

DETERMINATION PRATIQUE DES MODULES DE CISAILLEMENT NON LINEAIRE A PARTIR D'ESSAIS PRESSIOMETRIQUES AVEC BOUCLES DANS LES SOLS FINS

PRACTICAL DETERMINATION OF NON-LINEAR SHEAR MODULI BASED ON PRESSUREMETER TESTS WITH LOOPS IN FINE SOILS

Alexandre Lopes¹, Julien Habert¹

¹ Setec\Terrasol, Paris, France

RÉSUMÉ – La réalisation d'essais pressiométriques comportant des boucles de décharge-recharge et assurant une maîtrise des aspects métrologiques permet de déterminer de façon fiable le module de cisaillement des terrains, ainsi que sa décroissance avec le niveau de distorsion au cours de la sollicitation. Dans les sols fins, pour lesquels des conditions non drainées peuvent être considérées pendant l'essai pressiométrique, une méthode concrète est proposée dans cet article sur la base d'une modélisation du problème d'expansion de cavité dans un terrain régi par une loi de comportement faisant intervenir une loi d'élasticité non linéaire. Cette méthode est ensuite appliquée pas à pas sur un exemple d'essai pressiométrique réalisé dans l'Argile des Flandres, i) pour mettre en avant la simplicité de la méthode afin d'en permettre la parfaite appropriation, et ii) afin d'attester la pertinence de la méthode, en comparant ses résultats à d'autres moyens de mesures.

ABSTRACT – *Pressuremeter tests that are performed with unload-reload loops together with appropriate metrological developments enable to derive consistently shear modulus of ground, together with its decay with shear strain. In fine soils, for which undrained conditions may be assumed during the pressuremeter test, a dedicated method is proposed in this paper based on the modelling of the cavity expansion taking into account a material with non-linear elasticity. This method is then applied step by step to a pressuremeter test performed in Flander's Clay to illustrate its ease-of-use, and its results are compared to other measurements means to demonstrate its relevancy.*

1. Introduction

Les essais pressiométriques sont des essais d'expansion de cavité cylindrique qui peuvent être réalisés dans une cavité soit préforée soit créée par fonçage. Plusieurs procédures d'essais sont disponibles, permettant de déterminer conjointement les paramètres de déformabilité et les paramètres de résistance du terrain. En France, la procédure la plus répandue est la procédure Ménard, qui permet de dériver le module pressiométrique Ménard, et la pression limite pressiométrique Ménard, ainsi que la pression de fluage pressiométrique. Dans la pratique française, ces paramètres sont utilisés dans des méthodes semi-empiriques ou des corrélations directes pour déterminer la capacité portante et la raideur des fondations ou du terrain de part et d'autre d'un écran de soutènement. Depuis les développements de l'essai Ménard et les auteurs contemporains se sont concentrés sur des approches semi-empiriques, du fait de leur facilité d'utilisation. Ces approches sont toujours utilisées quotidiennement dans la pratique française (Frank, 2017), mais ce n'est pas forcément le cas dans la pratique internationale.

En effet, d'autres approches existent, basées sur des développements analytiques qui confirment qu'il est possible de déterminer les paramètres intrinsèques des propriétés du terrain. Ces développements sont remarquablement fiables et directs pour les sols pour lesquels les conditions non drainées règnent pendant l'essai, ce qui permet de supposer

qu'il n'y a pas de variations volumiques. Dans ces conditions, des paramètres additionnels peuvent être déterminés comme la résistance au cisaillement non-drainée, mais aussi les paramètres de déformabilité (valeur maximale du module de cisaillement, décroissance de ce module de déformation avec le niveau de déformation).

