

# Mesures dynamiques lors du battage pénétrométrique – Détermination de la courbe charge-enfoncement dynamique en pointe

## Dynamic measurements of the penetration test – Determination of the tip's dynamic load-penetration curve

Benz M.A., Escobar E., Gourvès R., Haddani Y.  
*Sol-Solution Géotechnique Réseaux, Riom, France*

Breul P., Bacconnet C.  
*Institut Pascal-Polytech Clermont-Ferrand Université Blaise Pascal, Clermont-Ferrand, France*

**RÉSUMÉ :** Dans cet article, nous présentons les résultats des récents développements réalisés sur l'essai de pénétration Panda 3® en vue de permettre d'enrichir son exploitation. A partir de la mesure et du découplage des ondes créées suite à l'impact sur l'appareil, nous pouvons obtenir pour chaque coup la courbe charge enfoncement  $\sigma_p-s_p$  permettant de déterminer des paramètres de résistance et de déformation mis en jeu pendant l'enfoncement de la pointe. Une campagne d'essais au laboratoire dans une chambre de calibration pour deux sols a été menée afin de valider les résultats obtenus par l'exploitation de la courbe  $\sigma_p-s_p$ . Les résultats obtenus sont confrontés aux résultats obtenus à l'aide d'essais triaxiaux et œdométriques.

**ABSTRACT:** In this paper, we present the results of the recent developments done on the Panda 3® dynamic penetrometer aiming at improving its use will be presented. From measurement and decoupling of waves created by the impact on the penetrometer, we can obtain for each blow the load-settlement  $\sigma_p-s_p$  curve allowing determination of the strength and deformation parameters brought into play during the cone penetration. A series of tests in a calibration chamber for two soils were conducted to validate the results obtained by the exploitation of the  $\sigma_p-s_p$  curve. The obtained results are compared with the results obtained using the triaxial and oedometer test.

**MOTS-CLÉS :** caractérisation des sols, pénétromètre dynamique, Panda 3®, propagation d'ondes, courbe charge-enfoncement.

**KEYWORDS :** soil characterization, dynamic penetrometer, Panda 3®, wave propagation, load-penetration curve.

### 1 INTRODUCTION

En reconnaissance de sols, du fait des contraintes des essais de laboratoire (coût, échantillonnage, transport...), l'utilisation d'essais in-situ est une pratique très répandue. Parmi ceux-ci, les pénétromètres dynamiques sont les plus utilisés dans le monde et sont intéressants pour l'étude du comportement dynamique des sols (Tokimatsu 1988) et ce bien que pour la plupart des ingénieurs, leur caractère dynamique soit considéré comme un désavantage. Toutefois, les pénétromètres dynamiques ne permettent d'obtenir qu'une seule information sur le sol : la résistance de pointe ; et au contraire des pénétromètres statiques qui sont devenus des outils très sophistiqués grâce à l'incorporation de différents capteurs dans les pointes, les pénétromètres dynamiques sont restés éloignés de ces avancées et demeurent d'une technicité ancienne. Par ailleurs, le battage pénétrométrique a longtemps été expliqué par la théorie des chocs de Newton, bien que l'on sache que ce problème ne peut être résolu avec la seule application de cette théorie. A l'heure actuelle, on sait que le battage pénétrométrique est mieux représenté par la théorie de transport des ondes où le transfert d'énergie se fait sous forme d'une onde de compression qui parcourt le pénétromètre après chaque impact (Smith 1962, Aussedat 1970).

C'est dans ce cadre et sur la base du pénétromètre PANDA® développé depuis plus de vingt ans (Gourvès 1995) que nous avons conçu et développé un pénétromètre et un procédé de mesure permettant d'améliorer l'information obtenue lors d'un sondage : Le PANDA 3® (Benz et al. 2010). Le principe consiste à mesurer et à découpler les ondes créées par l'impact du marteau sur la tête de l'appareil et à calculer ensuite la force, l'accélération et la vitesse subis en pointe pour nous permettre de tracer la courbe charge-enfoncement  $\sigma_p-s_p$  pour chaque coup fourni lors du battage (figure 1).

