

INTERPRETATION DE L'ESSAI IN-SITU DE CHARGEMENT UNIAXIAL AU DILATOSOL : APPLICATION EN CHAMBRE D'ETALONNAGE

INTERPRETATION OF THE IN-SITU UNIAXIAL TEST WITH THE DILATOSOL : APPLICATION IN A CALIBRATION CHAMBER

Théo BESSON^{1,2}, Michel RISPAL¹, Catherine JACQUARD¹, Philippe REIFFSTECK², Fabien SZYMKIEWICZ²

¹ Fondasol, Avignon, France

² Université Gustave Eiffel, Marne-la-Vallée, France

RÉSUMÉ – Dans cet article, nous comparons plusieurs prototypes Dilatosol à partir d'essais réalisés sur un sable d'Hostun sec de densité comprise entre 0,5 et 0,75 en chambre d'étalonnage. Les différents prototypes donnent des résultats proches en matière de module élastique. Le rapport entre le module pressiométrique et le module Dilatosol est compris entre 1,2 et 0,7 en fonction de la densité et de la théorie utilisée.

ABSTRACT – In this study, we compare several Dilatosol prototypes from tests performed on a Hostun sand at an index density varying from 0,5 to 0,75 in a calibration chamber. Despite the significant differences in the shells' geometry, they have little impact on the measurement of a modulus. Pressuremeter tests exhibit higher modulus by an order 1,2 to 0,7 depending on the sand's density and the theory considered.

1. Introduction

L'essai pressiométrique est le seul essai in-situ permettant d'accéder directement et de manière simultanée à un paramètre de déformation, le module de Ménard E_M , et à un paramètre de rupture, la pression limite de Ménard p_{IM} . Grâce à cela, cet essai a permis de développer des méthodes précises et fiables pour le dimensionnement de fondations tant pour des problématiques de déplacements que pour des problématiques de résistance.

Cependant, cet essai souffre de plusieurs défauts comme la complexité de l'équipement et plus particulièrement du contrôleur pression-volume, ainsi que l'éclatement fréquent de la sonde. Un nouveau concept d'appareil a donc été développé, appelé Dilatosol. Le principe de fonctionnement de l'appareil est analogue à celui du dilatomètre rigide utilisé en mécanique des roches : deux coquilles rigides diamétralement opposées sont initialement plaquées contre les parois du forage, puis foncées dans le sol. La mesure de l'enfoncement des coquilles dans le sol en fonction de la contrainte appliquée permet de tracer une courbe contrainte-déformation de manière analogue à l'essai pressiométrique.

Le changement de la géométrie du chargement par rapport au pressiomètre nécessite de redéfinir l'expression du module élastique et de la pression limite. Dans cet article, nous présentons l'évolution du concept Dilatosol à travers les différents prototypes qui ont été développés. Une étude comparative entre ces différents prototypes est réalisée sur un sable d'Hostun sec reconstitué en chambre d'étalonnage pour plusieurs états de densité compris entre 0,5 et 0,75. Parallèlement, plusieurs estimations basées sur des relations issues de la théorie de l'élasticité permettant de calculer un module élastique sont comparées. Enfin, les essais réalisés avec les sondes Dilatosol sont comparés avec des essais pressiométriques réalisés dans des conditions similaires.

2. Les prototypes Dilatosol

Pour le 1^{er} prototype, le système d'écartement des coquilles est de type mécanique tandis que pour le 2^{ème} et le 3^{ème} prototype il est de type hydraulique.

Le prototype 1 est présenté Figure 1. L'écartement des coquilles est réalisé via un système vis/écrou avec un moteur électrique actionnant la vis. Un capteur mesure la force de réaction du sol à l'écartement des coquilles. La longueur des coquilles (230 mm) a été choisie proche de la longueur de la cellule de mesure d'une sonde pressiométrique de Ménard (210 mm). Les coquilles ont un demi-angle d'ouverture de 30°.

