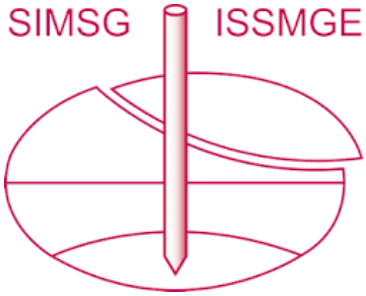
INTERNATIONAL SOCIETY FOR
SOIL MECHANICS AND
GEOTECHNICAL ENGINEERING



This paper was downloaded from the Online Library of the International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (ISSMGE). The library is available here:

https://www.issmge.org/publications/online-library

This is an open-access database that archives thousands of papers published under the Auspices of the ISSMGE and maintained by the Innovation and Development Committee of ISSMGE.

Courbes hyperboliques contrainte-déformation au pressiomètre Ménard autoforé

Stress-Strain Hyperbolic Curves Obtained With a Selfboring Ménard PMT

Baud J.-P.
Eurogéo, Avrainville, France

Gambin M.
Apagéo, Paris, France

Schlosser F.
École des Ponts Paris-Tech, Navier-CERMES, Marne-la-Vallée, France

RÉSUMÉ : On présente ici les derniers résultats de nos recherches sur le module de déformation du sol déterminé en assimilant à un arc d' hyperbole la courbe pression-volume obtenue dans un essai au pressiomètre Ménard. L'essai est réalisé en utilisant une cavité obtenue par un système de tube fendu auto-foré, soit en roto-percussion, le STAF®, soit en rotation seule, le ROTOSTAF®. L'ajustement des points de mesure sur une branche d'hyperbole du second degré permet d'obtenir une expression analytique originale de la déformée ε sous la forme $\varepsilon = f(G_0, p_o, p_{LM}, P_L)$ dans laquelle P_L représente l'abscisse de la « pression limite vraie » prise comme asymptote. Pour chaque essai, il est alors facile d'obtenir la variation, calculée à partir des points de mesure, du module tangent Gt et du rapport Gt/G0 en fonction de ε, et pareillement le module sécant Gs. Cette variation peut être comparée avec celle donnée par le modèle hyperbolique courant : la concordance est bonne, sauf pour les très faibles déformations initiales où les courbes obtenues à partir des points d'essais donnent des modules sensiblement plus élevés. Ces résultats sont en bon accord avec les résultats d'essais en laboratoire et en géophysique. Ils mettent en évidence une décroissance typique des modules lorsque la déformation s'accroit.

ABSTRACT : The present stage of our research work on soil E-moduli values are submitted here. These values are obtained by assimilating the pressure-volume plot of a Ménard PMT to a 2nd degree hyperbole arc. The tests were performed using a self-bored steel slotted tube implemented either by the STAF® technique involving a drifter and a full-face bit, or the ROTOSTAF® method with a drag bit protruding from the tube outlet. Getting the hyperbolic best fit of the plotted readings makes it possible to obtain an original equation of the radial borehole expansion ε as $\varepsilon = f(G_0, p_o, p_{LM}, P_L)$ in which P_L is the true "limit pressure" value of the vertical pressure asymptote. Then, it is easy to derive the tangent modulus G_t for each reading and the corresponding G_t/G_0 ratio as a function of ε, and similarly the secant modulus G_S. Their variation can be compared with those given by the usual hyperbolic model: a very good agreement is obtained, except for very small initial strains where the readings plot yields moduli sensibly higher in value. These results are similar to those obtained by laboratory tests and in geophysical surveys. They exemplify the typical decrease of the deformation modulus when the stress or the strain increases.

MOTS-CLÉS : Pressiomètre, autoforage, modèle hyperbolique,

KEYWORDS: Ménard Pressuremeter, self-boring, hyperbolic soil model.

1 CONDITIONS D'OBTENTION D'UNE EXPANSION PRESSIOMETRIQUE QUASI VIERGE.

L'analyse exposée ici est appliquée à des essais pressiométriques réalisés dans les conditions « traditionnelles » de chargement par paliers de l'essai pressiométrique Ménard (NF P91-110-1 et Pr EN-IS0 22476-4), avec des méthodes et matériels de forage et d'essai permettant de réduire autant que possible les effets perturbateurs pour que le sol, avant le départ de l'essai, ne soit ni décomprimé ni comprimé.

