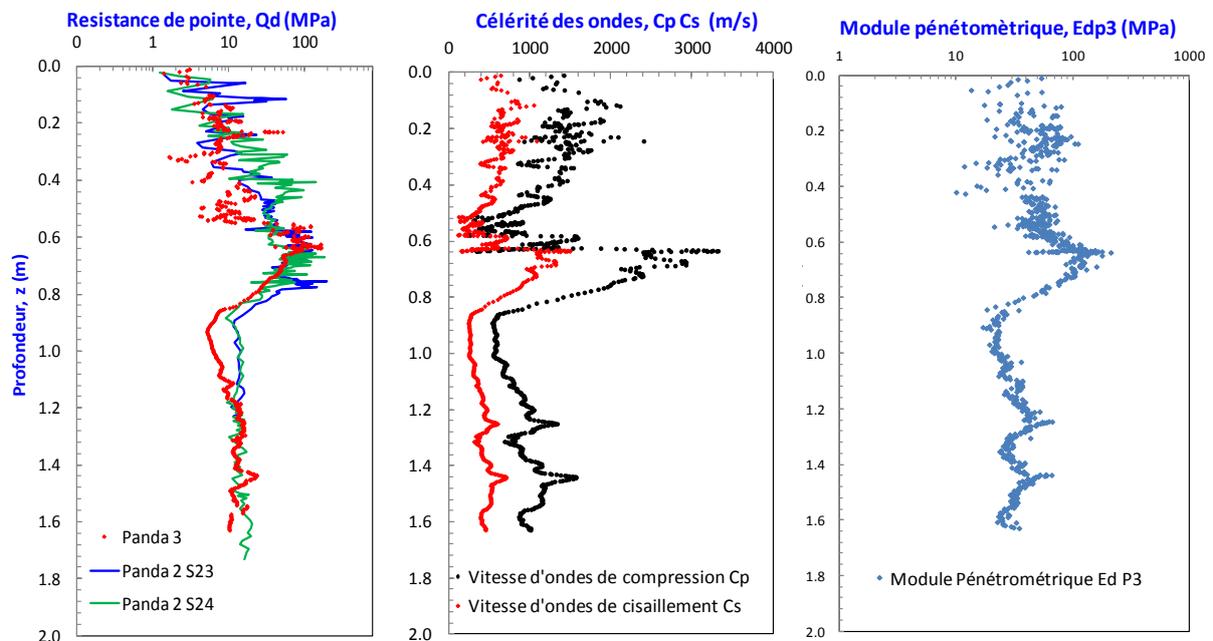


Figure 6. Résultats Panda 3®, Voie 2 : Résistance de pointe q_d , vitesses $CsP3$ et

CpP3 et module EdP3.

Une synthèse des résultats obtenus avec le Panda 3®, pour chaque couche identifiée, est présentée dans le tableau 3.

En ce qui concerne la valeur de résistance de pointe q_d , on peut remarquer qu'il existe une bonne concordance avec les résultats obtenus avec le Panda 2®.

4. Corrélation C_s (Panda 3®) - V_s (MASW)

Afin de valider les résultats obtenus, il nous a semblé intéressant d'étudier dans quelle mesure les valeurs des vitesses d'ondes obtenues par ces deux techniques, Panda 3® et MASW, sont corrélables. Pour ce faire, nous avons analysé les résultats obtenus lors des campagnes de caractérisation.

Toutefois, compte tenu de la résolution (pas d'échantillonnage) que fournit chaque méthode, nous avons réalisé un lissage par fenêtre glissante sur le pénétrogramme du Panda 3® afin de corréler les résultats avec la méthode MASW. Les résultats obtenus montrent qu'il existe une très bonne corrélation entre ces deux techniques, ceci est confirmé par la régression linéaire qu'on propose (figure 7). Cependant, il convient d'avoir encore plus d'expérimentations pour les valider et les confirmer dans un intervalle plus large.

