

INTERPRETATION DE L'ESSAI PRESSIOMETRIQUE POUR L'ESTIMATION DIRECTE DES DEPLACEMENTS DES OUVRAGES

INTERPRETATION OF THE PRESSUREMETER TEST FOR THE DIRECT DETERMINATION OF THE DISPLACEMENTS OF STRUCTURES

Alexandre LOPES¹, Julien HABERT¹, Fahd CUIRA¹

¹ Setec Terrasol, Paris, France

RÉSUMÉ – L'application d'une procédure modifiée d'interprétation de l'essai pressiométrique permettant la détermination du module de cisaillement pour une valeur ciblée de déformation est présentée. La procédure sera illustrée par un essai à Merville (59) dans l'argile surconsolidée des Flandres. Il est montré que les résultats sont directement applicables au calcul du tassement d'une semelle en fonction de son taux de chargement.

ABSTRACT – The application of a modified procedure for the interpretation of the pressuremeter test for the determination of the shear modulus at a targeted value of strain is presented. This procedure will be illustrated by a test carried out in Merville (France, 59) in the Flanders overconsolidated clay. It is shown that the results can be directly used for the evaluation of the settlement of a footing, as a function of its loading ratio.

1. Introduction

L'essai pressiométrique Ménard constitue l'essai de référence pour la reconnaissance des sols en vue du dimensionnement des ouvrages géotechniques en France. L'essai permet d'obtenir un paramètre de déformabilité (le module pressiométrique Ménard, E_M) et un paramètre de rupture du sol (la pression limite pressiométrique Ménard, p_{LM}). Ces deux paramètres peuvent être utilisés, selon les normes d'application nationales françaises de l'Eurocode 7, pour le calcul des fondations superficielles et profondes, pour la vérification des états limites ultimes et de service. Les règles de calcul ont été calibrées sur la base d'essais de chargement de fondations en vraie grandeur soumises à un chargement statique monotone.

Les corrélations entre E_M et le module d'élasticité linéaire équivalent du terrain, E (ou le module de cisaillement G associé), ont été établies dans les années 60, dans un contexte historique où l'on cherchait à utiliser des modèles de comportement en élasticité linéaire, pouvant être associé ou non à un critère de plasticité, pour évaluer le comportement des ouvrages. Les corrélations consistent, essentiellement, à appliquer un coefficient multiplicateur à E_M pour le faire correspondre au module E , dit « d'élasticité », associé à la plage de déformations imposées par l'ouvrage en interaction avec le terrain. Il était déjà connu à cette époque que E_M ne correspondait pas au module d'élasticité du terrain et, même, que le terrain n'avait pas de comportement parfaitement linéaire (Ménard, 1961).

D'autres façons d'utiliser l'essai pressiométrique ont été récemment mises en valeur dans le cadre du Projet National ARSCOP (nouvelles Approches de Reconnaissance des Sols et de la Conception des Ouvrages géotechniques avec le Pressiomètre (Burlon & Reiffsteck, 2015)). L'un des développements concerne la détermination de la courbe de décroissance du module de cisaillement du terrain en fonction du niveau de déformation évaluée à partir de l'essai pressiométrique. Une procédure de chargement modifiée, comprenant plusieurs boucles de décharge-recharge et une procédure adaptée d'interprétation sont nécessaires.

La procédure d'interprétation nécessite de transformer la réponse non-linéaire mesurée à la paroi de la cavité pressiométrique pour tenir compte du niveau de déformation et de contrainte variable avec la distance à la cavité pressiométrique. De cette façon, il est possible de déterminer, pour un niveau de déformation et de contrainte donné, le module de cisaillement « élémentaire » associé au module de cisaillement apparent évalué à partir de l'essai pressiométrique. Par la suite, ce module peut être utilisé directement pour le calcul de tout type d'ouvrage. La mise en œuvre d'une telle méthode a pour avantage de s'affranchir de l'utilisation de corrélations et de permettre un choix éclairé du paramètre de déformabilité à utiliser dans les analyses d'interaction sol-structure, en fonction du type de problème traité.

