

COMPARAISONS ET COUPLAGE DES MODULES DE DEFORMATION MESURES A L'AIDE DE PENETROMETRES DYNAMIQUES INSTRUMENTES ET DES MESURES PRESSIOMETRIQUES ET PENETROMETRIQUES

COMPARISONS AND COUPLING OF DEFORMATION MODULUS MEASURED WITH DYNAMIC INSTRUMENTED PENETROMETERS AND PRESSIOMETRIC AND PENETROMETRIC MEASUREMENTS

Alexandre TEYSSIER¹, Catherine JACQUARD¹, Caroline FORESTTI OLIVEIRA², Quoc-Anh TRAN², Miguel-Angel BENZ-NAVARRETE²

¹ Fondasol, Avignon, France

² Sol Solution, Riom, France

RÉSUMÉ – Dans cet article, nous présentons une étude comparative entre les mesures du module de déformation (E_{dP3}) réalisées à l'aide des pénétromètres dynamiques instrumentés - Panda 3® et Grizzly 3® - et le pressiomètre Menard. Ces valeurs sont également comparées avec celles obtenues par le biais des corrélations disponibles à partir des mesures au pénétromètre statique à pointe électrique CPT. Ces études sont effectuées sur la base des essais effectués sur plusieurs sites ayant des sols de nature différente, notamment un site constitué de sables fins dans le sud de la France. L'objectif principal est de confirmer la correspondance entre les mesures réalisées au pénétromètre Panda 3 et Grizzly 3 en termes de module avec celles issues de méthodes d'investigations traditionnelles. De plus, nous nous intéressons à l'évaluation de la pertinence du couplage entre les mesures obtenues en surface à l'aide des techniques Panda 3 et Grizzly 3 - ayant une forte résolution - et les mesures obtenues plus en profondeur à l'aide des techniques conventionnelles dont la résolution verticale des mesures est moins importante.

ABSTRACT – In this paper, we present a comparative study between deformation modulus measurements (E_{dP3}) obtained with dynamic instrumented penetrometers - Panda 3® and Grizzly 3® - and measurements from Menard's pressuremeter. We also compare these values with those obtained by correlations on static penetrometers CPT. These studies are based on investigations in several sites with different lithological natures, especially a site constituted with fine sands in the southern of France. The main goal is to confirm the coherence of modulus measurements with penetrometers Panda 3 and Grizzly 3 with traditional investigating methods. Likewise, we interest in assessing the pertinence of a coupling between measurements obtained in surface with Panda 3 and Grizzly 3 techniques, with a high vertical resolution, and deeper measurements obtained with traditional methods, with a lower vertical resolution.

1. Introduction

L'évaluation du module de déformation in-situ fait partie des grands enjeux de l'ingénierie géotechnique afin de caractériser les déformations entraînées dans les sols par les charges imposées. En effet, le module de déformation d'un sol permet de caractériser sa capacité de déformation dans deux domaines : au cisaillement (ou déviatorique) et à la compression (sphérique) pour différentes conditions de drainages (Combarieu, 2006).

Les principales méthodes de détermination du module d'un sol couramment utilisées aujourd'hui sont les suivantes :

- Les essais triaxiaux : plusieurs modules peuvent être déduits de ces essais : initial (E_{ini}), sécant (E_{sec}), cyclique (E_{cycl}) ou alors pour des essais rapides sur des sols pulvérulents un module drainé (E') ou sur des sols fins un module non drainé (E_u).
- L'essai œdométrique : sur les sols fins, compressibles et saturés et permet de déduire un module œdométrique (E_{oed}).
- L'essai pressiométrique : mesuré en forage par le biais de la sonde pressiométrique Ménard, cet essai permet d'acquérir un module de déformation (E_M) en phase pseudo-élastique (pratiquement linéaire mais non-réversible).
- Les formules de corrélations basées sur des mesures au pénétromètre statique CPT : sur la base des abaques et de l'indice de Robertson, il est possible de relier par corrélation les mesures au CPT à un module de déformation.

