

# Effets de l'utilisation du tube fendu sur les paramètres pressiométriques Ménard

## Assessing the impact of using a slotted tube on the Ménard pressuremeter parameters

Arnaud FINIASZ<sup>1\*</sup>, Marjorie GREGOIRE<sup>1</sup>, Michel RISPAL<sup>1</sup>, Julien HABERT<sup>2</sup>, Patrice DESOURTHEAU<sup>3</sup>,  
Jean-Pierre BAUD<sup>4</sup>, Philippe REIFFSTECK<sup>5</sup>, Pascal AGUADO<sup>6</sup>

*1 Fondasol, Avignon, France*

*2 Setec Terrasol, Paris, France*

*3 Ginger CEBTP, Chartres, France*

*4 Eurogé, Avrainville, France*

*5 Université Gustave Eiffel, Champs-sur-Marne, France*

*6 Géotec, Plaisir, France*

*\*arnaud.finiasz@groupefondasol.com*

**RESUME :** Les essais pressiométriques Ménard peuvent être réalisés avec différents types de sondes, et en particulier des sondes dont l'enveloppe extérieure est constituée d'un tube fendu, qui permet notamment de protéger la sonde des éclatements lors de la réalisation de l'essai. En dehors des problématiques liées à la mise en œuvre, il convient néanmoins de s'interroger sur les effets liés à la présence de ce tube fendu lors de l'interprétation, en recherchant la pression appliquée aux parois de la cavité pressiométrique et en évaluant l'expansion réelle de la cavité. Historiquement les modes de calcul du module pressiométrique Ménard en présence d'un tube fendu ont beaucoup évolué, de l'approche initiale de Louis Ménard à la dernière version de la norme NF EN ISO 22476-4, en passant par les normes françaises NF P94-110 et 110-1. Afin d'investiguer et de compléter ce sujet, cet article reprend les résultats des campagnes d'essais croisés réalisés dans le cadre du Projet National ARSCOP sur 3 sites d'essais distincts, afin d'analyser la pertinence des différentes méthodes d'interprétation disponibles, dans différents types de terrain, et en étendant également les réflexions à la pression limite pressiométrique Ménard.

**ABSTRACT:** Ménard pressuremeter tests can be carried out with different types of probes, including probes of smaller diameter inserted inside a slotted tube, that protects the probe and reduces the risks of bursting during the test. Besides considerations of installation of the probe into the ground, the mere presence of the tube will influence the pressure applied to the cavity walls as well as the expansion of said cavity. Historically, positions have evolved a lot regarding how to consider the slotted tube when deriving the Ménard modulus, from the original method by Louis Ménard, to the French standards that were used until 2015, to the now international standard NF EN ISO 22476-4. In order to investigate and shed some light on the subject, this paper uses the results of comparative site investigations where tests with slotted tubes were carried out alongside tests with standard probes, on 3 different sites from the ARSCOP project. Finally, the analysis on the Ménard modulus is also extended to the limit pressure.

**Mots-clés :** Pressiomètre Ménard ; tube fendu ; essais croisés.

### 1 INTRODUCTION

Parmi les différentes sondes à disposition des opérateurs pour la réalisation de l'essai pressiométrique Ménard, l'usage de sondes protégées par un tube fendu est fréquent, y compris souvent en forage préalable, au-delà du contexte pour lequel le tube fendu a été mis au point, pour le refoulement des sols bouillants.

Indépendamment des conditions de mise en œuvre, la simple présence du tube fendu modifie les incréments de pression et de volume appliqués aux parois du forage. Grégoire et al. (2025) ont permis d'explorer les effets du tube fendu sur le calcul des modules pressiométriques Ménard, en confrontant la théorie aux résultats des essais croisés réalisés pour le PN ARSCOP sur le site de Messanges, en terrain à dominante sableuse. Le présent article complète

l'analyse en incluant des essais croisés d'autres sites, et étend par ailleurs l'analyse à la pression limite pressiométrique Ménard.

## 2 MODULE PRESSIOMÉTRIQUE

### 2.1 Formulation générale et approches disponibles

Dans l'interprétation de l'essai pressiométrique Ménard, la formule utilisée pour déterminer le module pressiométrique Ménard est basée sur la théorie de l'élasticité, en l'occurrence sur l'expression de l'expansion radiale d'une cavité cylindrique dans un milieu élastique isotrope (Lamé, 1852) :

$$\Delta V = V \frac{\Delta P}{G} \quad (1)$$

En introduisant le coefficient de Poisson  $\nu$  pour revenir à un module d'élasticité, on obtient la formule générale :

$$E_M = 2(1 + \nu) \left( V_c + \frac{V_1 + V_2}{2} \right) \frac{P_2 - P_1}{V_2 - V_1} \quad (2)$$

où  $V_c$  correspond au volume initial de la cellule de mesure et  $P_1$ ,  $P_2$ ,  $V_1$  et  $V_2$  correspondent respectivement aux pressions corrigées et volumes injectés corrigés délimitant la plage pseudo-élastique sur laquelle le module est calculé.

Dans cet article, tous les volumes et pressions sont supposés lues sur la courbe corrigée (tenant compte de la souplesse de l'équipement et de la résistance propre de la sonde). On note également  $V_m = (V_1 + V_2) / 2$  le volume moyen injecté durant la phase pseudo élastique,  $\Delta P = P_2 - P_1$  and  $\Delta V = V_2 - V_1$ .