Dans cette communication, l'utilisation de cette méthode d'interprétation de l'essai pressiométrique sera illustrée par un exemple de calcul de fondation superficielle soumise à un effort vertical variable.

2. Les domaines de sollicitation des terrains en fonction du type d'ouvrage

Les ouvrages sollicitent les terrains de façons différentes. Au-delà des propriétés géomécaniques du terrain, les déformations résultantes sont fonction de la géométrie de l'ouvrage et du niveau et de la nature du chargement (statique, dynamique).

L'expérience avec des ouvrages instrumentés et des rétro-analyses ont permis de connaître les domaines approximatifs de sollicitation du terrain. Ces domaines sont rapportés dans la littérature (Atkinson & Salfors, 1991; Bourgeois *et al.*, 2018; Reiffsteck, 2002) et peuvent être utilisées comme une première appréciation de l'amplitude de la déformation de l'ouvrage en interaction avec le terrain et une donnée d'entrée pour une analyse simplifiée en élasticité linéaire. Ces domaines ont été reportés dans la Figure 2.

3. Détermination du module de cisaillement avec le pressiomètre

Des procédures spécifiques d'essai pressiométrique permettent d'accéder à la courbe de décroissance du module de cisaillement apparent du terrain en fonction du niveau de déformation radiale à la cavité, qui peut ensuite être interprétée comme une courbe élémentaire $G(\gamma)$ du terrain. Ces procédures d'essai nécessitent la mise en œuvre d'un protocole de chargement adapté, incluant des boucles de décharge-recharge réalisées suivant un certain nombre de règles : pression de cavité supérieure à la pression de fluage pressiométrique, palier de pression constante suffisamment long pour quasi-cesser le fluage, décharge avec un taux de déchargement constant et une amplitude limitée (Lopes, 2020).

L'allure générale de la courbe d'expansion réalisée selon la méthode proposée est présentée dans la Figure 1a. L'interprétation du module de cisaillement se fait à partir des boucles de décharge-recharge, par le calcul de la pente sécante entre l'origine de la boucle et chacun des points situés sur la courbe de décharge, permettant ainsi l'évaluation des modules de cisaillement apparents sécants ($G_{app,s}$) en fonction de la déformation radiale (ou de la distorsion) à paroi de la cavité (Figure 1b). La valeur maximale G_{max} obtenue pour une boucle donnée correspond au module de cisaillement maximal du terrain pour l'état de contraintes autour de la cavité compte tenu de la pression appliquée à sa paroi au début de la décharge. La courbe de décroissance du module apparent sécant est ensuite transformée dans une courbe élémentaire équivalente de la décroissance du module de cisaillement en fonction de la distorsion (Figure 1c) par application d'une méthode de transformation des déformations (dans le cas de l'essai dans l'argile des Flandres, la méthode de Jardine (1992) a été utilisée).

La courbe équivalente « élémentaire » obtenue du module de cisaillement sécant en fonction du niveau de distorsion peut être utilisée de plusieurs façons différentes. Elle peut, comme décrit par Lopes *et al.* (2022), être utilisée en vue de déterminer les paramètres G_0

et $\gamma_{0.7}$ d'une loi de comportement non-linéaire du terrain, décrite par l'équation (1) ci-dessous :

$$\frac{G_s}{G_0} = \frac{1}{1 + 0,385 \times \frac{\gamma}{\gamma_{0.7}}} \quad (1)$$

où G_0 est le module de cisaillement initial (ici défini de la même façon que G_{max}), G_s est le module de cisaillement sécant, γ est la distorsion et $\gamma_{0.7}$ la valeur de distorsion de référence pour laquelle le rapport $G_s/G_0 = 0,72$. Pour un essai pressiométrique avec boucles de décharge réalisé à 12 m de profondeur sur le site de Merville, Lopes et al. (2022) ont obtenu $G_0 = 55$ MPa et $\gamma_{0.7} = 1,1 \cdot 10^{-3}$. Un exemple de boucle interprétée est présenté dans la Figure 2. Dans le même essai, le module évalué dans la plage correspondante au module Ménard est de 34,8 MPa.