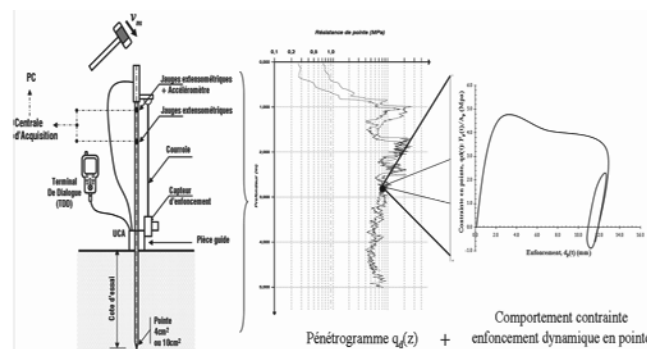


Figure 1. Principe de l'essai Panda 3® (c.f. Benz, 2009).

L'exploitation de la courbe permet de déterminer des paramètres de résistance et de déformation du sol mis en jeu lors de la pénétration de la pointe tels que la célérité des ondes, le module pénétrométrique et l'amortissement de Smith.

### 2 PRINCIPE DU PANDA 3®

Le principe de l'essai est simple : au cours du battage on vient mesurer dans les tiges, au voisinage de l'enclume, les variations de déformation  $\varepsilon(x,t)$  et/ou d'accélération  $a(x,t)$  entraînées par l'onde de compression créée par l'impact. En effet, quand le marteau de masse  $M$  animé d'une vitesse  $v_m$  heurte la tête du pénétromètre, une onde de compression  $u(x,t)$  est engendrée dans celui-ci et se propage à une vitesse constante  $c_t$  vers le cône. Lorsque  $u(x,t)$  arrive à l'interface cône/sol, une partie de celle-ci est utilisée pour déformer le sol et une autre partie est réfléchiée vers le haut. La propagation de  $u(x,t)$  dans les tiges est décrite par la équation (1) et sa solution générale correspond à la superposition de deux ondes,  $u_d$  et  $u_r$ , descendante et remontante (équation 2). Lors de son parcours  $u(x,t)$  entraîne dans tout point  $x$  des tiges des variations de déformation  $\varepsilon(x,t)$  et

de vitesse particulière  $v(x,t)$  représentées par la superposition des ondes élémentaires.

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

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

$$\varepsilon(x,t) = \varepsilon_d(t - x/c_t) + \varepsilon_r(t + x/c_t) \quad (3)$$

$$v(x,t) = v_d(t - x/c_t) + v_r(t + x/c_t) \quad (4)$$

Il est possible de montrer que l'expression (4) peut être exprimée en fonction des ondes de déformation  $\varepsilon_d$  et  $\varepsilon_r$ .

$$v(x,t) = -c_t [\varepsilon_d(t - x/c_t) - \varepsilon_r(t + x/c_t)] \quad (5)$$

La connaissance des ondes  $\varepsilon_d(t)$  et  $\varepsilon_r(t)$  permet ainsi de décrire entièrement le phénomène dynamique du battage pénétrométrique en tout point  $x$  le long des tiges. Dans la pratique, cette connaissance peut se faire à l'aide de mesures réalisées par le biais de jauges de déformation et/ou d'accéléromètres. Toutefois, dans les enregistrements réalisés lors du battage, ces ondes se trouvent souvent imbriquées les unes avec les autres et il devient nécessaire de les découpler.

### 2.1 Découplage d'ondes et construction de la courbe charge-enfoncement en pointe

Différentes méthodes peuvent être employées pour découpler les ondes  $\varepsilon_d(t)$  et  $\varepsilon_r(t)$  à partir des enregistrements réalisés. Celles-ci diffèrent suivant le type de mesures (déformation, accélération...), suivant la quantité ( $1 \dots n$ ) ainsi que suivant les conditions aux limites imposées. Toutefois, il a été montré que la méthode proposée par (Casem et al. 2003) est celle qui s'adapte le mieux au cas du battage pénétrométrique. A partir des enregistrements  $\varepsilon_A(t)$  et  $v_A(t)$  réalisés dans un point  $A$ , les ondes  $\varepsilon_d(t)$  et  $\varepsilon_r(t)$  sont découpées d'après :

$$\varepsilon_d(t) = \frac{1}{2} \left[ \varepsilon_A(t) - \frac{v_A(t)}{c_t} \right] \quad \text{et} \quad \varepsilon_r(t) = \frac{1}{2} \left[ \varepsilon_A(t) + \frac{v_A(t)}{c_t} \right] \quad (6)$$

