

# Une nouvelle sonde pour des essais d'expansion en forage

## *A new probe for borehole expansion tests*

Théo BESSON<sup>1,2</sup>, Catherine JACQUARD<sup>1</sup>, Michel RISPAL<sup>1</sup>, Philippe REIFFSTEICK<sup>2</sup>, Fabien SZYMKIEWICZ<sup>2</sup>,

<sup>1</sup> Fondasol, Avignon, France

<sup>2</sup> Université Gustave Eiffel, Marne-la-Vallée, France

**RÉSUMÉ** – Cet article présente un nouvel outil de caractérisation des sols dont le but est de réaliser des essais d'expansion analogues à l'essai au pressiomètre Ménard. L'appareil consiste en deux coquilles rigides semi-cylindriques qui pénètrent le sol. Des essais préliminaires sont présentés ainsi qu'une étude numérique paramétrique. Une chambre d'essais a été conçue pour réaliser des essais comparatifs dans un sable de référence.

**ABSTRACT** – This paper will present a new soil investigation apparatus that is aimed to perform pre-bored expansion tests similarly to Ménard pressuremeter tests. This apparatus consists of two rigid and semi-cylindrical plates which are jacked in the soil. Preliminary tests are presented as well as a comparative numerical study. A calibration chamber has been elaborated to perform comparative tests in a reference sand.

## 1. Introduction

Les essais d'expansion en forage consistent, dans un forage préalablement réalisé, à dilater radialement une sonde cylindrique et à mesurer la pression appliquée sur le sol ainsi que le volume injecté et/ou le déplacement de la paroi du forage. Ce type d'essai in-situ est le seul qui permette de mesurer la déformabilité et la résistance de tout type de sol.

En effet, les essais tels que l'essai de pénétration au cône ou l'essai de pénétration standard ne donnent accès qu'à un critère de rupture du sol, la déformabilité étant estimée à partir de corrélations avec des essais en laboratoire. L'essai de chargement de pointe pénétrométrique ou Cone Loading Test montre des résultats prometteurs pour le calcul d'un module de déformation, mais l'application d'un tel essai à une grande variété de sol est encore incertaine (Teyssier et al., 2020). A l'inverse, le pénétromètre latéral ou le dilatomètre plat, ne déforment pas suffisamment le sol pour atteindre sa résistance limite. Ces méthodes ne sont de plus pas adaptées aux sols durs et aux roches.

L'essai au pressiomètre Ménard est un essai répandu. La sonde en caoutchouc nitrile est composée de trois cellules, gonflée à l'eau pour la cellule centrale et à l'air pour les deux cellules de garde, permettant l'application d'un champ de contrainte cylindrique au voisinage de la cellule centrale. Des paliers de pression de 60 secondes sont appliqués par un contrôleur pression-volume en surface et le volume injecté est mesuré à différentes périodes. Après quelques corrections, on accède à la pression limite de Ménard  $p_{tM}$  et le module de Ménard  $E_M$  :

$$E_M = 2(1 + \nu) \left[ V_c + \frac{V_1 + V_2}{2} \right] \frac{p_2 - p_1}{V_2 - V_1} \quad (1)$$

Où  $V_c$  est le volume initial de la cellule de mesure,  $V_1$  et  $V_2$  et  $P_1$  et  $P_2$  sont respectivement les volumes injectés et les pressions appliquées délimitant la phase pseudo-élastique de la courbe pressiométrique.

Ainsi, l'essai Ménard a permis de développer des méthodes fiables de dimensionnement des fondations à la fois pour des problématiques de résistance et de déformation. En revanche, l'essai souffre de plusieurs défauts :

- l'influence de la qualité du forage sur les résultats de l'essai est importante,
- l'éclatement fréquent de la membrane qui résiste mal aux hétérogénéités du sol quand le volume et la pression augmentent fait que la pression limite est rarement atteinte,
- le coût de cet essai, caractérisé par un appareillage complexe et une durée assez longue, rend son utilisation handicapante pour les projets géotechniques les plus courants,
- enfin, l'utilisation de gaz sous pression soulève des problèmes de sécurité.

