

# Protocole de mesure de la pression des terres au repos avant essai pressiométrique Ménard. Vérification par capteurs de pression totale Géocell Ménard

## Protocol for measuring the at rest horizontal earth pressure prior to MPM test. Verification by total pressure sensors Géocell Ménard.

Jean-Pierre BAUD<sup>1#</sup>, Jérôme CUCCIA<sup>2</sup>, et Marc ZÉNÉRE<sup>3</sup>

<sup>1</sup> EUROGEO, Avrainville, France

<sup>2</sup> GAÏATHYS, Grans, France

<sup>3</sup> MECALITHE, Vallauris, France

<sup>#</sup>Corresponding author: baud@eurogeo.fr

### ABSTRACT

During a Ménard pressuremeter test, with controlled pressure steps in a preliminary borehole, the installation of the probe at an initial zero pressure in the volumeter at ground level means that the probe exerts on the ground the pressure of the water column, reduced by the probe's own resistance. This pressure helps to bring the probe into contact with the borehole wall.

By keeping the probe in contact with the borehole wall, and the pressure-volume controller in "sensor" mode, the progressive tightening of the soil could lead to the measurement of its horizontal pressure, but this equilibrium process is indeed long and even very long, and would greatly delay the start of the test.

Using a Géopac Pressuremeter Control Unit, compliant with type C in the ISO22476-4 standard, in "controlled volume" mode offers an effective solution to assess at rest horizontal earth pressure  $p_0$ . This mode allows a rapid and precise increase in volume, aiming for immediate contact with the ground. A short unloading-reloading cycle makes it possible to verify that a temporary equilibrium with the pressure of the earth at rest is reached, allowing to move to the normal pressure levels of a Ménard type test without having exceeded the pressure  $p_{1as}$  defined in ISO22476-4.

Applications of this methodology on pressuremeter surveys carried out in the Principality of Monaco have demonstrated its effectiveness. In parallel, verifications were carried out in dedicated boreholes, using pore pressure sensors and Ménard Geocell total pressure probes with high-precision recording pressure gauges. These verifications showed that stabilization of the initial pressure ( $p_0$ ) can require several months.

In addition, tests using self-drilled slotted tube, following this protocol, allowed to reach the  $p_0$  pressure more quickly. This approach allows to capture a very short initial phase of linear reaction of the soil giving a  $G_0$  modulus very useful for the design of foundations and other structures.

The proposed method not only improves the efficiency of pressuremeter tests, but also contributes to a better understanding of soil behaviour in real conditions.

**Keywords:** At rest horizontal earth pressure; Ménard total pressure Geocell probe; Ménard pressuremeter test; Tests in self-drilled slotted casing

### RESUME

Lors d'un essai pressiométrique Ménard, par paliers de pression contrôlée dans un forage préalable, la mise en place de la sonde à une pression initiale nulle dans le volumètre au niveau du sol correspond à une pression de la sonde sur le sol égale à celle de la colonne d'eau, diminuée de la résistance propre de la sonde. Cette pression contribue à amener la sonde en contact avec la paroi du forage.

En laissant la sonde au contact du sol, et le contrôleur pression-volume en mode "capteur", le serrage progressif du sol pourrait amener à la mesure de sa pression horizontale au repos  $p_0$ , mais ce processus d'équilibre est effectivement long et même très long, et retarderait énormément le démarrage de l'essai.

L'utilisation d'un contrôleur pressio-volume Géopac, conforme à la norme ISO22476-4, en mode "volume contrôlé" offre une solution efficace. Ce mode permet un accroissement rapide et précis du volume, visant un contact immédiat avec le sol. Un court cycle de déchargement-rechargement permet de vérifier qu'un équilibre provisoire avec la pression des terres au repos est atteint, permettant de passer aux paliers de pression normaux d'un essai type Ménard sans avoir dépassé la pression  $p_1$  définie dans ISO22476-4.

Des applications de cette méthodologie, sur des sondages pressiométriques réalisés en Principauté de Monaco ont montré son efficacité. En parallèle, des vérifications ont été menées dans des forages dédiés, en utilisant des capteurs de pression interstitielle et des sondes Géocell Ménard avec manomètres enregistreurs de haute précision. Ces vérifications ont montré que la stabilisation de la pression initiale ( $p_0$ ) peut nécessiter plusieurs mois.

De plus, des essais en autoforage du tube fendu, en suivant ce protocole, ont permis d'atteindre plus rapidement la pression  $p_0$ . L'autoforage permet de capter une très courte phase initiale de réaction linéaire du sol donnant un module  $G_0$ .

La méthode proposée améliore l'efficacité des essais pressiométriques, mais contribue également à une meilleure compréhension du comportement du sol en conditions réelles.

**Mots-clés :** pression horizontale des terres au repos ; sonde de mesure de pression totale Ménard Geocell ; essai pressiométrique Ménard ; essai pressiométrique en tube fendu autoforé

## 1. Motivations

Il est admis que, lors du déroulement d'un essai pressiométrique, quelle que soit la méthode, le fait de débiter l'essai avec une sonde dégonflée, dans laquelle la pression comme le déplacement sont proches de leur « point zéro », implique que dans le début de l'essai, l'augmentation simultanée de la pression et du déplacement amènera la sonde à s'expanser dans l'espace annulaire lié au diamètre du forage, puis à se trouver, de façon transitoire, à la pression horizontale des terres au repos  $p_0$  à la paroi du forage. Pour autant cette mesure reste fugitive et difficile à saisir, de nombreuses procédures ont été proposées et tentées, pour revenir à la pression  $p_0$  après l'avoir dépassée, ou pour la déterminer a posteriori dans l'interprétation de la courbe obtenue. Aucune procédure n'a fait jusqu'ici l'objet d'une normalisation.\*

## 2. Mesures de $p_0$ in situ

### 2.1. Méthodes de mesure

#### 2.1.1. Mise en contact par débit réglé

Nous utilisons ici une sonde pressiométrique Ménard classique tricellulaire à mesure volumétrique du déplacement sur la cellule centrale, mise en œuvre par un contrôleur pression-volume automatisé Géopac (Arsonnet et al. 2013a). Dans cette unité centrale pressiométrique, de type C selon la norme ISO22476-4, le volumètre est actionné en circuit fermé par un piston micromotorisé, la colonne d'eau n'est donc pas en contact avec la pression atmosphérique comme dans un volumètre classique pressurisé par un gaz. Cet ensemble électromécanique de haute précision permet l'expansion de la sonde soit par incréments de volumes., soit par incréments de pression, aussi petits que souhaité.