1.1. Essais pressiométriques non remaniés : nécessité de l'autoforage.

Depuis les années 1970, la mise en place du pressiomètre par autoforage a été utilisé dans les sols mous, suivi par des essais en déformations contrôlées (Baguelin et al., 1978, Mair & Wood, 1987). Progressivement, les essais en auto-forage ont été essentiellement limités pour tester des sols sous-consolidés, supposés dans les conditions idéales de démarrage à p_o, en vue d'obtenir des relations contrainte-déformation sous cycles de petites déformations, usuellement de moins de 20% d'amplitude. De cette façon, plusieurs modules de sol pouvaient être obtenus, mais aucune pression limite n'était recherchée (Clarke & Gambin, 1998).

Plus récemment, une technique d'auto-forage a été proposée (Arsonnet et al., 2005) pour réaliser des essais pressiométriques Ménard. Cette méthode, appelée STAF®, consiste à enfoncer un tubage continu, muni d'un tube fendu au voisinage de sa base, à l'aide d'un taillant débordant en roto-percussion à l'extrémité d'un train de tiges centré. Il était ainsi possible d'obtenir un essai en auto-forage de très bonne qualité en petites déformations, en raison de la réduction de la décompression du sol durant la création de la cavité, tout en permettant de réaliser des essais jusqu'à de grandes déformations rendant possible d'atteindre la pression limite conventionnelle (Baud & Gambin, 2005).

Avec cette conception, le STAF® fut utilisé avec succès dans les sols cohésifs mous et moyennement compacts, et dans les matériaux granulaires compacts, mais peu d'exemples pouvaient être proposés dans les argiles raides et les sols marneux, la vitesse d'avancement de l'appareillage restant réduit par rapport aux méthodes traditionnelles de pré-forage, telles que la tarière continue ou les outils à dents avec injection de boue.

1.2. Essais autoforés des sols meubles aux roches tendres par la technique Rotostaf.

Pour résoudre ce problème du faible avancement du STAF® dans les sols raides ou très compacts, l'utilisation de la rotation simple d'un train de tige a été résolu à l'aide d'une tête de forage hydraulique spécifique combinant une faible vitesse de

rotation du tube extérieur avec une bonne rapidité du vibro-marteau agissant sur le taillant débordant.

Avec cette conception, appelée ROTOSTAF®, les essais peuvent être réalisés dans des sols tels que les argiles compactes, les marnes et même des couches calcaires.

1.3 Régulation et conduite automatisée d'un essai par le pressiomètre GéoPac®

L'usage d'un contrôleur pression-volume (CPV) traditionnel en pression contrôlée est certes possible dans un tube fendu descendu par le STAF®. Mais de meilleurs résultats peuvent être atteints avec un nouveau type de CPV, GeoPac®, intégrant le logiciel de traitement Géovision. Au lieu de travailler au gaz comprimé, ce pressiomètre comprend un piston motorisé extrêmement précis qui permet de réaliser les essais normalisés en paliers de pression, avec une précision volumétrique de 10^{-3} cm^3, soit une précision sur la déformation radiale moyenne de 10^{-5}.

Actuellement, dans la mise au point de ce CPV, au moins quatre avancées fondamentales dans la procédure de l'essai ont été recherchées :

- une stricte compensation automatique de la résistance propre de la membrane des sondes, ce qui permet une correction de la pression vraie sur la paroi du forage à tout instant
- une automatisation complète de la procédure d'essai : le système assisté par ordinateur détermine les modules du sol à partir des trois premiers pas de pression, et ajuste la procédure d'essai de manière à mener à bien l'essai avec un nombre de paliers de pression optimisé. L'opérateur conserve cependant toujours la possibilité de travailler en semi-automatique.
- le calibrage automatique du volume initial de la sonde avec le volume réel du trou auto-foré, la pression pour ce premier palier de l'essai étant mis en équilibre avec la pression des terres au repos. Ce procédé dans le système "volume en fonction de la pression" rappelle celui du "lift-off" dans le système « pression en fonction du déplacement » des sondes du pressiomètre auto-foré SBP avec capteurs mécaniques.
- enregistrement des lectures (p,V) avec une très grande précision, la courbe ne présentant pas de point d'inflexion.