Fondasol cherche donc à développer un nouvel essai d'expansion en forage, rapide et facile à mettre en œuvre pour ses études les plus courantes (essais à moins de 10m de profondeur). Il devra être capable de déterminer un module et une pression limite du sol environnant tout comme l'essai Ménard. S'il semble difficile de s'affranchir de l'influence de la qualité du forage, le nouvel essai devra permettre de dépasser certaines des limites de l'essai Ménard en :

- limitant la complexité du contrôleur pression-volume et de la sonde de mesure voire en s'affranchissant si possible de l'utilisation de gaz,
- évitant les éclatements répétés quitte à abandonner le concept de gaine souple déformable utilisé par la sonde pressiométrique,
- éliminant les pertes de charges dans les tubulures lors de variations de volume importantes,
- s'affranchissant des corrections dues à l'inertie de la gaine en caoutchouc.

## 2. Revue bibliographique

A l'inverse des sondes tri-cellulaires classiques, les sondes mono-cellulaires ont une cellule de mesure supposée suffisamment grande pour s'affranchir des effets de bord. Elle est remplie soit par un liquide (comme les sondes Lateral Load Tester d'Oyo ou Texam de Roctest) soit par un gaz (comme la sonde Tri-Mod de Roctest). Dans le cas de la sonde Texam, le fluide est pressurisé via un piston ce qui permet de s'affranchir de l'utilisation d'un gaz. La sonde mono-cellulaire Francis Cour (Lopes et al, 2019) gonflée à l'eau permettrait d'atteindre la pression limite des sols grâce à une gaine textile de contention capable de se déformer de manière importante.

Les pressiomètres avec forage à l'avancement permettent de régler le problème de la qualité du forage mais ils restent trop coûteux et complexes pour une utilisation en dehors des laboratoires de recherche (Baguelin et al, 1977).

Les dilatomètres rigides sont composés de coquilles rigides qui poinçonnent le sol par l'application d'une pression via plusieurs pistons. On peut citer parmi les sondes existantes, la sonde Goodman ou plus récemment la sonde Ettlingen. Ces solutions présentent un grand intérêt en raison de l'absence de membrane mais elles ne sont en pratique utilisées que dans des sols très raides voire rocheux. De plus l'utilisation de pistons nécessite un diamètre de forage plus important (76mm pour la sonde Goodman et 101 mm ou 146 mm pour la sonde Ettlingen) que celui de l'essai pressiométrique en France. Enfin, il n'existe pas de théorie satisfaisante analysant les résultats de tels essais ; un module de déformation est calculé à partir de formules empiriques dérivées d'autres essais *in situ*. A l'inverse, l'essai au pressiomètre Ménard repose sur la théorie d'expansion d'une cavité cylindrique qui a permis de définir de manière rigoureuse le module et la pression limite Ménard.

Au regard de cette étude bibliographique nous avons décidé d'adapter le concept de dilatomètre rigide à une utilisation dans des sols en étanchéifiant la sonde, et dans des forages de petit diamètre en la miniaturisant.

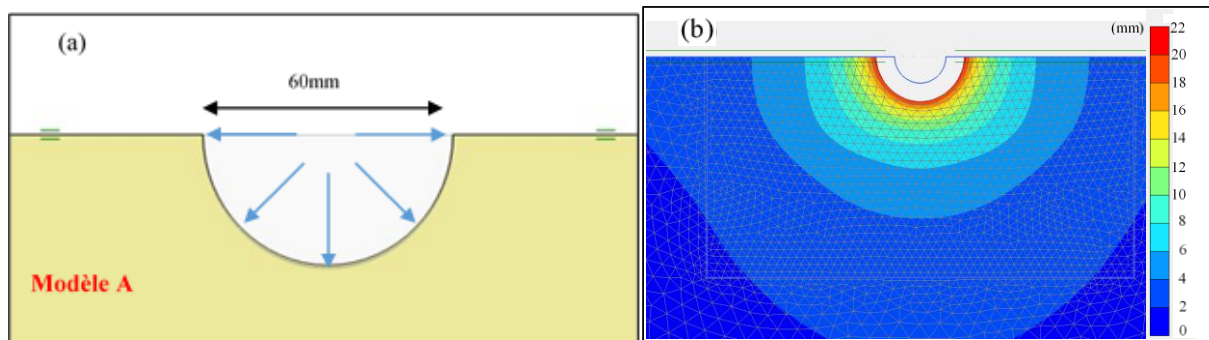
### 3. Étude numérique de la forme du poinçon