Par ailleurs, l'une des méthodes les plus couramment utilisée pour la caractérisation des sols (en parallèle de la méthode pressiométriques et des essais en laboratoire) est la mesure au pénétromètre dynamique. Son principe est de déterminer la résistance du sol à l'enfoncement d'une pointe battue à énergie constante ou variable. La profondeur d'investigation dépend du type de pénétromètre et la résolution verticale des mesures effectuées peut être nettement plus importante que celle obtenue à l'aide des méthodes décrites ci-avant (mesures tous les centimètres à dizaines de centimètres contre des mesures ponctuelles tous les mètres). Il s'agit donc d'un essai complémentaire très intéressant lorsqu'il s'agit d'évaluer la variabilité verticale et spatiale des caractéristiques mécaniques des sols sur site.

Facile à mettre en œuvre, cette méthode souffre d'une lacune : elle ne permet pas en théorie la mesure directe d'un module et donc d'une caractérisation des paramètres de déformabilité des sols. A la différence du pressiomètre, les pénétromètres tels que connus ne permettent qu'une évaluation assez grossière des déformations du sol, dans la mesure où aucune relation entre effort et déformation locale n'est établie au cours de l'essai.

C'est pour répondre à ces besoins qu'il a été développé depuis quelques années en France une nouvelle technique de mesure associée au pénétromètre dynamique à énergie variable Panda et Grizzly (NF EN ISO 22476-2). Elle s'inspire des essais de choc à la barre d'Hopkinson et des essais de chargement dynamique de pieux. Il s'agit d'une nouvelle génération de pénétromètres dynamiques, permettant d'accéder entre autres à des modules de type élastique des sols (E_{dP3}) auscultés. Ainsi il est intéressant d'évaluer dans quelle mesure les modules obtenus à l'aide de cette nouvelle technique sont comparables avec ceux obtenus au moyen de méthodes traditionnelles.

De même, l'importante résolution des mesures obtenues est également un point à étudier dans le cadre de la réalisation de campagnes d'investigations couplées entre mesures réalisées au Panda 3 et Grizzly 3 à faible profondeur et mesures réalisées en sondage pressiométrique à plus grande profondeur. Une reconnaissance plus fine du caractère déformable des sols, sur les premiers mètres, est essentielle dans les cas d'études de tassements verticaux sous fondations superficielles. Elle permettrait de mieux appréhender et prévoir le comportement des sols en déformation et déplacement.

2. Les pénétromètres dynamiques instrumentés Panda 3 et Grizzly 3

Développé depuis une dizaine d'années en France (Benz, 2009), le principe général de l'essai au pénétromètre dynamique instrumenté, présenté sur l'exemple du Panda et détaillé en Fig. 1, est le suivant : au cours du battage, il est mesuré dans la tige, au voisinage de l'enclume, les variations de déformation $e(t)$, d'accélération $a(t)$ et les déplacements $s(t)$ entraînées par l'onde de choc créée par l'impact lors du battage.

En effet, lorsque le marteau heurte la tête de battage ou 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. 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 $v(x,t)$ représentés par la superposition des deux ondes élémentaires.

Une des solutions les plus utilisées est celle obtenue par le biais de la méthode des caractéristiques, représentée par la superposition de deux ondes élémentaires, u_f et u_g ; respectivement les ondes descendantes et remontantes au sein d'un milieu élastique et homogène. La technique de reconstruction d'ondes consiste à calculer, à partir des signaux découplés, 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), la tige étant considérée comme un matériau élastique parfait.

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 (q_{da}) et statique (q_{ca}), le module pénétrométrique de chargement (E_{dP3} en vert) et déchargement (E_{rP3} en jaune), la vitesse d'ondes de compression (V_p) puis de cisaillement (V_s) ainsi qu'un coefficient d'amortissement dit coefficient d'amortissement de Smith (J_n).