2. Développements théoriques

Plusieurs méthodes d'interprétation existent pour dériver les modules de déformation du terrain, basées sur la courbe d'expansion de cavité cylindrique. Historiquement, le terrain est associé à une loi d'élasticité linéaire, permettant de dériver un module de cisaillement unique à partir de la partie quasi linéaire de la courbe pressiométrique (traduisant la variation du volume V de la cavité en fonction de la pression appliquée p aux parois de la cavité), selon l'équation (1)

$$G = V \frac{dp}{dV} \quad (1)$$

L'équation précédente, peut aussi être exprimée en termes de déformation radiale ε ou de distorsion à la cavité γ ($= \Delta V/V$), selon l'Equation (2).

$$G = \frac{dp}{2d\varepsilon} = \frac{dp}{d\gamma} \quad (2)$$

Le module de cisaillement (et le module d'Young qui peut lui être associé) ainsi déterminé, ne capte néanmoins pas le véritable comportement du terrain, qui n'est pas linéaire, et dépend du niveau de déformation. Si un tel module doit être utilisé pour la modélisation des ouvrages géotechniques, des corrélations de différentes sortes doivent être mises en œuvre pour tenir compte du niveau de déformation des terrains spécifiques aux mécanismes concernant les ouvrages étudiés.

Dans un essai pressiométrique, la réponse mesurée au niveau de la cavité résulte d'une intégration du comportement « élémentaire » du terrain, qui varie en fonction de la distance à la paroi de la cavité, étant dépendant de l'état de contraintes et de déformation, et donc pas homogène avec la distance à la cavité. Si l'hypothèse de l'élasticité linéaire s'appliquait, le module pressiométrique correspondrait directement au module du terrain. Néanmoins, ce n'est pas le cas, et l'utilisation de la formule (1) conduit ainsi à un module que l'on peut qualifier d'apparent. Des procédures complémentaires doivent donc être mises en œuvre pour corriger ce biais.

Des méthodes tenant compte de la réponse non linéaire du terrain ont été proposées par Briaud et al (1983), Wood (1990), Jardine (1992), Ferreira et Robertson (1992), Bolton et Whittle (1999), Hughes et Whittle (2022).

Dans tous les cas, la procédure comprend deux étapes :

- La supposition de la forme du comportement non linéaire initialement supposé, faisant appel par exemple à un module de cisaillement sécant G_{sec} variable en fonction du niveau de distorsion γ ,
- L'application par des méthodes de calage plus ou moins complexes aux résultats de l'essai pressiométrique, reposant :
 - soit sur des régressions directes de l'expansion de cavité,
 - soit sur des méthodes de transformation de déformation et de contraintes, pour passer du comportement de la cavité au comportement élémentaire du terrain.

En parallèle, il peut être noté que ces méthodes peuvent s'appliquer à des essais comprenant soit un chargement monotone, soit des boucles de décharge-recharge additionnelles ou encore un déchargement final. Des conditions supplémentaires sur les

conditions de drainage pendant l'essai pressiométrique sont aussi considérées : essais en conditions drainées ou non-drainées (pour lesquelles ce travail s'applique).

2.1. Présente proposition

La présente proposition reprend la méthode d'intégration de l'expansion de cavité proposées par Habert et Burlon (2021). Elle est ainsi appliquée sous les conditions suivantes :

1. La décroissance du module de cisaillement suit la forme proposée par Hardin et Drnevich (1972), désormais couramment utilisée dans diverses applications géotechniques ;
2. La méthode est mise en œuvre sur les boucles de décharge-recharge, afin de supprimer les effets parasites associés à l'utilisation de la seule courbe de chargement monotone, perturbée par le placement de la sonde pressiométrique et associée à des déformations importantes, exacerbant ainsi les perturbations liées à la métrologie de l'essai et également aux effets de fluage du terrain.

