

Variabilité des essais pressiométriques - contrôle des paramètres mesurés

Ammar Dhouib

Expert de justice – Expert national agréé par la Cour de Cassation – Président ADECSOL
9 Allée de l’Ile Marante 92700 Colombes (France)
ammar.dhouib@expert-de-justice.org

RESUME

Sont présentés, dans cette communication, quelques cas d’essais réels, liés notamment à la détermination des deux paramètres principaux : module pressiométrique Ménard (E_M) et pression limite p_l^* dans un essai dit « normal » ou dit « correct », un essai dit « remanié » et un essai dans un sol qui gonfle après la réalisation du forage. Des essais avec cycles enrichissent cet article.

ABSTRACT

This communication presents some real test cases, linked in particular to the determination of the two main parameters: Ménard pressuremeter modulus (E_M) and limit pressure p_l^* in a so-called "normal" or "correct" test, a so-called "reworked" test and a test in a soil which swells after drilling. Tests with cycles enrich this article.

Mots-clefs : Essai pressiométrique, monotone, normal, remanié, gonflement, cycle.

1. Préambule

L’essai pressiométrique est l’essai en place le plus riche de tous les essais en géotechnique destinés au dimensionnement et la justification des fondations des ouvrages de construction. En effet, cet essai renseigne l’ingénieur constructeur sur la résistance du sol par le biais de la pression limite et de la pression de fluage pour en déduire une portance sous l’ouvrage géotechnique et également sur la déformabilité du sol pour en tirer, par le biais du module pressiométrique, les déformations du sol sous les fondations de l’ouvrage.

Cependant, face aux difficultés de forage et des réponses du sol, l’ingénieur doit tout de même vérifier sa validité surtout dans les sols meubles susceptibles de remaniement et les sols sujets à gonflement qui affectent les trois paramètres de l’essai : pression de fluage p_f , pression limite pressiométrique p_l et module de déformation pressiométrique Ménard E_M .

Sont présentés ici des essais réels pour démontrer la sensibilité de l’essai pressiométrique et attirer l’attention des ingénieurs sur l’exécution de l’essai, son interprétation et le choix des paramètres entrants dans la justification des ouvrages de construction.

2. Analyse pratique d’essais monotones

2.1. Essai monotone « normal »

La figure 1 (a. à c) présente un essai jugé « normal » ou « correct » (Dhouib et al., 2002, Dhouib, 2016, 2021 et 2022), car de cet essai, il est aisé de tirer les trois

paramètres principaux de l’essai en les contrôlant, de surcroît, par les différentes méthodes interprétatives de l’essai pressiométrique (Figure 1.a à c). La figure 1.d illustre l’évolution des modules tangents de cet essai.

