

QUELS GAINS D'UNE MEILLEURE INTERPRETATION DE L'ESSAI PRESSIOMETRIQUE?

WHAT BENEFITS FROM A BETTER INTERPRETATION OF THE PRESSUREMETER TEST?

Romain GRANJON¹, Jacques MONNET²

¹ *Compagnie Nationale du Rhône, Lyon, France*

² *Gaiatech, Seyssinet Pariset, France*

RÉSUMÉ – Le présent article traite de l'apport de l'évaluation réaliste du mécanisme de gonflement de la sonde pressiométrique et de ses conséquences technico-économiques pour le maître d'œuvre / maître d'ouvrage. Cette nouvelle approche a permis dans le cadre des études de la PCH de Caderousse une optimisation conséquente des modules de palplanches utilisés en réévaluant de manière plus fine les caractéristiques du sol.

ABSTRACT – The present article deals with the contribution of the realistic evaluation of the inflation mechanism's pressuremeter probe and the technico-economical consequences for the project manager and the project owner. This new approach has allowed an optimization of the sheet pile modulus, by re-evaluating with more accuracy the soil parameters..

1. Introduction

L'essai pressiométrique développé par Ménard dans les années 50 a grandement contribué au développement de méthodes de calcul semi empiriques permettant d'accéder assez simplement à des lois de comportement des sols (contrainte – déformation) directement exploitables dans le dimensionnement des ouvrages du génie civil, qu'il s'agisse de fondations ou d'ouvrages de soutènement.

L'essai pressiométrique a acquis désormais une réputation mondiale qui n'est plus à démontrer. Le principe de l'essai consiste à considérer un mécanisme d'expansion purement cylindrique d'une sonde d'épaisseur négligeable gonflée au sein d'un forage préalablement exécuté. La réalisation de cet essai est encadrée par la norme (AFNOR, 2015), qui précise les modalités d'exécution et d'interprétation de l'essai pressiométrique. Cependant, l'interprétation de cet essai est encore perfectible, à la lumière des écarts de comportement constatés entre les mécanismes d'expansion théoriques et réels de la sonde pressiométrique (Monnet et al., 2022b).

Ces écarts conduisent à surévaluer les caractéristiques pressiométriques des terrains, plus particulièrement lors de l'utilisation d'une sonde à membrane épaisse ou d'un tube fendu. Cet état de fait conduit à nous interroger en tant que maître d'œuvre / maître d'ouvrage sur l'impact de ces écarts sur le dimensionnement de nos ouvrages.

Dans un contexte économique tendu et où la recherche de la limitation de l'empreinte humaine sur l'environnement devient essentielle, il est de notre ressort d'évaluer au plus juste le comportement physique réel des sols, de manière à évaluer au plus juste le coût financier et environnemental de nos projets. Cette démarche doit être menée sans dégrader les coefficients de sécurité inhérents aux incertitudes du dimensionnement d'un ouvrage.

2. Etat de l'art

Dans le domaine du Génie Civil, le dimensionnement des ouvrages est souvent réalisé à partir des essais pressiométriques:

- une première voie d'utilisation est de réaliser des corrélations entre les grandeurs mesurées au pressiomètre et les grandeurs nécessaires au dimensionnement (Baguelin et al., 1978), (Mair and Wood, 1987), (Clarke and Gambin, 1998). Ces méthodes utilisent les caractéristiques géotechniques du sol liées à l'essai pressiométrique que sont la pression limite Ménard p_{LM} et le module pressiométrique Ménard E_M . Le pressiomètre est largement utilisé et normalisé pour le dimensionnement des ouvrages de type fondations profondes (AFNOR, 2012) ou fondations superficielles (AFNOR, 2013). On sait maintenant que ces grandeurs (p_{LM} , E_M) ne sont pas des caractéristiques intrinsèques du sol et ne peuvent pas être introduites comme données dans un calcul géotechnique par Éléments Finis ou Différences Finies pour l'étude d'ouvrages de Génie Civil (murs de soutènement, tunnels, talus, remblais, déblais...). Ces moyens de calcul modernes nécessitent au minimum, la connaissance des caractéristiques mécaniques du sol, en élasticité (module de Young E et coefficient de Poisson ν) et en résistance (cohésion c et angle de frottement Φ).

