

Détermination du coefficient rhéologique α de Ménard dans le diagramme Pressiorama®.

Obtaining the Ménard α Rheological Factor in a Pressiorama® Diagram.

J.P. Baud

Eurogé, Avrainville, France

M. Gambin

Apagéo, Magny-les-Hameaux, France

RÉSUMÉ : Louis Ménard a défini le coefficient rhéologique α à l'aide du rapport adimensionnel des deux caractéristiques classiques de l'essai pressiométrique E_M/p_{LM}^* . La connaissance de ce rapport est un élément essentiel de la validité des calculs de déformation du sol au contact de toutes sortes de fondations. Sa valeur dépend simultanément de la qualité de réalisation du forage pressiométrique, et de la proportion entre cohésion et frottement dans la résistance du sol soumis à l'essai, c'est-à-dire de sa nature. Dans le but de compléter par un axe des valeurs de α le diagramme Pressiorama® désormais présent dans certaines normes d'application de l'Eurocode 7, nous nous sommes étalonnés sur des essais pressiométriques autoforés par la technique STAF dans des sols divers allant de sols très mous à des rochers très massifs. En effet ces essais, de très bonne qualité, permettent d'obtenir des valeurs E_M/p_{LM}^* allant de 4 pour les sols purement granulaires à plus de 100 pour les sols cohérents très consolidés et les roches. Les auteurs proposent ici, à partir de ces données, une expression, à la fois chiffrée et graphique, de la valeur du coefficient rhéologique α , basée sur 3 paramètres E_M , p_{LM} et p_0 - ce dernier estimé ou, mieux, mesuré et donc variable selon la profondeur de l'essai dans le sol.

ABSTRACT : In the early years of the development of his "direct method" of design based on PMT results, Louis Ménard introduced a rheological factor α based on the ratio E_M/p_{LM}^* for each test. The knowledge of this factor is necessary to estimate settlement and horizontal displacement of all sorts of foundations. Its value is a function of both the quality of the borehole and the ratio between soil friction and cohesion, *i.e.* its nature. In order to complete the Pressiorama® diagram with a α values axis, the authors used a calibration mostly based on so-called self-bored PMT tests performed with the STAF technique, in various soil types from soft clay to rock. These very good quality tests permit obtaining E_M/p_{LM}^* values from 4 in granular soils to 100 in highly consolidated soils and rock. From these data, the authors propose an evaluation of this rheological factor α only based on the values of 3 parameters, namely, E_M , p_{LM}^* and the earth pressure at rest p_0 , either estimated, or, much better, measured during the early part of the test. Results are given under the shape of an equation and graphically on the Pressiorama® diagram.

MOTS CLÉS : Pressiomètre, autoforage, classification des sols, coefficient rhéologique α .

KEYWORDS : Ménard pressuremeter, self-boring, soil classification, α rheological factor.

1 INTRODUCTION

Le rapport adimensionnel E_M/p_{LM}^* des deux caractéristiques classiques de l'essai pressiométrique Ménard est un facteur complexe et puissant, qui dépend simultanément de la qualité de réalisation du forage pressiométrique, et de la proportion entre cohésion et frottement dans le comportement du sol soumis à l'essai, c'est-à-dire de sa nature. Son utilisation par Ménard pour définir le coefficient rhéologique α est un élément essentiel de la validité des calculs de déformation du sol par les méthodes pressiométriques.

Au cours des années récentes, en raison de l'accroissement des essais pressiométriques produits par des opérateurs manquant de formation et de maîtrise des techniques de forage les mieux adaptées à chaque type de sol, techniques spécifiques à cet essai mais remarque valable aussi pour tous les essais géotechniques, de nombreux utilisateurs ont décelé une distorsion entre les prévisions de tassement par la méthode pressiométrique et les déformations réellement observées sur les ouvrages construits. La quasi-totalité des pratiques de forage entraînant le remaniement des parois de forage pressiométrique allant toujours dans le sens d'une diminution parfois dramatique des modules mesurés, les prévisions de tassement qui en ont été déduites deviennent notoirement pessimistes, ceci alors même

que la méthode de calcul, confirmée par les normes et réglementations nationales et européennes, a montré depuis longtemps sa fiabilité lorsqu'elle est appliquée à des données de terrain acquises dans des conditions de qualité normale. (Baguelin et al. 1978).

