

ESSAI PRESSIOMETRIQUE ET RESISTANCE HYDRAULIQUE DES TUBULURES

PRESSUREMETER TEST AND HYDRAULIC RESISTANCE OF THE CONNECTING TUBES

Julien HABERT¹, Philippe REIFFSTECK², Jean-Pierre BAUD³, Catherine JACQUARD⁴, Michel RISPAL⁴

¹ Terrasol, Paris, France

² IFSTTAR, Paris, France

³ Eurogé, Avrainville, France

⁴ Fondasol, Avignon, France

RÉSUMÉ – Le présent article aborde l'influence de la résistance hydraulique des tubulures sur l'évolution du volume de la sonde au cours de l'essai, qui perturbe aussi bien l'essai lui-même que la détermination préalable de la résistance propre de la sonde. Des principes de modélisation sont présentés pour tenir compte de ce phénomène, qui sont ensuite appliqués à un essai pressiométrique réel.

ABSTRACT – The present paper addresses the influence of the hydraulic resistance of the connecting tubes on the evolution of pressuremeter cell volume, that concerns both the test itself but also the preliminary determination of the self-resistance of the probe. Modelling principles are provided to consider this issue and are then applied to experimental pressuremeter data.

1 Introduction

L'essai pressiométrique, s'il est réalisé en suivant le protocole dit Ménard, implique un programme de chargement spécifique, et en particulier une durée de palier fixe. Les paramètres conventionnels Ménard qui en sont dérivés, et notamment les pressions limite et de fluage, permettent d'alimenter des méthodes robustes et courantes de prévision de la résistance et du déplacement des fondations.

Dans un pressiomètre hydropneumatique traditionnel, le volume de la sonde pressiométrique est suivi au travers du volume de liquide injecté au niveau du contrôleur pression-volume (CPV), déporté par rapport à la sonde et lui étant relié par des tubulures présentant une certaine longueur. De ce fait, les pertes de charges liées à l'écoulement perturbent la mesure de la pression réelle au niveau du CPV en surface (Arsonnet et al, 2013), elle-même différente de la pression dans la sonde du fait de la colonne d'eau verticale et surtout de la résistance hydraulique de l'ensemble du système, qui fait intervenir la longueur des tubulures et la viscosité du liquide utilisé. Le présent article aborde ce phénomène, qui peut notamment être exacerbé du fait du développement d'essais à des profondeurs importantes (nécessitant également des longueurs de tubulures conséquentes), le recours à des essais réalisés en période froide (utilisation de liquides antigel présentant une viscosité plus élevée que l'eau). Ces phénomènes sont en réalité minimisés par certaines dispositions de la norme d'essai pressiométrique (AFNOR, 2015), mais n'étaient pas jusqu'à présent quantifiés.

Dans un premier temps, le présent article rappelle les problématiques d'écoulement en cause et les principes permettant de prendre en compte la viscosité du liquide servant à la mesure de l'expansion du volume de la sonde. Dans un second temps, une application des principes précédemment développés est proposée pour des essais réels : la première partie de l'analyse concerne la détermination préalable de la résistance propre de la sonde

pressiométrique tandis qu'une deuxième partie s'intéresse à l'impact sur l'interprétation finale de l'essai pressiométrique.

2 Eléments théoriques sur les écoulements dans les tubulures

2.1 Ecoulement d'un fluide visqueux

Sous réserve de vitesses d'écoulement « faibles » (écoulement laminaire), le débit d'écoulement Q ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) dans un tube circulaire peut s'écrire selon l'équation 1.

$$Q = \frac{\pi r^4 g}{8\nu} \left(\frac{dh}{dx} \right) \quad (1)$$

Où r est le rayon du tube (m), g la constante de gravité (égale à $9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$), ν la viscosité cinématique ($\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$) et dh/dx le gradient d'écoulement, ou encore gradient de la charge hydraulique h le long du tube, elle-même calculée classiquement à partir de l'équation (2)

$$h = z + \frac{p}{\gamma_w} + \frac{v^2}{2g} \quad (2)$$

Où z est la cote du point considérée (comptée positivement « vers le haut »), p la pression, γ_w le poids volumique du liquide utilisé et v la vitesse d'écoulement.