Le logiciel Géovision traite automatiquement les données reçues d'un Géopac, avec sur option de l'utilisateur dérivation des courbes de modules tangent et sécant depuis p_o comme dans l'exemple donné ci-après.

1.4 Un exemple d'essai

Sur l'essai ci-contre (Fig.1), on remarquera que la pression du premier point de lecture est acceptable comme p_o, avec un volume de contact exactement égal au volume annulaire entre la sonde dilatable et le tube fendu, et que l'essai est régulé jusqu'à un volume de près de 1000 cm^3 soit un déplacement de la paroi du forage de l'ordre de 12 mm. L'erreur moyenne répartie entre les points mesurés et le modèle hyperbolique est ici de 1,8 cm^3 (soit environ 25µm).

D'autres caractéristiques de l'essai sont également remarquables et observées aussi sur de nombreux essais autoforés. La première est que la courbe de fluage présente deux cassures : l'une à la pression pf_1 prise ici pour le calcul du module pressiométrique, l'autre à une pression pf_2 nettement plus élevée (Monnet et Khlif, 1994). Une autre est que le modèle hyperbolique permet de tracer automatiquement les courbes de décroissance régulière du module sécant Es et de module tangent Et, qui recouvrent bien les mêmes courbes calculées sur les points d'essais, ceux-ci montrant dans les très faibles déformations initiales un module nettement plus élevé, ici presque doublé, que nous chercherons à expliquer.

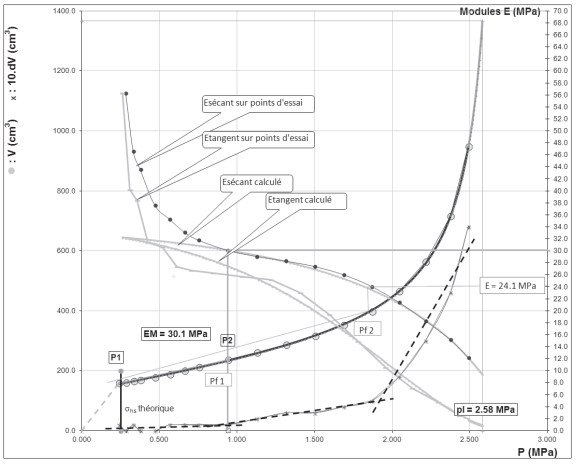


Figure 1. Résultat d'un essai à 18 m de profondeur dans une argile sableuse raide (Cénomanien de la bordure Ouest du Bassin Parisien), autoforé par Rotostaf, sonde diamètre 44 mm à cellule de mesure de 37 cm dans le tube fendu de 63 mm de diamètre, essai piloté par le CPV GéoPac®. et résultats tracés par Géovision

2. MODÈLE HYPERBOLIQUE DE L'EXPANSION D'UNE CAVITÉ CYLINDRIQUE

2.1. De la double hyperbole au modèle hyperbolique

Très tôt dans la pratique de l'essai pressiométrique, Louis Ménard avait défini la pression limite p_{LM}, notion née avec l'essai, au doublement du volume de la cavité de forage initiale, en sachant que cette convention n'impliquait pas que la déformation correspondante soit matériellement atteinte par les sondes. La société Ménard et les concessionnaires pionniers ont dès lors proposé successivement de nombreuses méthodes d'extrapolation de la courbe vers la pression limite : courbe inverse, méthode des volumes relatifs, coordonnées log-log, courbe Lemée, dont la convergence vers une pression limite unique n'était pas évidente (Baguelin et al. 1978). La double hyperbole est l'une de ces méthodes d'extrapolation, dérivant du dessin des essais en (P, 1/V) (d'Hemricourt 2005).