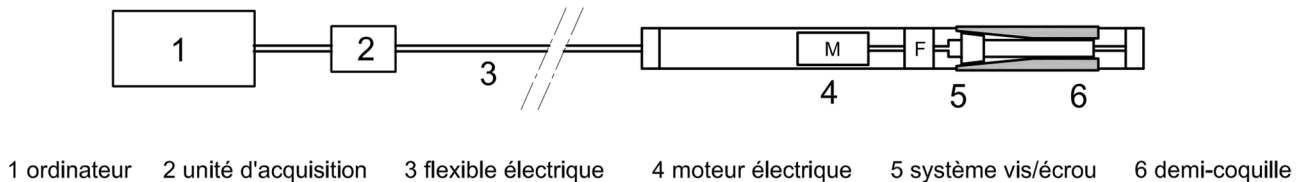


Figure 1. Prototype 1.

Pour les prototypes 2 et 3 (Figure 2), chaque coquille est déplacée par des vérins hydrauliques (au nombre de 2 par coquille pour le prototype 2 et de 5 par coquille pour le prototype 3). Un flexible hydraulique relie les vérins à un contrôleur pression volume (CPV) qui consiste en un réservoir cylindrique au sein duquel un piston déplace l'huile. La longueur des coquilles a été augmentée à 400 mm tout en gardant un demi-angle d'ouverture de 30°.

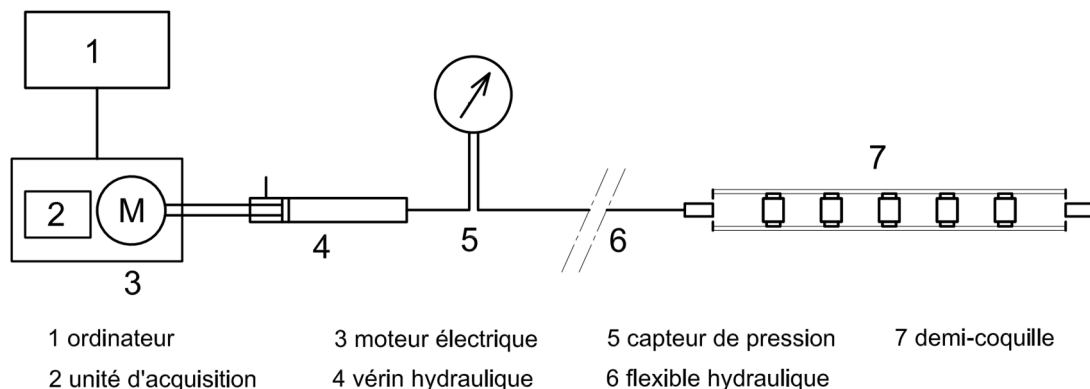


Figure 2. Prototype 3.

Le prototype 3 est une version améliorée du prototype 2 : avec ses 5 vérins par coquille, il est capable d'appliquer une contrainte plus importante sur le sol et a un diamètre initial plus faible. Les prototypes 3a et 3b diffèrent simplement sur la géométrie de leurs coquilles : pour le prototype 3a, elles sont creuses en certaines parties avec un diamètre initial de 48 mm. Pour l'interprétation des données, cette surface d'appui a été assimilée à une coquille équivalente continue avec un demi-angle d'ouverture de 62°. Pour le prototype 3b, une coquille continue supplémentaire a été superposée sur la précédente. Il en résulte un demi-angle d'ouverture de 90° pour un diamètre initial de 55 mm. Les différentes géométries de coquilles utilisées sont résumées sur la Figure 3. L'impact de la variation de la géométrie des coquilles sur le calcul d'un module a fait l'objet d'une étude numérique (Besson et al., 2020).