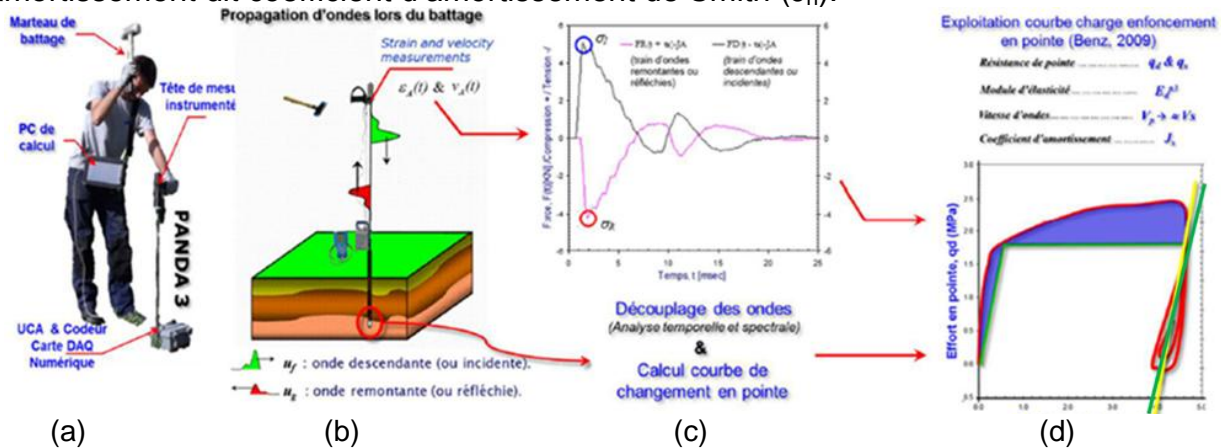


Figure 1. L'essai au pénétromètre dynamique instrumenté (a), principe de mesure et propagation des ondes (b), découplage des ondes (c) et courbe charge-enfoncement obtenue en pointe (d)

Les modules sont calculés de la façon suivante (Benz et al., 2011) : l'approche retenue est celle employée par (Arbaoui et al., 2006)(Reiffsteck et al. 2008). En assimilant la pointe à une petite plaque encastrée à l'intérieur d'un massif élastique semi-infini non pesant, on peut appliquer la formule de Boussinesq (1) :

$$E_{P3}^{d,r} = (1 - \nu)^2 \frac{\Delta q_d}{\Delta S_p} \frac{\pi d_p^2}{4} \frac{1}{k_M} \quad (1)$$

Avec $\nu = 0,33$, d_p le diamètre de la pointe et k_M le coefficient d'encastrement de Mindlin.

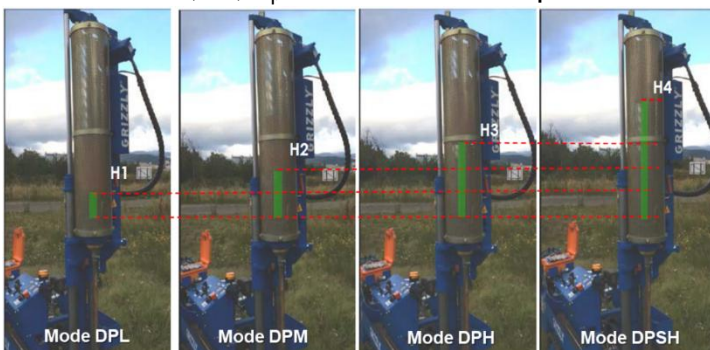


Figure 2 : Séquences du système de battage avec 4 hauteurs de chutes (Escobar et al., 2016)

Plus récemment, ce même procédé de mesure a été appliqué au pénétromètre dynamique lourd DPSH Grizzly (Escobar et al., 2016). Il s'agit d'un pénétromètre monté sur chenilles complètement automatique et équipé de différents capteurs permettant l'automatisation des mesures, l'adaptation automatiquement asservie de l'énergie de battage appliquée avec 4

hauteurs de chutes correspondant aux modes (DPL, DPM, DPH et DPSH de la norme NF EN ISO 22476-24) et la mesure en temps réel de l'énergie transmise au train de tiges pour chaque impact (Benz et al., 2012) (Fig. 2).

3. Campagne expérimentale

Une vaste campagne de reconnaissances au Panda 3 et au Grizzly 3 a été réalisée sur un site constitué de remblais sableux sur le port de SETE (Hérault – 34).

3.1. Description du site

Le site de Sète est un terrain gagné sur la mer durant l'été 2019. Celui-ci a été remblayé par dragage de sables sur une hauteur variant entre 4 et 8 mètres (Fig. 3).