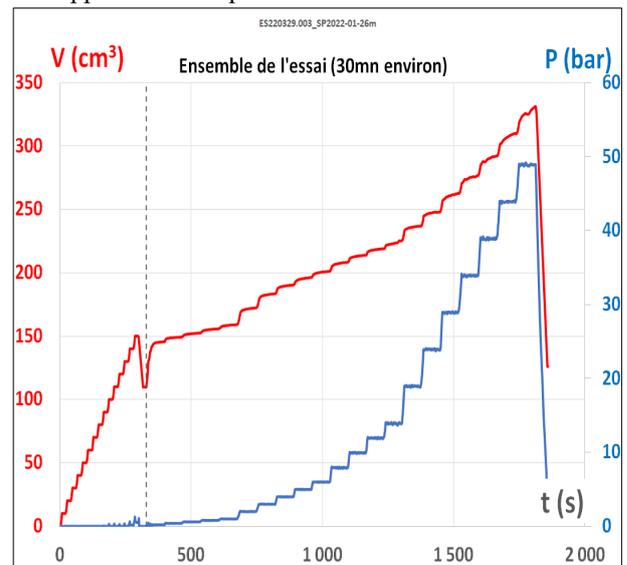
Des exemples sont donnés dans un forage préalable, et dans un forage où la sonde est constituée par le tube fendu autoforé par le procédé Rotostaf (Arsonnet et al. 2013b)

La mise en contact de la sonde interne avec le tube fendu, celui-ci étant déjà au contact de la paroi du forage est faite par petits incréments de volume maintenus 10 s, ce qui constitue un débit constant. La pression mesurée

au niveau du volumètre reste nulle pendant la durée de cette expansion dans l'espace annulaire sonde interne – tube fendu (et éventuellement sonde-sol), l'expansion étant assurée par la libération progressive de la pression de la colonne d'eau. L'apparition d'une légère surpression au changement de palier, puis son maintien pendant la régulation du palier de volume marque le début puis la généralisation du contact de la sonde avec la paroi du forage. On ne laisse croître cette pression que sur un petit nombre de paliers, puis le volume est redescendu jusqu'à disparition de toute pression au volumètre ; à ce moment, l'ensemble des composants de la sonde sont plaqués à la paroi du forage et la pression appliquée est uniquement celle de la colonne d'eau

Ce point de contact, acquis d'une façon similaire à la pression de « lift-off » décrite pour la sonde autoforeuse CamInSitu (cf. figure 2 de Whittle 2012) est d'autant plus proche de la pression horizontale du sol au repos que le forage préalable a subi le moins de décompression. Lors d'un essai complet normalisé ISO 22476-4, seul le premier palier aura été remplacé par cette mesure de  $p_0$ .

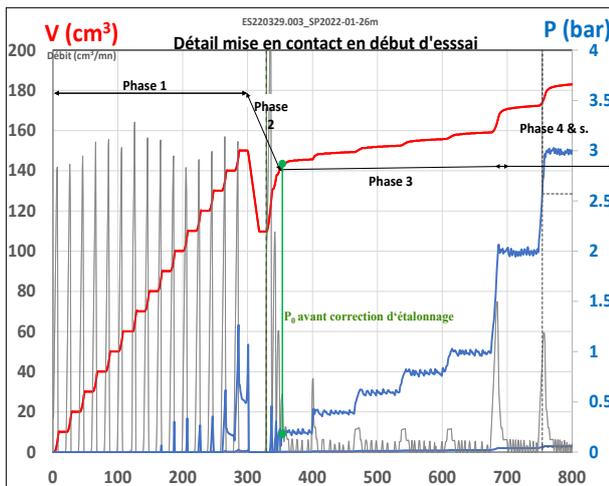
L'exemple ci-dessous est un essai à 26m de profondeur. La valeur de  $p_0$  brute (sans correction d'étalonnage) qui en est tirée est à considérer plus comme une approximation que comme une « mesure ».



**Figure 1.** Enregistrement de l'essai en  $V f(t)$  et  $P f(t)$ . (a) Mise en contact en déplacement imposé/ (b) Essai

\* Nous garderons l'appellation pratique " $p_0$ " plutôt que d'autres sigles utilisés tels que  $\sigma_h$  ou  $\sigma_{hs}$ .

pressiométrique Ménard ISO22476-4 démarré en petits incréments de pression.  
(voir détail figure 2 en suivant)



**Figure 2.** La mise en contact de la sonde interne avec le tube fendu, celui-ci étant déjà au contact de la paroi du forage est faite par petits incréments de volume maintenus 10 s, Détail des premières phases : (1) Montée par paliers de volume, apparition d'une pression (2) Redescence jusqu'à chute de pression (3) Début d'essai par très petits incréments de pression (4) Suite de l'essai par incréments de pression

### 2.1.2. Capteurs de pression totale Géocell

Les évaluations de  $p_0$  sur un sondage de 40m/40 essais, sont confrontées à la mesure en place en trois points, à proximité du sondage pressiométrique, sur une longue durée, par la pose de cellules de mesure de pression totale type Géocell Ménard (Ménard notice D83 1969). Il s'agit d'une sonde monocellulaire, mise en place dans un forage de même qualité qu'un forage pressiométrique, et équipé au niveau du sol d'un capteur de pression numérique enregistreur de grande précision.

Si la sonde reste en équilibre suffisamment longtemps dans le sol, la pression indiquée est une véritable mesure de la pression des terres autour de la sonde, qui peut varier en fonction d'une évolution du sol (variations du niveau de la nappe, occurrence d'excavations à proximité).