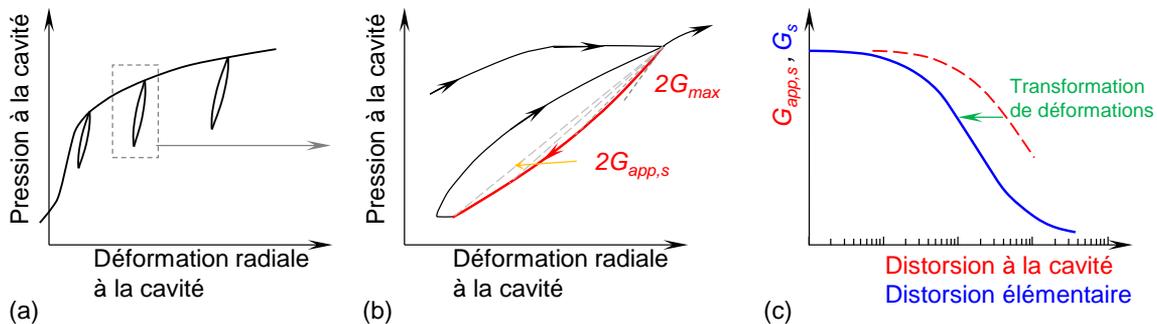


Figure 1 – Schéma de la procédure d'interprétation d'essai pressiométrique décrite dans ce travail.

(a) Allure générale de la courbe de chargement ; (b) détail d'une boucle et de la procédure de calcul du module apparent ; (c) transformation des déformations

Les modules Ménard évalués par d'autres campagnes de reconnaissance sur le même site se situent entre 20 MPa et 39 MPa. Les valeurs de G_0 obtenus par des essais de géophysique de type *down-hole* et *cross-hole*, réalisés sur le même site et à la même profondeur, varient entre 50 MPa et 70 MPa, respectivement (Ferber & Abraham, 2002). Ces valeurs sont également reportées sur la Figure 2 et ils sont cohérents avec ce qui a été évalué avec l'essai pressiométrique en question. On remarque néanmoins que le module pressiométrique Ménard obtenu est proche de la valeur supérieure sur le site, tandis que le module G_0 est plus proche des valeurs inférieures. Ceci explique le faible rapport entre G_0 et E_M , alors que aucune autre anomalie n'a été identifiée sur les mesures.

La norme NF P 94 261 (AFNOR, 2013) suggère que la corrélation $E/E_M = 3$ peut être utilisée dans ce type de terrain à l'ELS quasi-permanent. L'application au module pressiométrique mesuré mène à $E = 104$ MPa.

Hoang et al. (2018) proposent une relation non-linéaire pour le rapport E/E_M en fonction du niveau de déformation. L'application de l'équation proposée par Hoang *et al.* pour les argiles surconsolidées ($k_0 = 3,2$; $\varepsilon_0 = 0,014$) et un niveau de déformation de $1 \cdot 10^{-3}$ mène à un rapport E/E_M égal à 3, donc une valeur similaire de E dans ce cas.

La détermination directe du module de cisaillement associé à un niveau de distorsion de $1 \cdot 10^{-3}$ sur la courbe de décroissance déterminée avec le pressiomètre et présentée dans la Figure 2 donne une valeur de $G = 44$ MPa ($E = 117$ MPa, soit approximativement 12 % près des méthodes précédentes). Dans le présent papier il est proposé de déterminer sur la courbe de décroissance du module sécant un module G_s correspondant au domaine approximatif de déformations imposées par l'ouvrage au terrain et de faire la comparaison avec les autres méthodes : calcul en élasticité non linéaire aux éléments finis, calcul non-linéaire avec la méthode de Hoang *et al.*, calcul en élasticité linéaire avec la formule de Giroud, ou calcul avec la formule de Ménard.