La méthode en double hyperbole a été formalisée et programmée (Baud et al., 1992) et constitue un modèle décrivant bien la forme en « S » des essais en préforage, liée aux vicissitudes de diamètre de forage, du temps d'attente et de décompression entre forage et essai et du choix de paliers initiaux inférieurs à la pression des terres p_o avant forage, par un opérateur qui en principe ignore la valeur de p_o et de p_{LM}, sujets de la mesure, et à qui il est demandé de prévoir avant la mesure un résultat final divisé en n paliers égaux.

Il apparaît rapidement que l'application aux essais autoforés tel que celui de la figure1 simplifie plus ou moins radicalement la modélisation, en réduisant la première hyperbole au rôle de facteur secondaire. Pour un essai débutant par un palier de pression corrigée légèrement supérieure ou idéalement égale à la pression des terres au repos p_o sans décompression ni refoulement du sol avant l'essai, les points d'essai décrivent une simple hyperbole, de la forme

$$\Delta V = A_1 + A_2 \cdot p + \frac{A_3}{A_4 - p} \qquad (1)$$

où ΔV est le volume mesuré au-delà du volume de la sonde au repos V_o et p la pression d'essai corrigée de l'étalonnage et du calibrage. Pour le pressiomètre Ménard l'usage est de nommer le ΔV mesuré par la simple notation « V ».

Il est possible d'exprimer ces données d'essai en fonction de la déformation dite circonférentielle ε_c :

$$\varepsilon_c = \frac{a - a_0}{a_0} = \sqrt{\frac{V_p + \Delta V}{V_P + \Delta V_0}} - 1 \qquad (2)$$

où a est le rayon du forage en expansion, a_0 le rayon initial au moment du contact sonde-sol à la pression p_o, V_p le volume de la sonde au repos, ΔV_0 volume de contact entre la sonde et le sol vierge correspondant à a_0.

L'essai pressiométrique ne mesurant qu'un déplacement à la paroi de la cavité, ε_c est la seule déformation relative qui peut être ainsi déduite de l'essai et dans la suite du texte nous désignerons simplement

- la déformation pressiométrique à la paroi par ε, sans indice ;
- les pressions nettes à la paroi, après déduction de la pression horizontal du sol au repos $p^* = p - p_o$

L'hyperbole ainsi ajustée sur les données d'essai est de la forme

$$\varepsilon = C_1 + C_2 . p^* + \frac{C_3}{C_4 - p^*} \quad (3)$$

Nous rappelons rapidement les étapes conduisant de cet ajustement mathématique sur les points de mesure aux paramètres du modèle hyperbolique présenté ici :

- C_1 est homogène à une déformation, C_2 à une unité de contrainte ayant le rôle la dimension d'un module, C_3 et C_4 à des contraintes (pressions). On montre facilement (Baud & Gambin, 2005, 2008) que C_4 est l'ordonnée de l'asymptote verticale pour $\varepsilon = \infty$, notée p_L par les Anglo-Saxons, et ici p^*_L, et que les 3 autres paramètres ne sont pas indépendants et se réduisent à 2 : une déformation ε_0 et un module E_0 qui est la pente de l'asymptote oblique :

$$\varepsilon = \varepsilon_0 + \frac{p^*}{E_0} - \frac{\varepsilon_0 \cdot p^*_L}{p^*_L - p^*} \quad (4)$$

- Le module de cisaillement du sol pour les déformations infinitésimales à partir de p_o, noté G_0 est un des paramètres du modèle (Baud et al., 2012), comme on peut le voir en construisant hors de toute référence à une base expérimentale une hyperbole passant par le point (p_o, 0), ayant une pente $2G_0$ à ce point initial et admettant une asymptote verticale p^*_L :

$$\varepsilon = \frac{p^*}{2.G_0} . \frac{1 + p^* / p^*_c}{1 - p^* / p^*_L} \quad (5)$$

Cette expression nécessite pour être déterminée de connaître un point quelconque de la courbe (p_x, e_x) définissant comme paramètre complémentaire une pression nette p^*_c telle que :

$$p^*_c = \frac{p^*_L \cdot p^{*2}_x}{2.\varepsilon_x . G_0 (p^*_L - p^*_x) - p^*_L . p^*_x} \quad (6)$$

- En complément de G_0 et p^*_L, un seul autre paramètre est donc nécessaire à la définition complète du modèle, soit p_c, soit ε_0 :

$$\varepsilon = \varepsilon_0 + \left(\frac{1}{2.G_0} + \frac{\varepsilon_0}{p^*_L} \right) p^* - \frac{\varepsilon_0 . p^*_L}{p^*_L - p^*} \quad (7)$$

- Les expressions (5) et (7) sont équivalentes dès que l'on détermine le même point complémentaire sur la courbe.