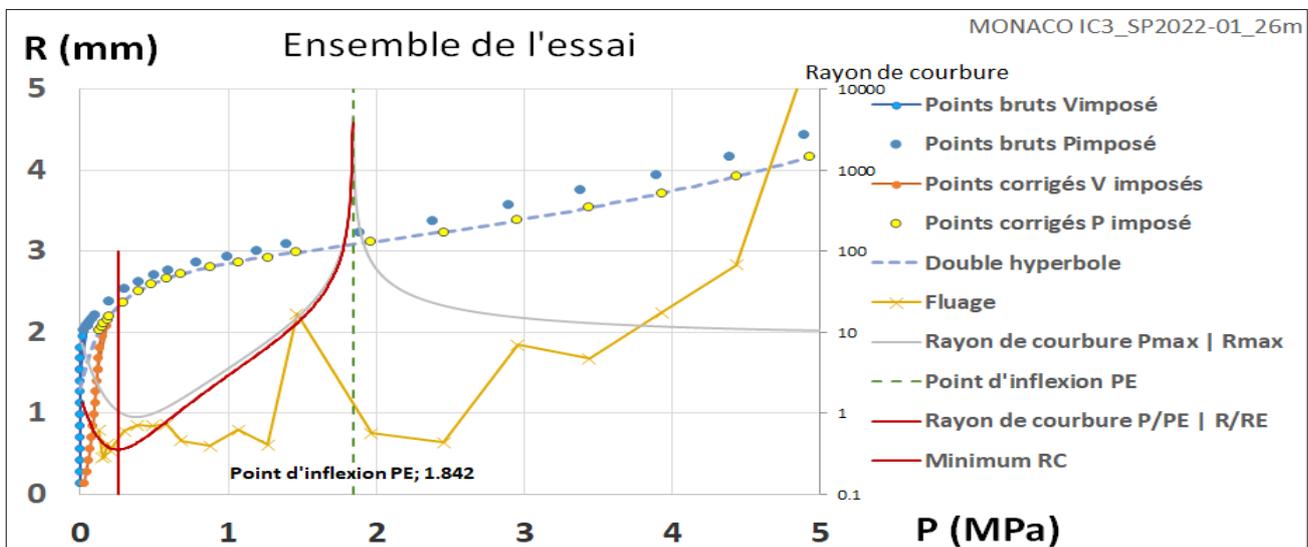
## 2.2. Résultats sur la courbe pressiométrique

### 2.2.1. Présentation de l'essai, modélisation en double hyperbole

La courbe pressiométrique (P | V), ici (Fig. 3 & 4) reportée en (P | R) commence au point de mise en pression acquis par la mise en contact, et dont la pression, corrigée de l'étalonnage bien entendu, s'approche de la pression de la hauteur d'eau entre le contrôleur pression-volume au niveau du sol et la sonde. Cette pression n'est évidemment pas encore la pression  $p_0$  recherchée, mais elle est a priori inférieure. Avant la généralisation de l'usage de  $p^*_L = p_L - p_0$ , Louis Ménard, pour son bureau d'étude et pour ses concessionnaires, recommandait d'appliquer les méthodes pressiométriques avec  $p'_L = p_L - \gamma_w \cdot h$ ,  $h$  étant soit la profondeur de l'essai dans le sol, soit la hauteur volumètre-sonde, en principe peu différente.

On s'attend donc généralement que  $p_0$  soit atteint dans les premiers incréments de pression. On voit sur cet exemple que l'on aurait pu prolonger l'expansion de la sonde par incréments de volumes imposés jusqu'à cette pression  $\gamma_w \cdot h$ , le démarrage de l'essai aurait été repoussé à une pression plus proche de  $p_0$ , probablement en gardant la même courbure. C'est un constat qui est fait assez souvent dans l'application de cette méthode aux essais en forage préalable, même en étant attentif aux conditions de limitation de la décompression de la paroi (boue de forage assez dense, limitation du temps entre forage et mise en place de la sonde). Cet objectif reste délicat à viser pour l'opérateur, qui ne doit pas trop mettre en pression la paroi avant de passer en pression contrôlée, qui ne lit à l'écran que la pression brute avant correction d'étalonnage, et à qui on ne laisse que l'intervalle de 20s pour décider d'arrêter le palier de volume en cours.

Un développement est en cours sur le pressiomètre Géopac pour automatiser la mise en contact par paliers de volume, l'arrêter quand une pression corrigée équivalente à  $\gamma_w \cdot h$  est presque atteinte, puis redonner la main à l'opérateur pour démarrer son essai standard par paliers de pression, ou sans action de sa part un essai entièrement automatisé.

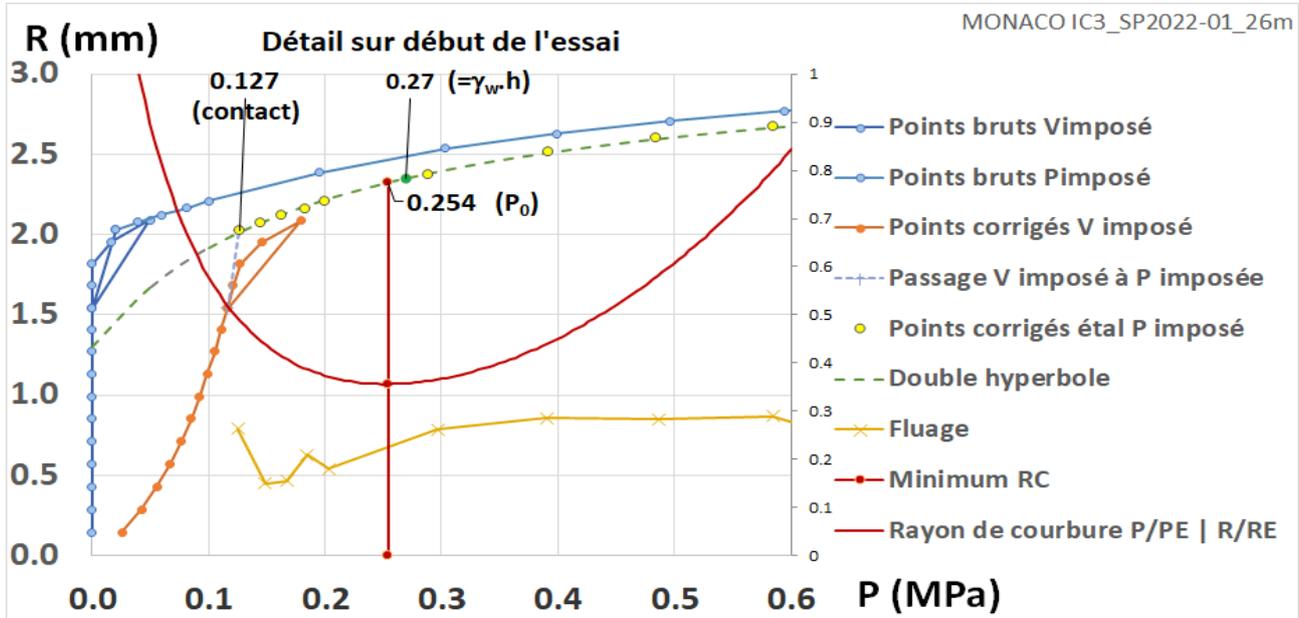


**Figure 3.** Détermination du point d'inflexion  $p_E$  par le rayon de courbure sur l'ensemble de l'essai

### 2.2.2. Détermination de $p_0$ par la méthode du rayon de courbure

La détermination d'une valeur pour  $p_0$  à partir d'un essai en forage préalable au point de courbure maximal de l'arrondi initial est proposée depuis longtemps pour donner une évaluation acceptable (Baud & Perpezat 1984, Briaud 1992, Reiffsteck et al. 2018). Le résultat est

d'autant plus proche de la réalité que la décompression de l'essai est maîtrisée et aboutit à une faible amplitude de déformation par recompression entre le point de contact et le point d'inflexion. La question pratique est celle du référentiel à utiliser pour le calcul de ce point de courbure maximale.



