

DÉTERMINATION DU MODULE DYNAMIQUE À PARTIR DU PANDA3® ET L'ANALYSE SPECTRALE DES SIGNAUX

DETERMINATION OF SOIL'S DYNAMIC STIFFNESS TROUGH PANDA 3® AND SPECTRUM SIGNAL PROCESSING

Quoc Anh TRAN, Miguel Angel BENZ NAVARRETE & Marta GUARDEÑO GARCIA
Sol Solution, Service Recherche et Innovation, Riom, France.

RÉSUMÉ – Le Panda3® est un pénétromètre dynamique à énergie variable, basé sur la théorie de la propagation d'ondes et permet d'obtenir pendant l'essai et pour chaque impact, la courbe charge enfoncement en pointe. Nous présenterons dans cet article une nouvelle approche permettant de déterminer le module dynamique $E_{kd}(f)$ du sol traversé en fonction de la fréquence à partir des signaux mesurés par Panda 3®.

ABSTRACT – In this paper, we will present the lightweight dynamic cone penetration test Panda3®. The exploitation of Panda 3®'s signals provides us many information not only on dynamic tip resistance but also on additional mechanical parameters involved during the driving of the tip, especially the tip's load displacement curve. The aim of this article is to determine the soil modulus E_{kd} in frequency domain trough transfer function.

1. Introduction

L'essai de pénétration est largement répandu dans le monde et très utilisé pour la caractérisation des sols in-situ. Il en existe de différents types : statiques, dynamiques ... Dans tous les cas, la résistance de pointe est le seul paramètre qui peut être mesuré avec ce genre d'appareils. Au début des années 90 nous avons assisté en France au développement du pénétromètre Panda® ([Gourvès, 1991](#)), seul pénétromètre dynamique à énergie variable équipé de capteurs permettant d'enregistrer automatiquement le battage lors de l'essai. Très employé en France pour le contrôle de compactage d'ouvrages en terre, à l'étranger il est principalement utilisé pour la reconnaissance et la caractérisation de sols. Plus de 3000 appareils existent aujourd'hui dans plus de 80 pays.

Plus récemment, et c'est en bénéficiant des dernières évolutions technologiques, nous assistons au développement de la 3^{ème} génération du Panda®, Le Panda 3®. Bien que le principe de l'appareil reste fondamentalement le même, il s'agit ici d'un appareil permettant d'une part d'obtenir la résistance de pointe du sol ausculté et d'autre part de déterminer, par analyse et traitement des signaux enregistrés lors du battage, des paramètres supplémentaires gouvernant le comportement en déformation du sol mis en jeu lors de l'enfoncement du cône, traduit par la courbe charge-enfoncement du sol en pointe ([Benz, 2009](#)). L'exploitation de cette courbe permet de déterminer des paramètres de résistance et de déformation tels que la résistance dynamique et pseudo-statique, le module pénétrométrique, la vitesse d'ondes de compression et cisaillement, ainsi qu'un coefficient d'amortissement du sol...

Les travaux réalisés récemment par ([Benz, et al., 2014](#) ; [Escobar, et al., 2016](#) ; [Tran, et al., 2017](#)) montrent que l'application de l'analyse spectral (Frequency Response Fonctions, FRF) des signaux en pointe s'avère très puissant pour l'exploitation du Panda 3®. Bien que les FRF soient très utilisés pour le contrôle non destructif de structures de génie civil, de fondations et notamment de pieux ([Calvente, et al., 2015](#)), cette méthode n'a jamais été utilisée pour la caractérisation géotechnique et encore moins appliquée à l'essai de pénétration dynamique. Nous proposons dans cet article une nouvelle approche permettant de déterminer le module dynamique E_{kd} du sol traversé en fonction de la fréquence pour la gamme 0-100hz. Notre approche sera évaluée par le biais des essais

au laboratoire, mais aussi par le biais d'une campagne d'essais in-situ où des essais au pressiomètre ont également été réalisés. On comparatifs des résultats obtenus avec chaque essais est également présenté à la fin.