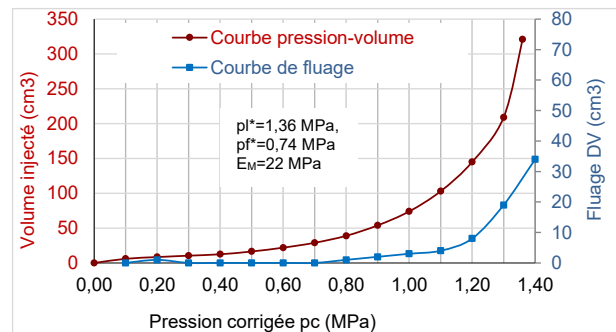


Figure 1.a : Courbe pression-volume de l’essai

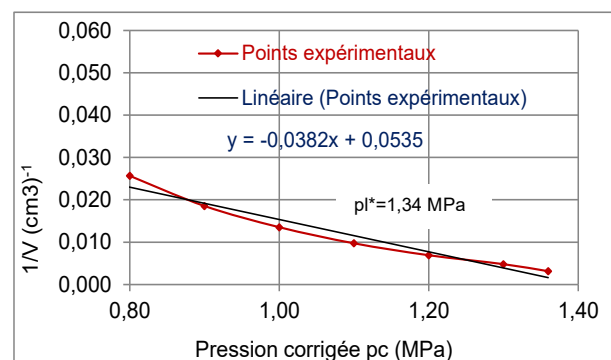


Figure 1.b : Courbe « inverse » de l’essai

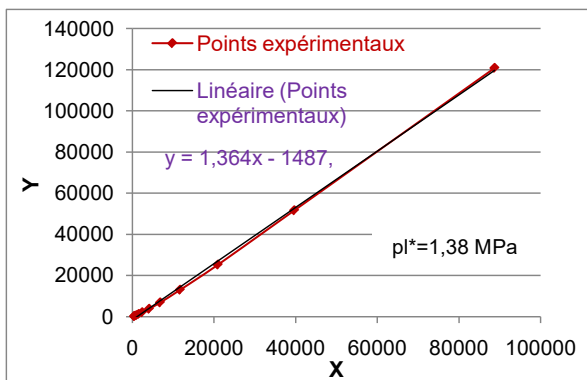


Figure 1.c : Extrapolation hyperbolique de l'essai

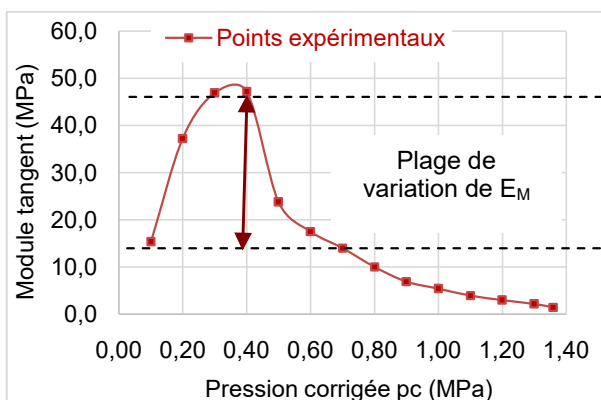


Figure 1.d : Courbes des modules tangents de l'essai

Sur la figure 1 qui précède, force est de constater que :

- L'interprétation de l'essai pressiométrique, jugé bon, conduite ici par le biais des trois méthodes conduit à une parfaite cohérence de la pression limite nette p_l^* à détermination directe (Figure 1.a), évaluée sur les derniers paliers de la courbe ($p_c > p_2 = p_r^*$) par la « méthode de la courbe inverse » : $1/V = Ap + B$ (Figure 1.b) et obtenue par la « méthode d'extrapolation hyperbolique » par la transformation (X,Y) de la figure 1.c. L'essai est très bon, et le rapport classique $[I_{pl}^* - p_{lh}^* I / p_{lh}^*]$ est (Norme NF P94-110-1) de 0,03 ($\ll 0,2$).
- Cet essai montre que le module pressiométrique « global » E_M , évalué à 22 MPa (Figure 1.a), se situe bien dans l'allure générale « en cloche » de la courbe des modules tangents de la figure 1.d où ces modules se situent dans une plage de variations de 12 à 48 MPa. On constate ainsi qu'au début de l'essai, le module de déformation pressiométrique croît rapidement en fonction de la pression injectée dans la sonde, car cette dernière comprime les parois de forage. Cette partie de la courbe des modules tangents peut fournir des informations importantes sur la réponse du sol en début d'essai, En cours de premiers paliers de l'essai, la courbe se stabilise et passe par un sommet avant de commencer à décroître en fonction de la pression. Dans les derniers paliers de l'essai, la courbe des modules tangents décroît rapidement et tend vers une direction asymptotique

¹ Le terme « remanié » noté constamment dans les coupes et profils des sondages pressiométriques de la

(valeur proche de 0) traduisant la rupture totale du sol.

2.2. Essai pressiométrique « remanié »

La figure 2 illustre un essai dit « remanié »¹ et donc ininterprétable et inutilisable (Dhouib et al. 2002).

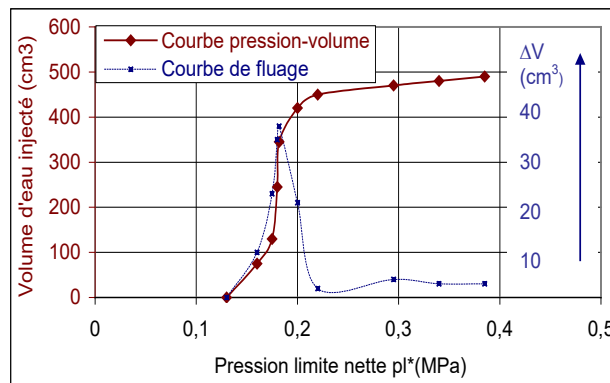


Figure 2 : Courbe type d'un essai « remanié » (essai écarté de l'analyse des fondations du projet)

L'interprétation d'un second essai « remanié » conduit aux graphes de la figure 3 suivants (Dhouib, 2016, 2021 et 2022) :