Pour calculer le module pressiométrique Ménard lorsque les essais sont réalisés avec une sonde de 44 mm placée dans un tube fendu, un débat revient régulièrement : comment considérer le tube fendu, ce qui est parfois également schématisé en se demandant si le tube fendu doit être considéré comme faisant partie de la sonde ou du sol. On peut retenir trois positions distinctes sur le sujet :

- Dans sa notice D.60 (Ménard, 1967), Louis Ménard détermine le module de déformation selon une approche identique, que la sonde AX (Ø44 mm, L370 mm) soit introduite dans un tube fendu ou directement dans un forage de faible diamètre. Cette méthode suppose implicitement que le tube fendu se comporte comme une extension du sol environnant, sans introduite de perturbation significative dans la mesure. Dans cet

article on notera  $V_c$  le volume initial de la sonde de 44 mm (y compris membrane et gaine).

- En 1991, la norme française (NF P94-110) adopte la position opposée en considérant un volume initial de la cellule de mesure tiré du calibrage, et qui inclut donc le tube fendu. On notera  $V_i$  ce volume initial de la cellule de mesure incluant toutes les protections, y compris le tube fendu. Pour un tube fendu de 63 mm de diamètre ce volume est approximativement le double de celui de la sonde de 44 mm seule, et l'utilisation de  $V_i$  à la place de  $V_c$  dans la formule (2) conduit mathématiquement à des modules nettement plus élevés. A cette occasion, la norme a introduit et même recommandé l'utilisation d'une sonde AX de longueur 210mm pour que son volume redevienne équivalent à celui d'une sonde BX à couverture souple.
- A peu près à la même époque, S. Hansbo, de l'Université Chalmers en Suède, utilisant fréquemment le tube fendu en battage direct, propose un compromis en utilisant une moyenne géométrique des volumes précédents (Hansbo, 1990) comme suit :

$$E_M = 2(1 + \nu) \sqrt{(V_c + V_m)(V_t + V_m)} \frac{\Delta P}{\Delta V} \quad (3)$$

Pour comprendre l'origine et juger du bien-fondé de ces différentes approches nous allons tout d'abord analyser de manière théorique ce qui se passe autour du tube fendu durant l'essai.

La formule utilisée pour calculer le module pressiométrique Ménard découlant de la théorie de l'expansion d'une cavité cylindrique, il semblerait logique de considérer que le tube fendu fait partie de la sonde. Cependant les variations de volume et de pression lues ou enregistrées sur le contrôleur pression volume (CPV dans la suite), sont celles de la sonde située à l'intérieur du tube fendu. Il convient donc de regarder comment ces incréments de pression et de volume sont transférés au sol environnant par le tube fendu.

### 2.2 Effet du tube fendu sur les pressions

Quand un incréments de pression  $\Delta P_{int}$  est appliqué sur la face intérieure d'une lamelle du tube fendu ce qui est transmis à l'autre face est une force égale et non la même pression. Pour le tube complet on peut écrire :

$$\Delta P_{int} 2\pi R_{int} = \Delta P_{ext} 2\pi R_{ext} \quad (4)$$

où  $R_{int}$  et  $R_{ext}$  correspondent respectivement au rayon intérieur et extérieur du tube fendu. On en déduit :

$$\Delta P_{ext} = \Delta P_{int} \frac{R_{int}}{R_{ext}} \quad (5)$$

En toute rigueur, les équations précédentes ne tiennent pas compte de la discontinuité du tube, mais on admettra que les irrégularités de la pression radiale sont rapidement lissées dans le sol. D'autres approches plus élaborées ont été proposées par Monnet (2022).

### 2.3 Effet du tube fendu sur les variations de volume

Dans le même esprit, un incrément de volume  $\Delta V_{int}$  à l'intérieur du tube fendu produit une variation de rayon  $\Delta R$  du tube fendu, qui est la même qu'on observe la face intérieure ou extérieure du tube. Si  $\Delta R$  est petit devant  $R$  (hypothèse raisonnable durant la phase pseudo-élastique), on peut approximer au premier ordre :

$$\Delta V_{int} = \Delta R \ 2\pi \ l_c \ R_{int} \quad (6)$$

où  $l_c$  désigne la longueur de la cellule de mesure.

$$\Delta V_{ext} = \Delta R \ 2\pi \ l_c \ R_{ext} \quad (7)$$

ce qui donne alors :

$$\Delta V_{ext} = \Delta V_{int} \frac{R_{ext}}{R_{int}} \quad (8)$$

L'incrément de volume à l'extérieur du tube fendu est donc supérieur à l'incrément de volume mesuré à l'intérieur, la différence entre les deux correspondant au volume créé par l'ouverture des fentes lors de l'expansion du tube.

On notera que cet incrément de volume supplémentaire n'est transmis pleinement au sol environnant que sous réserve d'au moins une des deux hypothèses suivantes :

- Si les grains de sol ne remplissent pas l'espace entre les lamelles du tube (on notera que la gaine peut également partiellement combler cet espace),
- Ou si des voutes de décharge se créent dans le sol environnant qui pontent les ouvertures du tube.

### 2.4 Cumul des effets

Si on considère le volume de la cavité dans la formule (2) les valeurs de  $\Delta P$  et  $\Delta V$  mesurées à l'intérieur du tube doivent être corrigées pour aboutir à ce qui sera appliqué aux parois de la cavité. Chacun des deux effets évoqués ci-avant conduit à une correction  $R_{int}/R_{ext}$  soit un facteur  $(R_{int}/R_{ext})^2$  si on considère que les deux effets sont applicables.

On notera que si on applique le facteur  $(R_{int}/R_{ext})^2$  au volume moyen de la cavité pendant la phase pseudo élastique (au lieu de  $\Delta P/\Delta V$ ), on retrouve le volume de

ce qui est à l'intérieur du tube, soit  $V_c + V_m$ . On revient alors à la proposition de Ménard.

Et si on considère que seul l'effet sur les pressions est à prendre en compte, on trouve une valeur intermédiaire, comme le suggère Hansbo.