2.2 Ordres de grandeur de viscosité dynamique

Par défaut, le liquide est utilisé pour mesurer le volume de la sonde pressiométrique est l'eau, dont la viscosité dynamique est bien connue, et qui dépend de la température et décroît de façon monotone avec celle-ci.

Néanmoins, pour pouvoir notamment réaliser des essais en période hivernale (température en surface inférieure ou proche de 0°C) et éviter les risques de gel, un liquide anti-gel est fréquemment mélangé à l'eau permettant la mesure de volume afin de descendre la température du point de congélation. Différents liquides peuvent être utilisés, notamment le mono-éthylène glycol et le mono-polypropylène glycol. Si ces liquides permettent effectivement de réduire la température du point de congélation, ils présentent en contrepartie une viscosité dynamique plus élevée. Ces produits ne sont pas utilisés purs mais généralement mélangés à l'eau. La viscosité dynamique du mélange eau-glycol peut être ensuite être dérivée pour quelques mélanges caractéristiques. Une comparaison des ordres de grandeur de viscosités cinématiques est reportée sur la Figure 1, en considérant différents degrés de dilution.

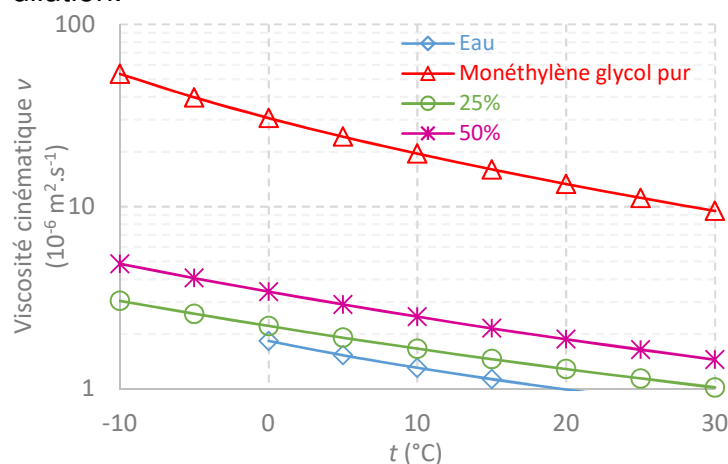


Figure 1 : Viscosités dynamiques de l'eau et du monoéthylène glycol à différents degrés de dilution

2.3 Ordres de grandeur du débit

En reprenant les équations (1) et (2), en considérant une différence de pression Δp et une vitesse constante le long des tubulures de longueur L , le gradient d'écoulement dh/dx peut être décrit par l'équation (3) :

$$\frac{dh}{dx} = \frac{\Delta p}{\gamma_w L} \quad (3)$$

Cela permet ensuite d'obtenir la valeur du débit Q sous gradient de pression constant, repris dans l'équation (4).

$$Q = \frac{\pi r^4 g \Delta p}{8 \nu \gamma_w L} \quad (4)$$

Cette dernière formule permet d'obtenir de premiers ordres de grandeur sur les débits au travers des tubulures. Dans le cas d'une sonde pressiométrique, en réalité, la pression du liquide, maintenue constante pendant un palier au niveau du CPV, évolue avec le temps au niveau de la sonde, et la différence de pression CPV-sonde ainsi que le débit ne sont plus constants : ce sujet est traité dans le paragraphe suivant.

3 Application à la mesure de la résistance propre de la sonde pressiométrique

Dans un premier temps, les développements précédents sont appliqués à la détermination de la résistance propre de la sonde (à l'air libre) qui est réalisée systématiquement et préalablement aux essais pressiométriques. Cette première étape préalable à l'essai permet de déterminer les pressions réellement appliquées au terrain par la sonde pressiométrique, fonctions du volume additionnel injecté ΔV au niveau de la sonde pressiométrique, au-delà de son volume initial V_c .

3.1 Relation pression-volume en négligeant la résistance hydraulique

Dans la suite, il sera considéré que la relation entre la pression dans la sonde p_c et le volume injecté ΔV à l'air libre suit une fonction puissance décrite par l'équation (5) :

$$\Delta V = ap_c^b \quad (5)$$

Où b est strictement supérieur à 1.