3.2. Investigations réalisées

Sur le site de Sète, de nombreuses investigations ont été menées :

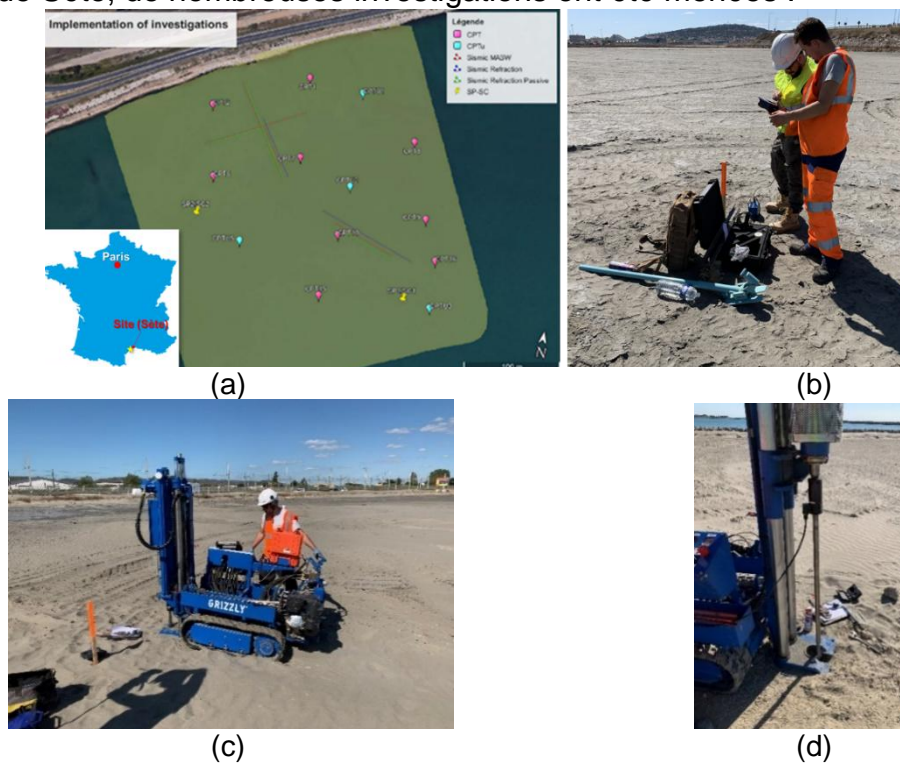


Figure 3. Campagne expérimentale menée à Sète sur un site constitué de remblais sableux (a), mesures au Panda 3 (b) et mesures au Grizzly 3 (c) et (d)

- 2 sondages carottés (SC) descendus entre 8 et 10 m de profondeur
 - 2 sondages pressiométriques (SP), couplés aux (SC), descendus à 26 m de profondeur.
 - 9 essais de pénétration statique à la pointe électrique (CPT) descendus entre 4 et 9 m de profondeur, et 4 essais de pénétration statique au piézocône (CPTu) descendus entre 9 et 15 m de profondeur.
 - 4 profils MASW2D, 2 profils sismique passive (Remi) et 4 profils de réfraction
- Sur chacun de ces points il a été réalisé également :
- 1 essai au pénétromètre Panda 3 (11 tests au total à 6 mètres de profondeur)
 - 1 essai au pénétromètre Grizzly 3 (11 tests au total à profondeur $6 < z < 17$ m).
 - 1 essai Panda classique (14 tests au total, $z < 6$ mètres).
 - 1 essai DPSH à énergie variable Grizzly-EV (11 tests au total).

3.3. Synthèse géotechnique

En réalisant l'analyse sur les 6 premiers mètres investigués (épaisseur moyenne du remblai apporté et hauteur de reconnaissance des Panda 3 et de la majorité des Grizzly 3 dans le cadre de cette campagne), il est possible de distinguer trois horizons de compacités différentes dans les remblais sableux surmontant le fond marin (considéré à une profondeur moyenne de 6 mètres) (Fig. 3) :