Dans tous les cas, le calcul avec  $V_i$  tel qu'il était réalisé conformément à la NF P94-110 semble exagérément favorable.

Les phénomènes décrits ci-avant sont connus depuis longtemps, mais la prise en compte de tous les effets du tube fendu, notamment la discontinuité au niveau des fentes est complexe. François Baguelin suggère dès 1978 dans son ouvrage sur le pressiomètre (Baguelin et al. 1978) que ces considérations ne pourront être tranchées que par des essais croisés, c'est ce qu'on se propose de faire dans la suite.

## 3 LES ESSAIS CROISÉS

L'analyse précédente est purement théorique et comporte un certain nombre de simplifications ; elle ne saurait suffire pour clore un débat vieux de 50 ans. On note en particulier une incertitude quant à la prise en compte de l'effet du tube sur les incréments de volume. Nous allons donc la confronter aux résultats du terrain, obtenus lors de plusieurs campagnes d'essais croisés.

### 3.1 Sables de Messanges

Dans le cadre du Projet National ARSCOP plusieurs campagnes d'essais croisés ont été réalisées (Rispaal et al. 2025). Le premier site auquel on s'intéresse est celui de Messanges, dans les Landes. Il s'agit d'une carrière de sable et les sols sont constitués de sables dunaires Quaternaires propres, moyennement denses à denses, sur toute la hauteur testée (jusqu'à environ 11 m de profondeur).

Au total 13 sondages et 103 essais pressiométriques ont été réalisés en deux campagnes (2019 et 2021). Les essais croisés ont consisté à comparer les résultats pour différents types de sondes, différentes gaines, plusieurs types de tubes fendus. On précise que l'ensemble des essais ont été réalisés avec forage à la boue (pas de vibro-fonçage pour les tubes fendus).

Dans cet article, on a séparé les essais en deux groupes : ceux réalisés avec une sonde nue de 60 mm à gaine souple d'un côté et ceux réalisés avec une sonde 44 mm dans un tube fendu de l'autre.

#### 3.1.1 Essais avec une sonde nue de 60 mm

Au total, on a considéré 33 essais, répartis dans 5 sondages pour les essais avec une sonde de 60 mm. Les modules pressiométriques varient de 2 à 32 MPa, pour une moyenne de 10.5 MPa et un coefficient de

variation de 66%. Sur la figure 1, on peut voir l'ensemble des valeurs et on observe logiquement une certaine amélioration avec la profondeur.

Pour la comparaison avec les essais au tube fendu, cette tendance avec la profondeur a été ignorée et les valeurs sont analysées dans leur globalité.

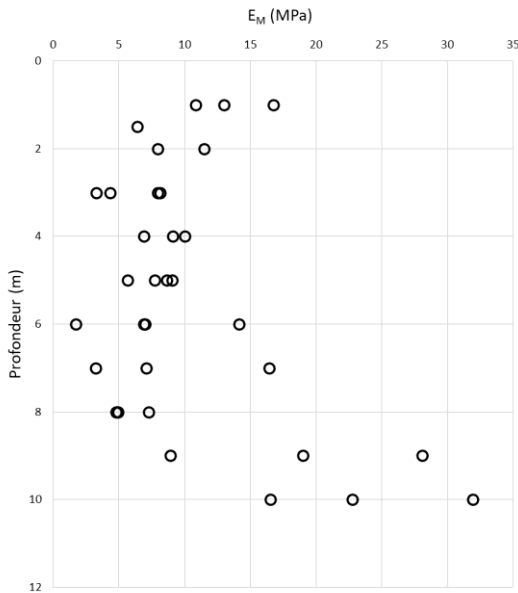


Figure 1. Modules  $E_M$  - sonde nue de 60 mm

### 3.1.2 Essais avec une sonde de 44 mm dans un tube fendu

Pour les sondes de 44 mm (incluant sondes courtes 210 mm et longues 370 mm), un total de 70 essais, répartis dans 8 sondages, ont été retenus.

Les résultats dépendent bien sûr de la formule utilisée pour calculer les modules. Le tableau 1 donne les moyennes et coefficient de variations obtenus selon les 3 approches suivantes :

- Celle de la notice D.60 où  $V_c$  dans la formule (2) correspond au volume de la sonde de 44 mm seule.
- Celle des normes en vigueur en France de 1991 à 2015 où c'est  $V_f$  qui est utilisé à la place de  $V_c$  dans la formule (2), incluant le volume du tube fendu.
- Et enfin, la proposition intermédiaire de Hansbo, recommandée dans la norme ISO 22476-4 :2012.

Tableau 1. Modules obtenus suivant les 3 approches

Formule	Moyenne (MPa)	CV
Ménard	12.5	55%
NF P94-110	22.9	59%
Hansbo	16.9	57%

Les résultats montrent clairement que les valeurs obtenues, que ce soit selon la norme NF P94-110 ou via le calcul de Hansbo, dépassent systématiquement celles issues des essais réalisés avec une sonde nue de 60 mm. Parmi les différentes approches, c'est le calcul

intégrant  $V_c$  dans la formule (2) – conforme à la méthodologie de Ménard – qui fournit les résultats les plus cohérents (représentés sur la figure 2).