2. Panda 3® - Principe & méthodologie de la détermination du module dynamique

Le Panda 3® est une innovation majeure en ce qui concerne la vieille et très répandue technique d'auscultation de sols à l'aide du pénétromètre dynamique (Sol Solution, 2017). Le principe de l'essai est : au cours du battage, on vient mesurer dans la tige, au voisinage de l'enclume, la variation de déformation $\varepsilon(t)$ et d'accélération $a(t)$ entraînée par l'onde créée par l'impact. Quand le marteau heurte l'enclume du pénétromètre, une onde de compression $u(x,t)$ est créée dans les tiges se propageant à vitesse c_t en direction de la pointe. Lorsque l'onde $u(x,t)$ arrive à l'interface pointe/sol, une partie de celle-ci est utilisée pour faire pénétrer la pointe dans le sol. L'autre partie est réfléchiée dans les tiges vers la surface. Des cycles aller-retour au sein de tiges se poursuivent jusqu'à ce que l'énergie dans les ondes ne soit plus suffisante pour pénétrer dans le sol. Le phénomène de propagation de l'onde $u(x,t)$ dans les tiges d'un pénétromètre battu est décrit par l'équation de l'onde ou « *wave equation* » (Eq.1). Pendant son voyage au sein des tiges, le passage de l'onde $u(x,t)$ entraîne en tout point x le long des tiges une variation de déformation $\varepsilon(x,t)$ et vitesse $v(x,t)$ représentées par la superposition des deux ondes élémentaires. Une des solutions la plus utilisée est celle obtenue par le biais de la méthode des caractéristiques (Eq.2), représentée par la superposition de deux ondes élémentaires, u_d et u_r ; respectivement les ondes descendantes et remontantes.

$$\frac{\partial^2 u(x,t)}{\partial t^2} = c_t^2 \frac{\partial^2 u(x,t)}{\partial x^2} \quad (1)$$

$$u(x,t) = u_d(x - c_t t) + u_r(x + c_t t) \quad (2)$$

Si ces ondes, descendantes et remontantes, sont connues à un point donné des tiges, il est possible de calculer les grandeurs dynamiques (*force, accélération, vitesse...*) en tout point x des tiges. La séparation d'ondes se propageant longitudinalement au sein d'un milieu élastique et homogène peut se faire selon différentes approches (Bussac, et al., 2001). En considérant une tige de longueur L_t on peut écrire en termes de leur transformé de Fourier, la contrainte $\sigma(x,t)$, la déformation $\varepsilon(x,t)$, la vitesse $v(x,t)$ et le déplacement $u(x,t)$ dans un point de mesure x tel que:

$$\tilde{u}(x, \omega) = A(\omega)e^{-i\varepsilon(\omega)x} + B(\omega)e^{i\varepsilon(\omega)x} \quad (3)$$

$$\tilde{\sigma}(x, \omega) = E^*(\omega) \left(A(\omega)e^{-i\varepsilon(\omega)x} + B(\omega)e^{i\varepsilon(\omega)x} \right) \quad (4)$$

$$\tilde{v}(x, \omega) = -\omega \left(A(\omega)e^{-i\varepsilon(\omega)x} - B(\omega)e^{i\varepsilon(\omega)x} \right) / \xi(\omega) \quad (5)$$

$$\tilde{u}(x, \omega) = -i \left(A(\omega)e^{-i\varepsilon(\omega)x} - B(\omega)e^{i\varepsilon(\omega)x} \right) / \xi(\omega) \quad (6)$$

$A(\omega)$ et $B(\omega)$ sont les composantes de Fourier des ondes descendantes et remontantes, $E^*(\omega)$ le module de Young complexe et $\xi(\omega) = k(\omega) + i(\omega)$ le numéro d'onde. On peut noter que l'ensemble de grandeurs dynamiques peut être obtenu si les valeurs suivants sont connues : $E^*(\omega)$, $\xi(\omega)$, $A(\omega)$ et $B(\omega)$. $E^*(\omega)$ et $\xi(\omega)$, étant déterminés seulement par les propriétés géométriques et matérielles des tiges, le découplage des ondes consiste donc à déterminer les valeurs des composantes $A(\omega)$ et $B(\omega)$.

2.1. Détermination & reconstruction d'ondes dans la pointe du pénétromètre

La technique de reconstruction d'ondes consiste à calculer, à partir du découplage, les signaux de force $F_N(t)$ et de vitesse $v_N(t)$ en chaque point de changement d'impédance le

long des tiges, notamment au niveau de la pointe, par l'intermédiaire des expressions suivantes (Lundberg & Henchoz, 1977; Bussac, et al., 2001 ; Tran, et al., 2017) :

$$\tilde{F}_N(x_n, \omega) = A(\omega)e^{-i\frac{\omega}{c_t}x_n} + B(\omega)e^{i\frac{\omega}{c_t}x_n} \quad (7)$$

$$\tilde{v}_N(x_n, \omega) = \frac{1}{Z_n} \left(A(\omega)e^{-i\frac{\omega}{c_t}x_n} - B(\omega)e^{i\frac{\omega}{c_t}x_n} \right) \quad (8)$$

$$\tilde{u}_N(x_n, \omega) = \frac{i\omega}{Z_n} \left(A(\omega)e^{-i\frac{\omega}{c_t}x_n} - B(\omega)e^{i\frac{\omega}{c_t}x_n} \right) \quad (9)$$