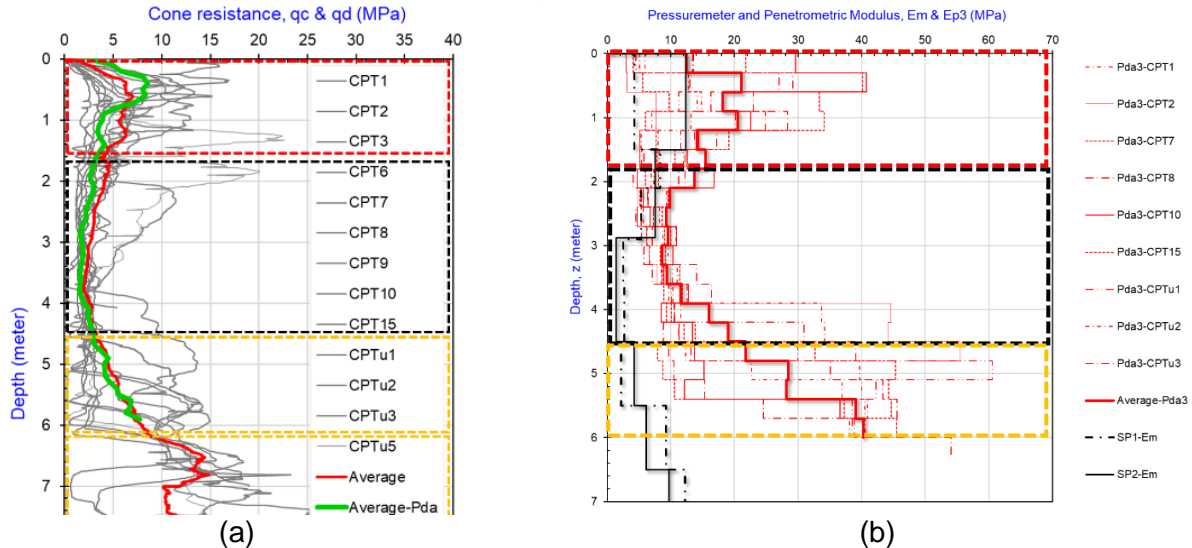


Figure 3. Comparaison des mesures obtenues au Panda 3 en termes de résistance de pointe avec les sondages CPT (a), en termes de modules avec les sondages pressiométriques (b)

- 1^{ère} couche de compacité faible à moyenne (0 à 1,8 m),
- 2^{ème} couche de compacité très faible à faible (1,8 à 4,6 m)
- 3^{ème} couche de transition avec augmentation progressive de la compacité avec la profondeur (4,6 à 6,0 m).

Ces trois horizons, déjà visibles dans les sondages pénétrométriques (en termes de résistance de pointe) et pressiométriques (en termes de modules pressiométriques), sont particulièrement nets via les mesures réalisées au Panda 3.

Sur les 6 premiers mètres investigués, on peut noter la bonne concordance entre les valeurs moyennes de résistance de pointe q_c et q_d mesurées au CPT et au Panda 3. En termes de modules, les trois horizons sont également bien visibles, avec une résolution de mesures plus nette au Panda 3 (représentés avec une moyenne glissante tous les 30 cm afin de faciliter la comparaison avec les valeurs de modules pressiométriques mesurés tous les mètres). On peut remarquer cependant que les modules pénétrométriques au Panda 3 (E_{p3}) sont plus élevés que les modules pressiométriques (E_M), de l'ordre d'un facteur 2 à 3. Des mesures de couples effectuées tous les mètres et l'analyse des signaux ont montré un frottement quasi négligeable le long des tiges.

Cette même étude comparative peut être menée sur les mesures réalisées au Grizzly 3® (Fig. 4). A noter que les sondages Grz3-CPTu2 et Grz-CPTu3 ont été descendus respectivement à 9,50 m et 16,85 m dans le substratum sableux afin de confirmer la validité de la méthode avec cet appareil plus puissant et permettant d'atteindre des profondeurs plus importantes que celles atteintes à l'aide du Panda.

Sur les 6 premiers mètres investigués, il est intéressant de noter, tout comme pour le cas du Panda, la bonne concordance entre la moyenne des q_c au pénétromètre statique et la moyenne des q_d au Grizzly 3. De la même façon qu'au Panda 3, la résolution des mesures au Grizzly est plus importante qu'au pressiomètre. Sur les 7 premiers mètres, les valeurs de modules au Grizzly 3 (E_{g3}) sont plus élevées d'un facteur 3 à 6 que les modules pressiométriques (E_M). Les deux sondages profonds au Grizzly 3 n'ayant pas été réalisés à proximité des sondages pressiométriques, il est difficile de les relier aux résultats

pressiométriques. On notera que le ratio E_M/E_{g3} semble augmenter avec la profondeur et la compacité des sols. De la même façon qu'avec le Panda, l'analyse des signaux a montré un frottement quasi négligeable le long des tiges.