Avec l'émergence de codes de calcul aux éléments finis, de nombreux ingénieurs ont pensé qu'il était possible, voire nécessaire, de délaisser la célèbre règle souvent nommée T-0 (Ménard & Rousseau, 1962) pour le calcul du tassement à partir d'un profil de modules pressiométriques, au profit d'une modélisation numérique complexe tenant compte de la géométrie de l'interface sol-structure, et de traiter le problème de la déformation en appliquant à ce modèle des lois de comportement basées sur l'élasticité linéaire, à l'aide d'une « corrélation » entre le module pressiométrique et un module d'Young.

Cette approche nous semble vouée à l'échec, comme chaque fois que l'ingénieur croit pouvoir faire fi de la méthode expérimentale et la remplacer par des calculs que l'on prend pour rigoureux à raison de leur complexité (Briaud & Gibbens 1994, Gambin 2003, Gambin 2010). Notre approche de ce problème majeur relatif à la crédibilité des prévisions de déformation faites par l'ingénierie géotechnique, se distingue de cette tendance aux modélisations complexes, et vise plutôt à assurer ce qui fait l'originalité et la cause du succès de la

méthode pressiométrique, c'est à dire atteindre rapidement un résultat par un calcul simple et fondé sur une connaissance la plus parfaite possible de la loi contrainte-déformation de la sollicitation pressiométrique du sol vierge. Dans ce sens, les essais autoforés dans la plus large gamme de sols possible sont une bonne réponse (Arsonnet et al., 2005), car ils permettent à la fois la mesure du module initial G_0 , de la loi de décroissance du module avec la contrainte (Baud & Gambin, 2005 ; Baud & Gambin, 2008 ; Baud et al., 2012 et 2013), enfin l'évaluation du coefficient α (Baud, 2005 ; Baud & Gambin, 2012).

2 PARAMETRES PRESSIOMETRIQUES NECESSAIRES ET SUFFISANTS A LA DETERMINATION DE α .

2.1 Module E_M , pression limite p_{LM}^* et confinement de l'essai.

La première présentation du coefficient rhéologique α en tableau à double entrée, en fonction du rapport E_M/p_{LM}^* et de l'état de consolidation du sol, qui avait été donnée dans la notice D60 sur les « règles d'exploitation des techniques pressiométriques et d'exploitation des résultats obtenus par le calcul des fondations » (Ménard, 1968) a été reconduite telle quelle dans les réglementations françaises puis européennes. Ménard prévoyait pourtant de réviser le tableau « en fonction de résultats d'essais expérimentaux », raison principale pour laquelle les valeurs de α étaient données sous forme de fractions unitaires. Mais le principe était établi : α est croissant quand E_M/p_{LM}^* est croissant, depuis le comportement sableux jusqu'au comportement argileux, et croissant également lorsque le sol passe de la sous-consolidation ou de l'altération à la sur-consolidation.

Pour suivre cette règle usuelle, des lignes d'isovaleurs des valeurs fractionnaires de α peuvent être tracées directement dans le diagramme bi-logarithmique Pressiorama® (Baud, 2005) en $\log(p_{LM}^*)$, $\log(E_M/p_{LM}^*)$, tel qu'il a été édité en annexe des normes NF P94-261 et NF P94-262 (Fig. 1), la valeur 1 formant la limite supérieure du diagramme et la valeur $1/4$, la plus faible du tableau de Ménard, étant affectée au rapports E_M/p_{LM}^* très faibles, correspondant soit à des sables et graviers, soit à des sols très remaniés, remaniement naturel in situ, ou bien lié à une mauvaise exécution du forage pressiométrique.