En supposant les efforts externes nuls le long de tiges, la connaissance de  $\varepsilon_d(t)$  et  $\varepsilon_r(t)$  permet de calculer les signaux de force  $F_N(t)$  et de vitesse  $v_N(t)$  pour tout point  $N$  situé en dessous du point de mesure  $A$ , notamment dans la pointe, selon la solution proposée par (Karlsson et al. 1989).

$$F_N(t) = \frac{1}{2} [F_{N-1}(t + \Delta t_{n-(n-1)}) + F_{N-1}(t - \Delta t_{n-(n-1)})] + \frac{Z_n}{2} [v_{N-1}(t + \Delta t_{n-(n-1)}) - v_{N-1}(t - \Delta t_{n-(n-1)})] \quad (7)$$

$$v_N(t) = \frac{1}{2} [v_{N-1}(t + \Delta t_{n-(n-1)}) + v_{N-1}(t - \Delta t_{n-(n-1)})] + \frac{1}{2Z_n} [F_{N-1}(t + \Delta t_{n-(n-1)}) - F_{N-1}(t - \Delta t_{n-(n-1)})] \quad (8)$$

avec  $\Delta t_{n-(n-1)} = (x_{n-1} - x_n)/c_n$  et  $Z_n = E_n A_n / c_n$  l'impédance mécanique de la section  $n$  définie par son module de Young  $E_n$ , sa section  $A_n$  et la célérité de l'onde  $c_n$ . Ainsi, à partir des enregistrements  $\varepsilon_A(t)$  et  $v_A(t)$  il est possible de calculer les signaux de force  $F_p(t)$ , vitesse  $v_p(t)$  et enfoncement  $s_p(t)$  en pointe et donc de tracer la courbe  $\sigma_p$ - $s_p$  pour chaque coup de marteau fourni lors du battage. De nombreux tests ont été réalisés pour valider la faisabilité d'un tel essai. Dans la figure 2 on présente un exemple de courbes obtenues pour deux types de sol. On peut remarquer que ces courbes sont répétitives pour un même matériau et varient selon la nature du milieu ausculté permettant d'identifier des comportements différents.

### 2.2 Exploitation de la courbe charge-enfoncement $\sigma_p$ - $s_p$

Pour interpréter la courbe  $\sigma_p$ - $s_p$  il a été proposé une méthodologie fondée sur les travaux de (Smith 1962).

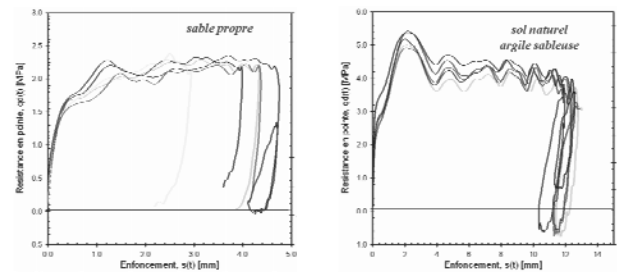


Figure 2. Exemple de courbes charge-enfoncement pénétrométriques obtenues avec le Panda 3 pour deux types de sol (c.f. Benz 2009).

Pour chaque impact, on calcule des paramètres de résistance, d'amortissement, de déformation ainsi que de célérité d'ondes dans le sol.

#### 2.2.1 Paramètres de résistance

En supposant que la contrainte en pointe  $q_d(t)$  est la résultante des composantes statiques  $R_s$  (obéissant à une loi élastoplastique parfaite) et 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  $q_d(t)$ .

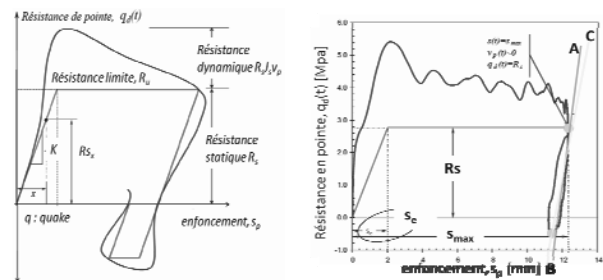


Figure 3. (a) Modèle de Smith et (b) exploitation de la courbe  $\sigma_p$ - $s_p$

Les valeurs de  $R_d(t)$  et du coefficient d'amortissement de Smith  $J_s$  sont 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  $J_s = R_d(t) / (R_s v_p(t))$  (figure 3.b).