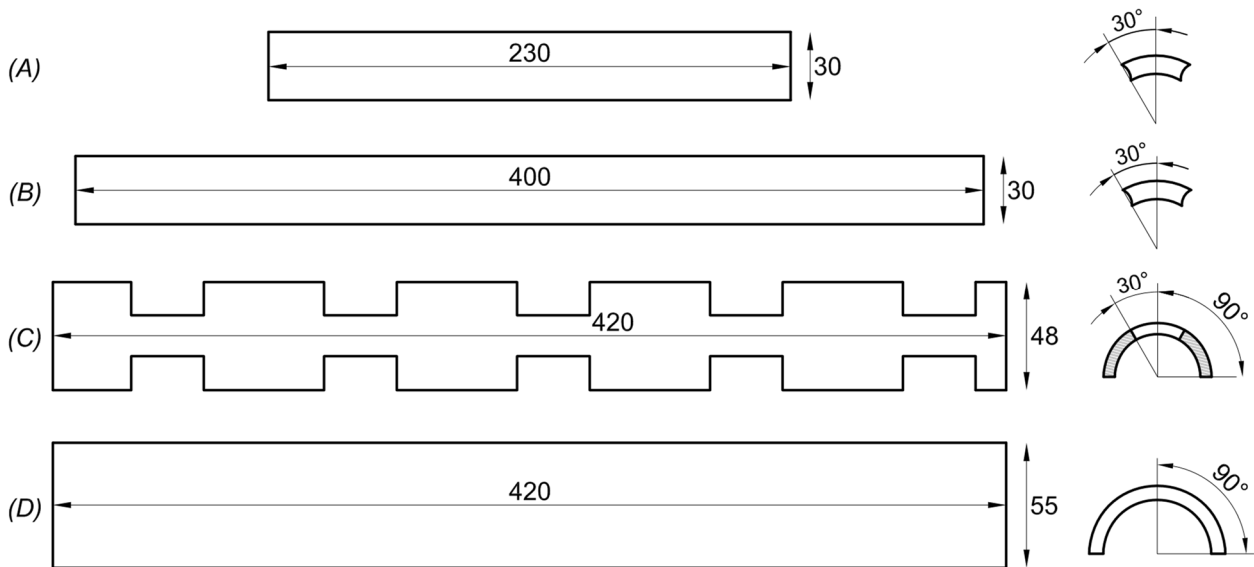


Figure 3. Géométrie des coquilles utilisées. (A) Prototype 1. (B) Prototype 2. (C) Prototype 3a. (D) Prototype 3b. Les longueurs sont exprimées en millimètre.

3. Essais en chambre d'étalonnage

3.1. La chambre d'étalonnage

Le matériau étudié est le sable d'Hostun HN31. Ses propriétés physiques mesurées en laboratoire sont rassemblées dans le Tableau 1.

Tableau 1. Caractéristiques granulométriques du sable HN31 (tailles de grains D_{10} , D_{50} , D_{90} , indices des vides minimal $e_{\min}$ et maximal $e_{\max}$, poids volumique minimal $\gamma_{\min}$ et maximal $\gamma_{\max}$ et poids volumique des grains γ_s).

D_{90} (μm)	D_{50} (μm)	D_{10} (μm)	γ_s (kN/m^3)	$e_{\min}$	$e_{\max}$	$\gamma_{\min}$ (kN/m^3)	$\gamma_{\max}$ (kN/m^3)
490	360	230	26,02	0,542	1,045	12,72	16,87

La chambre d'étalonnage consiste en un cylindre de 1,5 m de haut et de 1 m de diamètre au centre duquel est placée la sonde (Figure 4). La chambre est alors remplie de sable qui est ensuite compacté par vibration, par passe. La sonde Dilatosol est recouverte d'une membrane en caoutchouc empêchant le sable de pénétrer dans l'espace entre les coquilles et le corps de sonde.

La mesure de la masse de sable ajoutée permet de suivre l'évolution de la densité du sable à chaque étape de compactage. Des essais au pénétromètre dynamique permettent d'accéder à la densité du matériau via la relation entre la densité du massif γ et la résistance de pointe dynamique q_d (Figure 5). La relation empirique retenue est :

$$\gamma = A * \ln(q_d) + B \quad (1)$$

Avec $A=0,54$ et $B=14,47$. Cette relation est proche de celle obtenue par Dhaybi (2015) qui a considéré $A=0,88$ et $B=14,62$.

Avant chaque essai d'expansion, au moins 4 essais pénétrométriques sont réalisés de part et d'autre de la sonde. La densité du sable est ensuite obtenue en utilisant la relation (1) en prenant la valeur moyenne de la résistance de pointe dans le voisinage de la sonde.