- une seconde voie, encore au niveau de la recherche consiste à utiliser le pressiomètre pour trouver les caractéristiques intrinsèques du sol, soit à partir des mesures réalisées au pressiomètre, pour déterminer l'angle de frottement (Hughes et al., 1977), (Fahey and Carter, 1992), (Silvestri, 2001) ou la cohésion non drainée (Silvestri and Abou-Samra, 2012), (Wroth and Windle, 1977). Ces premières approches sont prometteuses sans permettre à ce stade de passer au dimensionnement des ouvrages réels. Notre approche se situe dans cet axe de recherche, mais en proposant de nouvelles corrections et interprétation à l'essai pour se passer des corrélations et arriver directement à la mesure des grandeurs géotechniques du sol. Ceci permet alors d'interpréter les essais en frottement (Monnet, 2012a) (Monnet, 2012b).

3. Les principaux points d'amélioration apportés à l'interprétation de l'essai pressiométrique

Les améliorations potentielles portent sur 3 points essentiels, qui n'interviennent pas dans la norme pressiométrique actuelle (AFNOR, 2015) et qui la complètent :

- Prise en compte de l'épaisseur (variable ou non) des membranes et de la lanterne éventuelle (Monnet et al., 2022b). L'essai pressiométrique selon la norme (AFNOR, 2015) ne tient pas compte de l'épaisseur des membranes de la sonde, bien que la pression réelle appliquée au sol soit significativement différente de celle exercée par le dispositif hydraulique sur l'intérieur de la sonde (Figure 1).

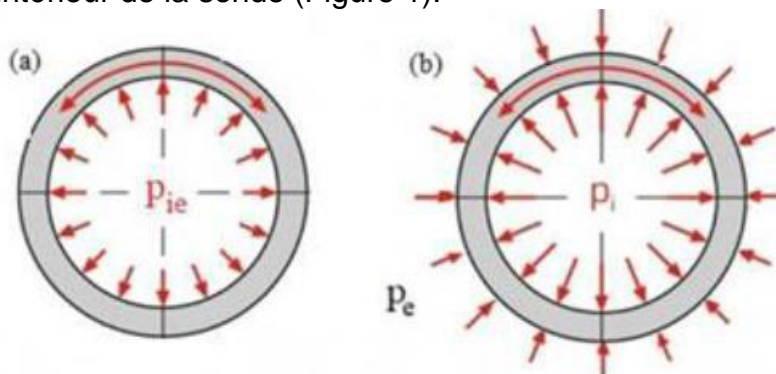


Figure 1 : Différence entre la pression extérieure à la sonde p_i et la pression réellement appliquée au sol p_e (Monnet et al.2022)

- Prise en compte de la déformée réelle de la sonde (Monnet et al., 2022a). Selon la norme (AFNOR, 2015), la sonde est considérée comme se déformant en cylindre, c'est-à-dire que la déformation est identique en tout point longitudinal du sol. Ainsi, la déformation aux extrémités de la sonde est identique à la déformation centrale. Cette hypothèse n'est

pas conforme à la réalité et on peut constater une déformation en ballon de rugby pour la sonde nue (Figure 2), en forme de console pour la sonde lanternée.