Un exemple de relation pression-volume traduisant la résistance propre de la sonde est fourni sur la Figure 2, pour $b=2$ et $a = 0,015 \text{ cm}^3/\text{kPa}^b$.

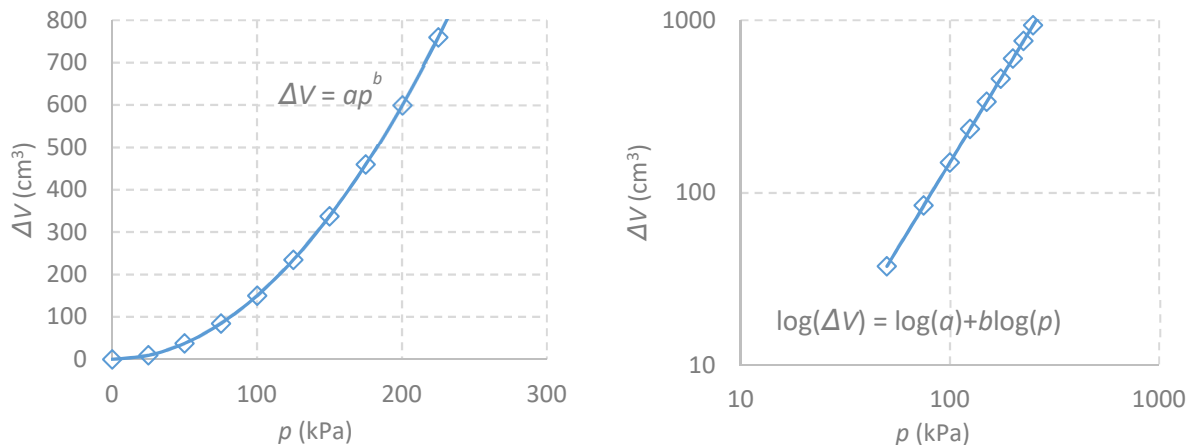


Figure 2 : exemple d'expansion propre

3.2 Application théorique à un incrément de pression unique

Considérons l'application d'un incrément de pression unique, visant une pression de consigne mesurée au niveau du contrôleur pression volume (CPV) notée p_{CPV} . En reprenant l'équation (3) et en considérant que la vitesse d'écoulement est constante le long des tubulures de longueur L et que le CPV est situé à la même cote que la sonde, le gradient de l'écoulement est décrit par l'équation (6) :

$$\frac{dh}{dx} = \frac{(p_{CPV} - p_c)}{\gamma_w L} \quad (6)$$

En reprenant (4) à (6), l'équation différentielle (7) peut être obtenue, du premier ordre mais non linéaire :

$$\frac{dV}{dt} = Q(t) = \frac{\pi r^4 g}{8\nu} \left[\frac{p_{CPV} - \left(\frac{\Delta V}{a}\right)^{1/b}}{\gamma_w L} \right] \quad (7)$$

L'équation (7) peut alors être mise sous la forme (8) :

$$\frac{d\Delta V}{dt} + \alpha \Delta V^\beta = \gamma \quad (8)$$

Cette équation peut être résolue simplement de façon approchée par discrétisation temporelle, en calculant le débit à chaque pas de temps et en actualisant le volume et la pression dans la sonde.

En reprenant la relation pression-volume présentée sur la Figure 2, les évolutions du volume de la sonde en fonction du temps sont présentées sur la Figure 3, pour un même incrément de pression instantané de 25 kPa en faisant varier la viscosité ν du fluide et le rayon r de la tubulure :

- un incrément de pression de 0 à 25 kPa sur la Figure 3a,
- un incrément de pression de 175 à 200 kPa sur la Figure 3b.