Avec x_N la distance entre le point $n-1$ et la section n considérée, c_t la vitesse de propagation d'ondes et Z_n l'impédance mécanique des tiges. Dans le domaine temporel la force et la vitesse peuvent s'écrire (Karlsson, et al., 1989 ; Casem, et al., 2003) :

$$F_N(t) = \frac{1}{2} (F_{N-1}(t + \Delta t_{n-(n-1)}) + F_{N-1}(t - \Delta t_{n-(n-1)})) + \frac{1}{2} Z_n (v_{N-1}(t + \Delta t_{n-(n-1)}) - v_{N-1}(t - \Delta t_{n-(n-1)})) \quad (10)$$

$$v_N(t) = \frac{1}{2} (v_{N-1}(t + \Delta t_{n-(n-1)}) + v_{N-1}(t - \Delta t_{n-(n-1)})) + \frac{1}{2Z_n} (F_{N-1}(t + \Delta t_{n-(n-1)}) - F_{N-1}(t - \Delta t_{n-(n-1)})) \quad (11)$$

Dans les équations précédentes $\Delta t_{n-(n-1)} = (x_{n-1} - x_n)/c_n$ et $Z_n = E_n A_n / c_n$. Une fois que les signaux en pointe ont été reconstitués, la courbe charge-enfoncement est tracée pour chaque impact. À partir de cette courbe, différents paramètres sont déterminés, à savoir : la résistance de pointe dynamique et statique, le module pénétrométrique de chargement et déchargement, la vitesse d'ondes de compression et cisaillement ainsi qu'un coefficient d'amortissement (Benz et al., 2013). Quelques travaux ont déjà été réalisés sur l'application de cette nouvelle technique (Benz et al., 2014; Escobar, et al., 2016). Cependant, aucun travail n'a abordé le sujet du module dynamique et le rapport que celui-ci pourrait avoir avec la fréquence de sollicitation imposée au sol.

2.2. Détermination du module dynamique

Principalement, la FRF est une fonction de transfert exprimée dans le domaine de fréquences permettant d'analyser la réponse spectrale des signaux en pointe (accélération, vitesse et déplacement) comme une fonction de la sollicitation imposée. En d'autres termes, la FRF exprime la réponse structurelle à une force appliquée en fonction de la fréquence. En normalisant les signaux de sortie du système par rapport au signal d'entrée, on fait apparaître les caractéristiques et la réponse du système sur les caractéristiques des signaux prises individuellement.

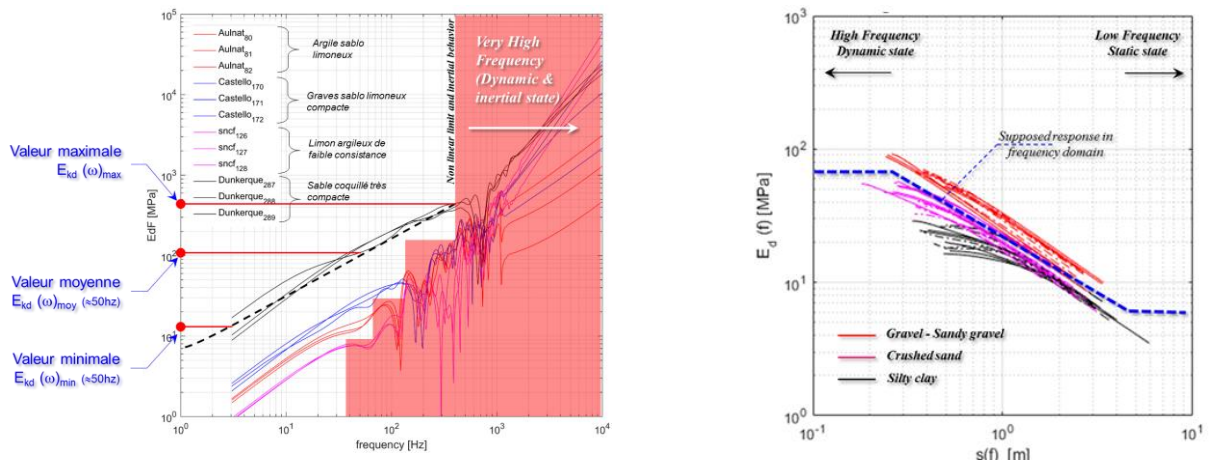


Figure 1 - (a) Schéma explicatif et courbe du module dynamique $E_{kd}(f)$ en fonction de la fréquence et (b) dégradation du module $E_{kd}(f)$ en fonction du spectre $s(f)$ en pointe.