#### 2.2.2 Paramètres de déformation

Une fois l'enfoncement maximal  $s_{max}$  atteint, on admet que sol et pénétromètre se mettent à vibrer ensemble dans un régime pseudo-élastique. Dans cette partie de la courbe  $\sigma_p$ - $s_p$ , deux modules sont ainsi définis : un module de déchargement  $E_{p3}^d$  (droite AB) et un module de rechargement  $E_{p3}^r$  (droite BC) (figure 3.b). En assimilant la pointe à une petite plaque encastree à l'intérieur d'un massif élastique semi-infini, on calcule la valeur de  $E_{p3}^{d,r}$  en appliquant la équation de Boussinesq (9) proposée par (Arbaoui 2006).

$$E_{p3}^{d,r} = (1 - \nu^2) \frac{\Delta q_d}{\Delta s_p} \frac{\pi d_p}{4} \frac{1}{k_M} \quad (9)$$

avec  $\nu$  supposé égal à 0,33,  $d_p$  le diamètre de la pointe et  $k_M$  le coefficient d'encastrement de mindlin.

#### 2.2.3 Célérité des ondes $c_p$ et $c_s$

La célérité des ondes de compression  $c_p$  et de cisaillement  $c_s$  dans le sol est calculée par le biais des polaires de choc préconisée par (Aussedat 1970). Pour chaque impact on mesure les pics des ondes descendantes et remontantes dans un espace de temps  $t_0 + 2L/c_t$  nous permettant de calculer la valeur de  $c_p$  (Benz 2009). La valeur de  $c_s$  est calculée d'après l'expression (10) en supposant la valeur de  $\nu$  égale à 0,33.

Tableau 1 – Caractéristiques des matériaux et des éprouvettes.

Caractéristiques	Sable d'Allier (GTR : B1 - USCS : SP)				Argile de Laschamps (GTR : A2 - USCS : ML)					
$T_{max}/2mm/80\mu m/IP$	2,73mm / 90,3% / 1,14% / NP				0,08mm / 99,3% / 96,3% / 15,1% (W <sub>L</sub> : 42,7%)					
OPN – W <sub>OPN</sub>	17,07 kN/m <sup>3</sup> – 7%				18,08 kN/m <sup>3</sup> – 15,8%					
Éprouvettes	1	2	3	4	1	2	3	4	5	6
- w%	0,8	0,8	14,6	14,6	0,6	0,6	0,6	15,38	15,61	19,15
- $\gamma_s$ kN/m <sup>3</sup>	16,1	16,83	16,26	16,52	15,73	16,69	17,43	16,65	17,43	16,72
- %OPN – D.R%	94 - 28	99 - 57	95 - 35	97 - 44	87	92	96	92	96	93
- qd(MPa) Pda2	2,1	4,5	2,4	4,6	9,8	33,9	43	1,9	2,8	1,2
- $E_{\text{triaxial}}$ MPa	2,9	11,2	4,1	6,3	-	-	-	-	-	-
- $E_{\text{Oed}}$ MPa (*)	28,1	97,6	37	57,6	19,6	38,1	63,5	24	36	17,6

$$c_s = c_p \sqrt{(1-2\nu)/(2(1-\nu))} \quad (10)$$

Enfin, à l'issue d'un sondage Panda 3®, on trace en fonction de la profondeur  $z$  les pénétrogrammes de : résistance de pointe  $q_d$ , célérité des ondes  $c_p$  et  $c_s$ , module pénétrométrique  $E_{p3}^d$  et du coefficient d'amortissement  $J_s$  (i.e. figure 6)

### 3 ESSAI EN CHAMBRE DE CALIBRATION

Une série d'essais a été réalisée dans une chambre de calibration composée d'un cylindre en acier de 400mm de diamètre et 810mm de hauteur (figure 4). L'objectif était d'une part de valider les résultats obtenus par l'exploitation de la courbe  $\sigma_p-s_p$  du Panda 3®, d'autre part de vérifier leur sensibilité à l'état du sol et enfin de les confronter aux résultats obtenus par le biais d'essais classiques (œdomètre, triaxial...). Deux sols ont été employés : un sable d'Allier et une argile de Laschamps.