2.1.1. La loi de décroissance du module de cisaillement considérée

La décroissance du module de cisaillement G_{sec} est paramétrée par l'équation (3), qui permet aussi de traduire l'évolution de la contrainte de cisaillement selon l'équation (4). Ces lois sont représentées dans la Figure 1.

$$\frac{G_{sec}}{G_0} = \frac{1}{1 + \frac{G_0 \gamma}{c_U}} \quad (3)$$

$$\tau = \frac{G_0 \gamma}{1 + \frac{G_0 \gamma}{c_U}} \quad (4)$$

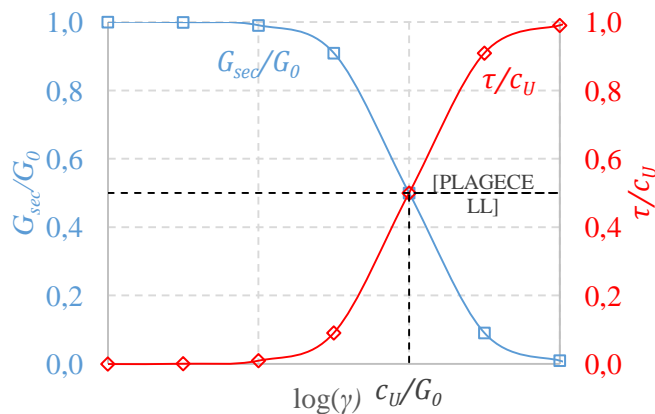


Figure 1 - Loi de comportement retenue (Eq. 3 et 4)

2.1.2. Application à l'expansion d'une cavité cylindrique

Sur cette base, sous réserve d'hypothèse des petites déformations et d'un comportement non-drainé, traduit par la conservation du volume, l'expansion de cavité est déterminée par l'équation suivante (5).

$$p = p_0 + c_U \ln \left(1 + \gamma \frac{G_0}{c_U} \right) \quad (5)$$

Où p_0 est la contrainte horizontale totale initiale dans le terrain et γ est la distorsion à la paroi de la cavité.

L'hypothèse de petites déformations introduit un biais faible mais non négligeable pour le chargement monotone (Ferreira et Robertson, 1994). En revanche, elle devient

négligeable pour l'application à la phase décharge, pour laquelle l'expression précédente peut être adaptée (Ferreira et Robertson, 1992). Cette équation peut être adaptée en phase de décharge, selon l'Equation (6).

$$p = p = p_{0i} + (\tau_{0i} + c_U) \ln \left(\frac{1}{1 - \frac{G_0}{\tau_{0i} + c_U} (\gamma - \gamma_{0i})} \right) \quad (6)$$

où p_{0i} , τ_{0i} et γ_{0i} sont respectivement i) la pression, ii) la contrainte de cisaillement et iii) la distorsion à la paroi de la cavité au début de la décharge i (pour tenir compte d'essais comprenant plusieurs boucles repérées par l'indice i).

La distorsion à la paroi de la cavité peut être calculée comme $\gamma_0 = 2\varepsilon_{0i}$. La contrainte de cisaillement τ_{0i} suit la loi de comportement supposée, selon l'Equation (4).

3. Application

3.1. Mise en œuvre pratique

La mise en application de la méthode, et notamment l'application de l'équation (6) se déroule selon les étapes suivantes :

- Etape 1 : La courbe de décharge est étudiée séparément pour chaque boucle de décharge-recharge i : on identifie d'abord son point d'origine (p_{0i} , γ_{0i}) ;
- Etape 2 : A partir du point d'origine, on calcule les valeurs $\Delta\gamma$ et $\Delta\gamma/\Delta p$ pour tous les points de la boucle. La tangente initiale (début de la décharge), est paramétrée par les coefficients a et b : $\Delta\gamma/\Delta p = a\Delta\gamma + b$. Le paramètre b a un sens physique direct et correspond à $1/G_{0i}$, ce qui permet de déterminer $G_0 = 1/b$;
- Etape 3 : On itère sur la valeur de cohésion non-drainée c_U pour caler la courbe l'Equation (6) sur les points expérimentaux. La valeur de τ_{0i} est actualisée à chaque itération en utilisant l'équation (5).