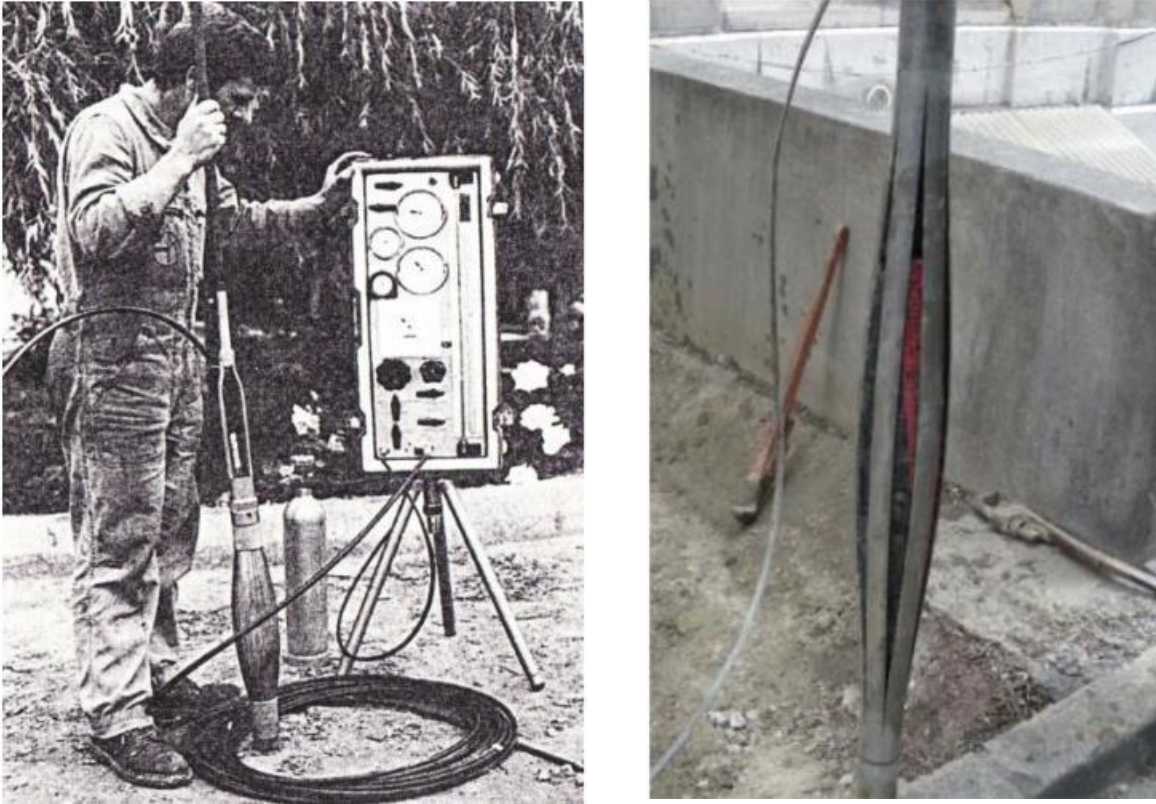


Figure 2 : Déformation de la sonde nue (a) et lanternée (b) en résistance propre (Monnet et al. 2022)

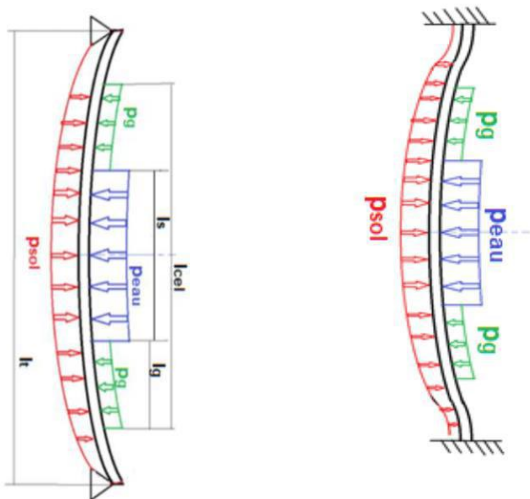


Figure 3 : Principe de la correction de membrane pour la sonde nue G (a) et lanternée (b) (Monnet et al. 2022)

Il est par conséquent opportun de tenir compte de la répartition des pressions internes amenées par la cellule de mesure gonflée à l'eau et par les cellules de garde gonflées à l'air, ainsi que de la réaction du sol à la déformation par un module de réaction élastique. Cette correction a été validée par une vérification à l'aide de calcul aux éléments finis (Monnet et al., 2022c).

- Détermination de la précision liée aux mesures et aux grandeurs pressiométriques comme le module pressiométrique et élastique et la pression limite (Monnet, 2021), (Monnet, 2020).