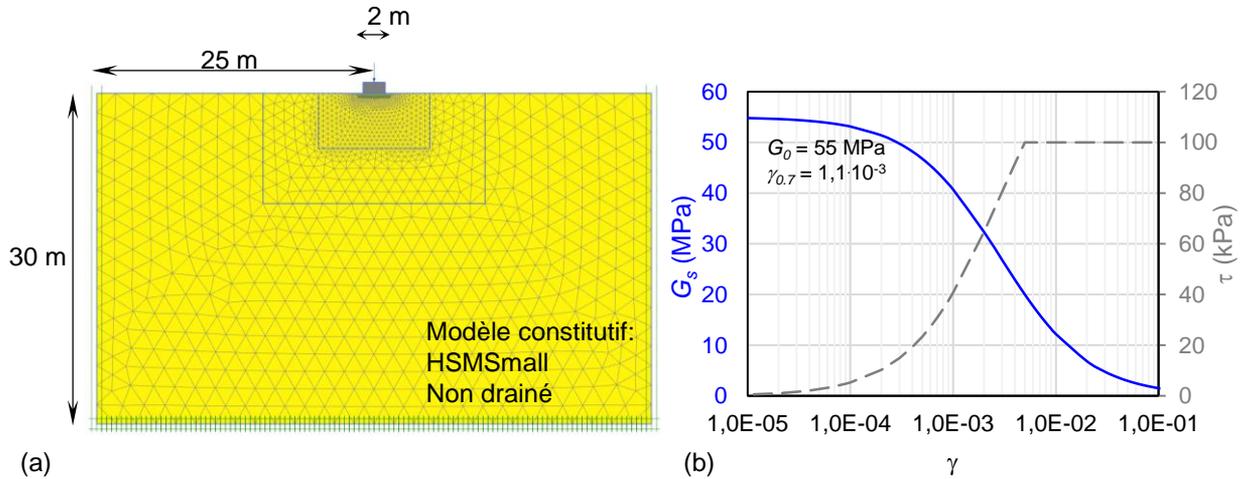


Figure 3 – Modèle aux éléments finis d'une semelle filante rigide sur sol avec comportement non linéaire. (a) Modèle et maillage ; (b) Loi de décroissance du module de cisaillement utilisée

Pour chacun des niveaux de chargement, l'état des contraintes et de déformations a été analysé dans le modèle. L'incrément de contrainte verticale en fonction de la profondeur ainsi que l'évolution du niveau de distorsion sous la semelle sont présentés dans la Figure 4. La profondeur de calcul des déformations a été ici considérée conventionnellement, comme suggéré dans l'Eurocode 7, comme la profondeur pour laquelle l'incrément de contrainte verticale devient inférieur à 20% de la contrainte verticale au repos. La distorsion moyenne a été calculée comme la moyenne arithmétique des distorsions dans cette zone. Le Tableau 1 synthétise les résultats obtenus avec le modèle aux éléments finis pour chaque cas de charge. Les valeurs de distorsion moyenne ainsi obtenues sont utilisées dans le paragraphe suivant pour l'évaluation des modules correspondants et des déplacements considérant un calcul en élasticité linéaire. Les résultats obtenus avec l'approche proposée par Hoang *et al* (2020), basés sur le module pressiométrique Ménard de 34,8 MPa évalué sur le site, sont également présentés dans ce tableau. On remarquera le bon accord entre les deux calculs pour les valeurs de charges de service.