Le module $E_{Kd}(f)$ sera déterminé à partir des enregistrements réalisés pour chaque impact dans la tête de battage du Panda 3®. Pour ce faire, d'abord on reconstruit pour chaque impact la force, l'accélération, la vitesse et l'enfoncement en pointe (c.f. section 2.1, Eqs.7-11). La FRF dite « rigidité dynamique » $K_d(f)$ est par la suite calculée en considérant la force $F_N(t)$ comme l'excitation d'entrée, à savoir :

$$K_d(f) = \frac{F_N(f)}{S_N(f)} \quad (12)$$

En assimilant la pointe du pénétromètre à une plaque circulaire encastrée dans un milieu élastique semi-infini (Boussinesq), il est possible de déterminer et tracer le module de déformation $E_{Kd}(f)$ complexe en fonction de la fréquence f . Cette courbe permet d'identifier l'intervalle où la rigidité, et donc le module E_{Kd} sont proportionnels à la longueur d'onde et donc à la fréquence. Une série d'exemples de courbes obtenues sur différents sites est présenté dans la figure 1.a. Tel qu'indiqué dans la figure, trois modules sont déterminés à partir de cette courbe : maximum, moyen et minimal. De même, pour la gamme de fréquences dans laquelle $E_{Kd}(f)$ est directement proportionnel à la fréquence, il est intéressant de tracer $E_{Kd}(f)$ en fonction du spectre du déplacement en pointe $s(f)$ (fig.1.b). On peut remarquer le caractère non linéaire de $E_{Kd}(f)$ selon la gamme de déplacements induits lors de la pénétration de la pointe. Bien qu'elle ne soit pas exploitée dans ce travail, cette représentation s'avère, dans le cadre des travaux améliorant la compréhension du phénomène de pénétration dynamique d'une pointe pénétrométrique, très intéressant pour les études postérieures.

3. Essais au laboratoire

Une série d'essais en chambre de calibration a été réalisée. Celle-ci est composée d'un cylindre en acier de 40cm de diamètre et 80cm de hauteur. Quatre matériaux sont employés : deux sables (Cusset & Fontainebleau), une grave sableuse (G31) et un limon argileux (A3). Pour chacun, trois éprouvettes ont été réalisées à teneur en eau constante et à densité variable. Le compactage des éprouvettes est réalisé à l'aide d'une dame de type Marshall (ϕ : 38.3cm) en couches de 15cm d'épaisseur. 9 éprouvettes ont été conçues. Les caractéristiques sont présentées dans le tableau 1.

Pour chaque éprouvette nous avons réalisé : 2 essais Panda 3®, 1 essai Panda 2® et 1 essai au pénétromètre américain DCP. Des essais avec une plaque dynamique LWFD permettant d'évaluer le module dynamique E_{Vd} et d'estimer la valeur E_{V2} ont été également effectués pendant le compactage, à mi-hauteur et en surface de l'éprouvette. Les courbes de dégradation $E_{Kd}(f)$ vs $\log_{10}|S(f)|$ obtenues pour chaque sol et pour chaque densité sont présentées dans la (fig.2). Ces courbes représentent la moyenne des courbes obtenues, pour chaque impact, entre les côtes 30-50cm de l'éprouvette. La bonne reproductibilité et la sensibilité à la nature du sol et à l'état de densité sont mises en évidence : pour une même gamme de déplacement, les valeurs du module sont influencées par la nature (sables, grave ou limon) mais aussi par leur densité.

Par la suite nous avons tracé la valeur du module dynamique $E_{Kd}(f)$ -max en fonction du module E_{V2} LWFD, de la résistance de pointe q_d Panda 2® (fig.3 & tab.1). De manière générale on peut constater la bonne relation entre chaque paramètre. Dans le cas de l' E_{V2} , on peut remarquer une bonne correspondance pour les valeurs du module $E_{Kd}(f) < 40\text{Mpa}$, puis un manque de corrélation pour les valeurs supérieures à cette limite. Cela est principalement dû à la fiabilité des mesures LWFD, mais aussi à la variabilité expérimentale/opératoire. En effet, il est rare de trouver dans la pratique un grave sableux compacté présentant des valeurs aussi faibles de module, alors que la valeur de q_d Panda 2® est de l'ordre de 20Mpa. Cela pourrait expliquer cette divergence.