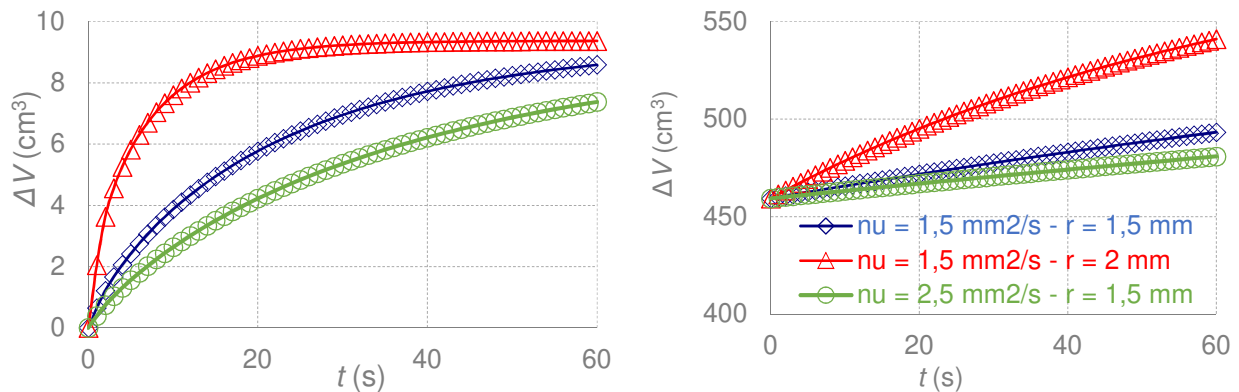


Figure 3 : modélisation d'un incrément de pression dans une sonde à l'air libre (3a : de 0 à 25 kPa, 3b : de 175 à 200 kPa)

Sur la Figure 3a, l'augmentation de volume associée est faible ($9,5 \text{ cm}^3$), et quelles que soient les caractéristiques du liquide et des tubulures, le volume injecté après 60 s apparaît stabilisé. En revanche, sur la Figure 3b, l'augmentation de volume est plus conséquente et les dimensions de la tubulure et la viscosité du liquide ont une influence forte sur les résultats, notamment pour le dernier cas représenté (viscosité cinématique d'un mélange d'eau avec 20 % de glycol et tubulures de faible diamètre).

3.3 Confrontation à une mesure de la résistance propre de la sonde pressiométrique

Lors de la mesure de la résistance propre, la pression au niveau du contrôleur pression volume n'est plus constante mais est une fonction du temps $p_{CPV}(t)$. L'équation (5) reste vraie, sous réserve de remplacer p_{CPV} par $p_{CPV}(t)$. Pour modéliser cela, les durées de montée en pression doivent également être considérées. Pour les données expérimentales présentées (sonde de type G, à cellules emboîtées) une durée de montée en pression constante et égale à 20 s a été retenue. Les Figures 4a et 4b comparent ainsi les mesures et la modélisation d'un essai d'expansion propre perturbé par les tubulures (50 m de longueur, diamètre intérieur 4 mm, eau faiblement glycolée, température $\approx 7^\circ$, viscosité cinématique égal à $2,5 \text{ mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$) au comportement théorique de la sonde seule (non perturbé par les tubulures).