Dans cette partie, nous comparons le problème de l'expansion d'une cavité cylindrique avec celui de la pénétration latérale de poinçons à géométries variées. Dans cette communication, seul le paramètre de déformation est étudié. Les comparaisons sont réalisées à l'aide du logiciel de modélisation en éléments finis Plaxis 2D. Une étude basée sur une formulation analytique a également été réalisée mais ne sera pas reprise dans cette communication (Besson et al., 2020). Les modèles présentés ici sont des carrés de 3m de côté. Une consigne de déplacement nul est appliquée sur la frontière supérieure du modèle pour simuler les conditions de forage. Tous les modèles supposent des déformations planes sauf le modèle D qui se place dans des conditions axisymétriques. Les contraintes horizontales initiales sont calculées à partir du coefficient  $K_0$  déduit de la relation de Jaky ( $K_0 = 1 - \sin\varphi$ ). Le modèle élastique parfaitement plastique avec un critère de rupture de Mohr-Coulomb est utilisé. Toutes les interfaces sont rigides et la pression maximale appliquée est de 300 kPa. Les paramètres du sol utilisés pour les simulations sont rassemblés dans le tableau 1.

Tableau 1. Paramètres du sol

$\gamma$ [kN/m <sup>3</sup> ]	E [MPa]	$\nu$	c [kPa]	$\Phi$ [°]	$\psi$ [°]
17	10	0.3	15	25	0

La figure 1 (a) montre une vue agrandie du modèle utilisé pour simuler une déformation cylindrique de type essai pressiométrique, le modèle A. C'est un demi-cylindre de 60 mm de diamètre. Un chargement est appliqué de manière perpendiculaire aux parois du forage. Comme il n'y a pas de structure rigide, il n'est pas nécessaire de modéliser une interface entre le chargement et le sol.

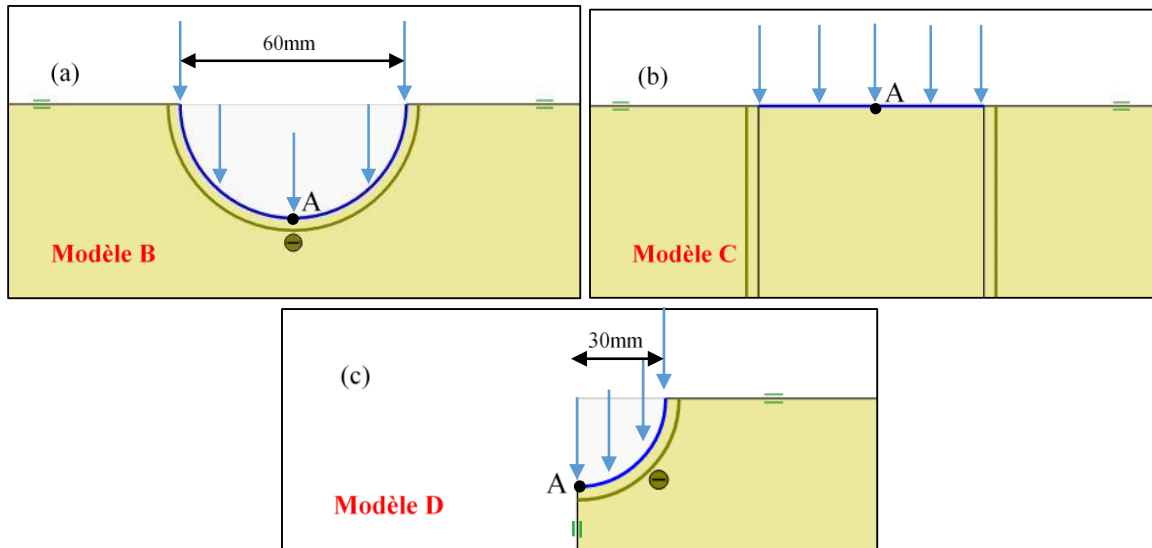


**Figure 1.** (a) Modèle A: expansion d'un demi-cylindre simulant l'essai pressiométrique (b) et maillage déformé à la dernière étape de calcul ( $P = 300$  kPa).