3.2. Exemple pas à pas

Un exemple d'application pas à pas est donné ci-dessous. Il s'agit d'un essai dans les argiles surconsolidées des Flandres, à Merville (59), réalisé à 12,0 m de profondeur et dont les résultats ont déjà été présentés et interprétés par Lopes (2020) en utilisant une méthode empirique passant par une transformation des déformations pour tenir compte du comportement non linéaire. La courbe d'expansion complète est présentée dans la Figure 2(a).

Le détail de la troisième boucle de décharge est donné dans la Figure 2(b). La détermination de l'origine de la boucle et le calcul des variations de pression Δp et des déformations radiales $\Delta\varepsilon_r$ sont représentés.

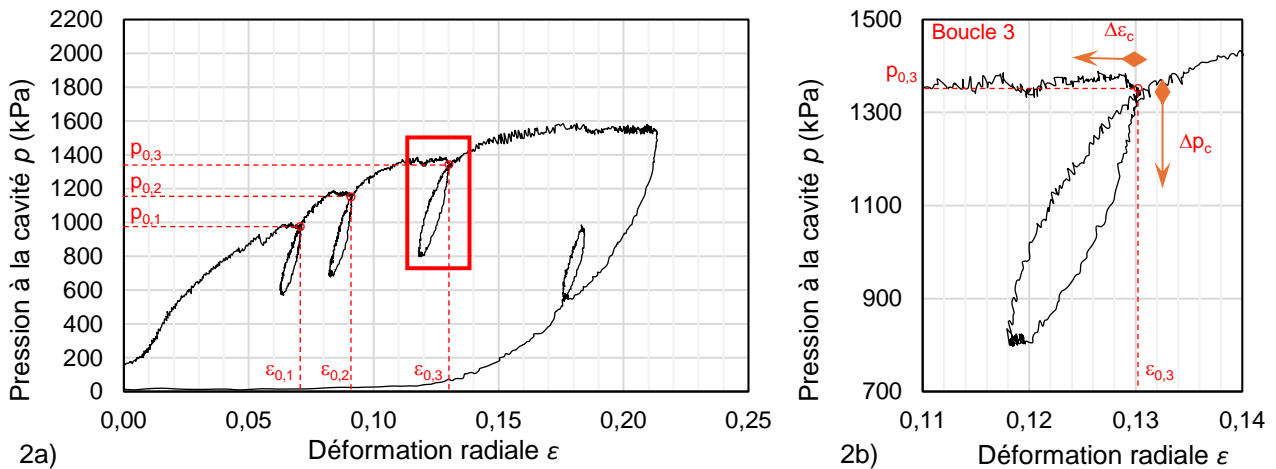


Figure 2 – Exemple d'essai dans les argiles surconsolidées des Flandres (Lopes, 2020)

Les différentes étapes sont alors les suivantes :

- Etape 1 : Les valeurs initiales pour la boucle 3 : $p_{03} = 1350$ kPa, $\gamma_{03} = 0,26$
- Etape 2 : Courbe $\Delta\gamma - \Delta\gamma/\Delta p$ présenté sur la Figure 3. Cette relation peut être approximée par une droite sur le début de la décharge. Par régression linéaire, on détermine les coefficients a et b dans l'équation $\Delta\gamma/\Delta p = a\Delta\gamma + b$. L'ordonnée à l'origine donne $b = 0,0186$, ce qui conduit à $G_{0i} = 1/b = 53,9$ MPa.

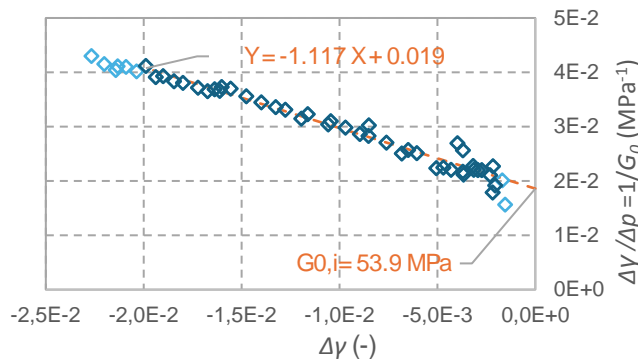


Figure 3 - Relation entre la distorsion $\Delta\gamma$ et le rapport $\Delta\gamma/\Delta p$ dans la 3^{ème} boucle de décharge

- Etape 3 : la cohésion non-drainée c_u est modulée jusqu'à caler la courbe $\Delta\gamma$ et Δp (Figure 4).