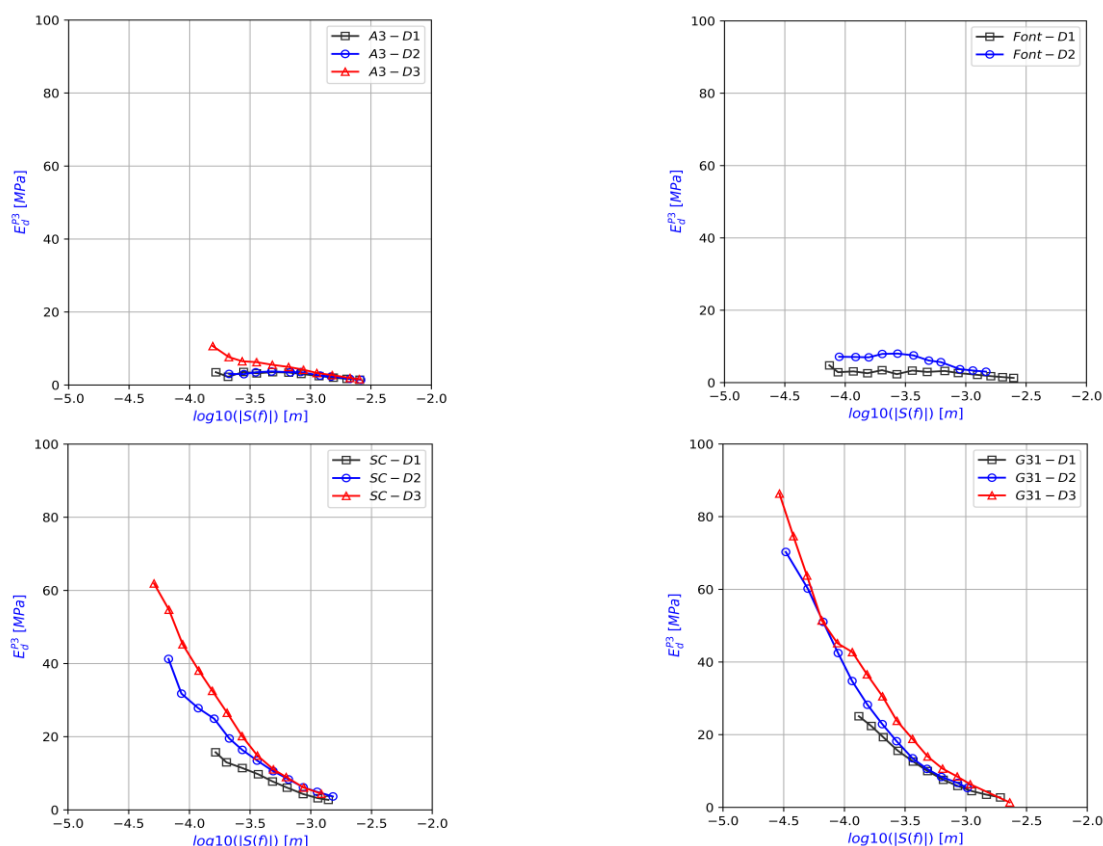


Figure 2 - Essais au laboratoire - Courbes de dégradation $E_{kd}(f)$ vs spectre de déplacement normalisé à l'échelle logarithmique $\log_{10}|S(f)|$ pour : (a) Argile limoneuse (A3), (b) Sable Fontainebleau (Font), Sable de Cusset (SC) et (d) Grave sableuse 0/31 (G31)

Tableau 1 - Réalisation des essais au laboratoire - caractéristiques des éprouvettes

	Sable de Cusset			Grave sableuse 0/31.5			Limon Argileux			Fontainebleau	
Classe GTR	D1			DC2			A3			B3	
éprouvette	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2
γ_d (kN/m ³)	16.0	16.9	17.6	17.2	18.1	19.0	8.5	8.9	11.0	14.3	15.1
W (%)	5.5	4.8	5.5	4.6	4.4	4.2	37	36	36	2.0	2.0
Résultats des essais réalisés											
q _{dP2} (Mpa)	4.5	7.6	15.2	5.4	10.2	17.1	1.4	1.4	2.3	1.15	3.0
E _{Vd LWFD} (Mpa)	12.0	15.1	15.8	16.7	16.4	18.2	6.2	7.6	12.4	16.1	21.2
E _{V2 LWFD} (Mpa)	24.5	34.6	29.6	35.4	33.1	36.2	12.8	15.3	25.3	12.7	20.6
DCI (mm/coup)	18	11	5	16	10	6	46	40	23	63	33
CBR (%) _{DCP}	6	11	31	7	13	31	4	5	8	3	6
Résultats Panda 3® (valeurs moyennes calculées pour chaque impact réalisé entre 0,3 et 0,5m de profondeur)											
E _{kd min} (Mpa)	8.2	9.08	20.2	10.4	19.6	23.6	3.17	3.35	4.72	2.86	6.07
E _{kd moy} (Mpa)	12.6	15.1	31.4	15.5	31.4	41.2	3.41	3.82	5.57	3.32	7.50
E _{kd max} (Mpa)	17.9	21.0	43.5	20.1	43.3	58.9	4.93	5.92	5.83	4.84	7.56

4. Campagne d'essais in-situ

4.1 Présentation du site et implantation de sondages

Le terrain expérimental, propriété de l'entreprise IGEOTEST, se situe au sud de la ville de Castelló d'Empúries dans la province de Gérone en Espagne (Fig.4.a-b). Il est situé dans une plaine alluviale formant un dépôt de type deltaïque méditerranéen.