2.2. Rôle de la limite conventionnelle de l'essai

Le choix d'une valeur de rupture conventionnelle pour l'essai, p^*_{LM}, a été dicté par la nécessité pragmatique de déduire de cette caractéristique globale du sol au niveau de l'essai des règles de dimensionnement à la rupture réalistes, et indépendantes de la recherche d'une pression limite « vraie » p^*_L correspondant à une déformation infinie. On peut remarquer qu'elle signifie, pour les essais en forage calibrés de diamètre 60 à 63 mm (2 pouces ½) qui sont devenus la pratique et la norme de l'essai, un déplacement absolu de la paroi de 13 mm environ (½ pouce, ou 20% du diamètre).

L'expérience de l'utilisation de sondes de diamètres très différents démontre que cette convention n'est équivalente au doublement du volume de la cavité que par le hasard historique du choix par Ménard de sondes de 55 à 63 mm, comme les plus pratiques et les plus répandues (en réalité, jusqu'à 76 mm ou 3 pouces si on considère la pratique du pressiomètre Ménard au niveau mondial). On constate que des sondes de diamètres très différents conduisent à une pression limite équivalente à p^*_{LM} pour des taux d'expansion qui ne correspondent pas au doublement de volume de leur cavité, mais à un même déplacement absolu de la paroi du forage de l'ordre de 13 mm :

- Dans les petits diamètres, les sondes de diamètres 22 mm et 32 mm dites « minipressiomètre », de volume 240 cm^3 au repos, restent dans le domaine pseudo-élastique ou proche de la pression de fluage lorsqu'elles ont doublé de volume, et nécessitent une expansion jusqu'à 350 à 400 cm^3 pour montrer une rupture franche du sol ; ce volume, atteint sans difficulté grâce à l'élancement important de ces sondes, correspond à un déplacement de la paroi de 11 à 13 mm.
- Dans les diamètres plus importants, les utilisateurs des sondes autoforeuses de type PAF76, de diamètre 140 mm, ont montré que la rupture était amorcée dès le début de l'essai, et ont fixé expérimentalement une équivalence avec la pression limite Ménard pour une pression p_{20} déterminée par une déformation diamétrale de 20%, soit un déplacement absolu de 14 mm. (Baguelin et al. 1978).

Dès lors, nous proposons d'utiliser comme convention pour le calcul de la pression limite p_{LM} pour tout essai de chargement radial la déformation conventionnelle $\varepsilon = \Delta r / R_{ref}$ et non plus $\varepsilon = \Delta r / r_0$, ce qui rend ε dépendant d'une longueur absolue R_{ref}=13 mm dont la signification reste à rechercher, mais indépendant de la sonde utilisée et du diamètre du forage.

2.3. Expression de la pression limite conventionnelle

Le modèle de comportement de sol hyperbolique de type élasto-plastique avec écrouissage dit « Hardening soil model » de Plaxis, B.V. est bien connu. Ce modèle utilise dans le repère (ε_1, q) où ε_1 est la déformation axiale des essais triaxiaux, et le déviateur $q = \sigma_1 - \sigma_3$, une courbe hyperbolique passant par l'origine et d'asymptote horizontale q_a. Par analogie avec ce modèle définissant un module E_{50} correspondant à la déformation acquise pour la moitié du déviateur de contrainte de rupture, soit q_f, nous définissons sur la courbe pressiométrique le module de cisaillement sécant G_M atteint à la moitié de la pression limite p^*_L ([1]). Soit :

$$G_M = \frac{p^*_L}{4.\varepsilon_M} \quad (8)$$

En portant cette valeur ε_M dans (7), on obtient

$$\varepsilon_0 = \frac{p^*_L}{2} \left(\frac{1}{G_0} - \frac{1}{G_M} \right) \quad (9)$$