4. Application aux essais du PCH Caderousse

4.1. Les essais pressiométriques réalisés

CNR a fait réaliser une campagne de sondages pressiométriques visant à tester la compacité des formations alluvionnaires du Rhône, des graves sableuses denses. Ces

graves, situées sous une couche de limons de 2 à 3 m d'épaisseur, ont été recouvertes lors des aménagements de la concession du Rhône (bief de Caderousse dans le cas présent) par plusieurs mètres de remblais de tout venant issus des terrassements du canal d'aménée de l'aménagement. Ces alluvions reposent sur le substratum marneux Pliocène présent dans la région. Sept sondages pressiométriques ont été réalisés, avec des essais pressiométriques tous les mètres à partir de 2 mètres de profondeur et jusqu'à des profondeurs de 20 à 30 m selon les sondages. En tout, ce sont 54 essais pressiométriques qui ont été réalisés, au tube fendu compte tenu de la nature des sols.

Les caractéristiques pressiométriques représentatives d'une couche de sol ne sont que l'estimation moyenne d'une variable présentant déjà une dispersion et une variabilité spatiale significative, pour laquelle il convient d'estimer avec la meilleure fiabilité possible chacune des valeurs contribuant à l'évaluation de cette variable. Deux essais de chargement cycliques au pressiomètre (Figure 4 ; Figure 5) ont par ailleurs été réalisés au sein des alluvions grossières du Rhône, pour lesquels le rapport moyen E_e/E_M vaut 5.54 (Tableau 1).

Tableau 1 : Les essais pressiométriques cycliques réalisés dans les graves du Rhône

Test	Module Elastique E_e (kPa)	Modulus Pressiométrique E_M (kPa)	E_e / E_M
SP3Bis_18	254047	32997	7,69
SP7Bis_16	130027	35295	3,4
Moyenne			5,54

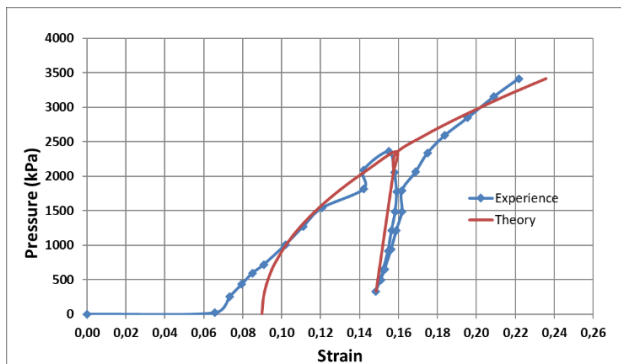


Figure 4 : Courbe pressiométrique corrigée de l'épaisseur de membrane - Essai SP3Bis - 18 m - Module pressiométrique $E_M = 33000$ KPa - Module élastique $E = 254000$ KPa - $\Phi = 40^\circ$

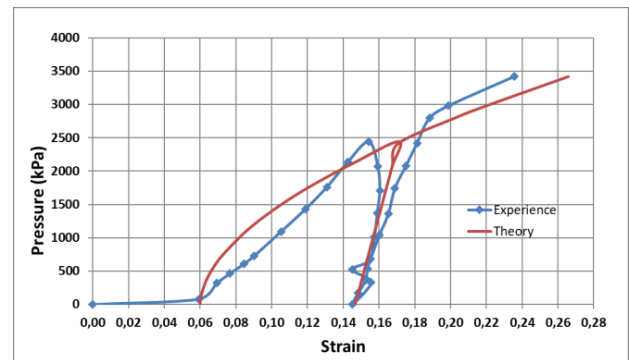


Figure 5 : Courbe pressiométrique corrigée de l'épaisseur de membrane - Essai SP7Bis - 16 m - Module pressiométrique $E_M = 35300$ KPa - Module élastique $E = 130000$ KPa - Frottement $\Phi = 43^\circ$

4.2. Résultats relatifs aux alluvions grossières du Rhône

Nous nous intéressons plus précisément aux alluvions sablo-graveleuses du Rhône. Les alluvions grossières du Rhône se présentent comme une formation complexe dans le détail (graves plus ou moins sableuses avec intercalations éventuelles de lentilles sableuses), tout en constituant une formation globalement homogène et grossière. La figure (Figure 6) représente le fuseau granulométrique moyen des alluvions du tiers central du Rhône.