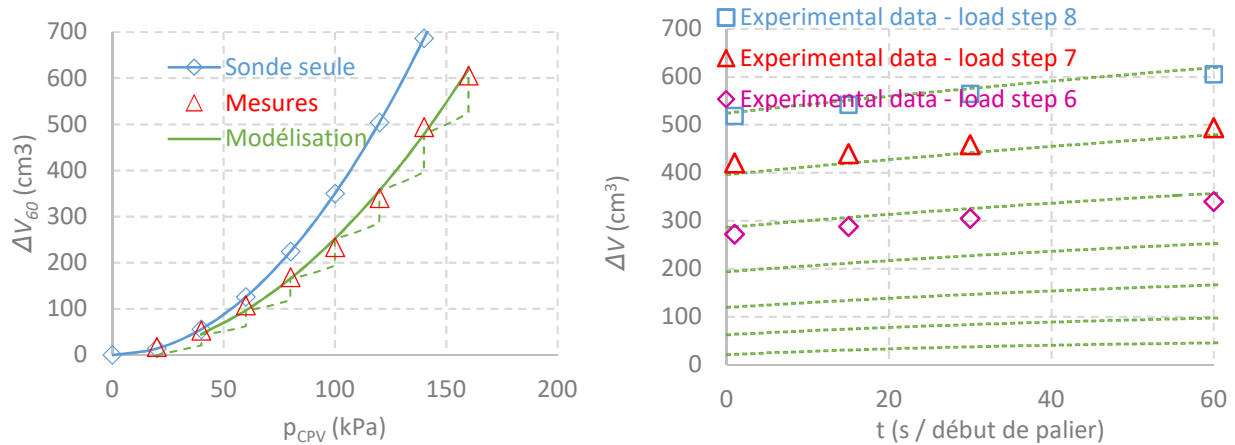


Figure 4 : mesures et modélisation de la détermination de la résistance propre de la sonde (4a : p - ΔV , 4b : t - ΔV)

Les deux Figures précédentes montrent la perturbation de la courbe d'expansion propre de la sonde engendrée par les tubulures. En particulier, la valeur p_{el} (pression dans la sonde pressiométrique correspondant à un volume conventionnel ΔV_c de 700 cm³), qui est égale à 142 kPa, présente une valeur apparente de l'ordre 170 kPa du fait de la résistance hydraulique des tubulures. In fine, le comportement lors de la mesure de la résistance propre de la sonde est fonction du temps, et le résultat est fonction de la durée des différents paliers, mais aussi des durées de montée en pression. Enfin, cette résistance propre de la sonde « supplémentaire » apportée par la résistance hydraulique permet d'expliquer un certain nombre de problématiques, comme i) des courbes de résistance propre de la sonde non régulières, ii) des pressions corrigées aberrantes (parfois négatives) obtenues lors d'essais pressiométriques et iii) des valeurs de résistance propre conventionnelle p_{el} (correspondant à un volume injecté ΔV égal à 700 cm³) souvent trop importantes au regard de la pression limite visée (la norme NF EN ISO 22476-4 – AFNOR, 2015 - limitant par exemple à $p_{IM}/4+25$ kPa pour $p_{IM} < 900$ kPa), et qui conduisent également à une pression dans les cellules de gardes également inadaptée pour les sondes de type G.

4 Application à un essai pressiométrique

4.1 Remarques générales

Dans un second temps, les développements précédents sont appliqués à un essai pressiométrique, en considérant l'influence, i) d'abord sur les valeurs de correction liées à la résistance propre de la sonde, puis ii) sur les paramètres de sortie (pression limite pressiométrique Ménard nette p_{IM}^* , pression de fluage nette p_f^*). L'effet sur le module pressiométrique E_M n'est pas investigué, car la plage de détermination de ce dernier est associée à des déformations volumiques limitées.

4.2 Application à un essai

4.2.1 Présentation de l'essai utilisé

Un essai réalisé à 10 m de profondeur dans l'argile des Flandres (Ère Tertiaire, Yprésien) fortement surconsolidée, sur le site de Merville (59), a été retenu. Ce site a fait l'objet de nombreuses campagnes de caractérisation et d'expérimentations géotechniques. Une sonde nue a été utilisée, mise en œuvre dans un forage la tarière continue avec une longueur de tubulures égale à 60 m (« justifiée » par la longueur totale de 50 m du sondage

pressiométrique dans lequel s'inscrivait l'essai). Les données brutes sont présentées sur la Figure 5.

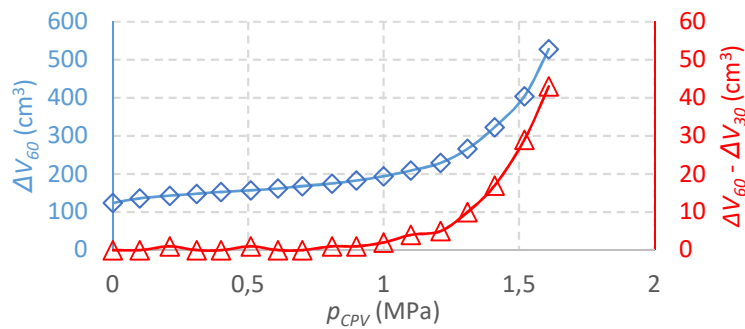


Figure 5 : Essai pressiométrique considéré – pressions imposées et volumes non corrigés