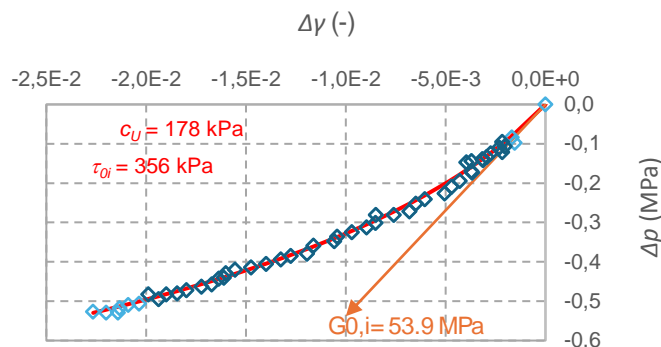


Figure 4 - Détermination de c_u par retro calage des points de la boucle

Avec les valeurs de G_0 et de c_u déterminés, il est possible de retracer la courbe de décroissance du module de cisaillement sécant élémentaire pour le terrain testé, d'après l'Equation (3). Cette courbe est représentée dans la Figure 5. On indique dans cette courbe le domaine des mesures effectivement réalisées sur la boucle (de l'ordre de $3 \cdot 10^{-4}$

à $1 \cdot 10^{-2}$), et la valeur de la distorsion de référence γ_{ref} , pour laquelle le module de cisaillement est déduit de 50% ($\gamma_{ref} = c_U/G_0$)

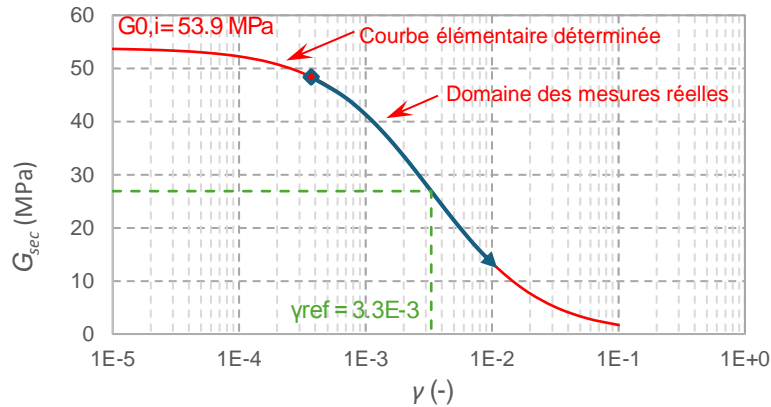


Figure 5 - Courbe de dégradation du module

4. Comparaison

Le module de cisaillement à très faibles déformations dans les argiles des Flandres sur le site de Merville a été caractérisé par des essais de géophysique de type Cross Hole et Down Hole (Borel et Reiffsteck, 2006).

A la profondeur de l'essai, égale à 12,0m, les modules G_0 se situent entre 50 et 70 MPa. L'indice de plasticité des argiles est de l'ordre de 40 à 50.

L'interprétation des trois boucles pressiométriques présentées, la valeur déterminée de G_0 se situe entre 53 MPa et 59 MPa (Figure 6).