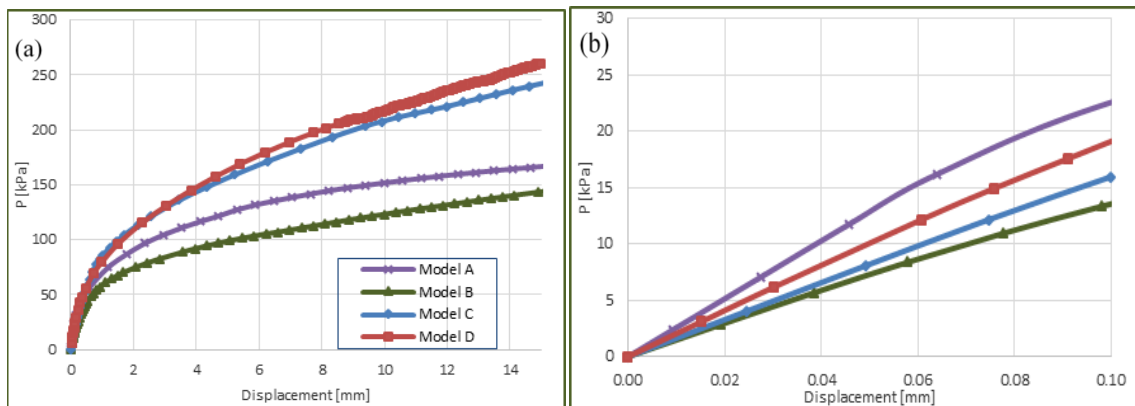
Les poinçons sont modélisés par des plaques supposées infiniment rigides sur lesquelles une contrainte verticale est appliquée (figure 2). Le modèle B est un demi-cylindre de 60 mm de diamètre. Les sondes Goodman et Ettlingen correspondent à cette géométrie. Une interface est placée entre la structure et le sol pour simuler leurs interactions. Les paramètres mécaniques de cette interface sont identiques à ceux du sol. Le modèle C, représente une surface plane. Des interfaces ont été ajoutées des deux côtés de cette surface pour permettre une discontinuité dans les instructions de déplacement. Le modèle D n'est plus infiniment long mais correspond à une demi-sphère de 60 mm de diamètre.

La figure 3 présente les courbes contrainte-déplacement au point A. La tangente des courbes a été calculée dans la partie linéaire correspondant à un déplacement compris entre 0 et 0,1 mm. Les résultats sont présentés dans le tableau 2. Des différences significatives peuvent être observées en termes d'allure et de rigidité. En particulier, la rigidité initiale du modèle B (sonde Goodman ou Ettlingen) est très éloignée de celle du modèle A. Deux modèles supplémentaires ont alors été créés (figure 4) permettant

d'étudier l'influence de la largeur du poinçon cylindrique. Ils sont basés sur le demi-cylindre du modèle B mais avec une largeur plus petite par rapport au diamètre du forage (45 mm pour le modèle E et 30 mm pour le modèle F). Le modèle F correspond à la géométrie du prototype actuel. Les tangentes à l'origine des courbes contraintes-déformations (figure 5) ont aussi été calculées pour ces modèles (tableau 3). On peut voir que le module augmente quand le poinçon diminue de taille. Aussi, le modèle F qui le plus petit poinçon, est le modèle qui a la rigidité initiale la plus proche de celle obtenue avec l'essai pressiométrique, le modèle A.



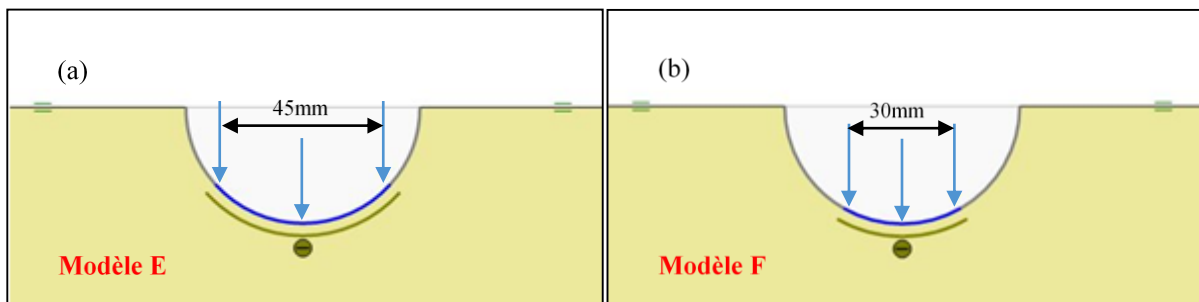
**Figure 2.** Géométries des poinçons étudiés (a) Modèle B: demi-cylindre, (b) Modèle C: poinçon plat. (c) Modèle D: demi-sphère.