4.2.2 Principe de la correction

La première question concerne la résistance propre à considérer, qui dépend en réalité du temps. Or, du point de vue hydraulique des tubulures, l'essai pressiométrique présente une cinématique de chargement sensiblement différente de la mesure de la résistance propre, du fait notamment, i) des incréments de pression différents, ii) des variations de volume différents et iii) du nombre de paliers. Pour intégrer ces différentes problématiques, un taux de chargement équivalent est défini, caractérisé par $dV/dpdt$. Il est représenté sur la Figure 6 pour chaque palier i) de la détermination de la résistance propre et ii) de l'essai pressiométrique, et montre des ordres de grandeur sensiblement différents.

Pour pallier à ces différences, plusieurs solutions peuvent être envisagées : 1) réaliser un essai d'expansion propre dans les mêmes conditions que l'essai pressiométrique, 2) modéliser complètement l'essai pressiométrique, 3) modéliser l'essai de résistance propre dans les conditions de taux de chargement de l'essai pressiométrique et à corriger uniquement les mesures de volumes en conséquence. La solution 1) nécessite de procéder à un nouvel essai de résistance propre de la sonde en fonction des résultats de chaque essai pressiométrique et n'est pas réaliste en pratique. La solution 2), impliquant de fixer une loi de comportement a priori pour le terrain testé, reste complexe à implémenter. En revanche, la solution 3) reste simple à mettre en œuvre et proche de la pratique actuelle.

La mise en œuvre de la solution 3) nécessite de fixer i) les incréments de pression et ii) les durées des paliers à modéliser. Dans un premier temps, les paliers de pression appliqués lors de la modélisation spécifique de la résistance propre (dans les conditions de taux de chargement de l'essai pressiométrique) sont déduits des volumes appliqués lors de l'essai pressiométrique et de la relation $p=f(\Delta V)$ traduisant la résistance propre de la sonde (corrigée des effets éventuels du temps). Dans un second temps, les durées de paliers effectives sont déterminées de façon à avoir des taux de chargement équivalents $dV/dpdt$ à ceux constatés lors de l'essai, pour chaque palier. La Figure 7 montre ainsi la résistance propre « effective » obtenue (pour laquelle la différence de volume due à la seule résistance hydraulique des tubulures est négligée).