La principale raison de tracer des droites en coordonnées bi-logarithmiques, était que l'on ne dispose absolument pas, dans le référentiel des confrontations entre méthode pressiométrique et fondations instrumentées, de données suffisantes pour proposer des courbes plus sophistiquées. Ces droites sont donc des constructions mathématiques simples, basée sur l'hypothèse :

$$\alpha = \frac{\left(\frac{E_M}{p_{LM}^*}\right)^{\frac{1}{n}}}{k \cdot \left(\frac{p_{LM}^*}{p_0}\right)^{\frac{m}{n}}} \quad (1)$$

Sous cette forme en effet, les coefficients m et n (en exposants) et le facteur k , tous sans dimensions prennent empiriquement les valeurs nécessaires pour assurer le tracé désiré : m détermine l'angle des droites iso- α , n détermine l'écartement entre les valeurs, et k détermine, pour un couple de valeurs (m , n) donné, la position de la ligne maximale $\alpha = 1$.

Les valeurs de α ainsi proposées peuvent être rendues assez conformes au tableau à double entrée de Ménard pour des essais à profondeur moyenne de quelques mètres utilisés pour des fondations superficielles.

Mais on voit assez vite que si les valeurs de E_M/p_{LM}^* décrivent toujours assez bien la nature du sol, sableux, intermédiaire ou argileux, qui peut être connu par ailleurs au moment du forage pressiométrique ou, mieux par un sondage

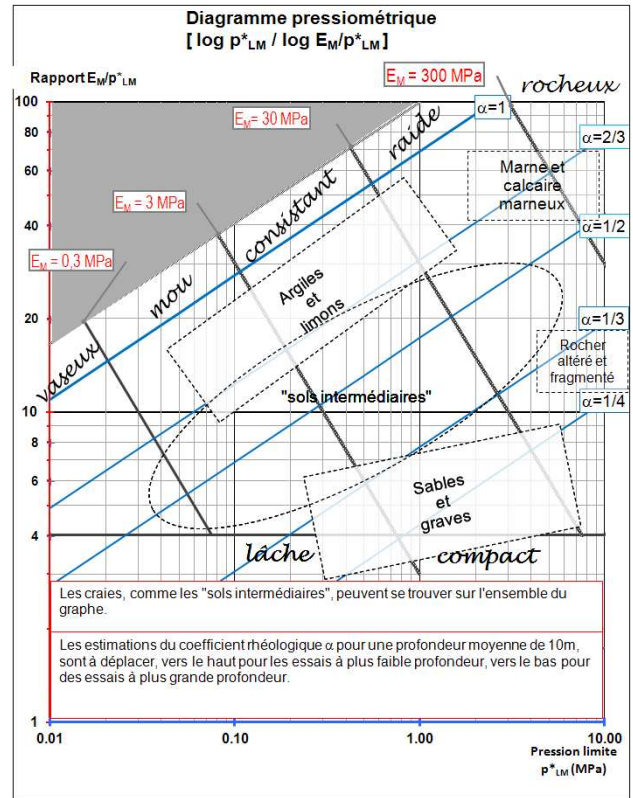


Figure 1 Valeurs de α dans le diagramme Pressiorama® tel qu'il peut apparaître dans les normes NF-P94-261 et NF-P94-262 (en projet).

carotté au voisinage, la position des lignes d'isovaleurs de α par rapport à p_{LM}^* n'est plus compatible dès lors que l'on considère des essais réalisés à des profondeurs importantes : ceci est lié au fait que ce n'est pas la valeurs absolue de p_{LM}^* qui doit être prise en compte, mais la valeur relative p_{LM}^*/p_0 , sans dimension, qui tient compte du confinement de l'essai par la pression horizontale des terres au niveau où elle est mesurée.

On est ainsi conduit à la formulation suivante, dans laquelle k , m et n jouent le même rôle.

$$\alpha = \frac{\left(\frac{E_M}{p_{LM}^*}\right)^{\frac{1}{n}}}{k \cdot \left(\frac{p_{LM}^*}{p_0}\right)^{\frac{m}{n}}} \quad (2)$$

Le nouveau diagramme [$\log(p_{LM}^*/p_0)$, $\log(E_M/p_{LM}^*)$] qui en résulte n'est pas tracé ici. Il constitue une présentation peu intuitive, essentiellement parce que le géotechnicien est très habitué à ce que représente la pression limite, directement proportionnelle à la résistance du sol, alors que la grandeur sans dimension p_{LM}^*/p_0 est difficile à saisir. Elle représente en quelque sorte le degré de résistance du sol soumis à l'essai par rapport à une augmentation « normale » de résistance attendue croissante en fonction de la profondeur.