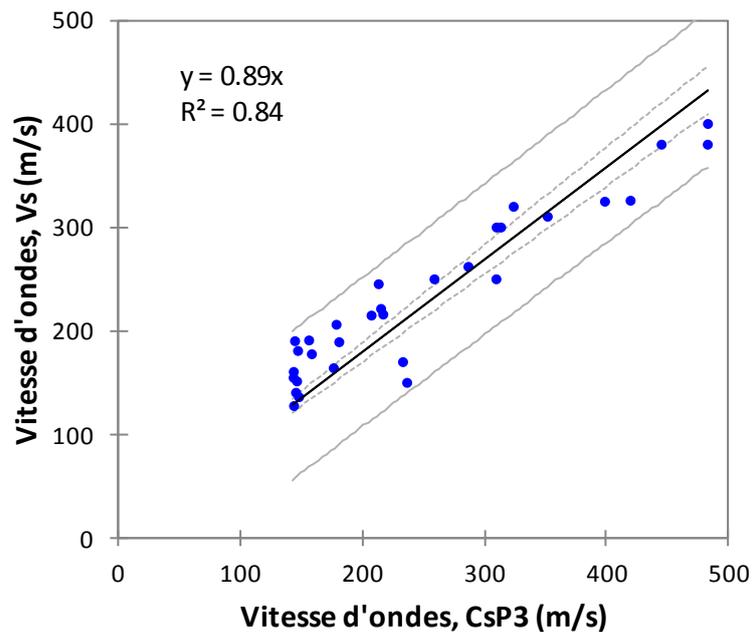


Figure 7. Corrélation V_s (MASW) et C_s (Panda 3®) – Sites Vernouillet et Vierzon

5. Conclusion

L'essai au pénétromètre dynamique bien que largement utilisé à travers le monde souffrait du peu de développements réalisés pour permettre d'améliorer la qualité des mesures effectuées et enrichir son exploitation. Cet article a présenté les développements récents réalisés sur le pénétromètre Panda 3®, qui permettent à

partir de la mesure et du découplage des ondes créées par l'impact sur l'appareil, d'obtenir pour chaque coup une courbe charge-enfoncement σ_p - s_p du sol testé. L'exploitation de cette courbe permet de déterminer des paramètres de résistance (résistance de pointe), de déformation (module dynamique) et de vitesse d'ondes des sols auscultés en fonction de la profondeur tout au long du sondage.

Les résultats obtenus mettent en évidence la faisabilité et la répétabilité du Panda 3® et montrent qu'il existe une bonne corrélation entre les paramètres obtenus et ceux issus d'autres techniques de caractérisation géotechnique.

L'ensemble des essais réalisés dans ces deux campagnes a permis de bien caractériser les différents horizons présents sur les premiers mètres sous la voie. Chaque méthode présente des avantages et des inconvénients. Toutefois, le couplage de l'information obtenue par chaque méthode permet d'améliorer considérablement la caractérisation géotechnique du milieu traversé.

Références bibliographiques

Arbaoui H. (2003). Mesure de la déformabilité des sols en place avec un Pénétrömètre, Thèse de doctorat, Université Blaise Pascal Clermont-Ferrand, France.

Aussedat G. (1970). Sollicitations rapides des sols, Thèse doctorale, Faculté de sciences de l'Université de Grenoble, France.

Benz M., Gourvès R., Haddani Y. (2011). Détermination de paramètres dynamiques du sol lors du battage pénétrométrique par découplage d'ondes, 8ème Colloque National AFPS, 1129-1138.

Benz M. (2009), Mesures dynamiques lors du battage du pénétromètre Panda 2®, Thèse de l'Université Blaise Pascal, Clermont-Ferrand, France.

Benz M., Escobar E., Gourvès R., Haddani Y., Breul P., Bacconnet C. (2013). Mesures dynamiques lors du battage pénétrométrique – Détermination de la courbe charge-enfoncement dynamique en pointe, in Proceedings of the 18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Paris, France, 409-503.

Chaigneau L. (2001). Caractérisation des milieux granulaires de surface à l'aide d'un pénétromètre. Thèse de l'Université Blaise Pascal, Clermont-Ferrand, France.

Gourvès R. (1991). Le PANDA – pénétromètre dynamique léger à énergie variable LERMES CUST, Université Blaise Pascal, Clermont-Ferrand, France.

Mayne P.W. (2007). Cone Penetration Testing State-of-Practice, NCHRP Project 20-05; Task 37-14, Synthesis on Cone Penetration Test, Atlanta, USA.

Rahim, A., Prasad, S. and George, K. (2004). Dynamic Cone Penetration Resistance of Soils — Theory and Evaluation, Geotechnical Engineering for Transportation Projects: pp. 1755-1766.

Shahrour I., Gourvès R. (2005). Reconnaissance des terrains in situ. 1 vols. Traité MIM. Série Géomatériaux, Ed. Hermes-Lavoisier. 192p.

Vachon C. (1998). The development and use of the PANDA in the United States, Mémoire d'ingénieur CUST, Clermont-Ferrand, France.