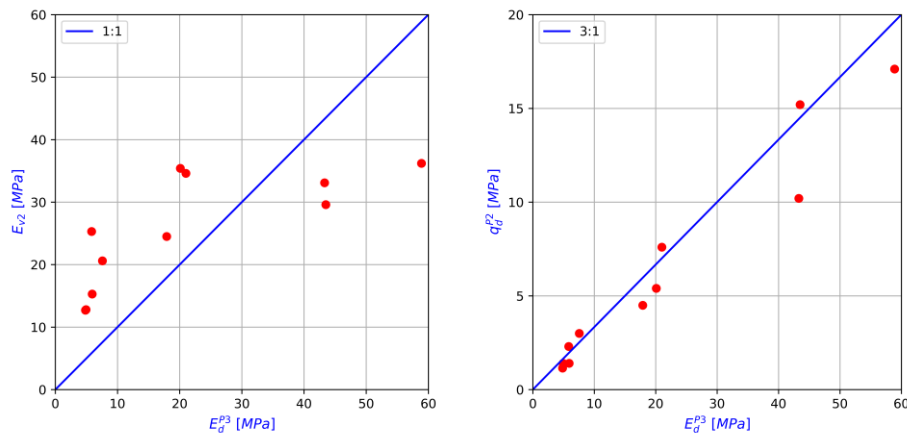


Figure 3 - Essais au laboratoire - Module $E_{kd}(\omega)$ Panda 3® vs : (a) Module E_{v2} LFWF, (b) résistance de pointe Panda 2®.

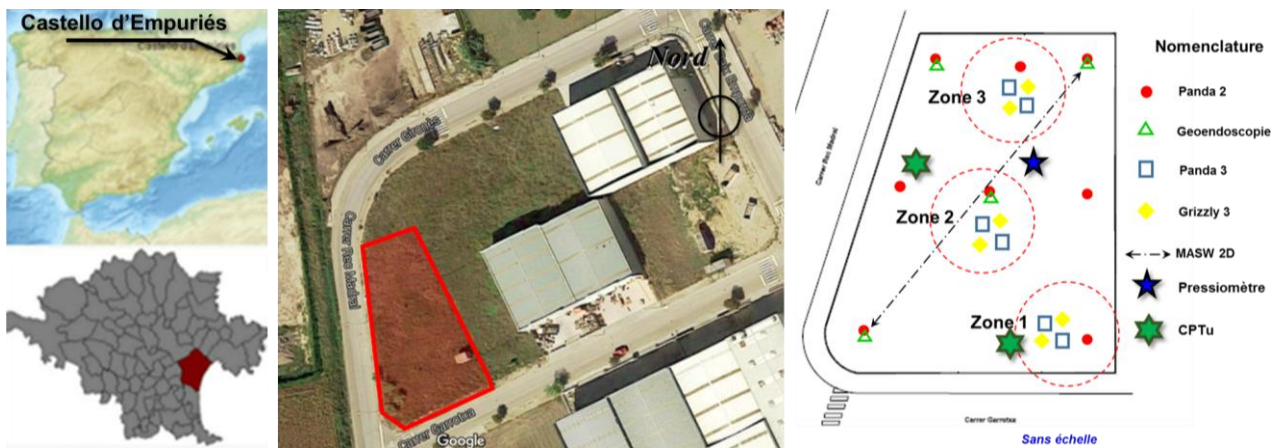


Figure 4 : (a) Situation géographique du terrain, (b) emplacement du Solar de Castello d'Empuriès (Source : Google earth®) et (c) - Schéma d'implantation de sondages

En profondeur il existe une alternance d'horizons principalement sableux et des horizons formés par des dépôts limoneux et argileux, avec des passages graveleux (Sastre et al. 2018, Pineda et al. 2012 ; Perez et al. 2013 ; Arroyo et al. 2015).

Sur site, une quantité importante de sondages ont été effectués et existaient. Au total, lors de notre campagne d'essais, nous avons réalisé : 8 sondages Panda 2® ($z_{\text{finale}} \sim 8,0\text{m}$), 6 sondages Grizzly 3® à énergie variable ($z_{\text{finale}} \sim 15,0\text{m}$) (Escobar et al. 2016), 1 profil MASW 2D et 6 sondages Panda 3® ($z_{\text{finale}} \sim 8,00\text{m}$). On dispose également de 3 sondages CPTu, 1 sondage au pressiomètre (PMT) et 2 sondages au dilatomètre de Marchetti (DMT). La plupart des résultats obtenus lors de ces différentes campagnes d'essais ont été publiés par (Pineda et al. 2012 ; Perez et al. 2013 ; Arroyo et al. 2015). L'implantation de la plupart de sondages est présentée dans la (Fig. 4.c).

Dans ce travail on s'intéresse principalement à l'exploitation des essais Panda 3® et pressiomètre (PMT), dont l'objectif principal est de comparer, les résultats obtenus en terme de module $E_{kd}(f)$ pour les faibles fréquences et le module obtenu avec le pressiomètre E_M . S'agissant des essais dont la vitesse de déformation reste faible (cas du pressiomètre), le plus pertinent est de comparer ce module avec celui qu'on détermine à partir de la courbe $E_{kd}(f)$ pour les fréquences comprises entre 6 et 24hz. Les résultats obtenus sont présentés par la suite.