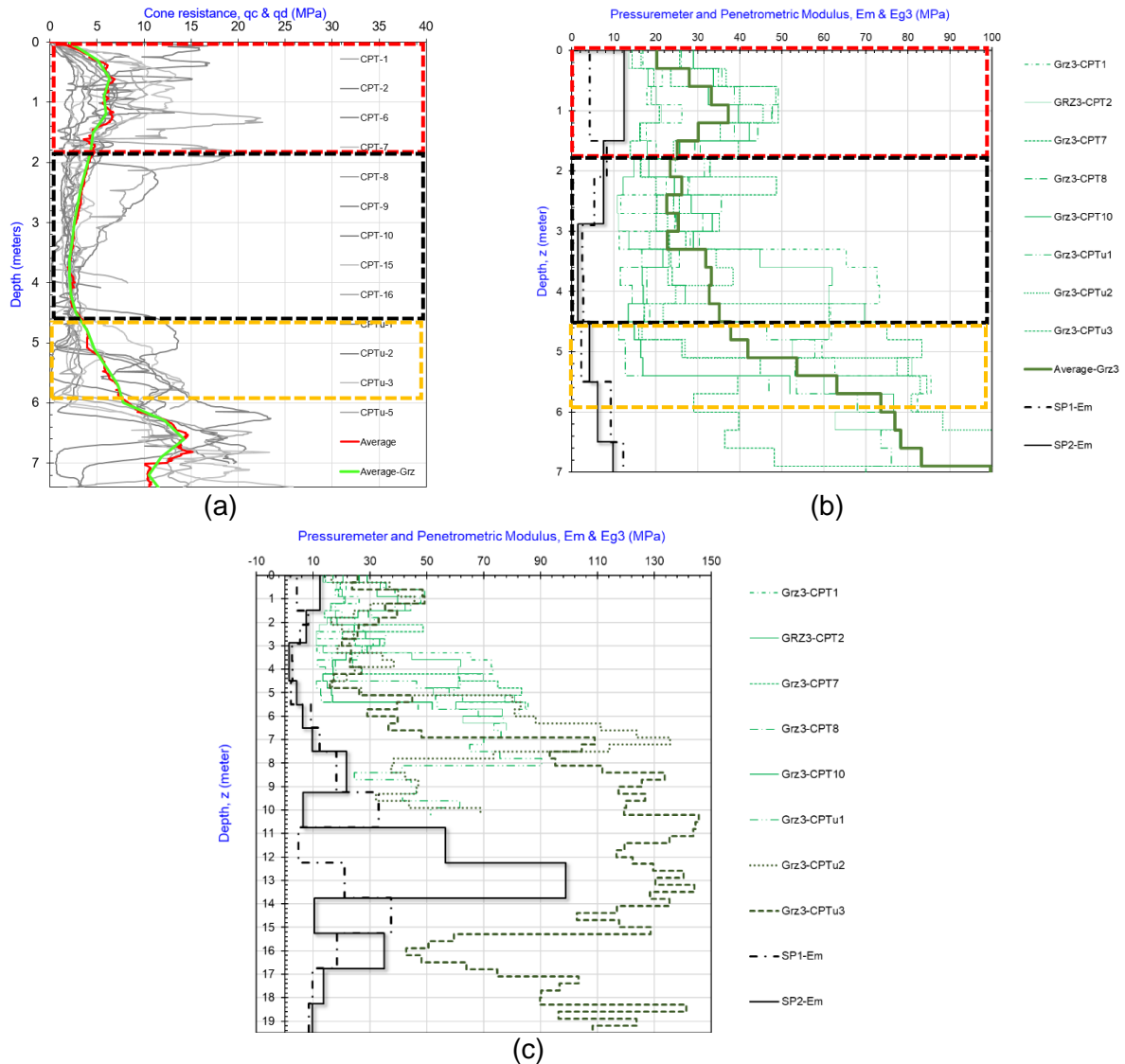


Figure 4. Comparaison des mesures obtenues au Grizzly 3 en termes de résistance de pointe avec les sondages CPT (a), en termes de modules avec les sondages pressiométriques (b) et focus sur les sondages Grz3-CPTu2 et Grz3-CPTu3 à plus grandes profondeurs (c)

Il est possible de synthétiser les paramètres géomécaniques mesurés des trois différents horizons de surface au sein du Tableau 1.