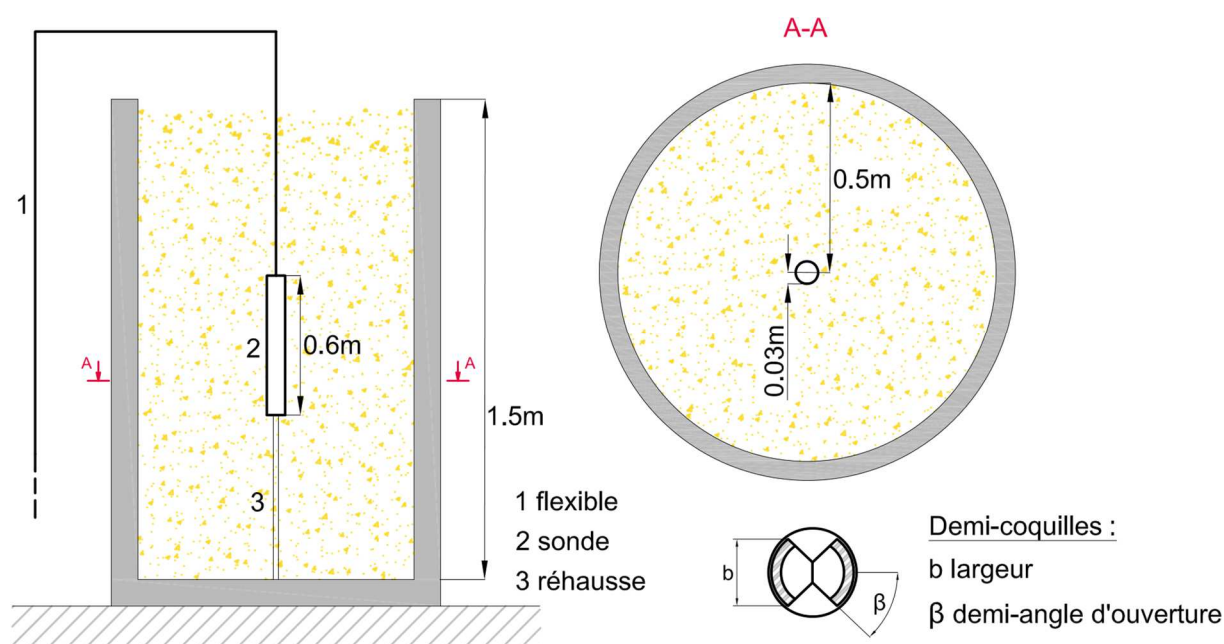
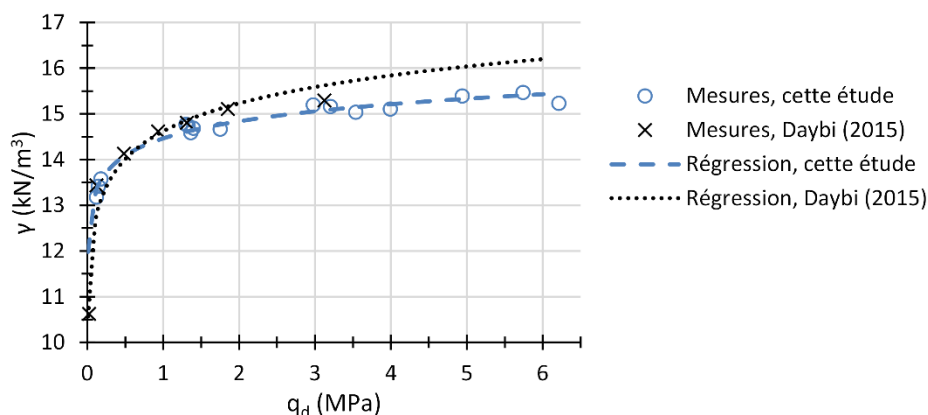


Figure 4. Le Dilatosol dans la chambre d'étalonnage.

Figure 5. Corrélation entre le poids volumique γ et la résistance de pointe moyenne q_d .

3.2. Procédure d'essai

L'essai au Dilatosol est un essai à déplacement imposé : l'enfoncement des coquilles dans le sol est réalisé à vitesse constante choisie par l'utilisateur. Cette vitesse a été calibrée par rapport à la durée théorique d'un essai pressiométrique (doublement du volume de la cavité cylindrique initial en 10 minutes environ). Les mesures de contrainte et d'écartement ont été moyennées par pas de 1 mm d'enfoncement.