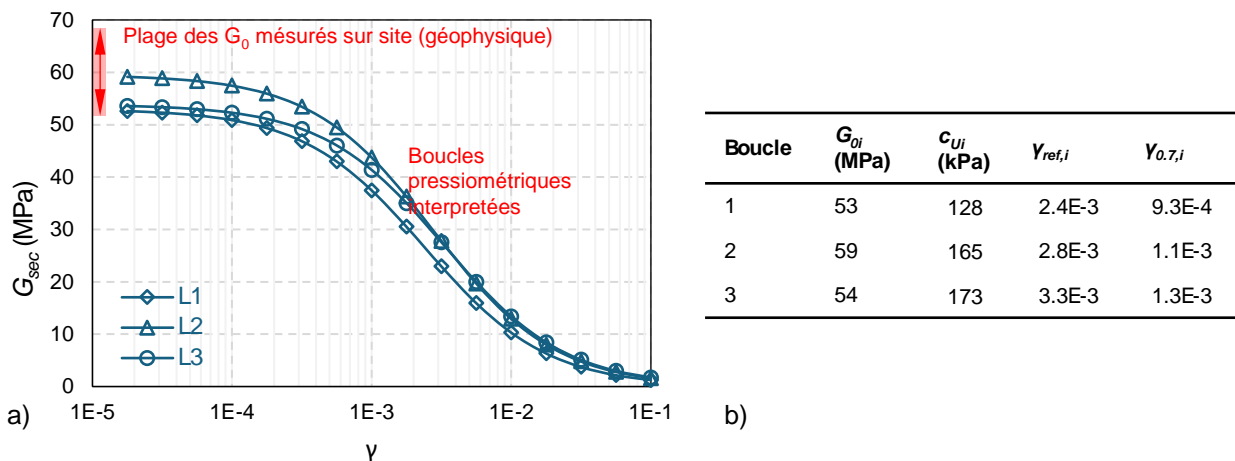


Figure 6 – a) comparaison des courbes évaluées à partir des boucles pressiométriques avec les valeurs de G_0 déterminés sur site à partir des essais de géophysique ; b) synthèse des résultats

En ce qui concerne le taux de décroissance du module en fonction de la distorsion, Les courbes normalisées G_{sec}/G_{0i} obtenues pour les trois boucles ont été comparées aux courbes normalisées proposées par Vucetic et Dobry (1991) pour des indices de plasticité IP variant de 40 à 50. Le résultat est présenté dans la Figure 7.

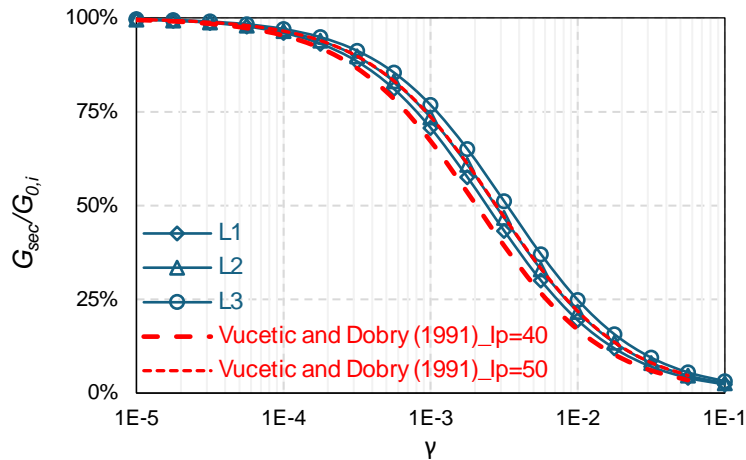


Figure 7 - Comparaison des courbes de décroissance normalisées du module $G_{0,i}$ et les courbes normalisées proposées par Vucetic et Dobry (1991) en fonction de l'indice de plasticité

On observe que les courbes déterminées à partir de l'interprétation des boucles pressiométriques fournissent des lois de décroissance proche de celles proposées dans la littérature pour des argiles d'indice de plasticité similaire. On peut également observer que la valeur de la distorsion de référence γ_{ref} déterminée avec les boucles pressiométriques se situe entre $2,0 \cdot 10^{-3}$ et $3,3 \cdot 10^{-3}$. Les courbes de référence se situent entre $2,0 \cdot 10^{-3}$ et $2,8 \cdot 10^{-3}$.