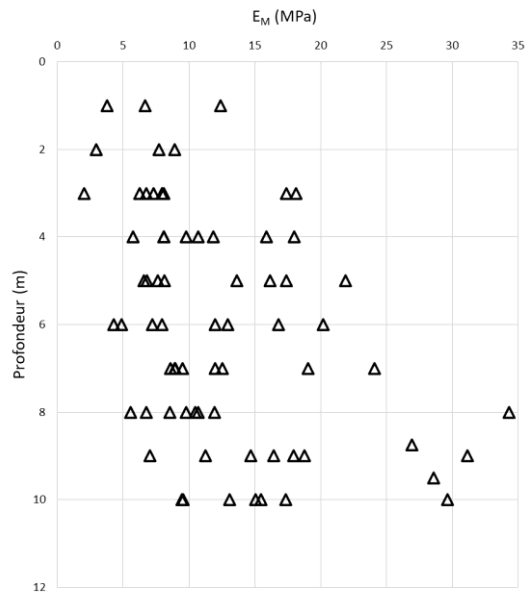


Figure 2. Sondes 44 mm – interprétation D.60

### 3.1.3 Comparaison

Pour comparer facilement l'ensemble des résultats obtenus, on a représenté dans la figure 3 les courbes de fréquence cumulée des modules pour les essais à la sonde nue de 60 mm et pour les 3 interprétations des essais au tube fendu. On observe que l'interprétation en ne considérant que le volume de la sonde de 44 mm dans la formule (2), présente un très bon accord avec la distribution des valeurs obtenues avec une sonde nue de 60 mm.

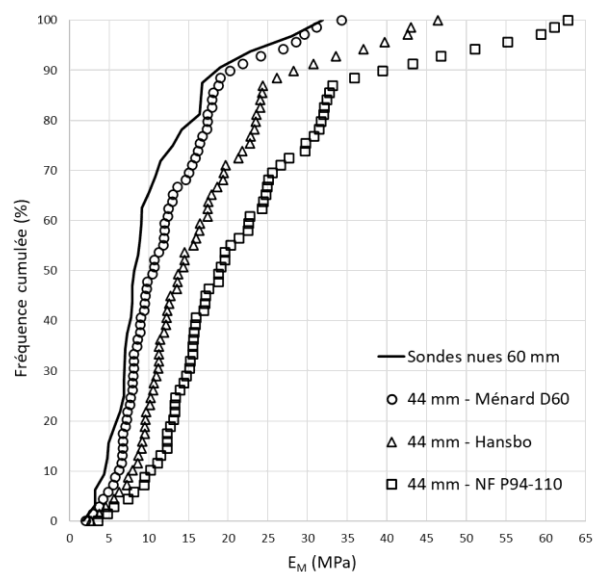


Figure 3. Diagramme de fréquence cumulée pour les différentes interprétations des essais avec tube fendu, comparé aux résultats des sondes nues de 60 mm

D'après les essais croisés de Messanges, dans un sol à comportement granulaire sans cohésion, afin d'obtenir une bonne cohérence entre les modules obtenus avec une sonde nue et ceux issus des essais au tube fendu, c'est un dépouillement qui ne considère que  $V_c$  dans la formule (2) qu'il faudrait privilégier. Cela voudrait dire que les deux effets évoqués au 2.2 et 2.3 s'appliquent (réduction des pressions et majoration des incréments de volumes).

Cela revient à considérer pour le dépouillement de l'essai, que le tube fendu fait partie du sol, comme suggéré initialement par Ménard.

### 3.2 Sables de Fos sur Mer

Le second site étudié est celui de Fos-sur-Mer, dans les Bouches-du-Rhône, où une série d'essais croisés a également été menée dans le cadre du projet national ARSCOP.

Les sols testés sont ici des sables fins, très légèrement limoneux, moyennement denses à denses. Les essais croisés réalisés sur le site de Fos-sur-Mer comprenaient une série de sondages où le tube fendu a été mis en œuvre par battage, qui sont écartés de la présente analyse. Ainsi, parmi les sept sondages pressiométriques réalisés sur ce site, seuls trois ont été conservés, comprenant deux sondages au tube fendu avec forage préalable et un sondage de référence où les essais ont été réalisés avec une sonde nue.

#### 3.2.1 Sondage de référence avec une sonde nue de 60 mm

Le sondage de référence, SP6, a été foré au tricône et à la boue, et comporte 8 essais réalisés avec une sonde nue de 60mm équipée d'une gaine en caoutchouc de 3 mm d'épaisseur. Les modules obtenus sont compris entre 1.0 et 9.5 MPa, pour une moyenne de 6.5 MPa.

#### 3.2.2 Essais avec une sonde de 44mm dans un tube fendu

Les sondages SP5 et SP7 ont également été forés au tricône et à la boue, mais les essais y ont été réalisés avec des sondes de 44 mm (respectivement longue et courte) à l'abri d'un tube fendu.

Les modules obtenus dépendent bien entendu de la formule utilisée pour le dépouillement. A nouveau trois approches ont été considérées :

- L'approche de la notice D.60 de Ménard, où  $V_c$  correspond au volume de la sonde 44mm seule,
- Celle de la NF P94-110 où le volume complet du tube fendu est considéré,
- Et celle de Hansbo où un volume intermédiaire est pris en compte.

Le tableau 2 donne les valeurs moyennes et coefficients de variation des modules obtenus suivant les trois approches.

Tableau 2. Modules obtenus suivant les 3 approches

Formule	Moyenne (MPa)	CV
Ménard	8.4	48%
NF P94-110	16.2	49%
Hansbo	11.7	48%

#### 3.2.3 Comparaison

Comme pour le site de Messanges, la simple lecture des moyennes montre que les essais réalisés au tube fendu conduisent à des modules plus importants que ceux obtenus avec une sonde nue dans les mêmes terrains. Seule l'interprétation suivant l'approche de Ménard, qui ne considère que le volume de la sonde 44 mm pour  $V_c$  dans la formule (2) permet de rapprocher les résultats.