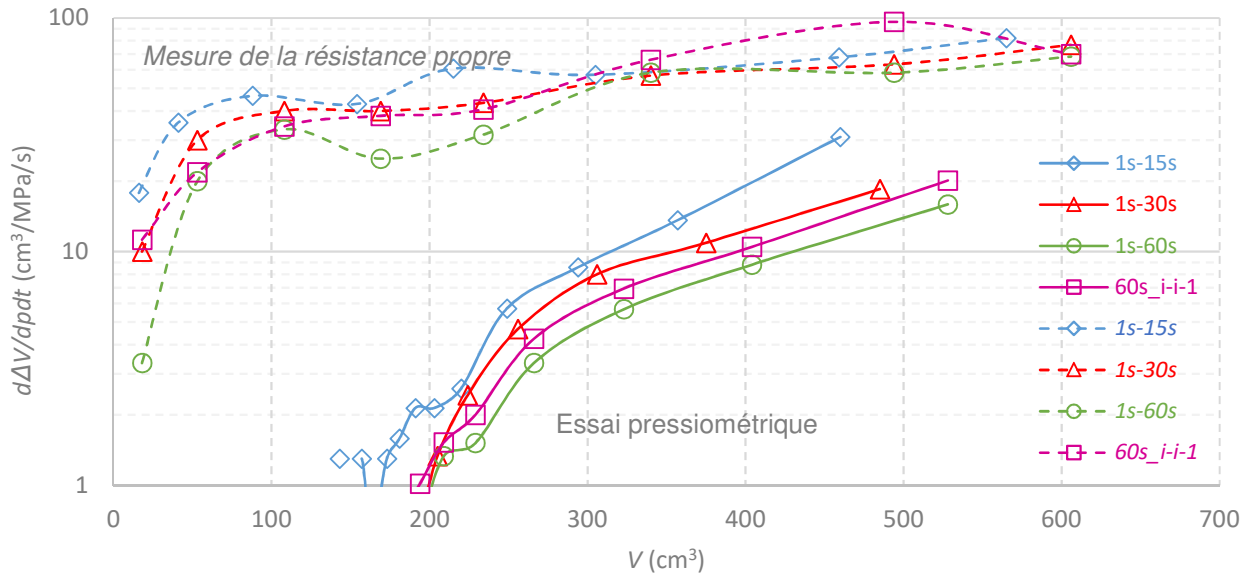


Figure 6 : vitesses de chargement, essai et détermination de la résistance propre

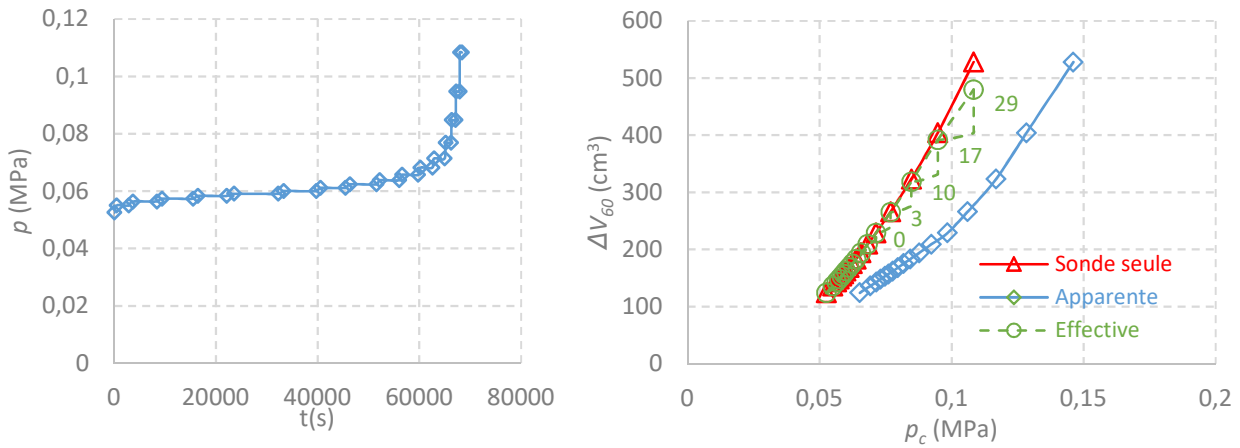
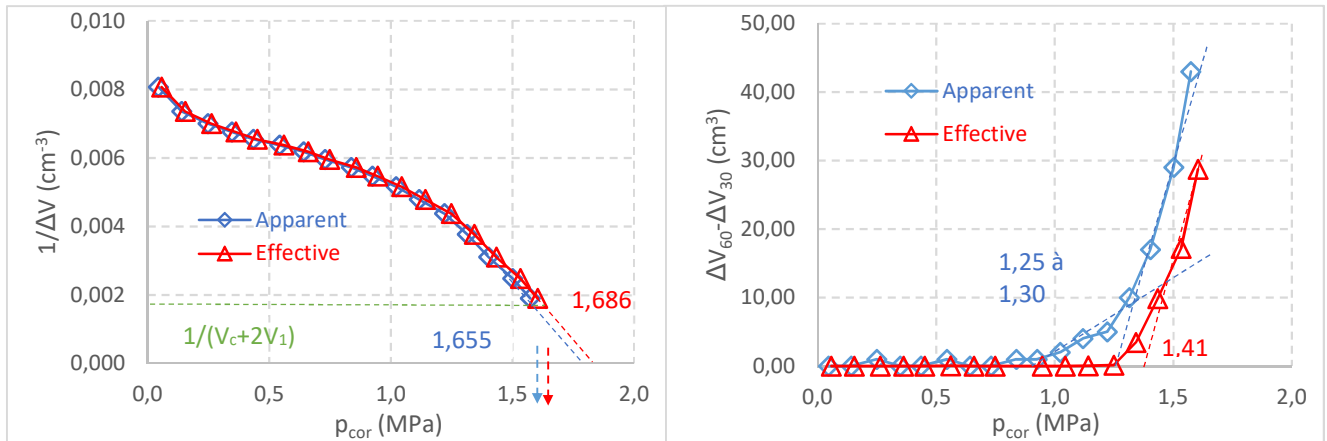