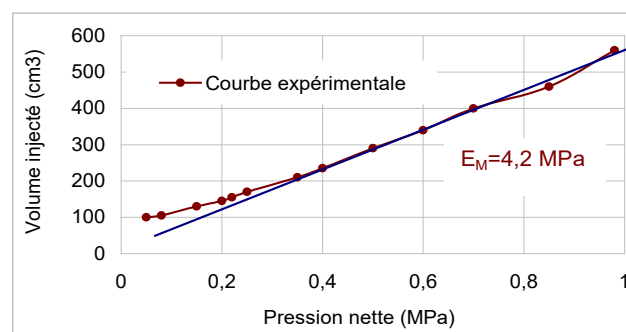


Figure 3.a : Courbe pressiométrique de l'essai

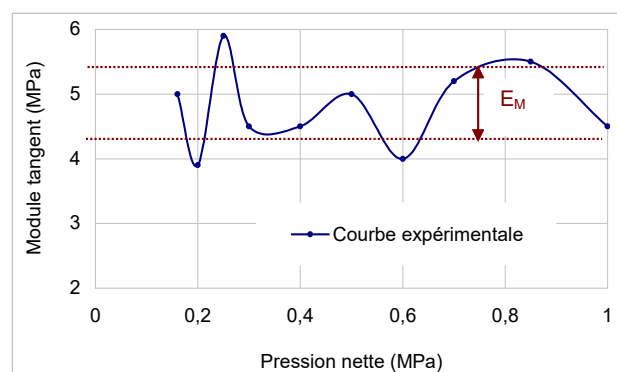


Figure 3.b : Courbe des modules tangents de l'essai

Notons qu'un essai remanié (Figures 2 et 3) correspond à un forage « remanié » où les parois du forage ne sont pas verticales et rectilignes et la courbe des modules tangents est très irrégulière et présente une succession de pics comme le montre la figure 3.b.

profession signifie, dans ce cas, que le sol est remanié lors du forage préalable à l'essai pressiométrique.

Un forage remanié peut être inhérent à plusieurs facteurs :

- La nature même du sol intrinsèquement décomprimé,
- La présence d'eau conduisant à l'éboulement des parois du forage, notamment dans le cas des sols grenus comme les sables et les graves sous l'eau,
- Le manque de boue bien épaisse permettant de tenir stables les parois de forage après extraction du matériel de forage.
- Le non-respect des passes de forage et de l'outil associé,
- Les maîtres foreurs utilisent un mot simple pour caractériser le remaniement d'un forage : « En forant, j'ai fait une patate ».

De la figure 3.a présentant la courbe pression-volume de l'essai « remanié », on tire un module « global » E_M de 4,2 MPa. L'analyse des modules tangents associés de la figure 3.b permet de déduire des modules de paliers allant de 4,5 à 5,5 MPa proches de la valeur globale de 4,2 MPa. Notons que dans les deux procédures d'évaluation du module pressiométrique E_M , celui-ci est faible et traduit un net remaniement des parois de forage préalable à l'essai.

Enfin, il est utile d'attirer l'attention des géotechniciens sur la qualité du forage dont dépend organiquement la qualité de l'essai. C'est pour cela qu'il est nécessaire d'avoir les courbes « pression-volume » annexées aux essais afin que l'ingénieur constructeur puisse les analyser finement et choisir les « bons » paramètres avant de procéder au calcul, dimensionnement et justification des fondations des ouvrages géotechniques.

2.3. Essais pressiométriques en sol gonflant

Lorsque le sol gonfle, les parois de forage se rétrécissent et la sonde de l'essai est forcée dans le sol pour réaliser l'essai.

Les phénomènes de gonflement instantané sont observés dans plusieurs sols d'argiles et de marnes gonflantes en France et dans le monde.

La figure 4 illustre la courbe pressiométrique et les modules tangents associés de deux essais types effectués dans une argile consistante et une marne moyennement raide, toutes deux instantanément gonflantes (Dhouib 2016, 2021 et 2022).