Une représentation des résultats sous forme de courbes de fréquence cumulée est fournie en figure 4. On arrive aux mêmes conclusions que pour le site de Messanges, à savoir que l'interprétation suivant les normes qui étaient en vigueur en France de 1991 à 2015 conduit à une large surestimation des modules pour les essais au tube fendu. L'approche de Hansbo est moins favorable mais reste assez loin des valeurs obtenues avec une sonde nue. Seule l'approche historique de Ménard permet de rapprocher les courbes, même si l'accord est moins bon que sur Messanges, sans doute du fait de l'échantillon nettement plus petit.

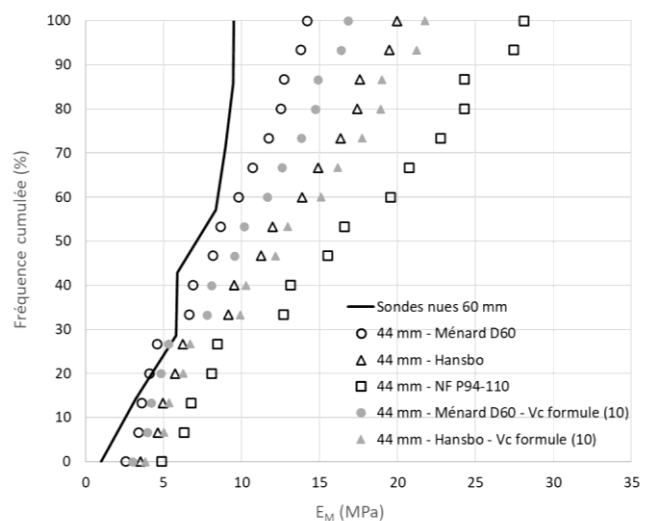


Figure 4. Diagramme de fréquence cumulée pour les différentes interprétations des essais avec tube fendu, comparées aux résultats obtenus avec une sonde nue

### 3.3 Argiles du Pont de Cran

Le site du Pont de Cran, sur la commune de Rieux dans le Morbihan se trouve sur la rive droite de la Vilaine. Il est caractérisé par un dépôt d'argiles molles marines et a fait l'objet de nombreuses études par les Laboratoires des Ponts et Chaussées.

L'objectif principal des essais croisés réalisés sur le site de Cran était d'étudier l'influence de l'épaisseur des gaines et des techniques de forage sur les essais pressiométriques dans ces argiles molles. Ainsi il a été réalisé une dizaine de sondages, parmi lesquels nous avons retenu pour la présente étude : 6 sondages réalisés avec des sondes nues de 60 mm (différentes gaines) et 2 sondages réalisés avec des sondes de 44 mm dans un tube fendu. Pour les essais réalisés à la sonde nue, un sondage historique (PMT3) du Laboratoire de Saint-Brieuc est également pris en compte.

Les essais avec les sondes nues ont été réalisés dans des forages préalables en rotation et à la boue, tandis que les tubes fendus ont été mis en œuvre par fonçage direct dans le sol. On précise qu'on est ici loin des conditions d'utilisation idéales du tube fendu, dans des sols dont la pression limite nette est globalement inférieure à la résistance propre de la sonde.

La méthodologie appliquée s'inscrit dans la continuité des deux sites précédemment étudiés. Elle consiste en une analyse comparative systématique entre : les modules mesurés en sonde nue (63 essais), et ceux obtenus (16 essais) avec un tube fendu (D60, NF P94-110 et approche de Hansbo)

La figure 5 représente les courbes de fréquence cumulée obtenues pour les modules.

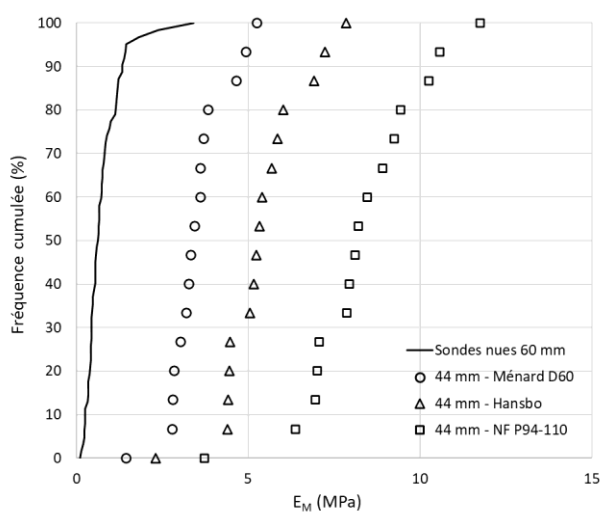


Figure 5. Diagramme de fréquence cumulée pour les différents interprétations des essais avec tube fendu, comparées aux résultats obtenus avec les sondes nues

Comme on peut le constater, le module pressiométrique est largement influencé par le mode mise en œuvre, et ce bien au-delà de ce que peut corriger le mode d'interprétation retenu.

### 3.4 Conclusion sur les modules

Les essais croisés des sites de Messanges et de Fos-sur-Mer montrent que c'est avec l'approche historique du D.60 (qui considère que le tube fendu fait partie du sol pour le calcul du module) qu'on arrive à rapprocher au mieux les modules des essais au tube fendu avec ceux des sondes nues. Cela montre que les deux effets évoqués en 2.2 et 2.3 s'appliquent bien (incidence sur les pressions et les volumes), a minima pour les sables.

Pour les argiles, compte tenu du mode de mise en œuvre lors des essais croisés sur le site de Cran, il est difficile d'être aussi catégorique.

### 3.5 Proposition de formule pour déterminer $V_c$

Que ce soit pour l'application de la formule de Hansbo ou pour l'approche historique de la notice D.60 il est nécessaire de déterminer le volume initial de la cellule de mesure placée à l'intérieur du tube fendu. Si à l'époque les calculs étaient menés avec les volumes théoriques des sondes, à l'instar de ce qui est fait en France depuis 35 ans, il semble aujourd'hui logique de l'obtenir à partir du calibrage réalisé dans un tube supposé indéformable.