En parallèle, des essais pressiométriques ont été réalisés et interprétés conformément à la norme ISO 22476-4 (2015). Le chargement monotone croissant a été mené avec un pas de pression constant tout au long de l'essai.

Pour les deux types d'essai, la plage sur laquelle le module a été calculé intègre tous les segments consécutifs ayant une pente inférieure ou égale à λ fois la pente la plus faible. Ce coefficient a été calculé selon la formule donnée par la norme.

3.3. Résultats typiques d'essais

La Figure 6 montre des résultats typiques d'essais obtenus avec les différents prototypes ainsi qu'avec le pressiomètre. On peut voir que les courbes obtenues avec le Dilatosol ont globalement une allure linéaire, sauf pour le prototype 1 dont la courbe a plutôt une allure hyperbolique ce qui est dû à un comportement mécanique différent. L'allure des courbes

diffèrent de la courbe pressiométrique au niveau des grandes déformations, la rupture globale du sol n'étant pas atteinte avec les prototypes actuels. Un nouveau prototype en développement aura une course de vérins plus importante et permettra de prolonger la courbe.

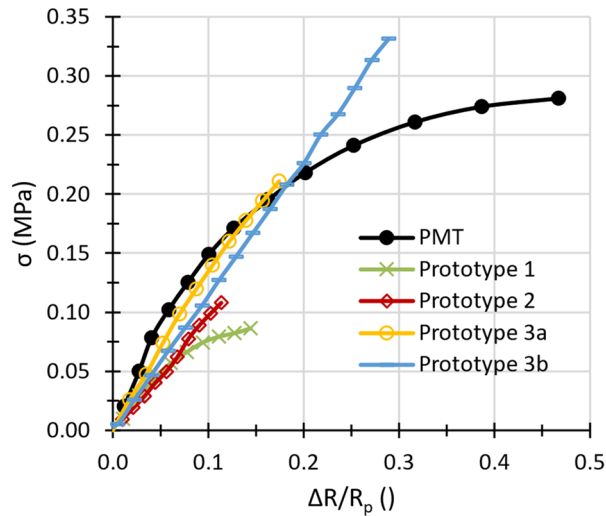


Figure 6. Courbes typiques d'essais au Dilatosol et comparaison avec un essai pressiométrique vers $I_D=0,55$.

4. Interprétation : calcul de modules

4.1. Formules analytiques pour le calcul d'un module élastique

On appelle module apparent la pente de la courbe en représentation $\Delta\sigma = f(\Delta R/R_p)$:

$$E_{app} = R_p \frac{\Delta\sigma}{\Delta R} \quad (2)$$

Avec les grandeurs suivantes calculées à partir de deux points P1 et P2 délimitant l'intervalle de calcul de la pente :

$\Delta R = R_2 - R_1$ l'enfoncement moyen d'une coquille entre P1 et P2.

R_p la distance moyenne des coquilles par rapport à l'axe de révolution de la sonde au moment du plaquage contre le sol. Dans notre cas où le sol est moulé autour de la sonde, R_p correspond au rayon initial de la sonde.

$\Delta\sigma = \sigma_2 - \sigma_1$ la variation de la contrainte appliquée sur le sol dans la direction d'écartement des coquilles.

Cette grandeur permet de comparer les différents prototypes entre eux mais elle ne correspond pas un module élastique.

Considérons maintenant les différentes théories permettant de calculer un module élastique à partir de cette pente. Le module de Ménard est basé sur la théorie de l'expansion d'une cavité cylindrique dans des conditions de déformations planes. Il peut s'écrire sous la forme :

$$E_M = (1 + \nu) R_m \frac{\Delta\sigma}{\Delta R} \quad (3)$$

Avec :

ν le coefficient de Poisson du sol conventionnellement fixé à 0,33.

$R_m = (R_1 + R_2)/2$ le rayon moyen de la sonde entre P1 et P2.