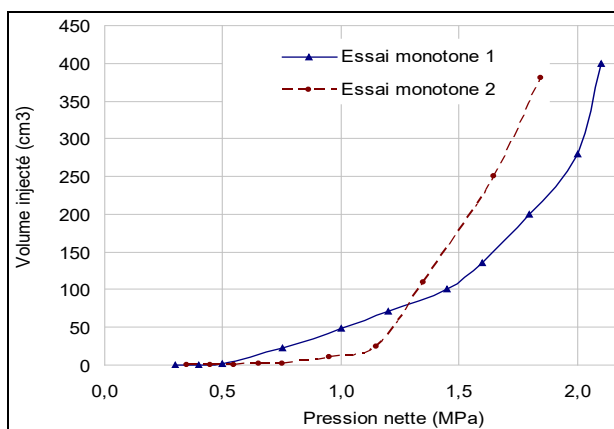


Figure 4.a : Courbe pressiométrique des 2 essais

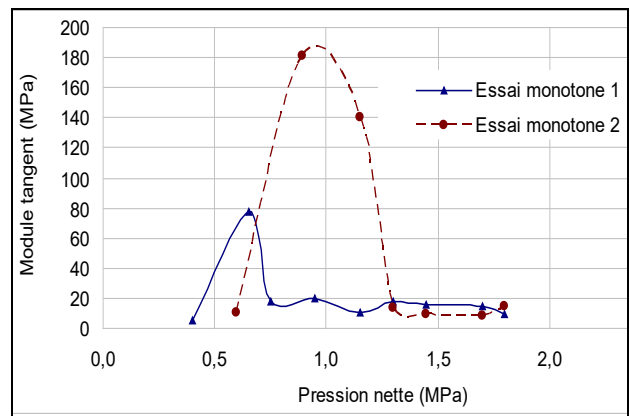


Figure 4.b : Courbe des modules tangents des 2 essais

L'examen de la figure 4 met en évidence ce qui suit :

- La mise en force de la sonde dans un sol gonflant se traduit par une courbe pression-volume horizontale qui ne « décolle » qu'à partir d'un niveau de pression élevé.
- La courbe expérimentale des modules tangents se caractérise par un fort pic donnant des modules extrêmement forts au regard des pressions limites atteintes.
- Sur la courbe 4.a, la rupture du sol est brutale et s'apparente à un comportement « plastique parfait ».

Cet exemple appelle les géotechniciens à la vigilance dans l'interprétation et le choix des modules pressiométriques dans les essais effectués dans des sols gonflants. Dans plusieurs projets, nous avons constaté des rapports de module pressiométrique à la pression limite de 20 à 200 alors que les pressions limites n'excédaient pas les 0,2 à 0,4 MPa et le remblai ferroviaire sus-jacent a subi des désordres importants (rupture avant la hauteur escomptée et réparation très onéreuse avec renforcement du sol sous-jacent).

3. Essais pratiques avec cycles

L'essai avec cycles (Norme XP P94-110-2) permet de simuler des cycles de chargement et déchargement du sol sous diverses sollicitations répétitives (vibrations, chocs, séismes). La figure 5 illustre deux essais avec un cycle (Figure 5.a) et avec deux cycles (Figure 5.b).

Les deux essais pressiométriques avec cycles de la figure 5 effectués sur des marnes raides (Dhouib et al., 2002, Dhouib 2016, 2021 et 2022) appellent les remarques suivantes :

- La pression du premier déchargement joue un rôle important sur le module pressiométrique mesuré dans l'essai avec cycles.
- En effet, sur la figure 5.a l'essai pressiométrique a été conduit de manière monotone jusqu'à 2,8 MPa, pression de l'ordre de 0,8 p_f (p_f étant la pression de fluage), mais un déchargement a été opéré jusqu'à 0,45 MPa et puis un rechargement jusqu'à peu près la même pression de décharge. La boucle de déchargement/rechargement est fermée, le module pressiométrique de décharge/recharge $E_{D/R}$ vaut 115 MPa, soit le double de son homologue E_M mesuré dans le chargement initial et qui est de 61 MPa. Cette

différence s'explique par une « rigidification » du sol marneux au cours du cycle de décharge / recharge.

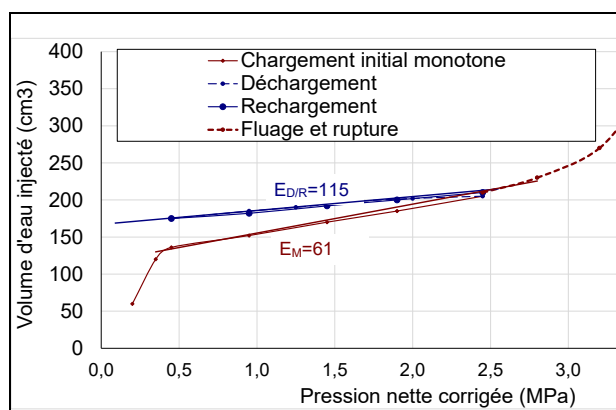


Figure 5.a : Essai à un cycle

- Par contre dans l'essai à deux cycles de la figure 5.b, le premier cycle a été conduit à partir d'une pression de fluage plus élevée que la pression de fluage, ce qui permet de constater une nette diminution des modules pressiométriques de décharge/recharge : $E_1 = 60$ MPa au premier cycle et $E_2 = 40$ MPa au second cycle, modules plus faibles que le module pressiométrique initial E_M qui est de 72 MPa. Au-delà de la pression de fluage, la marne se « détruit » progressivement pendant l'application des cycles de décharge/recharge.