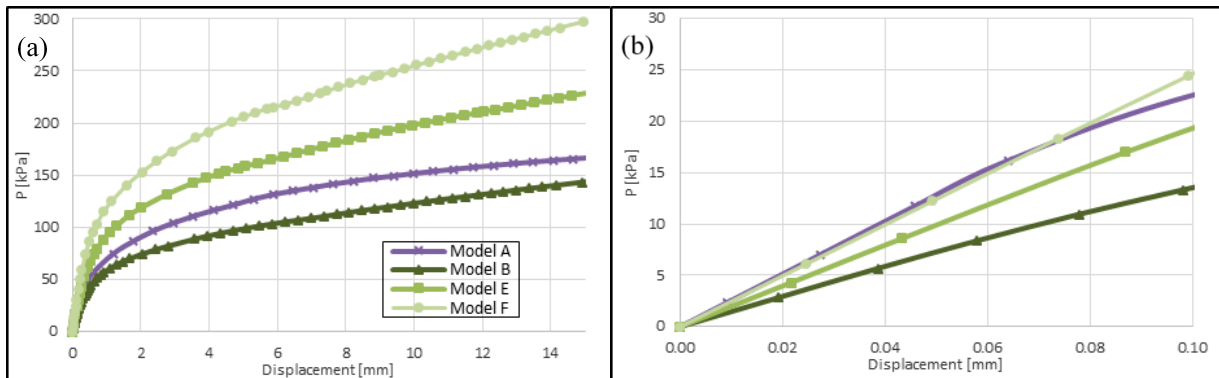
**Figure 3.** (a) Courbes contrainte-déplacement associées aux modèles présentés figure 2 au point A. (b) Agrandissement au niveau de la zone linéaire où les rigidités ont été calculées.

Tableau 2. Rigidités calculées sur la partie initiale des courbes contrainte-déplacement.

Modèle	A	B	C	D
Rigidité [kPa/mm]	253	132	160	189



**Figure 4.** Géométries des poinçons courbés d'une longueur horizontale de (a) 45 mm, Modèle E, et (b) 30 mm, Modèle F.



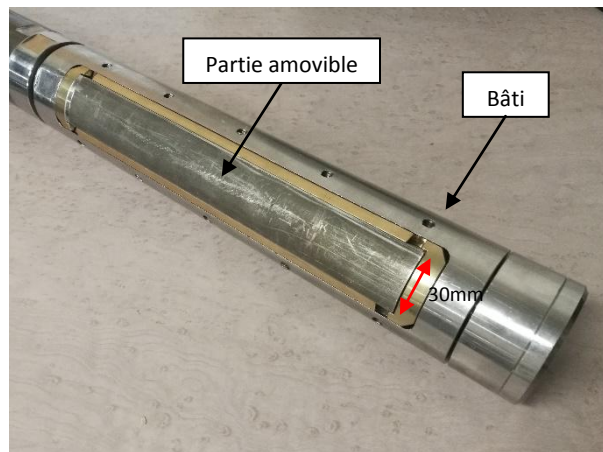
**Figure 5.** (a) Courbes contrainte-déplacement associées aux modèles présentés Figure 5 (b) agrandissement au niveau de la zone linéaire où les rigidités ont été calculées.

Tableau 3. Rigidités calculées sur la partie initiale des courbes contrainte-déplacement.

Modèle	A	B	E	F
Rigidité [kPa/mm]	253	132	196	248

#### 4. Présentation du prototype

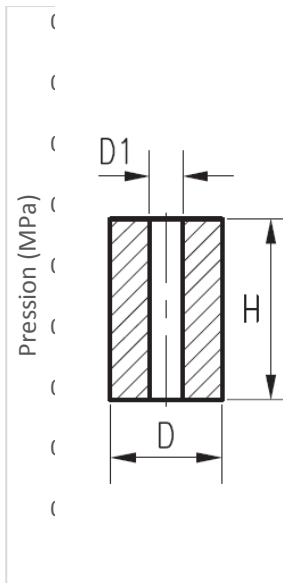
Le prototype développé est présenté figure 6. Il est constitué de deux coquilles de 230 mm de long et de 30 mm de large qui s'écartent de manière diamétralement opposée. La sonde a un diamètre de 60 mm au repos et peut atteindre une envergure de 90 mm lorsque les bras sont au maximum de leur course. Cette envergure correspond au diamètre auquel la sonde Ménard double approximativement son volume. L'objectif est d'utiliser les formules appliquées dans la procédure Ménard, les relations entre les deux essais doivent donc être étudiées en profondeur.