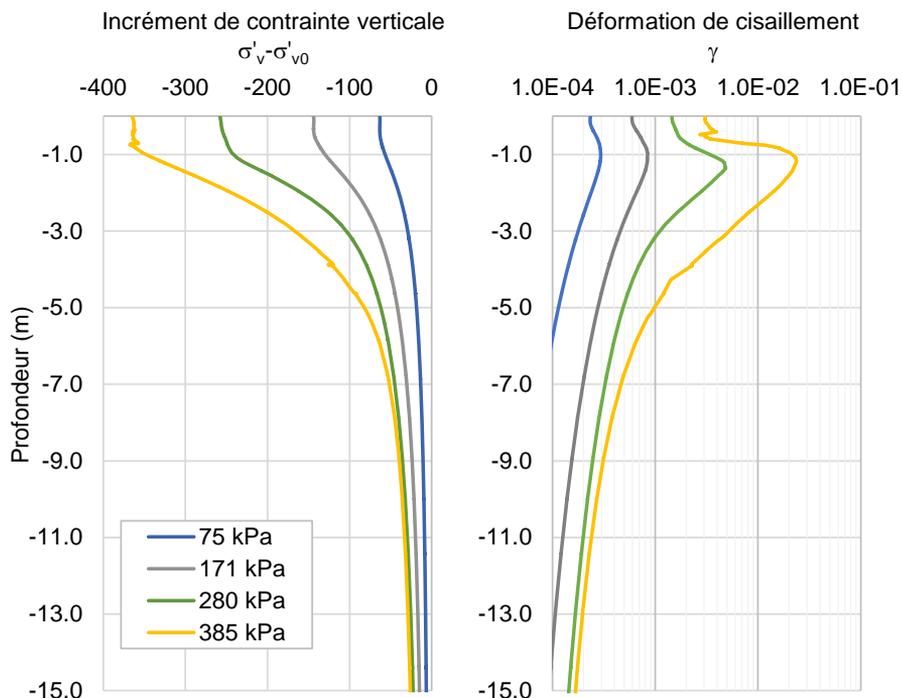


Figure 4 – Variation des contraintes verticales et du niveau de distorsion sous la semelle

Tableau 1 – Profondeurs de calcul des déformations, distorsion et déformation verticale moyenne pour chaque chargement, évalués dans le modèle en élasticité non-linéaire

Modèle aux éléments finis			Approche de Hoang <i>et al</i> (2020)	
Q/Q _u	Profondeur de calcul de γ_{moyen} (m)	γ_{moyen}	Tassement (mm)	Tassement (mm)
0,15	5	1,83E-04	2,7	2,6
0,33	8	4,46E-04	6,4	6,0
0,54	9	1,20E-03	12,8	10,0
0,75	10	4,33E-03	36,0	Non applicable

4.2. Calcul en élasticité linéaire

Le tassement de la semelle filante rigide ci-dessus peut être également évalué avec l'hypothèse simplificatrice d'un milieu élastique linéaire par l'application de la formule de Giroud (1973), avec un coefficient de forme $c_f = 2,54$. Il est proposé que le module d'élasticité à utiliser dans cet équation soit fonction du niveau de distorsion évalué par ailleurs.

Pour cet exemple d'application, on part du principe que le niveau de distorsion est celui donné dans le Tableau 1. A partir de cette valeur, on estime le module de cisaillement sécant correspondant par application de l'équation (1), en remplaçant γ par la valeur de distorsion préalablement évaluée. On obtient ainsi une valeur de module de cisaillement associé au niveau de déformation estimé. On calcule ensuite le module d'Young associé ($E = 2(1 + \nu)G_s$).

Les valeurs de tassement obtenus par application de la formule de Giroud ainsi que les valeurs des modules d'élasticité linéaire équivalents, associés à chaque niveau de chargement, sont présentées dans le Tableau 2.

Une autre possibilité est l'application directe de la formule de tassement de Ménard en utilisant le module $E_M = 34,8$ MPa. Les valeurs de tassement ainsi obtenues sont également présentées dans le Tableau 2.

Tableau 2 – Modules d'élasticité équivalents déterminés en fonction du niveau de distorsion estimé pour chaque chargement et évaluation du tassement en élasticité linéaire

Q/Q _u	Elasticité linéaire avec E équivalent			Formule de Ménard	
	γ_{moyen}	G/G ₀	E (MPa)	Tassement (mm)	Tassement (mm)
0,15	1,83E-04	0,94	137	2,7	2,9
0,33	4,46E-04	0,87	127	6,6	6,6
0,54	1,20E-03	0,70	103	13,3	10,8
0,75	4,33E-03	0,40	58	32,3	Non applicable

Les valeurs de tassement évaluées à partir du modèle aux éléments finis en élasticité non-linéaire et ceux évalués à partir de la formule de Giroud sont présentées dans la Figure 5. On remarque un très bon accord entre les prévisions dans le domaine de service (charge inférieure à $1/3 Q_{ult}$). Pour les charges plus élevées et lorsque les déformations plastiques deviennent prédominantes, le modèle en élasticité linéaire donne des résultats moins satisfaisants, ce qui est attendu compte tenu de l'apparition de déformations plastiques qui se superposent au comportement en élasticité non-linéaire. Ainsi, pour le chargement à $0.75 Q_{ult}$, on obtient un écart de 10% entre la prévision en élasticité linéaire et le modèle aux éléments finis.