S'il est toujours possible de sortir les sondes de 44 mm du tube fendu pour réaliser le calibrage dans un tube de plus petit diamètre, il semble plus pratique de réaliser le calibrage avec le tube fendu dans les mêmes conditions qu'avec une sonde nue de 60 mm.

Afin de tenir compte de la présence du tube, la version actuellement en vigueur de la norme EN ISO 22476-4 propose la formule suivante :

$$V_c = 0.25\pi l_c (d_i^2 - (d_c^2 - d_{ci}^2)) - V_p \quad (9)$$

où  $d_i$  désigne le diamètre intérieur du tube de calibrage,  $d_c$  le diamètre extérieur du tube fendu et  $d_{ci}$  le diamètre de la sonde placée à l'intérieur du tube fendu.

Cette formule présente plusieurs faiblesses. Tout d'abord le diamètre de la sonde dont on cherche à déterminer le volume intervient dans la formule. Ensuite le terme correctif  $(d_c^2 - d_{ci}^2)$  est censé correspondre au volume occupé par le tube fendu, mais il est considéré ici au repos et non au contact du tube de calibrage, or ce volume varie avec l'ouverture des fentes. Enfin le jeu qui existe entre la sonde et l'intérieur du tube est compté dans le terme correctif, alors qu'il est également compté dans le volume  $V_p$  à injecter pour arriver au contact avec le tube de calibrage.

Cette formule pourrait être améliorée en partant toujours du volume du tube de calibrage, mais en enlevant uniquement le volume occupé par le tube fendu lorsqu'il est en contact avec le tube de calibrage (ce qui revient à considérer un tube de calibrage plus petit) :

$$V_c = 0.25 \pi l_c (d_i - 2 e_{TF})^2 - V_p \quad (10)$$

où  $e_{TF}$  désigne l'épaisseur du tube fendu.

On précise que les figures 3, 4 et 5 ont été construites en utilisant la formule (9) pour déterminer  $V_c$  conformément à la norme actuellement en vigueur. Les figurés gris clair sur la figure 4 montrent le décalage qui serait obtenu en utilisant la formule (10). On voit que les effets de cette formule restent toutefois secondaires par rapport au débat principal sur le volume de référence à considérer.

## 4 PRESSION LIMITE

### 4.1 Analyse théorique

Les effets évoqués au 2.2 et 2.3 sur les pressions et incréments de volumes transférés aux parois de la cavité sont bien sûr à prendre en compte également pour la détermination de la pression limite.

On rappelle que la pression limite est définie conventionnellement comme la pression corrigée mesurée ou extrapolée pour un volume correspondant au doublement du volume de la cavité.

#### 4.1.1 Correction des pressions

La réduction de la pression appliquée aux parois de la cavité par rapport à celle appliquée à l'intérieur du tube fendu, liée à l'épaisseur du tube et détaillée au 2.2, reste toujours valable. Il conviendrait donc a priori d'ajuster la pression lue sur la courbe corrigée d'un facteur  $R_{int}/R_{ext}$ , en considérant les rayons du tube fendu sur la plage où est mesurée, ou extrapolée, la pression limite.

On donne dans le tableau 3 la valeur de ce rapport, pour deux modèles de tube fendu et plusieurs diamètres initiaux de la cavité. La valeur de  $R_{ext}$  est ici prise telle qu'elle corresponde au doublement du volume de la cavité.

Tableau 3. Facteur de correction sur la pression limite pour un tube fendu 46/60 mm ou 49/63 mm

Ø cavité (mm)	$R_{ext}$ (mm)	$R_{ext}/R_{int}$
64	45.25	0.845
65	45.96	0.848
66	46.67	0.850

Comme on peut le constater, pour des diamètres usuels de forages, un abattement de l'ordre de 15% à 16% devrait être appliqué aux pressions limites mesurées ou estimées, pour tenir compte de l'épaisseur du tube fendu.

#### 4.1.2 Volume à injecter pour obtenir le doublement du volume de la cavité

Suivant les notations usuelles, il faut injecter un volume  $V_I$  pour mettre la sonde en contact avec les parois du forage. A ce moment le volume occupé de la sonde vaut dans le cas d'une sonde nue  $V_c + V_I$ , et le doublement de volume de la cavité est obtenu quand on a injecté  $V_L = 2 V_I + V_c$  dans la sonde.

Lorsqu'on passe à une sonde de 44 mm placée dans un tube fendu, la question se pose de la valeur à donner à  $V_c$ . Suivant l'approche de Ménard dans la notice D.60, ce volume correspond à celui de la sonde de 44 mm seule. Suivant l'approche de la NF P94-110, ce volume inclut celui du tube fendu (on remplace alors  $V_c$  par  $V_f$ , suivant les notations adoptées ici). Dans l'esprit de ce qui est proposé par Hansbo pour les modules, on serait logiquement sur un volume intermédiaire.

Les tableaux ci-après montrent la variation du volume de la cavité pour plusieurs diamètres de forage, en fonction de la valeur du volume  $V_L$  injecté dans la sonde de 44 mm. On précise que dans les tableaux ci-dessous le diamètre initial de la sonde au niveau de la cellule de mesure est fixé à 42 mm (la valeur de 44 mm correspondant plutôt aux bagues).

La démarche de calcul consiste en partant du volume théorique de la sonde 44 mm, à calculer tout d'abord la valeur de  $V_I$  qui correspond à la mise en contact du tube fendu avec les parois du forage. On calcule ensuite le volume final de la sonde 44 mm après injection de  $V_L$ . De là on évalue le diamètre final de la sonde 44 mm et du tube fendu, pour obtenir *in fine* le rapport entre le volume initial et le volume final de la cavité d'essai.