Les coefficients m et n peuvent prendre en théorie une large gamme de valeurs, mais en pratique seule une faible gamme de variations laisse les droites représentatives toutes présentes et étalées dans le champ de vision du diagramme. Nous proposons de les arrêter à $m=0,5$ et $n=2$, et avec ce couple de coefficients,

k prendra une valeur comprise entre 3 et 4 pour que α reste compatible avec l'usage. Nous avons retenu ici $k=3,2$, d'où :

$$\alpha = \frac{\left(\frac{E_M}{p_{LM}^*} \right)^{\frac{1}{2}}}{3,2 \cdot \left(\frac{p_{LM}^*}{p_0} \right)^{\frac{1}{4}}} \quad (3)$$

2.2 Quelle est la relation possible entre E Young et E_M ?

Tout d'abord, il paraît peu judicieux de comparer le module d'Young mesuré par traction sur des solides polycristallins (barres métalliques) où la déformation est linéaire jusqu'à la fin de la phase strictement élastique, et le module de déformation des sols, variable avec l'intensité de la contrainte, cette déformation étant de nature hyperbolique tout au long de l'application de la charge.

C'est la raison qu'expose Ménard, dans son article fondateur de Sols-Soils n°1 (Ménard & Rousseau, 1962), pour créer la notion de coefficient α pour lequel il propose simultanément la gamme des valeurs fractionnaires dans différents sols, et une expression basée sur le module alterné E_a :

$$\alpha = \left[\frac{E}{E_a} \right]^{\left(\frac{1+\nu}{2} \right)} \quad (4)$$

ν étant « une valeur faible comparée à $\frac{1}{2}$, dépendante de facteurs secondaires ». Ménard pensait approcher avec E_a la valeur du module de micro-déformations, noté alors E_e ; on s'accorde plutôt aujourd'hui à voir dans E_a une approche d'un module élastique E_Y . Paraphrasant Ménard on peut écrire :

$$E_Y = E_M / \alpha^n \quad (4b)$$

avec $n \leq 2$, soit en négligeant les facteurs secondaires :

$$E_Y = E_M / \alpha^2 \quad (4c)$$

Pour des raisons non explicites, l'habitude avait été prise en France par les utilisateurs de résultats pressiométriques, de tronquer cette proposition et de la transformer en $E_Y = E_M / \alpha$, de la diffuser voire de l'enseigner sous cette forme en citant les publications de Ménard, alors que ce n'est pas le cas. Des utilisateurs de longue date des méthodes pressiométriques hors de France avaient gardé l'usage de cette relation entre E_Y et E_M (R Heintz, 2012). Il y a eu sans doute attraction et confusion liée au fait que Ménard a plus tard également défini $\alpha = E_M / E_+$, E_+ « module de déformation du sol dans un champ quasi-isotrope », plutôt assimilable donc à un module de type œdométrique et non à un module d'Young.

En identifiant α entre les relations (3) et (4), il vient :

$$\frac{E_Y}{p_{LM}^*} = 10 \cdot \left(\frac{p_{LM}^*}{p_0} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

Cette relation remarquable qui élimine E_M et α et établit une relation directe entre E_Y et p_{LM}^* , découle directement du choix fait ci-dessus pour les coefficients m et n . En effet, quelle que soient les valeurs adoptées pour ces coefficients, il se maintient toujours une forte corrélation entre un paramètre de rupture, p_{LM}^* , et un module d'Young définissant une relation linéaire élastique, donc constituant une corde sur la courbe pressiométrique, entre son origine ($p = p_0$) et un point situé vers le milieu de l'intervalle $p_0 - p_{LM}$ c'est-à-dire proche de la pression de fluage de l'essai.