D'où une expression du modèle pressiométrique :

$$\varepsilon = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{G_M} - \frac{1}{G_0} \right) \left(\frac{p^{*2}}{(p^*_L - p^*)} \right) + \frac{p^*}{2.G_0} \quad (10)$$

Pour obtenir la présentation de l'expression (10), nous avons choisi un module à la moitié de la rupture « vraie », asymptotique, et non la moitié de la rupture conventionnelle. Ce second choix aboutit également à une expression $\varepsilon = f(p)$ déterminée par 3 paramètres physiques (G_0, p^*_{LM} et un module sécant G'_M), mais moins simple. En pratique, ces deux modules G_M et G'_M sont évidemment très peu différents, puisque l'on

[1] N.B. Les modèles hyperboliques « hardening soil » et pressiométrique n'étant pas dans les mêmes coordonnées de contraintes et déformations, il ne s'agit ici que d'une analogie.

constate sur les essais autoforés que le rapport p^*_{LM}/p^*_L, analogue au rapport $R_f = q_f/q_a$, est de l'ordre de 0,7 à 0,9.

La pression limite conventionnelle p^*_{LM} est celle qui correspond à $\varepsilon = 1$, ce qui conduit pour p^*_{LM} à une simple équation du second degré :

$$\left(\frac{1}{2.G_M}-\frac{1}{G_0}\right)p^{*\,2}_{LM}+\left(\frac{p^*_L}{2.G_0}+1\right)p^*_{LM}-p^*_L=0 \qquad (11)$$

dont p^*_{LM} est l'unique solution positive.

2.4. Expression des modules réduits G/G_0.

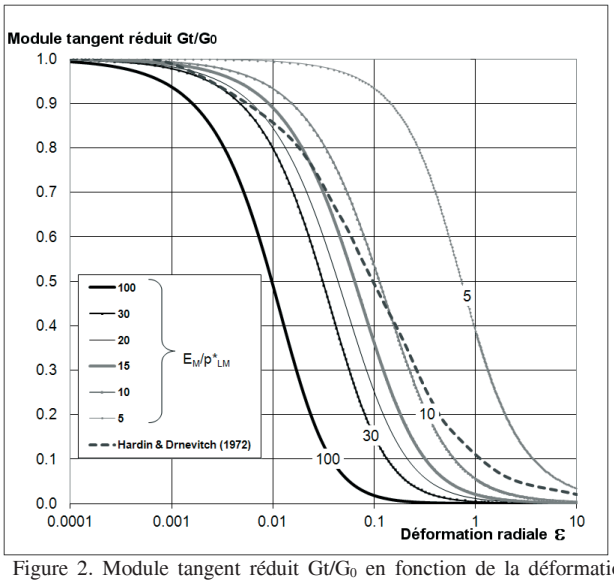


Figure 2. Module tangent réduit Gt/G_0 en fonction de la déformation pressiométrique radiale pour la gamme des valeurs du rapport E_M/p^*_{LM}.

Les expressions (10) et (11) permettent de calculer les modules de cisaillement tangent Gt et sécant Gs, normalisés par leur rapport au module tangent initial G_0, et de visualiser l'évolution de ces modules en fonction de la déformation, pour la gamme des valeurs possibles pour les rapports G_0/p^*_{LM} ou p^*_L/p^*_{LM}, rapports caractéristiques du type de comportement du sol. En figure 2 est présentée la même évolution du module tangent réduit Gt/G_0 en fonction des valeurs de E_M/p^*_{LM}, plus familières aux utilisateurs du pressiomètre.

3. CONCLUSION

La possibilité existe avec la méthode du tube fendu autoforé (forage STAF®) et l'utilisation d'un pressiomètre qui pilote et régule l'essai automatiquement (pressiomètre Géopac®), de réaliser dans des sols variés et offrant la plus large gamme de résistances, des essais pressiométriques autoforés, fournissant instantanément (logiciel industriel Géovision®) non seulement la courbe pressiométrique "classique", mais aussi ses dérivées en module tangent et sécant depuis une origine p_o. Elle ouvre des perspectives de développements nouveaux dont nous n'avons pu donner ici qu'un aperçu. En particulier nous pensons possible de traduire très facilement les paramètres des courbes d'essais nécessaires au dimensionnement direct de fondations par la méthode de J.-L Briaud (2003, 2006).