Le tableau 4 présente les calculs pour un tube fendu de 7 mm d'épaisseur et pour trois valeurs de  $V_L$  :

- $V_L = 2 V_I + V_c$  conformément à la pratique historique de la notice D.60
- $V_L = 2 V_I + V_f$  conformément à ce qui était fait dans la NF P94-110
- $V_L = 2 V_I + V_{Hansbo}$  où  $V_{Hansbo}$  est ici défini comme la moyenne géométrique entre  $V_c$  et  $V_f$  dans l'esprit de ce qui est proposé pour les modules

On constate qu'avec l'approche de la notice D.60, qui consiste à considérer que le tube fendu fait partie du sol, le doublement du volume de la cavité n'est pas atteint si on s'intéresse au sol qui se trouve autour du

tube fendu. En toute rigueur cela conduirait à une légère sous-évaluation de la pression limite, mais qui est sans doute compensée en partie par l'absence de correction sur les pressions (pour tenir compte de l'épaisseur du tube).

Avec l'approche de la NF P94-110, du fait d'une mesure des volumes par le CPV au niveau de la sonde 44 mm, on dépasse en réalité le doublement du volume de la cavité, valeur qui ne peut jamais être mesurée mais extrapolée, d'autant plus pour une sonde « courte ». Cela devrait logiquement conduire à une légère surestimation de la pression limite, qui se cumule avec l'effet du tube fendu sur les pressions, augmentant d'autant le biais.

Enfin, il est intéressant de noter que si on applique à la définition de  $V_L$  l'esprit de ce que Hansbo propose pour le calcul des modules on obtient à peu de choses près le doublement du volume de la cavité.

Tableau 4. Variation du volume de la cavité en fonction du volume injecté dans la sonde longue de 44 mm pour un tube fendu 46/60 mm ou 49/63 mm

Ø cavité (mm)	64	65	66
Vol. cavité (cm <sup>3</sup> )	1190	1228	1266
$V_I$ (cm <sup>3</sup> )	214	243	273
$V_L = V_c + 2 V_I$	940	999	1059
Ø final sonde 44mm	70.7	72.1	73.5
Ø final cavité (mm)	84.7	86.1	87.5
<b>Rapport des volumes</b>	<b>1.75</b>	<b>1.76</b>	<b>1.76</b>
$V_L = V_t + 2 V_I$	1474	1533	1592
Ø final sonde 44mm	82.7	83.9	85.1
Ø final cavité (mm)	96.7	97.9	99.1
<b>Rapport des volumes</b>	<b>2.28</b>	<b>2.27</b>	<b>2.26</b>
$V_L = V_{Hansbo} + 2 V_I$	1160	1219	1279
Ø final sonde 44mm	75.9	77.2	78.5
Ø final cavité (mm)	89.9	91.2	92.5
<b>Rapport des volumes</b>	<b>1.97</b>	<b>1.97</b>	<b>1.96</b>

## 4.2 Essais croisés – site de Messanges

On reprend ici la démarche adoptée pour les modules pressiométrique, en comparant les valeurs de pression limite obtenues dans les essais réalisés avec une sonde nue de 60 mm et celles obtenues avec des sondes de 44 mm dans un tube fendu. Pour les essais réalisés avec un tube fendu, on a considéré 3 hypothèses différentes pour le dépouillement :

- Un calcul de la pression limite pour un volume  $V_L = 2 V_I + V_c$  conformément à ce qui était fait dans la notice D.60, à la différence près qu'ici  $V_c$  est dérivé des calibrages en utilisant la formule (9) tirée de la norme EN ISO 22476-4,
- Un dépouillement où la pression limite est extrapolée pour un volume  $V_L = 2 V_I + V_t$

conformément à ce qui était fait dans la norme française NF P94-110,

- Un dépouillement de la pression limite avec une valeur intermédiaire de  $V_L = 2 V_I + V_{Hansbo}$  où  $V_{Hansbo}$  est défini comme la moyenne géométrique entre  $V_c$  et  $V_t$ .
- Et enfin, un dépouillement qui intègre également une extrapolation jusqu'à  $2 V_I + V_{Hansbo}$ , mais à laquelle on applique ensuite forfaitairement un abattement de 15% pour tenir compte de l'effet du tube sur les pressions. Cette dernière interprétation tient compte au mieux des deux effets analysés dans le 4.1.

Le tableau 5 donne les valeurs moyennes et médianes obtenues avec les 4 interprétations, à comparer avec les valeurs obtenues pour les essais menés avec une sonde nue de 60 mm.

Tableau 5. Valeurs représentatives de la pression limite pour les essais avec une sonde nue et différentes interprétations pour les essais au tube fendu

Type de sonde et interprétation	Moyenne (MPa)	Médiane (MPa)
Sonde 60 mm	1.41	1.24
Tube fendu D.60	1.49	1.30
Tube fendu P94-110	1.65	1.43
Tube fendu Hansbo	1.57	1.36
Tube fendu 0.85 x Hansbo	1.34	1.16

On constate que, comme on pouvait s'y attendre, l'approche de la NF P94-110 conduit à des valeurs un peu surestimées par rapport aux essais réalisés avec une sonde nue, mais l'écart reste inférieur à 20%. Une extrapolation jusqu'au volume de Hansbo conduit également à une légère surestimation de la pression limite.

L'approche historique de la notice D.60 est plus proche avec seulement 5% d'écart sur la moyenne et la médiane (ce qui est plutôt cohérent avec l'analyse théorique qui identifie deux biais qui vont en sens opposé). Enfin la dernière approche qui tiendrait compte de l'ensemble des facteurs évoqués dans l'analyse théorique est également assez proche (environ 6% d'écart), mais donne un résultat plus conservatif.