Figure 7a : Modélisation spécifique de la résistance propre en suivant la vitesse de chargement de l'essai pressiométrique/ Figure 7b : Résistances propre à considérer pour l'essai pressiométrique

La correction de résistance propre effective à utiliser pour l'essai se distingue de celle directement mesurée lors de la détermination de la résistance propre (différence allant jusqu'à 35 %). La modélisation permet d'accéder aux différences de volumes en cours de paliers dues à la seule résistance hydraulique, reportées sur la Figure 7b pour les 5 derniers paliers.

4.2.3 Application à l'essai

Ces corrections de la résistance propre de la sonde sont ensuite appliquées à l'essai et comparées aux corrections appliquées sans tenir compte de cette résistance hydraulique. La Figure 8a présente la relation $p_{cor} - 1/\Delta V$ permettant de déterminer la pression limite par extrapolation (méthode inverse) et la Figure 8b la relation p_{cor} fonction de $\Delta V_{60} - \Delta V_{30}$ avec et sans prise en compte de la résistance hydraulique (respectivement « effective » et « apparente »).


 Figure 8a : Détermination de p_{IM} par la méthode inverse / Figure 8b : Détermination de p_f

Les pressions limites Ménard obtenues (doublement du volume « initial » de la sonde, ici $V_c = 460 \text{ cm}^3$ et $\Delta V_1 = 140 \text{ cm}^3$, et doublement du volume obtenu pour $\Delta V = V_c + 2\Delta V_1 = 740 \text{ cm}^3$), ajustement par courbe inverse - $1/V$ - et double hyperbole – DH) sont reportées dans le Tableau 1, ce qui met en évidence une sous-estimation de l'ordre de 2 % concernant p_{IM}^* , si la résistance propre n'est pas corrigée. La différence reste faible et acceptable dans le cas présent, du fait du soin particulier pour la sélection de la sonde, et de la pression limite importante au regard de la résistance propre de la sonde. Des différences sensiblement plus importantes sont susceptibles d'être mises en évidence avec une sonde présentant une résistance propre plus importante.

La prise en compte de la résistance propre effective permet de véritablement isoler les variations de volume dues au terrain, et grâce à des courbes plus simples à interpréter, d'obtenir une pression de fluage p_f sans équivoque.

Tableau 1. Pressions limites Ménard et de fluage

	p_{IM} (1/V) (MPa)	p_{IM} (DH) (MPa)	p_{IM}^* (1/V) (MPa)	p_{IM}^* (DH) (MPa)	p_f (MPa)
Résistance effective	1,686	1,668	1,486	1,468	1,41
Résistance apparente	1,655	1,638	1,455	1,438	1,25 à 1,30
Différence	- 1,9%	- 1,8%	- 2,1%	- 1,9 %	-7,8 à 11,3%

5 Conclusions

Le présent article détaille une première approche permettant de modéliser les effets de la résistance hydraulique le long des tubulures pressiométriques, qui concernent aussi bien les essais d'expansion propre de la sonde que les essais pressiométriques, et leur incidence sur la détermination des pressions limites et de fluage. Une modélisation spécifique des écoulements a été développée, confirmant l'importance de limiter la résistance propre de la sonde au regard de la pression limite visée.

D'autres éléments mériteraient d'être investigués, comme i) l'application à des essais pressiométriques avec cycle(s) ou déchargement final, ou ii) l'influence de la température, qui n'est pas la même lors de la détermination de la résistance propre (à la température de l'air) et lors de l'essai dans un forage.

6 Références bibliographiques

AFNOR (2015). NF EN ISO 22476-4 : essai pressiométrique Ménard

Arsonnet F., Baud J.P, Gambin M., Youssef W. (2013). Le GéoPAC®, un contrôleur pression volume automatisé pour les essais pressiométriques de qualité. ISP6, Paris.