La mise en évidence de cette relation confirme bien la définition initiale de Ménard et l'expression qui en est proposée ici. En effet, dans un modèle (q, ε) ramenant le comportement du sol à une phase élastique linéaire bornée par un critère de rupture fixe, celui-ci impose bien un rapport unique entre le module E et la valeur choisie pour le déviateur q .

3 PROPOSITION D'UN NOUVEAU CADRE POUR LE DIAGRAMME PRESSIORAMA®.

En vue de déterminer la valeur du coefficient rhéologique α pour chaque essai pressiométrique dont on connaît normalement et simultanément la pression limite, le module pressiométrique, et la profondeur permettant d'estimer p_0 , ou mieux la valeur mesurée de p_0 , il est possible de proposer une façon différente de placer les résultats d'essais, dans un nouvel abaque construit de la façon suivante (Fig. 2) :

- en abscisse, le coefficient α , en échelle logarithmique et en valeurs décroissant de gauche à droite.
- en ordonnée, placé sur $\alpha = 1$, le module pressiométrique relatif E_M/p_0 , qui est donc un nombre sans dimension, en échelle logarithmique et en valeurs croissantes vers le bas.
- l'axe des pressions limites relatives p_{LM}^*/p_0 vient se placer en oblique des deux axes, avec un angle variable selon les rapports d'échelles.
- l'axe des rapports E_M/p_{LM}^* est alors conjugué et orthogonal à l'axe p_{LM}^*/p_0 .

Chaque essai pressiométrique est représenté par un point unique au croisement de ses 4 caractéristiques.

Limité vers le haut par la ligne $E_M/p_{LM}^* = 3$ au-delà de laquelle on ne doit pas trouver de matériau naturel ou fabriqué, l'abaque est un triangle rectangle englobant tous les types de sols, roches et matériaux fabriqués. La base, que l'on tronque plus ou moins tôt selon que l'on s'intéresse plus à la mécanique des roches, ou à celle des sols, ou au domaine intermédiaire, représente les matériaux cimentés. Les sols très mous, les vases et boues sont dans la pointe également tronquée. Les sols habituels de la géotechnique sont entre ces deux extrêmes, et sont ici qualifiés dans un quadrillage de 3 fois 3 cases, N°1 à N°9, dont les matériaux sont identifiés dans la légende de la figure.

L'expérience réduite d'essais pressiométriques que nous avons personnellement dans le rocher franc (Baud & Gambin, 2011 et 2012) nous a permis de confirmer les zones N°10, pour les graves et roches très fracturées, N°11, pour les roches tendres, fracturées ou altérées et N°12 pour les roches très dures. Elles sont également en accord avec des études antérieures sur les roches (Failmezzger et al., 2005).

4 CONCLUSION.

Cette étude a permis de montrer qu'il est possible d'introduire un axe des α comme abscisse de notre diagramme Pressiorama®, l'ordonnée étant E_M/p_0 , et d'en graduer la valeur en fonction des résultats obtenus au pressiomètre, ce qui n'était pas évident *a priori*. (Fig. 2).

Deux autres axes apparaissent transversalement aux coordonnées cartésiennes : la pression limite relative p_{LM}^*/p_0 et le rapport bien connu E_M/p_{LM}^* . L'abscisse α est également normée arithmétiquement en définissant le comportement pressiométrique du sol par un indice de granularité $g = [2.Ln(\alpha)]/k$, proportionnel à un angle de frottement déductible directement de l'essai : $\phi_M = \arctan(g)$.

Nous ne considérons pas notre travail comme terminé, car il est nécessaire qu'il soit confronté à de nombreux résultats d'essais pressiométriques dans les roches en particulier. Et il est possible que cette confrontation conduise à une évolution de notre schéma dont les bases paraissent cependant bien acquises.