#### 3.1 Réalisation des éprouvettes et des essais

Diverses éprouvettes ont été réalisées en faisant varier la densité  $\gamma_s$  et la teneur en eau  $w$  pour chaque sol étudié (tableau 1). Le compactage des éprouvettes est réalisé à l'aide d'un vérin équipé de différents capteurs suivant la procédure décrite par (Chaigneau 2001). Lors du compactage, des essais de chargement œdométriques étaient réalisés selon la procédure préconisée par (Gorena 2007). L'exploitation des courbes œdométriques a permis de déterminer les valeurs  $E_{\text{Oed}}$  présentés dans le tableau 1. Une fois les éprouvettes réalisées, trois essais de pénétration étaient réalisés avec le Panda 2 et le Panda 3 et dont au moins 1 avec ce dernier (figure 4.c).



Figure 4. (a) essais de chargement œdométriques lors du compactage, (b) éprouvette compactée et (c) réalisation des essais Panda 3®.

Des essais triaxiaux ont été également réalisés pour le sable d'Allier. Les échantillons, conçus à même densité que les éprouvettes auscultées, ont été cisailés dans un chemin triaxial à pression de confinement égale à 50kPa et les résultats obtenus (module tangent initial  $E_{\text{triaxial}}$ ) sont présentés dans le tableau 1.

#### 3.2 Résultats

Au total, une dizaine d'essais Panda 3® ont été réalisés, un pour chaque éprouvette (tableau 1). Pour chaque essai et donc

pour chaque impact réalisé lors du battage, la courbe  $\sigma_p-s_p$  a été déterminée. Un exemple des courbes obtenues lors d'un essai pour quatre éprouvettes différentes est présenté dans la figure 5. Dans l'exemple, les échelles de charge  $\sigma_p$  et d'enfoncement  $s_p$  sont normalisées par rapport à la charge  $\sigma_{p-max}$  et à l'enfoncement  $s_{p-max}$  maximal mesurés pour chaque coup tracé.

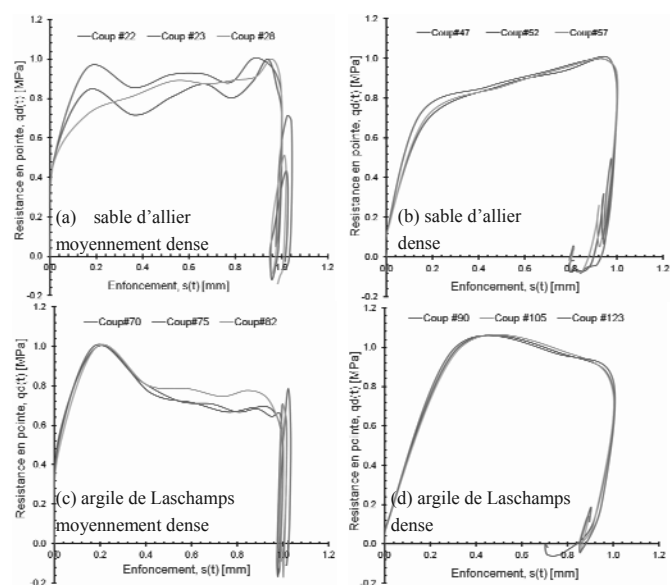


Figure 5. Courbes  $\sigma_p-s_p$  obtenues pour du Sable d'allier (a)  $\gamma_s$  : 16,26kN/m<sup>3</sup>, w% : 14,6, (b)  $\gamma_s$  : 16,83kN/m<sup>3</sup>, w% : 0,8 et pour de l'Argile de Laschamps (c)  $\gamma_s$  : 16,72kN/m<sup>3</sup>, w% : 19,15 et (d)  $\gamma_s$  : 17,43kN/m<sup>3</sup>, w% : 0,6

A partir des courbes  $\sigma_p-s_p$  exposées, on peut remarquer que celles-ci sont caractéristiques et répétitives pour chaque sol ausculté. De même, l'allure des courbes est sensible à l'état du sol. Dans le cas du sable d'Allier, on constate que la courbe  $\sigma_p-s_p$  devient presque asymptotique avec l'augmentation de la densité et que le retour élastique augmente aussi (figure 5.a,b). Quant à l'argile, on peut remarquer que les courbes  $\sigma_p-s_p$  sont sensibles à l'état du sol. Lorsque le sol est très humide (figure 5.c) la contrainte augmente très rapidement jusqu'au pic  $\sigma_{p-max}$ , puis elle chute à même vitesse vers la valeur résiduelle. Cela n'est pas le cas lorsque le sol est sec et plus dense (figure 5.d)