La modélisation de l'essai par la double hyperbole (Van Wambecke A. et D'Hemricourt J. 1978, Baud J.P., M. Gambin & S.T. Uprichard 1992, ISO22476-4: 2021) permet de disposer d'une courbe continue qui autorise la dérivation du rayon de courbure  $\rho$  :

- Courbe pressiométrique (P | R)

$$R = a_1 + a_2 \cdot P + \frac{a_3}{a_5 - P} + \frac{a_4}{a_6 - P}$$

- Rayon de courbure  $\rho$  d'une courbe définie cartésienne  $y = f(x)$ , défini à partir de sa dérivée première  $y'$  et sa dérivée seconde  $y''$

$$\rho(x) = \left| \frac{(1 + y'^2)^{3/2}}{y''} \right|$$

- Il vient :

$$\rho(P) = \left| \frac{\left[ 1 + \left( a_2 + \frac{1}{(a_5 - P)^2} + \frac{1}{(a_6 - P)^2} \right)^2 \right]^{3/2}}{\frac{2 \cdot a_3}{(a_5 - P)^3} + \frac{2 \cdot a_4}{(a_6 - P)^3}} \right|$$

La courbe correspondante (Fig. 3) présente un point de rebroussement très aigu qui marque le point d'inflexion  $p_E$  de la courbe pressiométrique, entouré de deux minima relatifs à gauche (concavité de la courbe vers les abscisses correspondant à l'arrondi de mise en contact de la paroi décomprimée), et à droite (expansion pressiométrique hyperbolique jusqu'à PL).

Nous avons montré que ces minima ne sont pas utilisables directement, parce que leur position en

abscisse P est dépendante des échelles adoptées pour P et R (ou pour P et V), qui n'ont pas de commune mesure, alors que le point d'inflexion  $p_E$  est invariant, indépendant des échelles.

La meilleure option pour rendre le minimum qui nous intéresse comme marqueur de  $P_0$  unique est de chercher le minimum de courbure de la première branche d'hyperbole réduite en  $(p/p_E | R/R_E)$ .

Dans l'essai pris comme exemple, les figures 3 et 4 montrent la conclusion obtenue pour  $p_0$ . Il est probable qu'une mise en contact par augmentation du volume jusqu'à atteindre cette pression, au-delà du contact n'aurait pas modifié l'appréciation de la valeur  $p_0$ , mais aurait sans doute permis ensuite de raccourcir l'intervalle  $p_0-p_E$ , en d'autres termes déporter vers la gauche le point d'inflexion, voire de confondre les deux, donnant un essai en simple hyperbole, tel qu'on l'attend d'un essai très peu décomprimé ou parfaitement autoforé.

### 2.3. Sonde Géocell Ménard

Ménard avait construit et mis en place sur différents chantiers ce capteur de pression totale constitué par une sonde pressiométrique simplifiée, monocellulaire, certains modèles sans âme métallique axiale, et munie en tête d'un manomètre type Bourdon avec une plage de mesure réduite de -1 bar à +2 ou +3 bar (ou quelques bars de plus), la mesure pouvant descendre près de cette valeur négative et ne montant pas à des valeurs très élevées. La fabrication des sondes Géocell d'origine

n'étant plus assurée, nous avons utilisé des corps de sonde Ø60mm, monocellulaire avec seulement une gaine caoutchouc, et en tête un double circuit de tubulure souple permettant, par l'intermédiaire d'un « bloc-mano » (c'était l'appellation Ménard) la purge du Géocell et son remplissage jusqu'au contact du forage à l'aide d'un contrôleur pression-volume pressiométrique. Le tout est équipé d'un manomètre électronique enregistreur de grande précision, dans la plage -1 / +3 bar



Figure 5. Manomètre numérique enregistreur en tête de forage et processus de remplissage de la sonde Géocell.

#### 2.4. Mesure instantanée de $p_0$ par les sondes Géocell

Trois sondes Géocell ont été implantées à proximité du forage dont est extrait l'exemple ci-dessus ; dans 3 forages destructifs :

Géocell 1 à 17,50 m/TN

Géocell 2 à 14,00 m/TN

Géocell 3 à 10,00 m/TN

Le remplissage de la sonde Géocell jusqu'au contact complet avec la paroi du forage se fait, à l'aide du pressiomètre Géopac, par petits incréments de volume, jusqu'au débordement de la tubulure retour, ce qui fait monter légèrement la pression. On arrête le processus en fermant la vanne de vidange, déconnectant le contrôleur pression-volume et plaçant le Géocell en circuit fermé étanche. La pression lue, aussi bien sur le contrôleur pression-volume (Géobox, en bar) que sur l'écran du manomètre avec plus de précision (en millibar) comme sur la figure 5 est en général de l'ordre de grandeur de la pression hydrostatique, et se trouve souvent plus élevée que la pression exercée par le sol, et la valeur au manomètre commence à descendre et donner l'impression, à court terme, de se stabiliser (figure 6)

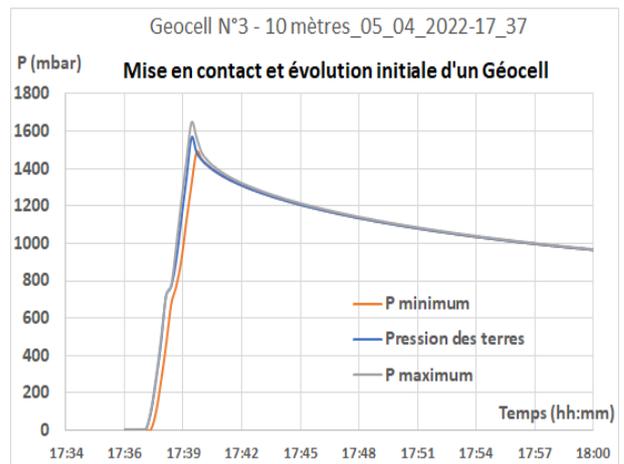


Figure 6. Pression de mise en contact d'un Géocell et évolution dans les premières minutes.