Tableau 1. Synthèse géotechnique des principaux horizons rencontrés au sein du remblai sableux entre 0 et 6 m de profondeur - moyennes et (écarts-types)

Strate	Profondeur (m)		CPT - CPTu		SP1 – SP2	
	Haut	Bas	q_c (MPa)	p_{LM}^* (MPa)	E_M (MPa)	
Couche 1	0	1,8	4,5 (3,2)	0,47 (0,42)	7,2 (3,5)	
Couche 2	1,8	4,6	2,2 (2,0)	0,21 (0,10)	4,1 (2,4)	
Couche 3	4,6	6,0	3,2 (4,0)	0,35 (0,24)	15,5 (14,3)	

Strate	Profondeur (m)		Panda 3		Grizzly 3	
	Haut	Bas	q_d (MPa)	E_{p3} (MPa)	q_d (MPa)	E_{g3} (MPa)
Couche 1	0	1,8	6,0 (3,2)	19 (9,2)	3,0 (0,7)	29 (5,7)
Couche 2	1,8	4,6	2,9 (1,1)	12 (4,3)	2,5 (0,4)	28 (4,9)
Couche 3	4,6	6,0	12,5 (4,8)	36 (8,5)	5,8 (1,7)	54 (13,9)

3.4. Résultats et discussion

En réalisant une analyse comparative des modules obtenus sur les trois premières couches de sol, et en prenant comme référence la valeur du module pressiométrique (E_M), on peut déterminer un ordre de grandeur des ratios avec les modules obtenus au Panda 3 (E_{p3}) et Grizzly 3 (E_{g3}). Une synthèse des résultats obtenus est présentée dans le Tableau 2.

Tableau 2. Ratios entre modules pressiométriques (E_M) et modules Panda 3® (E_{p3}) et modules Grizzly 3® (E_{g3}) au sein du remblai sableux entre 0 et 6 m de profondeur

Strate	Profondeur (m)		Pressiomètre			Panda 3		Grizzly 3	
	Haut	Bas	E_M (MPa)	α	E_M/α (MPa)	E_{p3} (MPa)	E_{p3}/E_M	E_{g3} (MPa)	E_{g3}/E_M
Couche 1	0	1,8	7,2	0,33	21,6	19	2,64	29	4,03
Couche 2	1,8	4,6	4,1	0,33	12,3	12	2,92	28	6,83
Couche 3	4,6	6,0	15,5	0,5	31	36	2,32	54	3,48

On peut constater, pour ce cas de figure, que le ratio entre les modules E_{p3} et E_M et varie entre 2,32 et 2,92 ; et pour le cas du Grizzly 3, le ratio avec E_M varie entre 3,48 et 6,83. Ces différences sont sans doute liées d'une part au mode et direction des sollicitations imposées par les essais et d'autre part par le modèle utilisé lors de l'interprétation des mesures effectuées. En effet, selon les auteurs, dans le cas du Panda 3 (et du Grizzly 3), le module déterminé est comparable au module de Young des sols (équation 1). Par ailleurs, il est important de noter que des ratios du même ordre de grandeur ont été publiés pour des expériences similaires confrontant l'essai de chargement en pointe CLT et le pressiomètre (Arbaoui et al. 2006; Reiffsteck et al. 2008, 2009, 2018).

Compte tenu de cela et d'après le tableau H.2.1.1.1 de la NF P94-261, en considérant le coefficient rhéologique α pour des sables sous-consolidés et normalement consolidés, ainsi que pour des sables surconsolidés (respectivement 0,33 pour les couches 1-2 et 0,5 pour la couche 3), on peut constater que le rapport E_M/α , donnant un module de type œdométrique, et le module obtenu au Panda 3 sont quantitativement comparables.

Par ailleurs, d'après le tableau J.2.1 de la NF P94-261, un rapport entre module élastique de Young et le module pressiométrique existe pour le calcul de fondations superficielles, de 4,5 pour les sables lâches à 3 pour les sables denses. Les ratios E_{g3}/E_M confirmeraient cette relation pour les couches 1 et 3 et permettraient de considérer le module obtenu au Grizzly 3 comme étant un module élastique de type Young.