Le calcul en élasticité linéaire peut également être réalisé en considérant, pour la charge de service (171 kPa), la corrélation entre le module d'élasticité et le module pressiométrique Ménard : $E/E_M = 3$ (AFNOR, 2013). Pour la valeur obtenue de $E = 104$ MPa, le calcul en élasticité linéaire mène à un tassement de 7,4 mm, proche de la valeur calculée avec le modèle en élasticité non linéaire (Tableau 1).

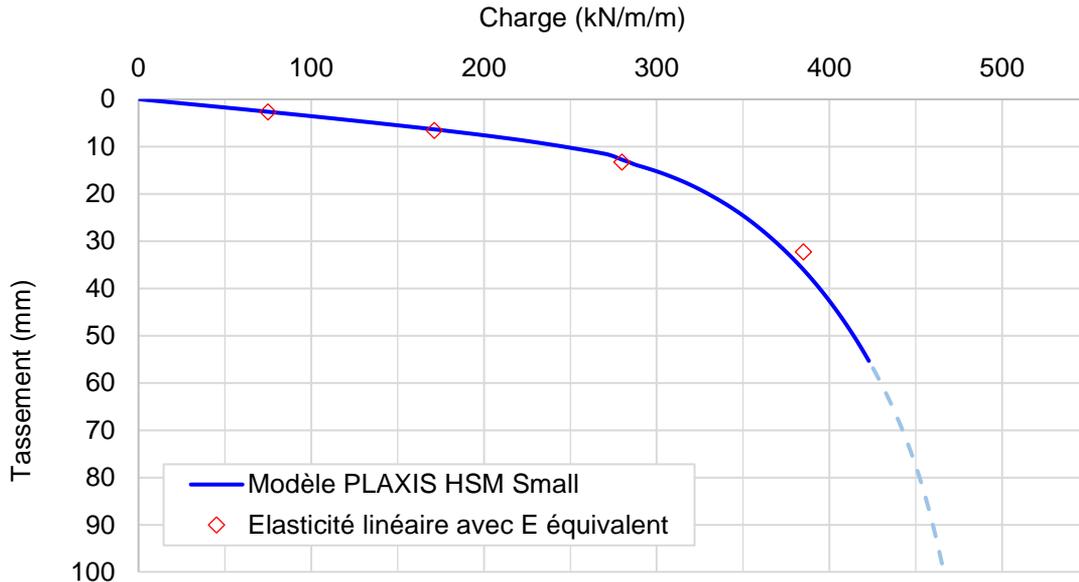


Figure 5 – Comparaison entre la courbe de chargement de la semelle obtenue par modèle aux éléments finis en élasticité non-linéaire et en élasticité linéaire avec E équivalent

5. Conclusions

Les terrains ont un comportement non-linéaire dès la plage des faibles déformations. L'influence des non-linéarités sur le comportement des ouvrages est connue des géotechniciens depuis longtemps. Cependant, l'application de modèles simplifiés en élasticité linéaire est encore courante puisque ces modèles permettent d'accéder de façon rapide à une estimative du déplacement des ouvrages, sans faire appel à des calculs avancés, tels que par la méthode des éléments finis. Cette simplification est pertinente, pourvu que le choix du module d'élasticité soit fait en accord avec le niveau de sollicitation et déformation du problème.

Dans cette communication, cela a été illustré par l'exemple d'une fondation superficielle sur un terrain modèle dont les propriétés d'élasticité non-linéaire sont connues et ont été déterminées à partir d'un essai pressiométrique réel. Sur cet exemple, les résultats obtenus par un modèle aux éléments finis prenant en compte le comportement non-linéaire du terrain ont été confrontés aux résultats obtenus par la solution analytique en élasticité linéaire avec un choix ciblé du module de déformabilité, ainsi qu'à d'autres méthodes d'évaluation des tassements faisant appel à des corrélations avec le module pressiométrique Ménard.