**Figure 6.** Le prototype et une des deux coquilles rigides diamétralement opposées.

Une première série de tests préliminaires a été réalisée dans un faux sol élastique constituée d'un tube en polyuréthane 70 shore d'un diamètre intérieur 64 mm et extérieur 120 mm (figure 7). Le pilotage du prototype s'est fait à vitesse d'expansion constante (environ 2 mm/min). Pour la sonde Ménard, deux pilotages ont été testés : un pilotage classique en paliers de pression et un pilotage en vitesse d'expansion constante. Pour le prototype, un capteur de force inséré dans le mécanisme d'expansion nous permet de calculer à partir de la surface des coquilles la force appliquée sur le faux sol.

On peut voir que l'allure générale des trois courbes est comparable. Le changement de mode de pilotage de la sonde pressiométrique n'a pas eu d'influence sur la courbe étant donné le caractère essentiellement élastique du faux sol.



**Figure 7.** A gauche : faux sol en polyuréthane dans lequel sont réalisés les essais comparatifs (diamètre intérieur  $D1=64$  mm, diamètre extérieur  $D=120$  mm, longueur  $H=500$  mm) . A droite : Résultats des essais.

Une étude plus approfondie permettra de caractériser la répétabilité des essais avec le prototype et de comparer les pentes des courbes entre les différentes sondes. Cependant, pour réaliser des essais dans un matériau plus représentatif d'un sol réel, des essais dans une chambre d'essais vont être réalisés.

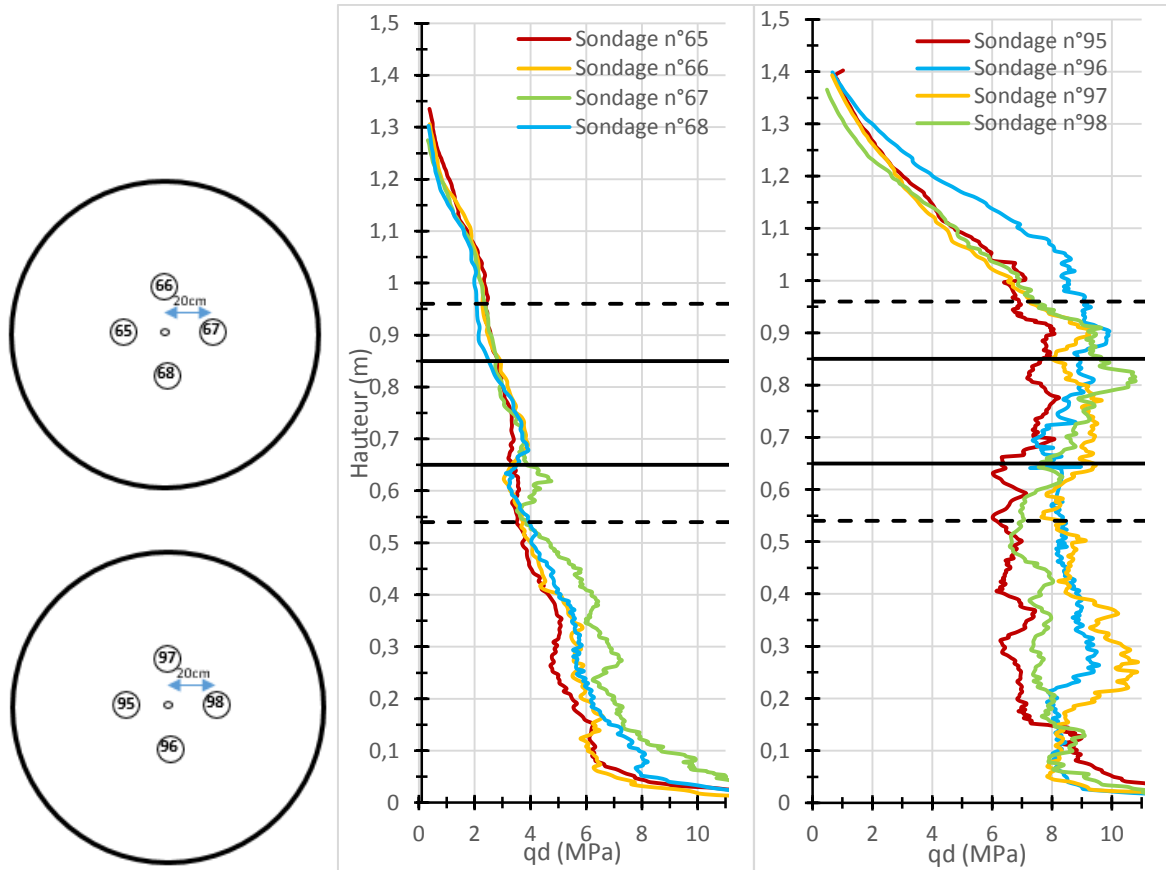
## 5. Chambre d'essais pour étude comparative