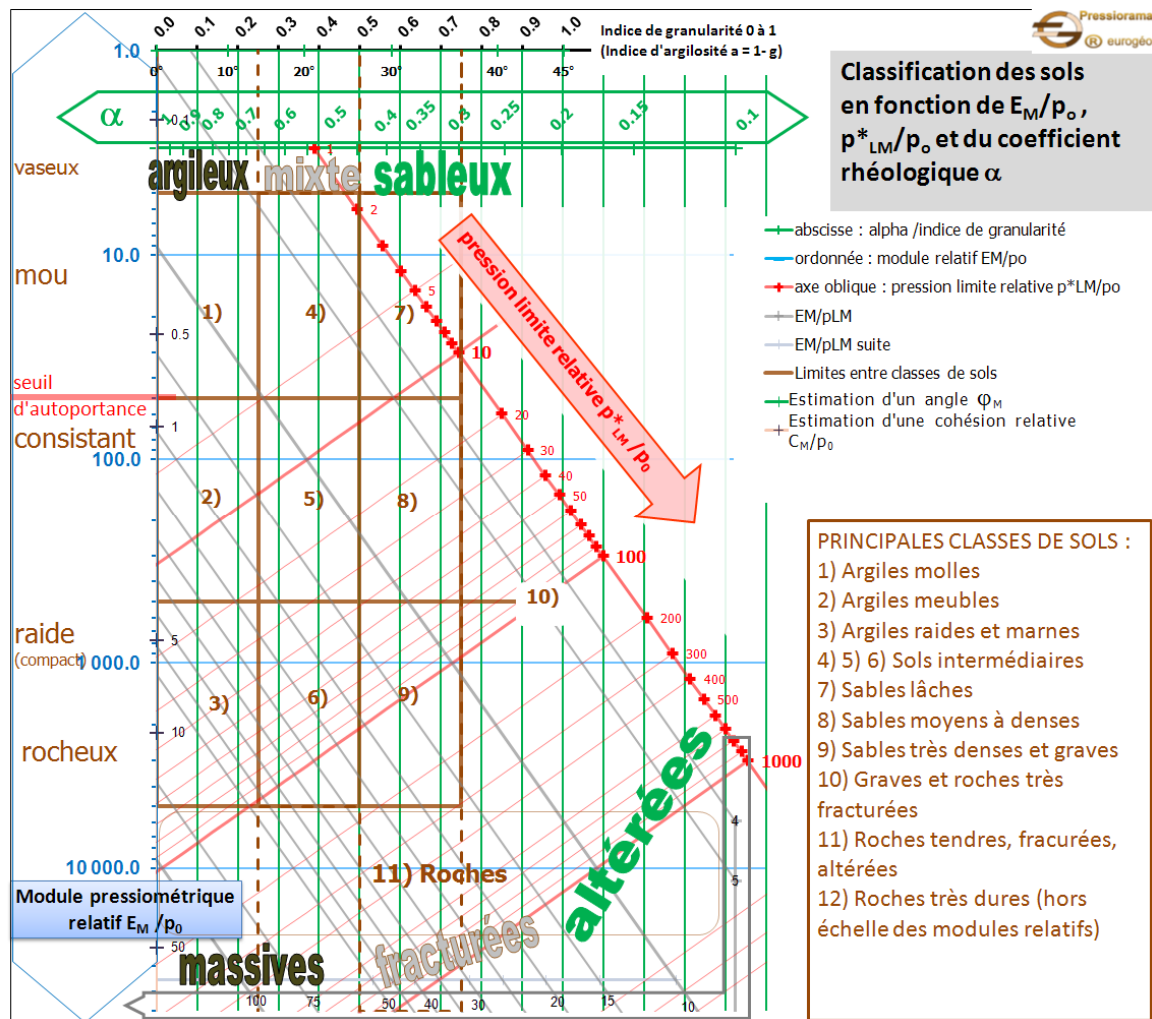


Figure 2 Diagramme Pressiorama en coordonnées bilogarithmiques adimensionnelles [α , module relatif E_M/p_0].