Les calculs réalisés avec la solution analytique en élasticité linéaire avec module équivalent ont conduit à des valeurs de tassement proches de celles évaluées avec le modèle non-linéaire aux éléments finis, confirmant le principe énoncé. Les calculs avec l'approche de Hoang et al (2020) et la formule de Ménard, calibrés à partir de corrélations avec E_M , ont été également satisfaisantes, permettant d'établir le lien avec la pratique pressiométrique traditionnelle.

Des procédures spécifiques d'essai pressiométrique permettent la détermination du module de cisaillement des terrains dans une plage s'étendant depuis le domaine des faibles déformations. Ces méthodes d'interprétation pressiométriques peuvent être utilisées pour permettre un choix éclairé du module d'élasticité équivalent à utiliser dans les calculs

d'interaction sol-structure. Dans ce cas, il est d'abord nécessaire d'estimer le niveau de déformation de l'ouvrage en service, puis de déterminer le module associé sur la courbe de décroissance du module de cisaillement sécant en fonction de la déformation établie avec le pressiomètre.

Cette procédure met en évidence l'avantage de l'essai pressiométrique par rapport à d'autres essais *in situ* qui ne permettent l'évaluation des modules d'élasticité que par corrélations préalablement établies, ou la détermination d'un seul module, associé à un niveau de déformation fixé. Cette procédure peut contribuer à étendre les domaines d'utilisation du pressiomètre pour la caractérisation de la déformabilité des terrains, s'affranchissant de ceux seuls pour lesquels des corrélations préalablement établies sont connues.

6. Références bibliographiques

- AFNOR. (2013). Justification des ouvrages géotechniques - Normes d'application nationale de l'Eurocode 7 - Fondations superficielles. French standard NF P 94-261.
- Atkinson, J. H., & Salfors, G. (1991). Experimental determination of stress-strain-time characteristics in laboratory and-in-situ tests. In A. G. Italiana. R. ; B. : A. A. Balkema (Ed.), Proc. of the 10th European Conf. on Soil Mechanics and Foundation Engineering (pp. 915–956).
- Bourgeois E, Burlon S, & Cuira F. (2018). Modélisation numérique des ouvrages géotechniques. Techniques de l'Ingénieur. <https://doi.org/https://doi.org/10.51257/a-v1-c258>
- Burlon, S., & Reiffsteck, P. (2015). ARSCOP : a French national project to continue with the development of the pressuremeter. ISP 7. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01589060>
- Ferber, V., & Abraham, O. (2002). Apport des méthodes sismiques pour la détermination des modules élastiques initiaux : application au site expérimental de Merville. PARAM 2002 - Symposium International Identification et Détermination Des Paramètres Des Sols et Des Roches Pour Les Calculs Géotechniques, 8 pages.
- Hoang, M. T., Cuira, F., Dias, D., & Miraillet, P. (2018). Estimation Du Rapport E / E M : Application Aux Radiers De Grandes Dimensions. Journées Nationales de Géotechnique et de Géologie de l'Ingénieur - Champs-Sur-Marne, 1–8.
- Giroud, J.P. (1973) Tables pour le calcul des fondations, Volume 2 : Tassements, Dunod, Paris, France, 505 p.
- Jardine, R. J. (1992). Nonlinear stiffness parameters from undrained pressuremeter tests. Canadian Geotechnical Journal, 29, 436–447.
- Lopes, A. (2020). Determination of soil shear modulus at low strain level using an innovative pressuremeter probe. Application to cyclic pile design.
- Lopes A., Puech A., Dupla JC., Canou J. (2022). Determination of non-linear elasticity parameters from innovative pressuremeter tests. Strain transformed approach for hyperbolic undrained behaviour. 20ème ICSMGE, Sydney, 2022.
- Ménard, L. (1961). Influence de l'amplitude et de l'histoire d'un champ de contraintes sur le tassement d'un sol de fondation. Cinquième Congrès International de Mécanique Des Sols et Des Travaux de Fondations, 249–253.
- Reiffsteck, P. (2002). Nouvelles technologies d'essai en mécanique des sols - Etat de l'art. PARAM 2002 - Symposium International Identification et Détermination Des Paramètres Des Sols et Des Roches Pour Les Calculs Géotechniques, 1–44.