Pour chaque éprouvette, l'ensemble de courbes  $\sigma_{p-max}$  est exploitée automatiquement selon la procédure citée dans §2.2. Les paramètres calculés sont tracés sous forme de pénétrogrammes, tel que montré dans la figure 6. Dans l'exemple présenté, on compare les pénétrogrammes obtenus pour deux éprouvettes de sable d'Allier à différents états de densité (D1 et D2). De manière générale, on peut constater que l'ensemble des paramètres est sensible à l'évolution de la densité du milieu.

A partir des pénétrogrammes obtenus nous avons calculé la valeur moyenne pour chaque paramètre issu de l'exploitation des courbes  $\sigma_p-s_p$  (tableau 2). On peut remarquer que ceux-ci varient en fonction de la nature et de l'état du sol ausculté. De même, l'ordre de grandeur des paramètres calculés, tel que la

célérité des ondes  $c_p$  et  $c_s$ , a une bonne correspondance avec

ceux proposés dans la littérature (Sharour et Gourvès, 2005).

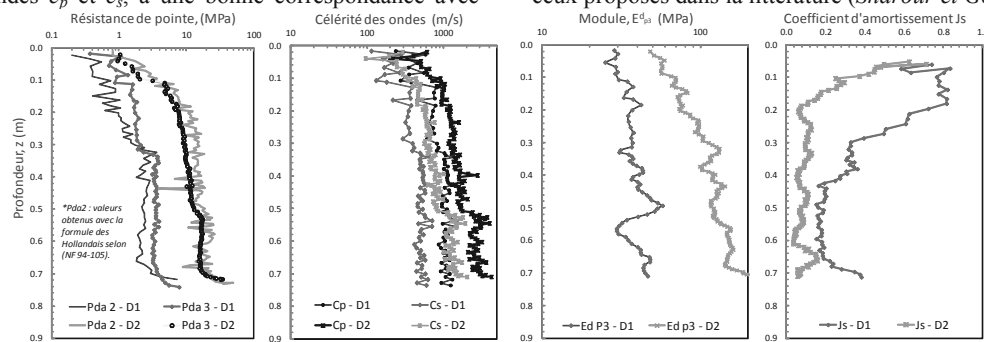


Figure 6. Résultats Panda 3® obtenus en chambre de calibration pour un sable d'Allier sec à 2 états de densité différents D1, D2 (éprouvettes 1 et 2).

Tableau 2 – Synthèse des résultats obtenus à l'aide du Panda 3® dans chambre de calibration

éprouvettes	Sable d'Allier (GTR : B1 - USCS : SP)				Argile de Laschamps (GTR : A2 - USCS : ML)					
	1	2	3	4	1	2	3	4	5	6
w%	0,8	0,8	14,6	14,6	0,6	0,6	0,6	15,38	15,61	19,15
$\gamma_s$ kN/m <sup>3</sup>	16,1	16,83	16,26	16,52	15,73	16,69	17,43	16,65	17,43	16,72
<b>Résultats Panda 3® (valeurs moyennes calculées pour chaque éprouvette)</b>										
- $q_{d P3}$ (MPa)	2,3	11	1,6	2,6	8	32	65	1,5	3	4
- $c_p$ (m/s)	620	1504	383	504	2380	6151	5775	597	989	1081
- $c_s$ (m/s)	298	708	184	242	1145	2955	2773	286	475	519
- $E_{P3}^d$ (MPa)	37	120	41	65	60	130	221	31	62	64
- $J_s$ (Ns/m)	0,26	0,09	0,15	0,15	0,63	0,65	0,70	0,43	0,56	0,75

Par ailleurs, nous avons confronté les valeurs moyennes des modules  $E_{P3}^d$  obtenus pour chaque éprouvette avec ceux obtenus par le biais des essais triaxiaux (cas du sable) et œdométriques (figure 7). Dans le cas du sable, on peut constater qu'il existe une très bonne corrélation entre les modules  $E_{P3}^d$  et les modules triaxiaux  $E_{triaxial}$  et œdométriques  $E_{oed}$  (figure 7.a). Toutefois, la corrélation  $E_{P3}^d - E_{oed}$  est moins bonne pour le cas de l'argile (figure 7.b). Cela peut s'expliquer par le caractère dynamique du chargement pénétrométrique et par l'augmentation des pressions interstitielles au sein du milieu pendant l'enfoncement du cône. De même, les valeurs du module  $E_{oed}$  obtenues lors du compactage des éprouvettes peuvent être perturbées par la création des surpressions interstitielles lors du chargement.