Une chambre d'essais a été développée pour cette étude : elle consiste en une buse cylindrique de 1,5 m de haut et de 1 m de diamètre contenant en son centre la sonde utilisée pour l'essai. Le sol est reconstitué à partir d'un sable d'Hostun HN31. En premier lieu, la méthode de pluviométrie a été testée pour former un massif de sable homogène. L'application de cette méthode a cependant donné des résultats médiocres : d'importantes hétérogénéités radiales et verticales de la densité apparaissaient en raison de mouvements d'air déviant les jets de sable. De plus, la densité globale du massif obtenue était insuffisante pour pouvoir réaliser des essais intéressants. Une autre méthode a donc été élaborée : un compactage est réalisé par vibration d'une aiguille dans le massif par paliers successifs de bas en haut. La durée d'application des paliers ainsi que la répartition des sondages ont une influence sur la densité obtenue. Des essais au pénétromètre dynamique PANDA® sont ensuite réalisés afin d'étudier l'homogénéité du massif. La figure 8 montre plusieurs essais au PANDA® pour deux protocoles de densification. Pour l'état de densité le plus lâche (pénétrogramme de gauche), la résistance de pointe moyenne à hauteur de la cellule de mesure est de 3,3 MPa. Elle s'élève à 8,5 MPa pour l'état de densité le plus compact (pénétrogramme de droite). On peut voir que pour l'état de densité le plus faible, il existe une variation significative de la densité avec la profondeur et une faible variation autour de la sonde. C'est l'inverse pour l'état de densité le plus élevé. Nous avons pour objectif futur d'obtenir une homogénéité verticale identique au pénétrogramme de droite et une homogénéité transversale identique au pénétrogramme de gauche.

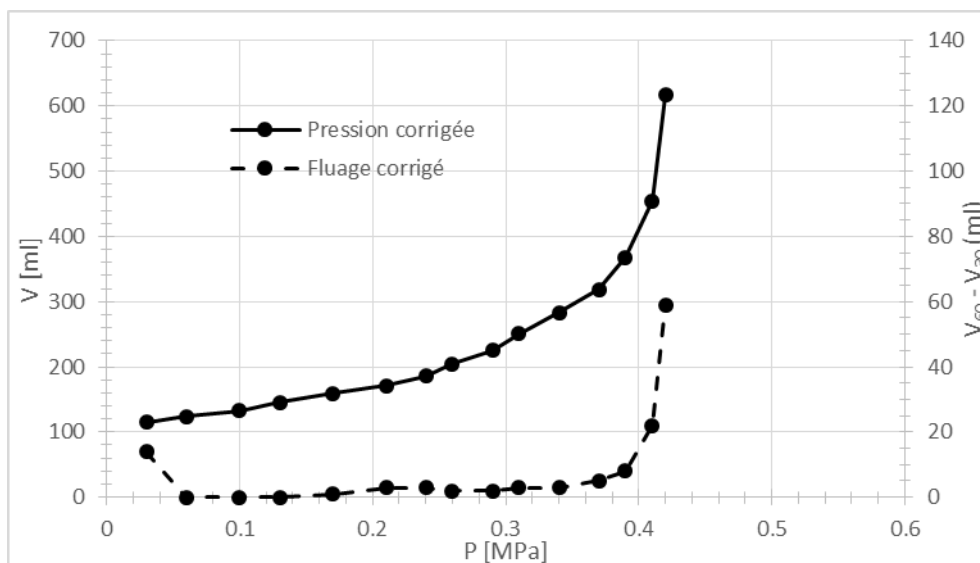
Des essais pressiométriques ont été réalisés pour ces deux sols. Pour l'état le plus dense cependant, la densité du massif était si importante que l'effort exercé lors de l'essai s'est propagé jusqu'à la paroi de la chambre rendant l'essai non représentatif. Pour l'état