Néanmoins, on peut constater que la valeur de module déterminée au Grizzly dans la couche 2 demeure élevée en comparaison avec celles mesurées au pressiomètre. On constate également que les ratios entre les valeurs mesurées entre le Panda 3 et le Grizzly 3 (basés a priori sur des modèles d'interprétation identiques) est de l'ordre de 2. Cette anomalie pourrait être causée, entre autres, par l'effet des rebonds du marteau suite au premier impact au pénétromètre Grizzly, par l'effet d'échelle, par l'amplitude, la magnitude et le contenu spectral des ondes de choc analysées dans les différents appareils. Ceci montre que, bien qu'intéressant comme méthode, des études complémentaires devront être réalisées pour mieux analyser et exploiter les mesures effectuées avec cette nouvelle technique afin d'offrir des mesures qualitatives et quantitativement comparables à celles obtenues par le biais du pressiomètre Ménard.

Enfin l'analyse croisée des mesures au pressiomètre, au Panda 3 et au Grizzly 3 permet de confirmer tout l'intérêt de la réalisation d'un couplage entre ces différentes mesures. La densité de mesures plus importante avec les pénétromètres permet de caractériser plus finement les paramètres de déformabilité des couches de surface, notamment pour l'application aux calculs de dimensionnement de fondations superficielles.

4. Conclusions

Les mesures avec les pénétromètres instrumentés Panda® et Grizzly® de troisième génération permettent d'enrichir les mesures de résistance de pointe avec des mesures du caractère déformable du sol et de vitesses d'ondes. Ces méthodes d'investigations pratiques et peu coûteuses présentent l'avantage de fournir dans les horizons de surface une résolution de mesures plus élevée qu'avec des méthodes d'investigations traditionnelles en forage. La construction du modèle géotechnique pour les horizons de surface gagnerait ainsi en précision.

Cette étude expérimentale sur le site de SETE a permis de donner une approche sur la façon de considérer les modules obtenus avec ces pénétromètres dans des sables de compacité variée : un module de type œdométrique (E_M/α) pour le module au Panda® et un module de Young pour le module au Grizzly®.

En perspective, il serait nécessaire de réaliser ce type d'analyse sur des sols de nature lithologique différente et de préciser l'augmentation des modules avec la profondeur d'investigation. Enfin pour les horizons de très faible compacité, il est nécessaire de confirmer l'origine de la dérive des mesures de module observée au Grizzly®.

5. Références bibliographiques

- Arbaoui H., 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, Canadian geotechnical journal, vol. 43, 2006, pp. 355-369
- Benz Navarrete M.-A. (2009). Mesures dynamiques lors du battage du pénétromètre PANDA 2, Blaise Pascal Clermont Ferrand II.
- Benz Navarrete M.-A., Gourvès R., Haddani Y. (2011). Détermination de paramètres dynamiques du sol lors du battage pénétrométrique par découplage d'ondes, AFPS.
- 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. JNGG 2012.
- Benz Navarrete M.-A., 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, 18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, n°1, pp. 1–4.
- Combarieu O. (2006). L'usage des modules de déformation en géotechnique. Revue Française de Géotechnique n°114, pp. 3-32.
- Escobar E. (2015). Mise au point et exploitation d'une nouvelle technique pour la reconnaissance des sols : le PANDA 3.
- Escobar E., Benz Navarrete M.-A., Gourvès R., Breul P., Chevalier B. (2016). Le Grizzly 3® à énergie variable : nouveaux développements de l'essai de pénétration dynamique. JNGG 2016.
- Reiffsteck P., Bacconnet C., Gourves R., Godde E., Van De Graaf H. (2008). Determination of elastic modulus from stress controlled cone penetration test, 3rd International conference on Site Characterization, Taipei, pp. 1135-1138.
- Reiffsteck P., Bacconnet C., Gourvès R., van de Graaf H.C., Thorel L. (2009). Measurements of soil compressibility by means of cone penetrometer, Soils and Foundations, 49(3) 397-408.
- Reiffsteck Ph., van de Graaf H., Jacquard C. (2018). Assessment of pile bearing capacity and load-settlement behavior, based on cone loading test (CLT) results. CPT18, 4th Int Symp. on Cone Penetration Testing, Delft.
- Teyssier A., Benz Navarrete M.-A., Tran Q. Anh, Pellez J.-C., Jacquard C. (2020). Field correlation between shear wave velocity measured by Panda 3®, Ménard pressuremeter test (PMT), cone penetration test (CPT) and geophysical tests. ISC6.