4.2. Résultats

Afin d'évaluer la pertinence et valider cette nouvelle approche nous permettant de déterminer le module d'élasticité dynamique à l'aide des FFR et plus précisément à partir

de la courbe $E_{Kd}(f)$ présenté dans les sections précédentes, une comparaison entre le module Panda 3® E_{Kd} et celui obtenu par l'essai préssiométrique E_M est ici présenté. Pour ce faire, et compte tenu que la gamme de déformation entraînée dans le sol par l'essai préssiométrique est de l'ordre de 10^{-4} - 10^{-3} , et la vitesse de chargement reste faible, on considère la valeur $E_{Kd \min}$ déterminée pour $f = 24\text{Hz}$.

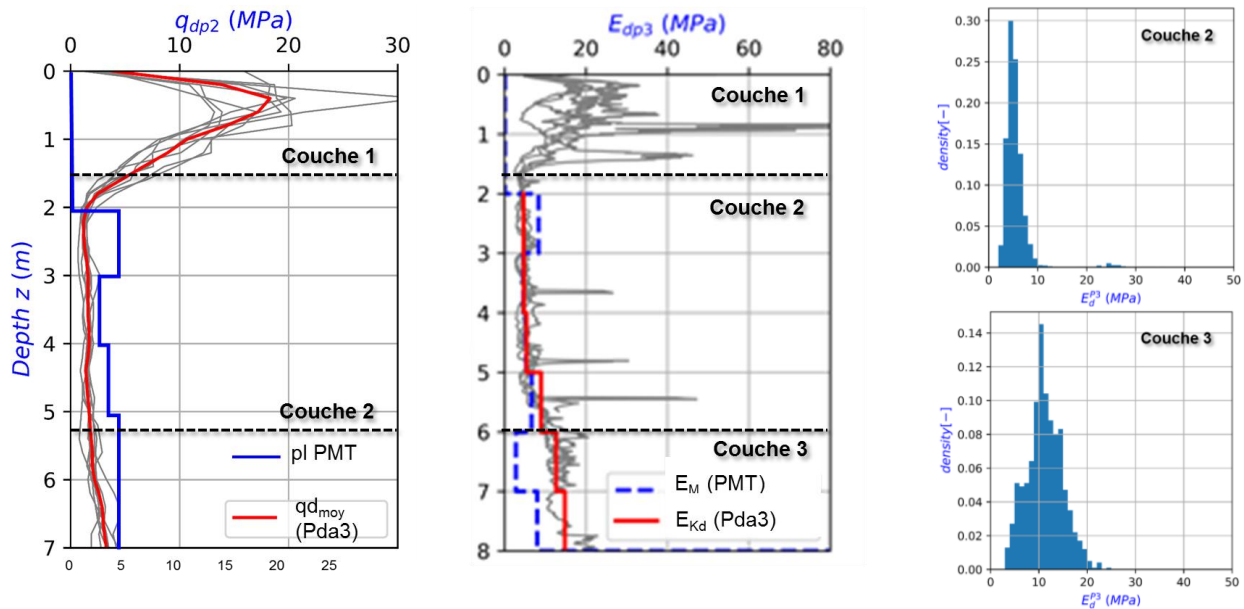


Figure 5 : Comparaison du module d'élasticité déterminé par Panda 3® et par l'essai préssiométrique : (a) – Pénétrogramme de la résistance dynamique q_d déterminé par le Panda 2® pour les 6 sondages et (b) – $E_{Kd \min}$ vs E_M

Dans la figure 5.a on présente les résultats obtenus sur site sous formes de pénétrogrammes. Dans la figure de droite on présente l'ensemble des profils de résistance en pointe Panda 3® (Fig. 5.a). La valeur moyenne du profil $q_d(z)$, calculée par tranches de 100mm, est également présentée (courbe rouge). La pression limite pl mesurée à l'aide de l'essai PMT est aussi tracée (courbe bleu). À partir du profil pénétrométrique 3 horizons sont bien identifiés (couches 1, 2 et 3). La première formation, entre 0 et 1,5m, présente une résistance q_d comprise entre 14 et 20 Mpa. Dans cette formation et dû aux contraintes techniques, nous ne disposons pas des mesures préssiométrique. Au-delà de 2m de profondeur et c'est jusqu'à 7,0m, le sol est assez homogène. La valeur de q_d se trouve comprise entre 2,0-4,0Mpa et le terme pl entre 3,5 et 5,0Mpa.