Le problème d'un chargement unidirectionnel est plus complexe puisque l'on perd la symétrie du chargement autour de l'axe du forage. La théorie permettant d'interpréter un module à partir d'un essai au dilatomètre rigide a été présentée par Goodman et al. (1968). Plusieurs corrections et approfondissements ont ensuite été apportés (Heuzé et Salem, 1985) jusqu'à atteindre la forme finale :

$$E_{Goodman} = K(v, \beta) R_p \frac{\Delta \sigma}{\Delta R} \quad (4)$$

Avec :

β le demi-angle d'ouverture des coquilles.
et la grandeur $K(v, \beta)$:

$$K(v, \beta) = \frac{720}{\pi^2} \frac{1}{\beta} (1 - v^2) \sum_{m=1}^{\infty} \frac{1}{m^3} (1 - (-1)^m) \sin^2(m\beta) \quad (5)$$

Le Tableau 2 donne les valeurs de K appliquées aux mesures issues des différents prototypes.

Pour une fondation de longueur a et de largeur b, le module du sol assimilé à un espace semi-infini peut être exprimé sous la forme (Giroud, 1968) :

$$E_{Giroud} = (1 - v^2) b I \frac{\Delta \sigma}{\Delta R} \quad (6)$$

Avec le facteur d'influence I dépendant du rapport b/a. Pour un tassement moyen sous une fondation souple, les différents facteurs bI utilisés sont renseignés dans le Tableau 2.

Tableau 2. Paramètres des modèles de Giroud et de Goodman utilisés.

	K ()	bI (mm)
Prototype 1	1,27	62,4
Prototype 2	1,27	64,5
Prototype 3a	1,65	95,0
Prototype 3b	1,52	114,5

4.2. Application aux essais en chambre d'étalonnage

La Figure 7 montre les modules calculés à partir des essais en chambre d'étalonnage. Concernant le module apparent E_{app} , on peut voir que tous les prototypes donnent des résultats comparables avec des valeurs comprises entre 0,2 et 7 MPa à l'exception du prototype 1 qui donne des modules légèrement plus faibles : cela est lié au comportement mécanique que nous avons évoqué plus tôt.

Les trois modules élastiques donnent aussi des résultats comparables avec des valeurs comprises entre 0,4 et 13 MPa. Pour le module de Ménard, tous les modules apparents sont multipliés par un coefficient $(1+v)$ quelle que soit la géométrie des coquilles. Pour le module de Giroud, on peut constater une plus grande dispersion des modules entre les différents prototypes et notamment pour des densités élevées (vers $I_D=0,7$) où le prototype 3b donne un module significativement supérieur comparé au prototype 3a. Cette dispersion n'est pas autant prononcée avec le module de Goodman.