Dans le détail, la mesure est sensible à quelques millibars aux variations de température, que le système enregistre également et qui varie quotidiennement malgré une protection dans un capot enterré. La corrélation Pression-température est particulièrement mise en évidence en superposant la dérivée des deux courbes (Fig. 7). Elle correspond aussi à la grande précision de la mesure. Une correction empirique peut être proposée pour lisser ces variations périodiques qui perturbent un peu la lente décroissance vers une stabilisation, mais elle n'est pas indispensable sur le long terme.

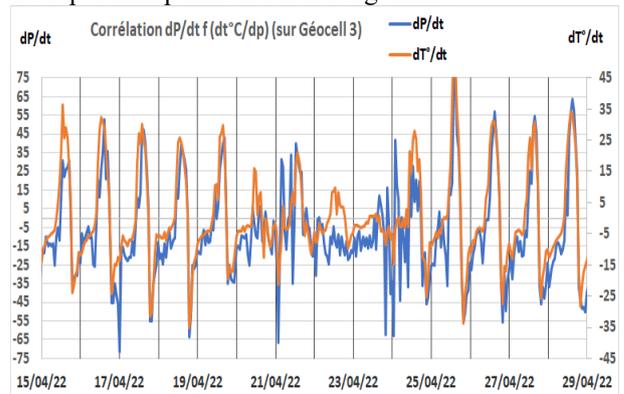


Figure 7. Superposition des courbes dérivées de Pression et Température. Variations journalières sur 14 jours.

#### 2.5. $P_0$ à long terme par les sondes Géocell

La décroissance vers la stabilisation d'une valeur significative de  $p_0$  s'est avérée très longue, d'allure logarithmique en fonction du temps et à la durée prévue des relevés de chantier (1 mois), une lente décroissance se manifestait encore. Les manomètres étant restés dans leur boîtier de protection après cette durée, ils ont été enlevés au moment où le site d'implantation en bordure de voirie a dû être rendu à la circulation. Les manomètres ont continué à enregistrer jusqu'à épuisement de leur batterie interne, permettant de recueillir 70 à 80 jours de mesure chacun :

On constate dans les 3 cas une longue descente à partir d'une pression de mise en contact manifestement supérieure à la pression des terres. Un ajustement logarithmique  $p = f(\ln(\text{temps}))$  est en général proche de la perfection, mais pour autant n'a aucun caractère prédictif à long terme, puisque l'on constate

heureusement un arrêt puis un début de remontée plus ou moins marquée selon le cas. On peut donner le résumé suivant de la valeur de  $p_0$  stabilisée :