La figure 6 représente la distribution des pressions limites pour les essais à la sonde nue et pour les 4 interprétations des essais avec un tube fendu, sous la forme des courbes de fréquence cumulées pour donner une vision d'ensemble.

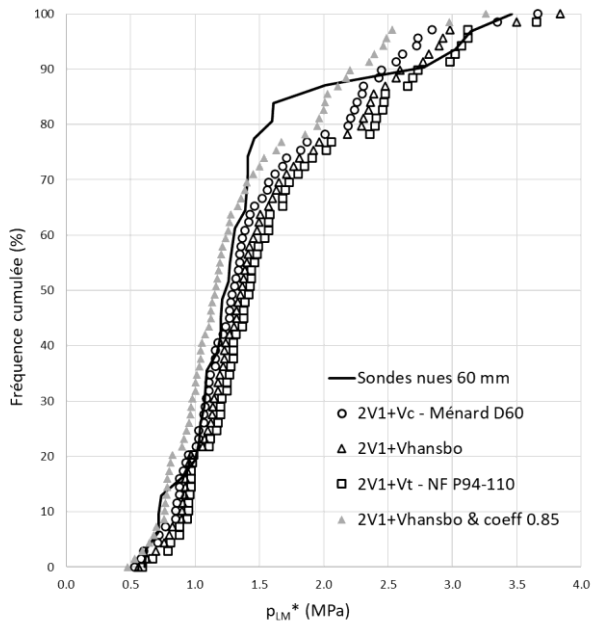


Figure 6. Diagramme de fréquence cumulée pour les différentes interprétations des essais avec tube fendu, comparées aux résultats des sondes nues de 60 mm

Comme sur les valeurs moyennes, on constate que quelle-que-soit l'interprétation retenue les écarts entre les résultats obtenus avec les sondes nues et les tubes fendus sont beaucoup moins significatifs que pour les modules. On note toutefois les mêmes tendances que sur les moyennes, avec l'approche de Ménard et celle qui combine volume de Hansbo et facteur d'affinité de 0.85, qui semblent coller au mieux avec les essais des sondes nues.

## 5 CONCLUSIONS

On a montré dans cet article qu'une approche théorique relativement simple permet d'estimer l'effet de l'épaisseur du tube sur les incréments de pression et de volumes transmis aux parois du forage. Les deux effets sont confirmés par l'analyse des modules pressiométriques Ménard obtenus lors des essais croisés du PN ARSCOP sur des terrains grenus avec des tailles de grains faibles au regard de l'ouverture des fentes du tube fendu.

Si on arrive à une bonne estimation des modules en considérant un volume de sonde inférieur à celui de la cavité, il s'agit là d'un artifice de calcul. Pour l'extrapolation de la pression limite, l'application d'un simple facteur d'affinité est plus discutable, car le rapport  $R_{int}/R_{ext}$  n'est pas figé, mais évolue au fur et à mesure de l'expansion de la sonde.

Nous proposons plutôt de corriger les couples pression/volume à chaque palier des essais, comme on le fait pour l'étalonnage et le calibrage, du rapport  $R_{int}/R_{ext}$ , calculé pour le niveau d'expansion atteint à

chaque palier. La courbe corrigée pourrait alors être exploitée de la même manière pour une sonde nue et une sonde placée dans un tube fendu.

## REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient le PN ARSCOP pour la mise à disposition des résultats des différentes campagnes d'essais croisés, sans lesquels l'article n'aurait eu que peu de portée.

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- AFNOR, 2021. NF EN ISO 22476-4 - Essai pressiométrique Ménard.
- AFNOR, 1991. NF P94-110 - Essai pressiométrique Ménard.
- Baguelin, F., Jézéquel, J. F., Shields, D. H., 1978. *The Pressuremeter and Foundation Engineering*. Trans Tech Publications, Clausthal, Allemagne. [https://doi.org/10.1016/0148-9062\(78\)91371-2](https://doi.org/10.1016/0148-9062(78)91371-2)
- Grégoire, M., Finiasz, A., Jacquard, C., Rispal, M., 2025. Assessing the influence of the slotted tube on modulus. ISP8, Esch-sur-Alzette, Luxembourg (en anglais). <https://www.issmge.org/uploads/publications/105/136/SP2025-10.pdf>
- Hansbo, S., Pramborg, B., 1990. Experience of the Menard pressuremeter in foundation design. ISP3 Proceedings, Oxford, Royaume Uni, pp. 361–370. <https://www.icevirtualibrary.com/doi/abs/10.1680/p3is.15562.0034>
- Lamé, G., 1852. *Leçons sur la théorie mathématique de l'élasticité des corps solides*, Bachelier, Paris.
- Ménard, L. 1967. Le pressiomètre Louis Ménard - Règles d'utilisation des techniques pressiométriques et d'exploitation des résultats obtenus pour le calcul des fondations. Notice générale D60, Centre d'études géotechniques Louis Ménard, Longjumeau, France. <https://web.archive.org/web/20190410174024/http://icp-pressuremeter.com/wp-content/uploads/2018/04/D60-general-notice.pdf> (en anglais)
- Monnet J., Boutonnier L., Mahmutovic D., Ouedraogo M. 2022, Correction de membrane pour le pressiomètre, 20<sup>th</sup> ICSMGE, Sydney, Australie. [https://www.issmge.org/uploads/publications/1/120/ICSMGE\\_2022-82.pdf](https://www.issmge.org/uploads/publications/1/120/ICSMGE_2022-82.pdf)
- Rispal, M., Jacquard, C., Désourtheau, P., Mourier, J.-P., Reiffsteck, P., 2022. Essais croisés avec le pressiomètre dans le cadre d'ARSCOP. 11<sup>ème</sup> JNGG, Lyon France. <https://hal.science/hal-03719815v1>