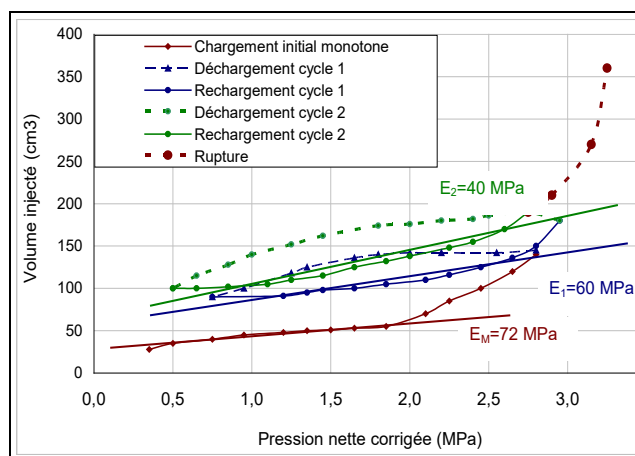


Figure 5.b : Essai à deux cycles

4. Conclusion

L'essai pressiométrique Louis Ménard revêt d'une importance capitale pour les projets de construction, du petit pavillon à l'Immeuble de Grande Hauteur (IGH) et aux grands viaducs, appelle à une « parole sage » : Pour bâtir des projets qui marquent, il faut :

- 1- Faire de bons essais dans le respect total et inconditionnel des règles et des normes en vigueur,

- 2- Analyser et vérifier dans le détail les courbes « automatisées » et les paramètres mesurés,
- 3- Sélectionner les valeurs les plus représentatives possibles : valeurs minimales et valeurs maximales, moyennes, écart-types, essais non valides (remaniés) et singuliers (points durs).
- 4- Choisir des jeux de paramètres balayant l'ensemble des mesures pour construire plusieurs coupes types (plusieurs « modèles de terrain »).

L'ingénieur doit vérifier sa validité surtout dans les sols meubles susceptibles de remaniement et sujet de gonflement qui affectent les trois paramètres de l'essai :

- Pression de fluage p_f ,
- Pression limite pressiométrique p_l ,
- Module de déformation pressiométrique : E_M

Remerciements

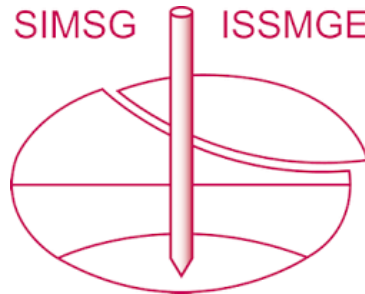
L'auteur adresse ses remerciements à ses deux collègues et amis, Michel Gambin² et Xavier Caquineau.

Références

- AFNOR. (2000), "Essai pressiométrique Ménard – Partie 1 : Essai sans cycle", NF P94-110-1, Paris, 42 pages, janvier 2000.
- AFNOR. (1999), "Essai pressiométrique Ménard – Partie 2 : Essai avec cycle", XP 94-1101-2, Paris, 8 pages, décembre 1999.
- Dhouib A., Caquineau X., Gambin M. (2002), "Variations des paramètres mesurés par le pressiomètre Ménard", Symposium International PARAM 2002, Editions Presses des Ponts, 2-3 septembre 2002
- Dhouib, A., (2016), "Géotechnique appliquée aux projets de construction", Presses des Ponts et Chaussées, Paris, 1041 pages, septembre 2016.
- Dhouib, A., (2021), "Géotechnique appliquée aux projets de construction", Presses des Ponts et Chaussées, Paris, Edition complétée, 1104 pages, juin 2021.
- Dhouib, A., (2022), "Applied Geotechnics for Construction Projects - Volume 1 : Soil and Experimental Data", ISTE / WILEY Edition, London/New York, 372 pages (2022), December 2022.

² Michel nous a quitté le 30 juin 2024 à ses 94 années.

INTERNATIONAL SOCIETY FOR SOIL MECHANICS AND GEOTECHNICAL ENGINEERING



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

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

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

The paper was published in the proceedings of the 8th International Symposium on Pressuremeters (ISP2025) and was edited by Wissem Frikha and Alexandre Lopes dos Santos. The conference was held from September 2nd to September 5th 2025 in Esch-sur-Alzette, Luxembourg.