Géocell 1 à 17,50 m/TN : 118 à 125 kPa

Géocell 2 à 14,00 m/TN : 217 à 219 kPa

Géocell 3 à 10,00 m/TN : 107 à 108 kPa

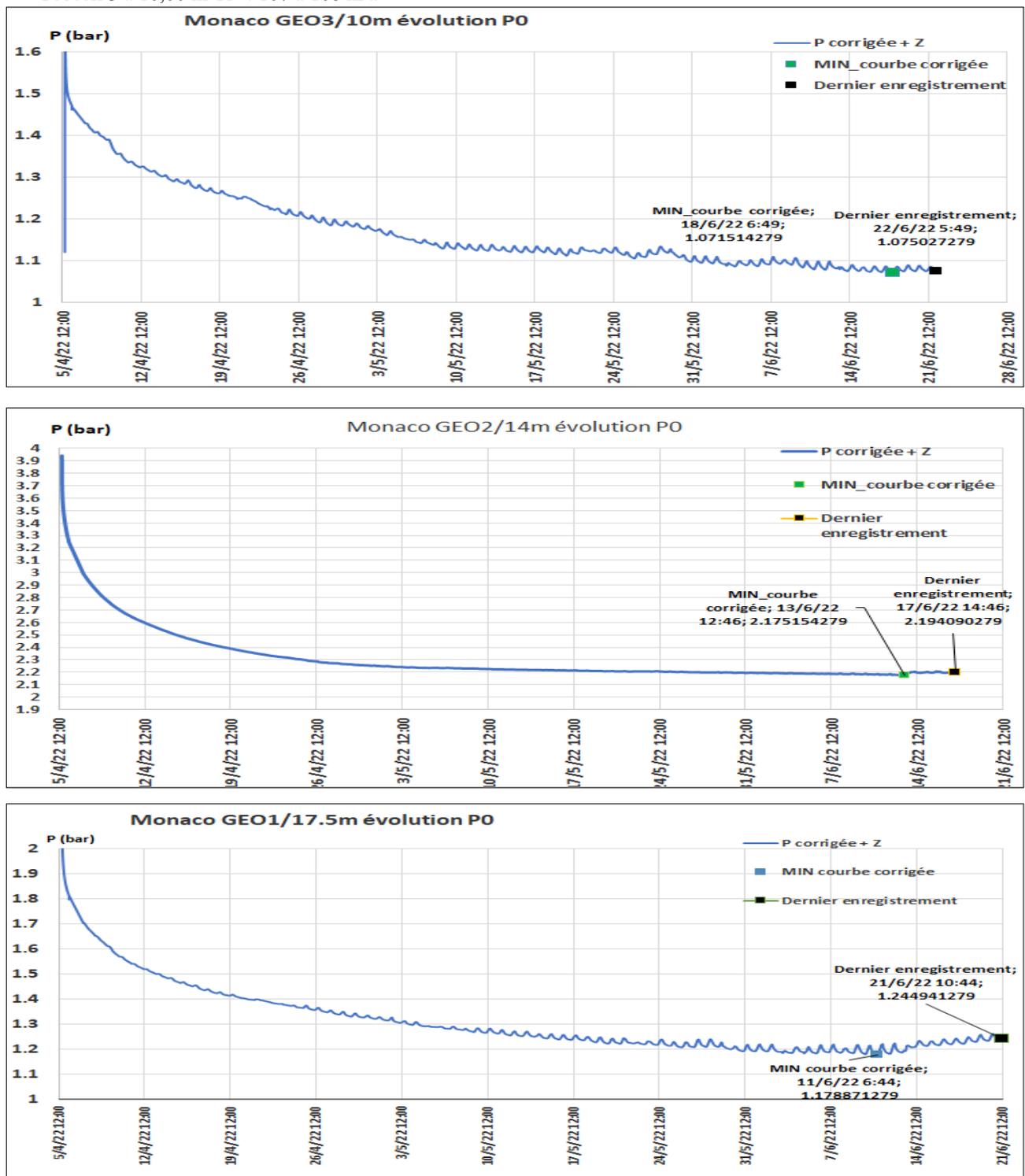


Figure 8. Stabilisation de la mesure de  $p_0$  sur les 3 sondes Géocell

## 2.6. Comparaison des mesures Géocells et d'un profil pressiométrique complet

Sur le forage d'où est extrait l'exemple ci-dessus, on dispose de 32 essais pressiométriques sur lesquels la pression  $P_0$  a été déterminée avec la même méthode. Les résultats forment le profil suivant pour  $p_0$ , et pour la valeur de  $K_0$  estimée d'après une valeur moyenne  $\gamma_h$  mesurée par ailleurs :

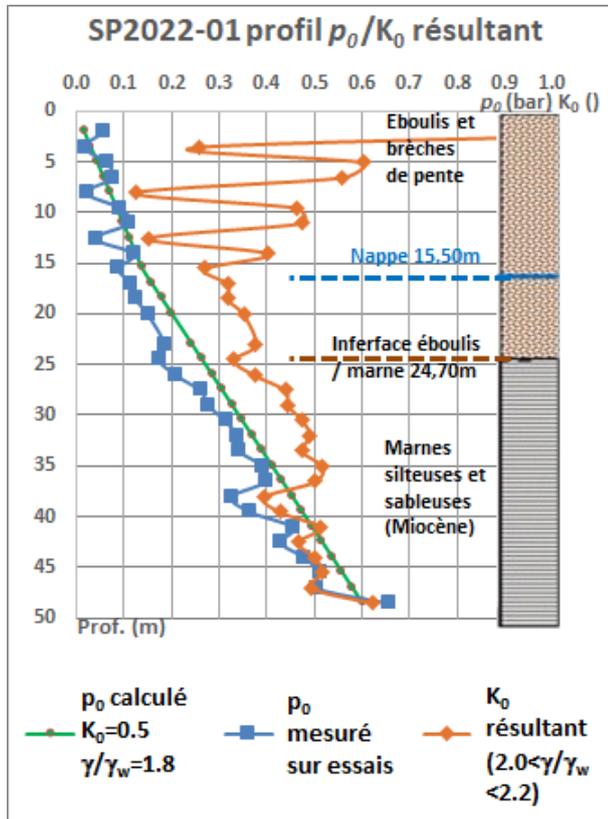


Figure 9. Profil  $p_0$  sur essais pressiométriques comparé à l'hypothèse classique sur le coefficient  $K_0$ .

L'objection peut être faite à une mesure volumétrique globale (Flavigny E. communication orale), dans un sol pouvant présenter une anisotropie de répartition des pressions au repos, ici en raison de la pente du terrain, ailleurs en raison de conditions géologiques en cours de dépôt des sédiments ou postérieurement. Cependant, les tentatives de mesure de l'ampleur de cette anisotropie par des sondes pressiométriques à capteurs ponctuels orientés ne semblent jamais avoir été probantes, aussi bien dans les sols meubles que dans les roches, et difficilement mises en œuvre roches (Ghionna et al. 1983, Bertrand & Durand 1983). L'approche d'une valeur estimée du coefficient  $K_0$  semble donc, sur cet exemple, possible.

## 3. Application sur essais au tube fendu autoforé

Des exemples de mesure de  $p_0$  par la méthode de mise en contact en début d'essai exposée en § 2.1.1 seront donnés sur un profil au tube fendu autoforé Rotostaf (Arsonnet et al. 2013). Dans ces conditions, l'application de petits incréments de pression dès le contact atteint donne de la précision supplémentaire à l'estimation de  $P_0$ . Le cas exposé n'avait pas donné lieu à vérification par Géocells.

### 3.1. Contexte géotechnique du forage

Le profil pressiométrique est entièrement dans la formation de la craie sableuse du Campanien à La Milesse (72), chantier du Viaduc de la Courbe sur l'autoroute A11. La mise en place du tube fendu autoforé Rotostaf est faite en continu par la méthode d'enlèvement des sédiments de l'outil débordant à la base par le flux d'injection remontant à l'intérieur du tubage, mise en place par percussion et rotation du tubage en sens inverse de l'outil.

Les essais sont réalisés lors d'une passe d'autoforage de quelques mètres, après fin de nettoyage du tubage, descente et positionnement de la sonde, en remontant l'ensemble sonde-tube par pas de 1m. Les 30 essais du profil ont ainsi été réalisés en 5 passes.

### 3.2. Exemple de courbe pressiométrique au tube fendu autoforé

Tous les essais ont été réalisés par la méthode de mise en contact, qui se résume en fait à la mise en contact de la sonde  $\varnothing 44\text{mm}$  dans son espace annulaire interne au tube fendu  $\varnothing$  int.  $49\text{mm}$ , soit  $135\text{cm}^3$  théoriques, le contact de l'extérieur du tube fendu étant par principe assuré au fur et à mesure de l'autoforage et du resserrement quasi instantané du terrain sur le tubage. Les essais présentent une courbe qui peut être modélisée soit en double hyperbole, s'il reste sur les premiers incréments (ou seulement le premier) un arrondi, témoignant alors que l'autoforage n'est pas parfait, soit en simple hyperbole lorsque l'autoforage est suffisamment démonstratif d'une absence de décompression et que l'essai représente la mise en charge d'un sol vierge. Les débuts de courbe par très petits incréments dans ce cas-là donnent assez souvent une succession de points qui témoignent d'un comportement linéaire de la relation  $(P | V)$ , avant de passer à un comportement hyperbolique (Fig. 10)

Nous interprétons cette phase très fugitive en début d'essai comme une réaction élastique linéaire intergranulaire, déjà prévue (Ménard & Rousseau 1962). Ménard (1961) la décrit sur un essai initié sur un sol parfaitement vierge, sous le nom de phase élastique, courte et transitoire, avant tout déplacement des grains, avec son module  $E\varepsilon$ , nettement plus élevé que le module de la plage pseudo-élastique.