Dans la figure 5.b on présente les profils de module $E_{Kd \min}$ obtenus pour les six sondages Panda 3®. Le profil E_M obtenu avec le pressiomètre entre 2,0 et 7,0m de profondeur est également présenté (profil bleu pointillé). Afin de mieux comparer les résultats obtenus avec le Panda 3® et ceux du PMT, le profil moyenne par tranches de 1,0m est également calculé et représenté par le profil en rouge. En effet, une des difficultés au moment de comparer les résultats obtenus avec le PMT c'est que la résolution de mesure vertical du PMT est très faible (1 mesure/mètre) alors que avec le Panda 3® la fréquence d'échantillonnage est de l'ordre de 200 mesures/mètre, ce qui facilite l'analyse statistique des données mais aussi représente un des grands atouts de la technique que nous avons développée. Malgré tout, on peut constater que l'ordre de grandeur des profils des modules est sensiblement pareil. Une très bonne correspondance existe entre les deux essais. On peut constater également que le module préssiométrique est bien plus faible que celui du Panda 3® entre les côtes 6 et 8m, alors que le terme de pointe et la pression limite augmentent. Enfin, dans la figure 5.c (à

gauche) nous présentons les histogrammes de distributions des modules déterminés avec le Panda 3® pour les couches 2 et 3 et pour l'ensemble de 6 sondages réalisés sur le site de Castello.

5. Conclusions

Nous avons présenté dans cet article une nouvelle approche nous permettant de déterminer le module dynamique à partir des mesures réalisées avec le pénétromètre Panda 3®. Pour ce faire on s'est basé sur l'analyse spectrale des signaux enregistrés dans le pénétromètre lors du battage. L'application des techniques d'analyse et de traitement des signaux, et notamment la détermination des fonctions de transfert (FRF) pour les enregistrements calculés en pointe, permet de déterminer la valeur du module dynamique du sol E_{kd} en fonction de la fréquence f pour chaque impact. Plus la fréquence augmente, plus l'amplitude des déformations autour de la pointe est faible et plus E_{kd} est grand. Le choix de la fréquence avec laquelle on calcul la valeur du module E_{kd} dépend à l'objectif de chaque étude. Au laboratoire nous avons remarqué, par comparaison avec l'essai dynamique de plaque LFWD, qu'il existe une très bonne correspondance entre $E_{kd \max}$ et E_{vd} . In situ, sur le terrain expérimentale de Castelo d'Empurés (Catalogne, Espagne) nous avons souhaité comparer les résultats obtenus avec le Panda 3® et ceux issus des essais préssiométrique. En exploitant le module déterminé pour les basses fréquences, nous avons constaté une très bonne correspondance entre les deux essais $E_{kd \min}$ vs E_M . Ces résultats confirment ceux déjà obtenus sur d'autres sites et présentés par (Escobar, 2015).

La robustesse de l'approche proposé pour l'exploitation du module dynamique à partir des enregistrements Panda 3® et la détermination de la courbe charge enfoncement en pointe (avec tous les paramètres exploités, q_d , q_s , E_{kd} , V_p , V_s ...) ; associés à la simplicité, rapidité et haute résolution d'échantillonnage vertical et spatial de l'essai, font de cette nouvelle technique d'auscultation de sols une alternative intéressante pour l'ingénieur géotechnicien.

6. Références

- Benz Navarrete, M. A., (2009). Mesures dynamiques lors du battage du pénétromètre Panda 2, Clermont Ferrand, France: Thèse de l'Université Blaise Pascal.
- Benz Navarrete, M. A. et al., (2013). Mesures dynamiques lors du battage pénétrométrique–détermination de la courbe charge-enfoncement dynamique en pointe. Paris, France, In Proceedings of the 18th International Conférence on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering.
- Benz Navarrete, M. A. et al., (2014). Détermination de la raideur dynamique des plateformes ferroviaires à l'aide de l'essai pénétrométrique Panda 3(r). Marne la Vallée, Paris, 2ème Symposium International en Géotechnique Ferroviaire - Georail 2014.
- Bussac, M., Collet, P., Gary, G. & Othman, R., (2001). An optimisation method for separating and rebuilding one-dimensional dispersive waves from multi-point measurements, Application to elastic or viscoelastic bars. J. Mech. Physics and solids.
- Calvente, R. M. et al., (2015). Non-destructive control methodology for micropiles based on low strain dynamic load test. Buenos Aires, Argentina, Fundamentals to applications in geotechnics. D. Manzanal and A.O. Sfriso (Eds.).
- Casem, D., Fourney, W. & Chang, P., (2003). Wave separation in viscoelastic pressure bars using single-point measurements of strain and velocity. Polymer testing, Vol. 22, pp. 155-164.
- Escobar, E. et al., (2016). Dynamic characterization of the supporting layers in railway tracks using the dynamic penetrometer Panda 3. Proc. Eng., Vol. 143, pp. 1024-1033.
- Karlsson, L., Lundberg, B. & Sundin, K., (1989). Experimental study of a percussive process for rock fragmentation. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts, 1(26), pp. 45-50.

- Lundberg, B. & Henchoz, A., (1977). Analysis of elastic waves in non-uniform rods from two point strain measurement. *Experiment. Mech*, Volume 17, pp. 213-218.
- Tran, Q. A. et al., (2017). Modeling of light dynamic cone penetration test – Panda 3® in granular material by using 3D discrete element method. *Powder and Grain 2017*. Proceedings of 8th International conference on micromechanics of granular media.