le plus lâche, on obtient une courbe pressiométrique (figure 9) avec un module de Ménard égal à 4,16 MPa ( $P_1=0,02$  MPa et  $P_2=0,26$  MPa) et une pression limite extrapolée à 0,43 MPa. Ces caractéristiques mécaniques demeurent faibles ce qui nous pousse à tester dans l'avenir une durée de vibration supérieure tout en prenant garde à éviter une densité du massif trop importante. Lorsqu'un protocole permettant d'obtenir une telle densité sera établi, des essais comparatifs seront réalisés entre le prototype et le pressiomètre Ménard.



**Figure 8.** Contrôles de densité au PANDA pour deux sols compactés par vibration. La durée de vibration contrôle la densité du sol: elle est plus importante pour le sol le plus dense (pénétragramme de droite) que pour le sol le moins dense (pénétragramme de gauche). Le tracé noir plein délimite la position verticale de la cellule de mesure tandis que le tracé en pointillé délimite la position verticale de la gaine.



**Figure 9.** Exemple d'un essai pressiométrique piloté en pression dans la chambre d'essai. Cet essai est associé à l'état de densité présenté Figure 8 à gauche.

## **6. Conclusion**

Un état de l'art sur les essais d'expansion en forage a mis en évidence l'intérêt des sondes de type Goodman ou Ettlingen. Une révision de leur concept a été cependant nécessaire afin de permettre leur utilisation dans les sols et dans des forages de diamètre inférieur. Une étude numérique a montré des similarités en termes de rigidité initiale entre la pénétration d'un poinçon cylindrique et l'essai au pressiomètre Ménard.

Ces analyses ont mené au développement d'une nouvelle sonde d'expansion en forage qui consiste en deux coquilles rigides cylindriques de 30 mm de large imbriquées dans un bâti cylindrique de 60 mm de diamètre. Pilotée à vitesse d'expansion constante, la sonde peut s'étendre jusqu'à une envergure de 90 mm. Des tests préliminaires ont permis de comparer le prototype avec une sonde pressiométrique Ménard dans un faux sol en polyuréthane. On constate une similitude dans l'allure des différentes courbes. Cependant, une étude dans un sol réel doit être réalisée pour la validation du prototype. Une chambre d'essai a donc été élaborée dans laquelle un sol sableux est mis en place par vibrocompactage à l'aiguille vibrante. Nous avons montré que l'on pouvait obtenir différents états de densité en faisant varier le temps de vibration. Lorsqu'une densité adéquate sera obtenue, des essais comparatifs seront réalisés.

Enfin, des comparaisons entre les modélisations présentées dans cette communication et des mesures avec le prototype seront effectuées.

## **7. Références**

- Baguelin F., Jézéquel J. (1977). Le pénétromètre latéral autoforeur, Comptes rendus, 9th ICSMFE, Tokyo, Japan, vol.1, pp.27-30.
- Besson T., Rispal M., Jacquard C. Reiffsteck P., Szymkiewicz F. (2020) A new tool for soil characterization, ISC6, Budapest, (sous presse).
- Lopes A., Dupla J.C., Canou J., Droniuc N. (2019). Laboratory validation of an innovative mono-cell pressuremeter probe: test procedures and first results. Comptes rendus 17ième ECSMGE, Reykjavik, ISBN 978-9935-9436-1-3, doi:10.32075/17ECSMGE-2019-0639
- Marchetti S. (1975). A new in situ test for the measurement of horizontal soil deformability, In situ measurement of soil properties Rayleigh, ASCE, pp. 231-243.
- Teyssier A., Reiffsteck P., Rispal M., Jacquard C. (2020). Evaluation of modulus deformation and drainage condition during Cone Loading Tests, ISC6, Budapest, (sous presse).