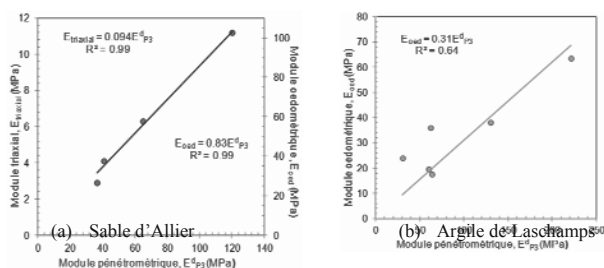


Figure 7. Corrélation entre les modules  $E_{P3}^d$  et les modules triaxiaux  $E_{triaxial}$  et œdométriques  $E_{oed}$  pour (a) Sable d'Allier et (b) Argile de Laschamps.

#### 4 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  $\sigma_p - s_p$  du sol testé. L'exploitation de cette courbe permet de déterminer des paramètres de résistance (résistance de pointe), de déformation (module dynamique), des caractéristiques d'amortissement et de célérité des sols auscultés en fonction de la profondeur tout au long du sondage. Les tests réalisés en chambre de calibration ont montré la bonne répétabilité des mesures ainsi que leur sensibilité aux conditions du sol (état de serrage et état

hydrique) et leur bonne adéquation avec les valeurs de la littérature. Des études comparatives entre les modules obtenus au pénétromètre et ceux obtenus à partir d'essais de chargement œdométrique ou triaxial ont montré une bonne corrélation pour le sable. Cet outil est maintenant opérationnel in situ et des travaux complémentaires sont actuellement menés en vue d'obtenir une meilleure interprétation des paramètres extraits à partir de la courbe charge/enfoncement.

#### 5 REFERENCES

Tokimatsu, K., (1988). Penetration tests for dynamic problems, Proc., ISOPT1, 1, pp. 177-136.  
 Gourvès R, Barjot R (1995). Le pénétromètre dynamique PANDA, Proc. of ECSMFE, Copenhagen, Denmark, 1995, p 83- 88.  
 Benz, M.A. (2009). Mesures dynamiques lors du battage du pénétromètre Panda 2®. Thèse de l'Université Blaise Pascal, Clermont-Fd, (2009).  
 Casem, D., Fourney, W. et Chang, P. (2003), Wave separation in viscoelastic pressure bars using single-point measurements of strain and velocity, Polymer testing 22, 2003, pp 155-164.  
 Chaigneau, L. (2001). Caractérisation des milieux granulaires de surface à l'aide d'un pénétromètre. Thèse de l'Université Blaise Pascal, Clermont-Fd (2001).  
 Karlsson L.G., Lundberg B, Sundin K.G. (1989), Experimental study of a percussive process for rock fragmentation, Int J Rock Mech Min Sci Geomech, 1989, pp.45-50.  
 Smith, E.A.L. (1962), Pile-Driving Analysis by the Wave Equation, ASCE. Paper No. 3306, Volume 127, Partie I, 1962, pp 1145-1193.  
 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.  
 Sharour, I et Gourvès R (2005) Reconnaissance des terrains in situ. Ed. Hermes Lavoisier. 191pp. 2005  
 Aussadat G. (1970). Sollicitations rapides des sols, Thèse de doctorat, Faculté de sciences de l'Université de Grenoble.  
 Gorena A. (2007). Mesure des propriétés de déformabilité de sols de référence, Mémoire d'Ingénieur CUST, Juin 2007.  
 Benz, M.A., Gourvès, R. et Haddani, Y. (2010). Détermination de la courbe charge enfoncement dynamique en pointe pénétrométrique par découplage des ondes. JNGG 2010, Grenoble 7-9 Juillet 2010, France Tome 1, pp17-24.