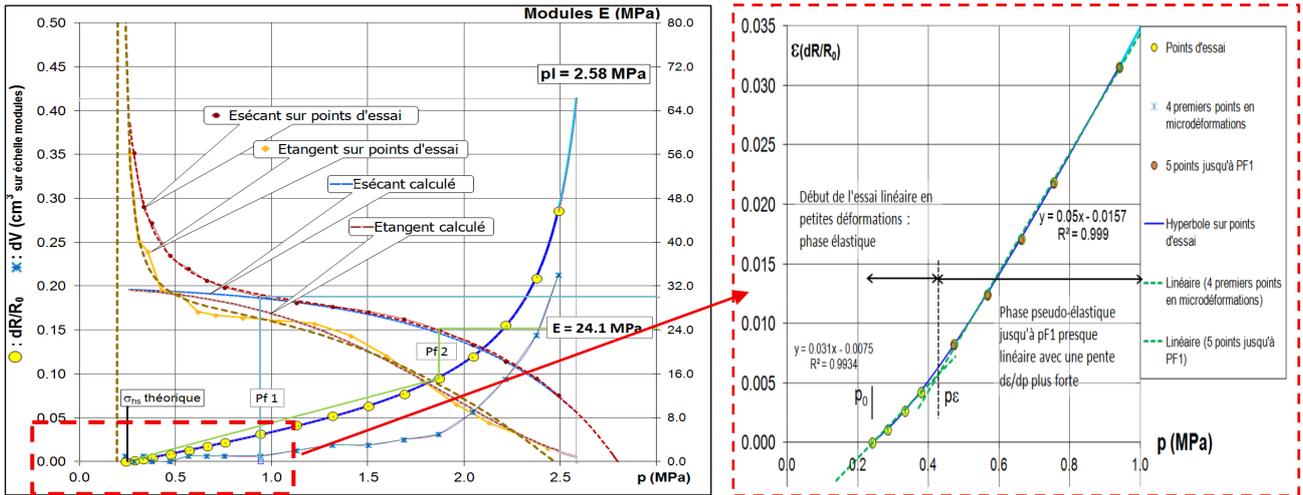


Figure 10. Début d'un essai au tube fendu autoforé en très petits incréments de pression après mise en contact en débit contrôlé.

Nous avons exposé (Baud, Gambin, Heintz 2015) qu'un essai suffisamment « bien » autoforé, et mesuré avec des incréments initiaux suffisamment petits pour mettre en évidence cette phase linéaire initiale, permettait l'extrapolation vers l'origine (déformations infinitésimales) d'un module tangent initial maximum  $E_{max}$ , et d'une estimation de  $p_0$  correspondante (Fig11). Le rapport  $E_{sécant}/E_{max}$  en fonction de la déformation, se trouve exactement superposé au rapport  $p_0/p$  jusqu'à

une déformation de l'ordre de  $10^{-2}$  qui marque, pour ce cas, la fin de la phase élastique « vraie ».

Cette approche n'a pas encore été validée par une mesure en place de la valeur de  $p_0$  à long terme par une sonde de pression totale type Géocell.

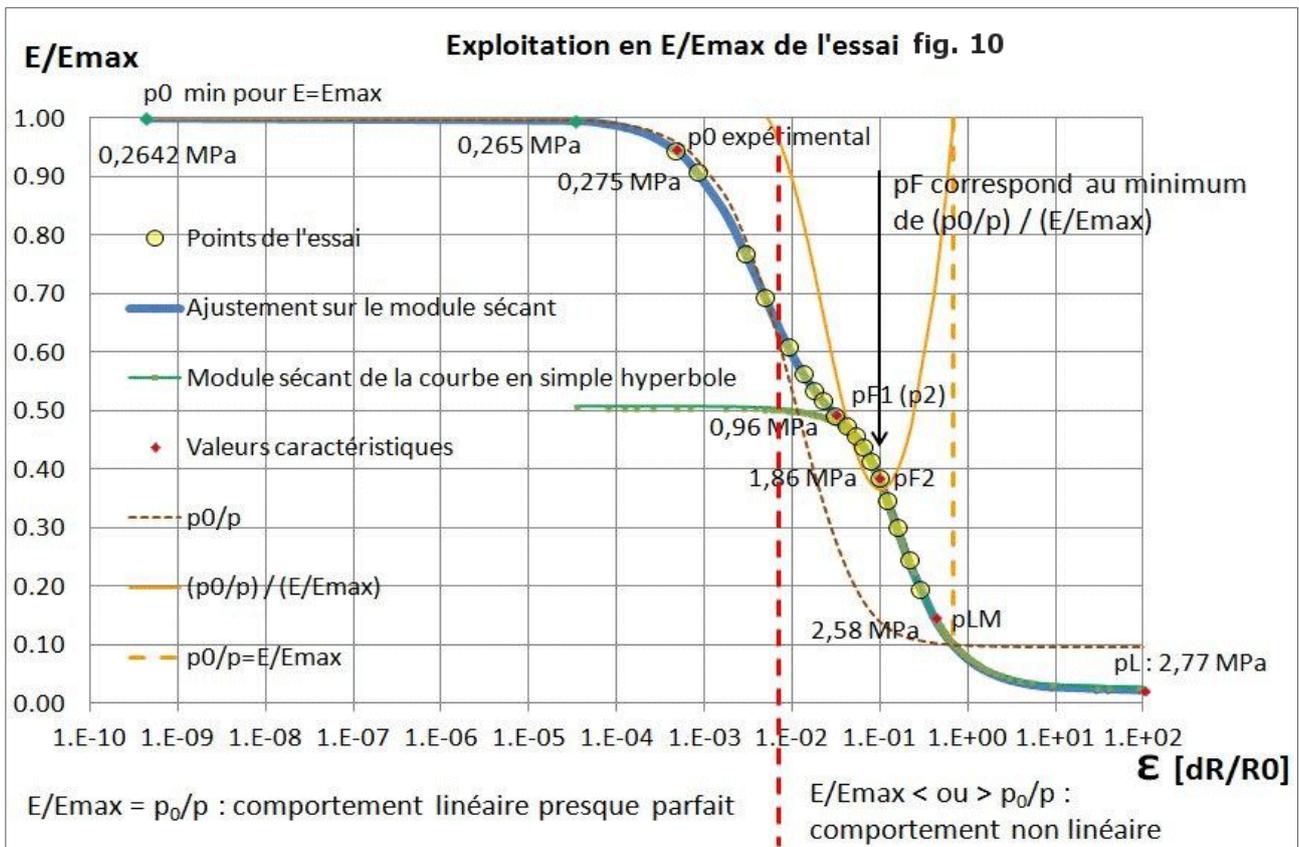


Figure 11. Extrapolation aux faibles déformations d'un essai autoforé donnant une valeur de  $p_0$  pour le module maximum