Les valeurs ainsi déterminées de γ_{ref} peuvent facilement être utilisées comme données d'entrée pour les lois de comportement couramment utilisées dans les logiciels aux éléments finis. Ces lois utilisent souvent un seuil de déformation pour la décroissance de 72% de G_0 , souvent noté $\gamma_{0,7}$. A partir de l'Equation (3), on déduit :

$$\gamma_{0,7} = 0,385\gamma_{ref} = 0,385 \times c_u/G_0 \quad (7)$$

L'application de l'Equation 7 au cas présent (synthèse des valeurs dans la Figure 6), résulte en valeurs de $\gamma_{0,7}$ similaires à ceux déterminés par Lopes *et al.* (2022), en utilisant une méthode de transformation de déformations empirique, calibrée sur des modèles aux éléments finis en élasticité non-linéaire. Le présent papier fixe donc le cadre théorique analytique, permettant d'obtenir des résultats similaires sans approximations empiriques telles que réalisé dans les travaux précédents.

5. Conclusions

Une méthode analytique est proposée pour déterminer le module de cisaillement initial et sa décroissance à partir d'un essai pressiométrique, comprenant une phase de décharge, dans des conditions de chargement non drainées. Sa mise en œuvre pratique pas à pas est proposée sur un exemple, puis une comparaison à d'autres méthodes de prédiction est effectuée, en démontrant l'efficacité. La méthode permet de consolider un cadre théorique analytique à l'interprétation de l'essai pressiométrique en conditions non drainées.

6. Références bibliographiques

- Bolton, M.D., Whittle, R.W., 1999. A non-linear elastic/perfectly plastic analysis for plane strain undrained expansion tests. *Géotechnique* 49, 133–141. <https://doi.org/10.1680/geot.1999.49.1.133>
- Borel, S., and Reiffsteck, P. 2006. Caractérisation de la déformabilité des sols au moyen d'essais en place. Laboratoire Central des Ponts et Chaussées.

- Ferreira, R., Robertson, P., 1992. Interpretation of undrained self-boring pressuremeter test results incorporating unloading. *Canadian Geotechnical Journal* 29, 918–928. <https://doi.org/10.1139/t92-103>
- Ferreira, R., Robertson, P.K., 1994. Large-strain undrained pressuremeter interpretation based on loading and unloading data. *Canadian Geotechnical Journal* 31, 71–78. <https://doi.org/10.1139/t94-008>
- Habert, J., Burlon, S., 2021. Taking into account inhomogeneous distortion around the pressuremeter probe to determine shear modulus, in: ISC'6. Presented at the ISC'6, Budapest.
- Habert, J., Lopes, A., 2022. Elasticite non linéaire appliquee a l'essai pressiometrique, in: JNGGX1. Presented at the JNGGX1, Lyon.
- Hardin, B., Drnevich, V., 1972. Shear Modulus and Damping in Soils: Design Equations and Curves. *J. Soil Mech. Found. Div.* 98, 667-692. <https://doi.org/10.1061/JSFEAQ.0001760>
- Hughes, J., Whittle, R., 2022. *High Resolution Pressuremeters and Geotechnical Engineering: The measurement of small things*, 1st ed. CRC Press, London. <https://doi.org/10.1201/9781003200680>
- Jardine, R.J., 1992. Nonlinear stiffness parameters from undrained pressuremeter tests. *Can. Geotech. J.* 29, 436–447. <https://doi.org/10.1139/t92-048>
- Lopes, A., 2020. Determination of soil shear modulus at low strain level using an innovative pressuremeter probe. Application to cyclic pile design. Paris-Est.
- 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. In : 20th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Sydney. 2022.
- Vucetic, M., and Dobry, R. 1991. Effect of soil plasticity on cyclic response. *Journal of Geotechnical Engineering*, 117(1): 89–107.
- Wood, D.M., 1990. Strain-dependent moduli and pressuremeter tests. *Géotechnique* 40, 509–512. <https://doi.org/10.1680/geot.1990.40.3.509>