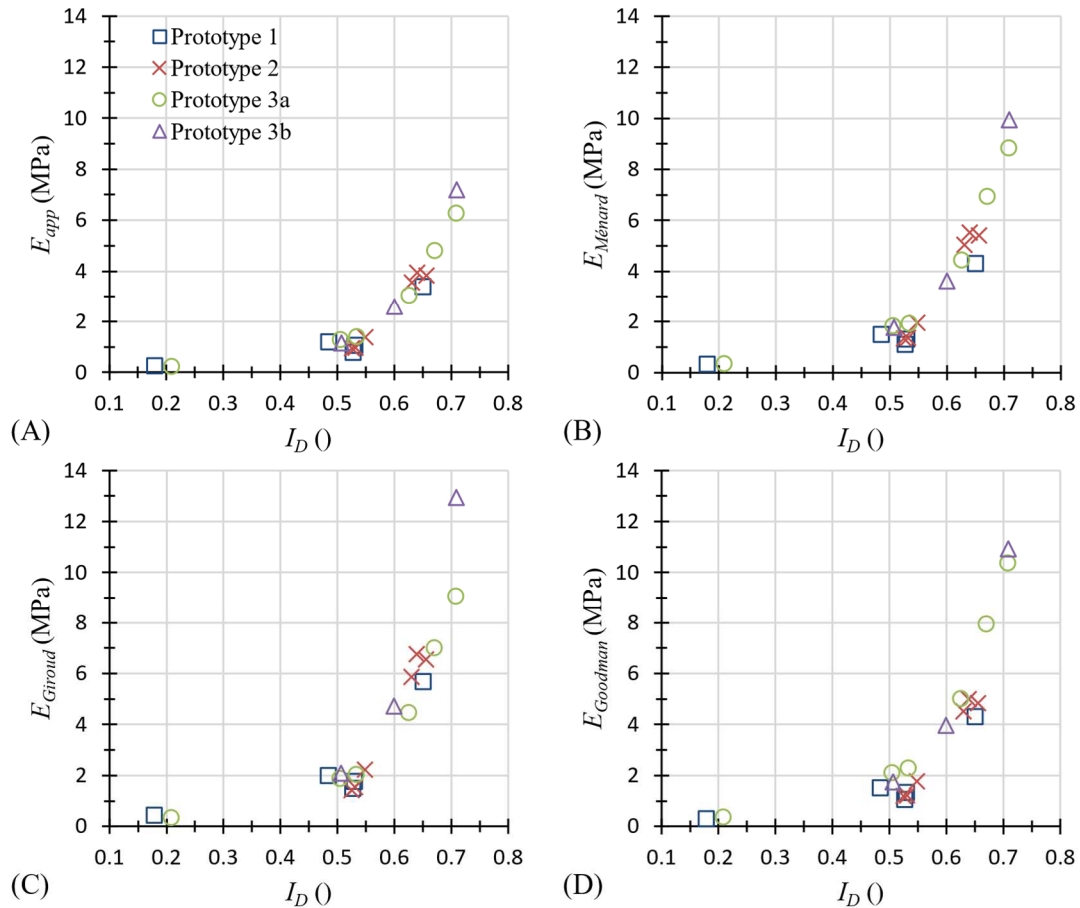


Figure 7. Modules du sable HN31 obtenus avec les différents prototypes Dilatosol.

4.3. Comparaison avec les essais pressiométriques

Pour comparaison, 5 essais pressiométriques ont été réalisés pour un indice de densité variant entre 0,5 et 0,75 (Figure 8). En première approche, on peut comparer les régressions linéaires sur les graphiques (E , q_d). On observe qu'entre $I_D=0.55$ et $I_D=0.65$ les modules Dilatosol sont proches des modules pressiométriques. Au-delà, les modules Dilatosol sont supérieurs.

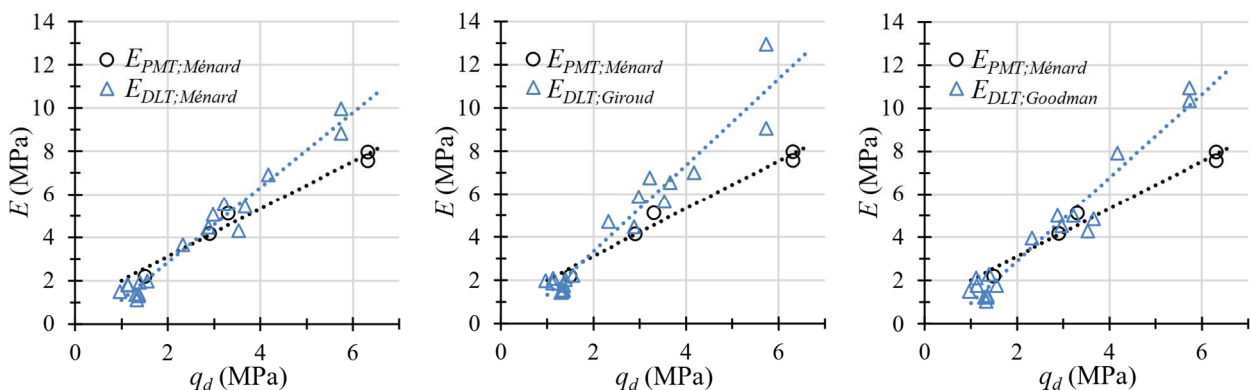


Figure 8. Comparaison des modules Dilatosol (DLT) avec les modules pressiométriques (PMT).

La Figure 9 montre le rapport E_{PMT}/E_{DLT} ainsi obtenu en fonction de la densité. Pour un indice de densité variant de 0,55 à 0,70, ce ratio E_{PMT}/E_{DLT} diminue de 1,2 à 0,8 pour le

module de Ménard, de 1,0 à 0,7 pour le module de Giroud, et de 1,2 à 0,8 pour le module de Goodman.