## 4. Conclusions

Le désir d'extraire d'un essai pressiométrique Ménard la valeur de la pression des terres au repos au droit de l'essai est né avec l'essai lui-même. Celle-ci n'est cependant pas devenue un paramètre couramment extrait de l'essai, comme la pression limite, moins sensible à la qualité du forage avant essai, et le module pressiométrique Ménard, déjà plus sensible. C'est en grande partie cette difficulté qui est à l'origine du concept de sonde autoforée dont le but est de tenter d'assurer une stabilisation de la sonde à la valeur  $p_0$  avant de démarrer un essai, quel qu'en soit le protocole. Il faut cependant constater, après 70 ans de pressiométrie, que l'autoforage « parfait » n'est utilisé en pratique que sur les terrains très compressibles dans lesquels la mise en place de la sonde par autoforage demande peu d'énergie de forage.

La majorité des essais étant réalisés en forage préalable, les efforts de la profession doivent continuer à se porter sur le respect des bonnes pratiques, exposées de longue date dans différents ouvrages de recommandations (Ménard D10, LCPC 1971, Briaud 1992, Gambin 2005, ISO22476-4 :2021 résumant l'ensemble), toutes basées sur quelques concepts élémentaires : découpage de la paroi du forage calibré et évacuation complète des déblais de forage, assurée par une vitesse de forage volontairement limitée en-dessous de 90 m/h, soutènement de la paroi aussitôt après découpage par le dispositif le plus efficace (boue ou directement enveloppe externe de la sonde), délai entre découpage de la paroi et mise en contact de la sonde réduit au minimum.

Le protocole d'approche du point où la sonde est au volume idéal pour se trouver en équilibre avec la pression des terres au repos exposé ici n'est qu'une façon de compenser les imperfections inévitables du forage, dont la réduction reste primordiale. Sur le cas du tube fendu autoforé, on parvient à montrer que la phase élastique initiale peut être atteinte, et donne une valeur de  $p_0$ .

## Remerciements

Les auteurs remercient le Gouvernement Princier de Monaco et Egis pour les mesures de  $p_0$  in situ demandées sur le projet « Aménagements Charles III ».

## Références

Arsonnet G., J.P. Baud, M. Gambin and W. Youssef. 2013a. "Le GéoPAC<sup>®</sup>, un contrôleur pression volume automatisé pour les essais pressiométriques de qualité". In: Proceedings of the 18<sup>th</sup> International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Parallel session ISP6, Paris 2013.

Arsonnet G., J.P. Baud, and M. Gambin 2013b. "RotoSTAF<sup>®</sup>, une amélioration déterminante de l'autoforage du pressiomètre Ménard". In: Proceedings of the 18<sup>th</sup> International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Parallel session ISP6, Paris 2013.

Baud J.P., M. Gambin & S.T. Uprichard 1992. "Modeling and automatic analysis of a Ménard pressuremeter test". Actes

Colloque "Géotechnique et Informatique", pp 25-32, Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Paris, 1992.

Baud J.P. et D. Perpezat 1984. "Calcul automatique des valeurs du module  $E_p$  et de la pression limite  $P_l$ . Application au pressiomètre assisté par ordinateur PAC". In : Document technique Ménard D/75b/84.

Baud J.-P., Gambin M., Heintz R. 2015 "Modules élastiques, pseudo-élastiques et cycliques dans l'essai pressiométrique Ménard : historique et pertinence actuelle", 7<sup>ème</sup> Symposium International sur le Pressiomètre ISP7, Hammamet.

Bertrand L. & Durand E. 1983 "Mesures de contraintes in situ. Comparaison de différentes méthodes" International Symposium « Soil and rock investigation by in situ testing » Mai 1983 Paris p. 449-470

Briaud J.L. 1992. "The Pressuremeter". Balkema Ed. Rotterdam.

Gambin M. 2005 "Essai pressiométrique" Chap.4 - p.103-146 in : Sharour I. & Gourvés R. "Reconnaissance des terrains in situ" Hermès-Lavoisier éd. Paris, 2005. In [French] ISBN13 978-2-7462-1135-3

Ghionna V., Jamiolkowski M., Lacasse S., Ladd C., Lancellotta R., Lunne T. 1983 "Evaluation of self-boring pressuremeter" International Symposium « Soil and rock investigation by in situ testing » Mai 1983 Paris p. 293-301

Ménard L. & Rousseau J. 1962 "L'évaluation des tassements. Tendances nouvelles" Sols-soils n°1 p. 13-30

Ménard L. 1961 "Influence de l'amplitude et de l'histoire d'un champ de contrainte sur le tassement d'un sol de fondation", Actes du 5<sup>ème</sup> Congrès International de la SIMSTF, Paris.

[https://www.issmge.org/uploads/publications/1/40/1961\\_01\\_0042.pdf](https://www.issmge.org/uploads/publications/1/40/1961_01_0042.pdf)

Reiffsteck P., J. Benoit J., Habert, P.G. Karagiannopoulos, G. Desanneaux & S. Fanelli, 2018, "Procédure pour la détermination du coefficient des terres au repos  $K_0$  par les essais en place", JNGG 2018 Champs-sur-Marne.

Van Wambecke A. et D'Hemricourt J. 1978. "Evolution dans l'interprétation de l'essai pressiométrique". Proc.3rd Internat. Congr. IAEG, sect. IV vol 1, pp 91-98, Septembre 1978.

Whittle R. 2012 "Using pressuremeters - worked examples" Cambridge InSitu Technical Reference 1006

[https://reports.cambridge-insitu.com/system/files/techref\\_pdfs/techref\\_citr1006\\_worked\\_examples.pdf](https://reports.cambridge-insitu.com/system/files/techref_pdfs/techref_citr1006_worked_examples.pdf)

ISO/TC182/WG5, 2013. "ISO 22476-4 Ménard Pressuremeter Test"