4. RÉFÉRENCES.

AFNOR, 2012, Pr EN ISO 22476-4,. Reconnaissance et essais géotechniques Essais en place - Partie 4: Essai au pressiomètre Ménard.

Arsonnet, G., Baud, J.-P., Gambin, M. P. 2005. Réalisation du forage pour essais pressiométriques par un système de tube fendu autoforé (STAF), in ISP5 – PRESSIO 2005, Actes Symp. Intern. Paris, Gambin, M. P., Magnan, J.-P., Mestat, P. (eds) 22-24 août, 2005, Paris: Presses des Ponts. Vol.1 pp 31-45..

Baguelin F., Jezequel J.F., Shields D.H. 1978. The Pressuremeter and Foundation Engineering. Trans Tech Publications, Clausthal, Germany, pp 425-439.

Baud, J.-P, Gambin, M. P. 2005. Déduction d'une loi de réponse hyperbolique unique par compilation de courbes pressiométriques dans un sol de lithologie homogène, in ISP5 – PRESSIO 2005, Actes Symp. Intern., Gambin, M. P., Magnan, J.-P., Mestat, P. (eds) Paris, 22-24 août, 2005, Vol.1 Paris: Presses des Ponts pp 175-186.

Baud, J.-P, Gambin, M. P. 2008. Homogenising MPM Tests Curves by Using a Hyperbolic Model, in Huang, A.-B., & Mayne, P. W. (eds) Geotechnical and Geophysical Site Characterization, Proc. ISC'3 Taiwan, 1-4 April 2008, London: Taylor & Francis

Baud, J.-P, Gambin, M. P., Schlosser F. 2012. Stress-strain Hyperbolic Curves with Ménard PMTs, in R.Q. Coutinho (ed.), 4th Int. Conf. on Geotechnical and Geophysical Site Characterization (ISC'4), P. de Galinhas, Brazil, 18-21 sept. 2012. London: Taylor & Francis

Baud J.-P., Gambin M., Uprichard S. 1992. Modeling and automatic analysis of a Ménard pressuremeter test. Géotechnique et Informatique, Presses des Ponts, Paris.pp 25-32.

Briaud, J.-L., Hossein K. et BarfknechtJ, .2003. Méthode de détermination de la courbe charge-tassemennt pour les fondations superficielles dans les sables. Presses des Ponts, Rev. Fr. de Géotechnique N°105, pp 29-39.

Briaud, J.-L., 2006. The preboring pressuremeter, some contributions, in ISP5 – PRESSIO 2005, Actes Symp. Intern., Gambin, M. P., Magnan, J.-P., Mestat, P. (eds) Paris, 22-24 août, 2005, Vol.2 Paris: Presses des Ponts pp 103-124.

Clarke B. G., Gambin, M. 1998 Pressuremeter Testing in Onshore Ground Investigations: A report by the ISSMGE Committee TC16, Geotechnical Site Investigation, Proc. First Int. Conf. on Site Characterization (ISC'1), P. K. Roberts on & P. W. Mayne eds., Vol.2, A. A. Balkema, Rotterdam, pp 1429-1468.

d'Hemricourt J. 2005. L'interprétation de l'essai pressiométrique : de la courbe inverse à la double hyperbole. in ISP5 – PRESSIO 2005, Actes Symp. Intern. Paris, Gambin, M. P., Magnan, J.-P., Mestat, P. (eds) 22-24, 2005, Paris: Presses des Ponts. Vol.1 pp 319-328.

Mair, R. J., Wood, D. M. 1987. Pressuremeter Testing, CIRIA Series, London: Butterworths

Monnet J. et Khlif J. 1994 Etude théorique de l'équilibre élasto-plastique d'un sol pulvérulent autour du pressiomètre. Presses des Ponts, Rev. Fr. de Géotechnique N°65.