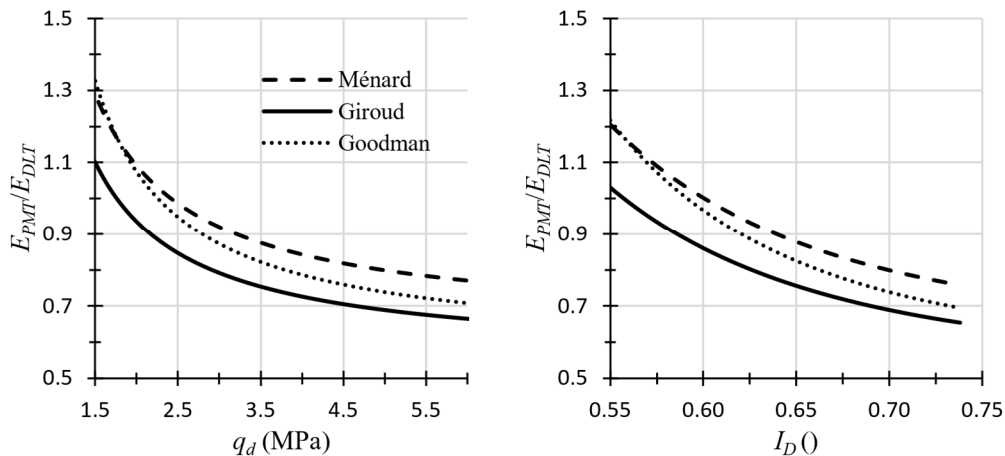


Figure 9. Ratios E_{PMT}/E_{DLT} obtenus à partir des régressions linéaires (Figure 8).

5. Conclusion

Les différents prototypes de dilatomètres rigides ont été testés avec succès sur un sable d'Hostun reconstitué en chambre d'étalonnage. Des résultats similaires sont obtenus, et ce malgré des différences importantes en termes de géométrie des coquilles en contact contre le sol. En comparant ces prototypes au pressiomètre, on obtient des modules pseudo-élastiques relativement proches et ce quelle que soit la théorie considérée avec un rapport E_{PMT}/E_{DLT} variant entre 1,2 et 0,7 pour un indice de densité compris entre 0,55 et 0,70. En revanche, on observe des différences significatives au niveau de la phase plastique, les essais au Dilatosol n'arrivant pas jusqu'à la rupture globale du sol. Un prototype permettant d'atteindre un niveau de déformation comparable à celui du pressiomètre est actuellement en développement afin de mieux caractériser cette phase des grandes déformations. Un paramètre de rupture de type contrainte limite pourra ainsi être proposé. Des études numériques et des essais complémentaires sur site, compléteront ces analyses.

6. Références bibliographiques, ;

- Besson T., Rispal M., Jacquard C., Reiffsteck P., Szymkiewicz F. (2020). A new tool for soil characterization. ISC6, Budapest, Hungary.
- Dhaybi M. (2015). Renforcement de fondations superficielles par soil mixing : Analyse par modélisation physique et numérique. Master's thesis, INSA Lyon.
- Giroud J. P. (1968). Settlement of a linearly loaded rectangular area. Journal of the soil mechanics and foundation division, ASCE, 94, SM 4, Proc. Paper 6021, pp. 813-831.
- Goodman R. E., Van T. K., Heuzé F. E. (1968). Measurement of rock deformability in boreholes. Proceedings 10th US symposium on rock mechanics, University of Texas, Austin.
- Heuzé F. E., Amadei, B. (1985). The NX-borehole jack : a lesson in trial and errors. Int. J. Rock Mech. Min. Sci., Vol. 22, No. 2, pp. 105–112.
- ISO 22476-4. (2015). Reconnaissance et essais géotechniques - Essais en place - Partie 4 : essai au pressiomètre Ménard.
- ISO 22476-7 (2013). Reconnaissance et essais géotechniques - Essais en place - Partie 7 : essai au dilatomètre rigide diamétral.