5 REFERENCES.

- Arsonnet, G., Baud, J.-P., Gambin, M.P. 2005. Réalisation du forage pour essais pressiométriques par un système de tube fendu auto-foré (SFAF), *Actes du Symp. Intern. ISP5 – PRESSIO 2005, sous la direction de Gambin, M., Magnan, J.-P., & Mestat, Paris, 22-24, Août. 2005, Vol.1, Paris: Presses des Ponts.*
- Baguelin F., Jezequel J.F. Shields D.H. 1978. *The Pressuremeter and foundation engineering*. Trans Tech Publications, Clausthal, Germany, chap. 3 pp 284-291.
- Baud, J.-P., Analyse des résultats pressiométriques Ménard dans un diagramme spectral [$\log(p_{LM})$, $\log(E_M/p_{LM})$] et utilisation des regroupements statistiques dans la modélisation d'un site, *Actes du Symp. Intern. ISP5 – PRESSIO 2005, Paris, sous la direction de Gambin, M., Magnan, J.-P., & Mestat, P., Paris, 22-24 Août. 2005, Vol.1, Paris: Presses des Ponts.*
- Baud, J.-P., Gambin, M. P. 2005. Dédution d'une loi de réponse hyperbolique unique par compilation de courbes pressiométriques dans un sol de lithologie homogène *Actes du Symp. Intern. ISP5 – PRESSIO 2005, sous la direction de Gambin, M., Magnan, J.-P., & Mestat, P., Paris, 22-24, Août. 2005, Vol.1, Paris: Presses des Ponts.*
- 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 Taipei, Taiwan, 1-4 April 2008*, London: Taylor & Francis
- Baud, J.-P., Gambin, M. P. 2011. Classification des sols et des roches à partir d'essais d'expansion cylindrique en haute pression, *C. R. du 15ème Congrès Européen de Mécanique des Sols et de Géotechnique*, edited by A. Anagnostopoulos, M. Patchakis, C.Tsatsanifos, ISO Press, Amsterdam.
- Baud, J.-P., Gambin, M. P. 2012. 50 MPa Ménard PMTs help linking Soil and Rock Classifications. in A. Anagnostopoulos, ed., *Geotechnical & Geological Engineering Journal, Special Issue on Hard Soils and Weak Rocks*, Springer Verlag, Berlin.
- Baud, J.-P., Gambin, M. Schlosser F. 2012. Stress-strain hyperbolic curves with Ménard PMTs in R.Q. Coutinho ed., *Geotechnical and Geophysical Site Characterization, Proc. ISC'4 Porto de Galinhas, Brazil, Sept.18-21, 2012*, London: Taylor & Francis
- Baud, J.-P., Gambin, M. Schlosser F. 2013. La courbe contrainte-déformation au pressiomètre Ménard *Actes du 18ème CIMSG*, Paris, 1-5 sept.
- Briaud, J.-L., & Gibbens, R. 1994. Test and Prediction Results for Five Spread Footings on Sand *ASCE Geotechnical Specification Publication No.41*
- Failmezger, R., Zdinak, A., Darden, J., Fahs, R. 2005. Use of Rock Pressuremeter for Deep Foundation Design *Actes du Symp. Intern. ISP5 – PRESSIO 2005, sous la direction de Gambin, M., Magnan, J.-P., & Mestat, P., Paris, 22-24, Août. 2005, Vol.1, Paris: Presses des Ponts.*
- Gambin, M. 2003. Etude élémentaire d'un mythe. *FONSUP 2003, Symposium International sur les fondations superficielles, Paris, 5-7 novembre 2003, p.251-254, J.P. Magnan & N. Droniuc éd., Presses de l'ENPC, Paris.*
- Gambin M. 2010. Les théories et leur évolution face à la réalité en Géotechnique. *VIIème Conférence Coulomb, Comité Français de Mécanique des Sols, Paris.*
- Heintz R. 2011. Communication personnelle. *Luxembourg.*
- Ménard L. Rousseau J. 1962. L'évaluation des tassements, tendances nouvelles. *Sols-Soils, N°1, Paris.*
- Ménard L. 1968. Règles d'exploitation des techniques pressiométriques et d'exploitation des résultats obtenus par le calcul des fondations. (en anglais, trad. Française TLM notice D60), *Sols-Soils, N°26 Paris.*