4.2.1. Résultats relatifs aux alluvions grossières du Rhône

Les mesures pressiométriques sont réalisées soit par lecture visuelle des grandeurs, soit par saisie automatique par des appareils adaptés (LIM, Geomatech, ...). La précision des résultats pressiométriques (module pressiométrique, pression limite) dépend de la précision des mesures (Monnet 2021). A titre indicatif, la précision des résultats

pressiométriques sur l'un des chantiers en cours d'études par CNR (PCH de Caderousse) a permis d'évaluer cette précision de mesure à une erreur moyenne de 14% sur les

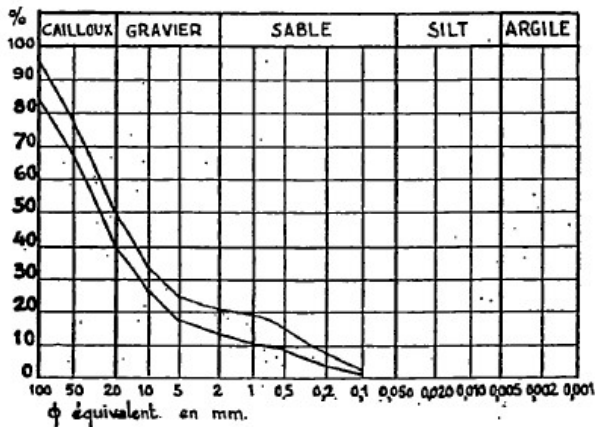


Figure 6 : fuseau granulométrique moyen des alluvions grossières du Tiers Central du Rhône

modules corrigés et de 4% sur les modules normalisés pour une lecture de précision de 0.1 cm^3 , ce qui s'avère être une précision acceptable. La compacité générale de cette formation est généralement moyenne à forte. D'un point de vue mécanique, les différents essais (essais de cisaillement en gros diamètre, ...) réalisés le long de la vallée rendent compte de matériaux avec des angles de frottement élevés, compris entre 35° et 40° , pour une cohésion nulle. Compte tenu de la granularité des matériaux, les bureaux d'études géotechniques emploient à raison la sonde

à tube fendu. Les caractéristiques pressiométriques obtenues sont généralement élevées, voire très élevées et il n'est pas rare de ne pas atteindre le fluage de l'essai au sein de cette formation. L'analyse des essais pressiométriques dépouillés selon l'approche normative AFNOR 2015 et celle tenant compte du comportement physique réel de la sonde (approche « optimisée », (Monnet et al. 2022b)) amènent à constater des écarts très significatifs sur les différents paramètres pressiométriques :

4.2.2. Analyse des pressions limites

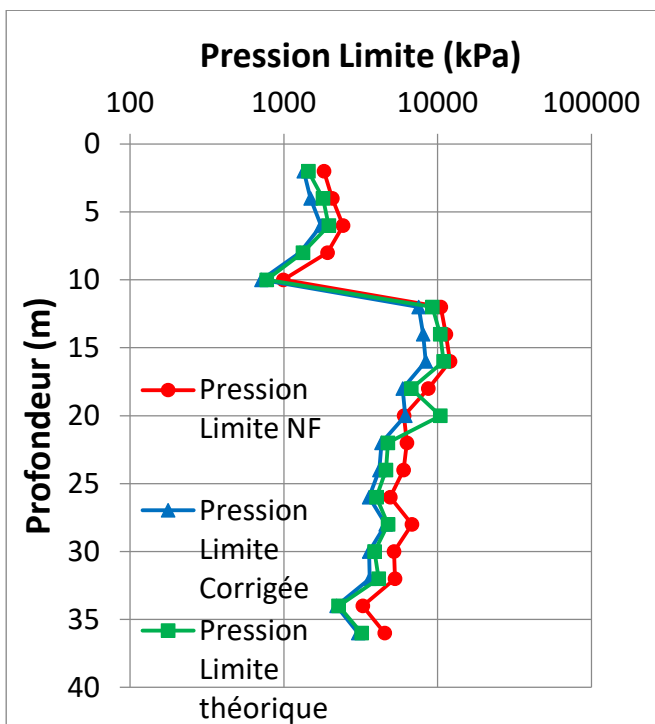


Figure 7 : Profil pressiométrique SP2bis - proximité importante des pressions limites corrigées avec la pression limite théorique et ce en regard de l'approche préconisée par la norme NF qui est un maximum

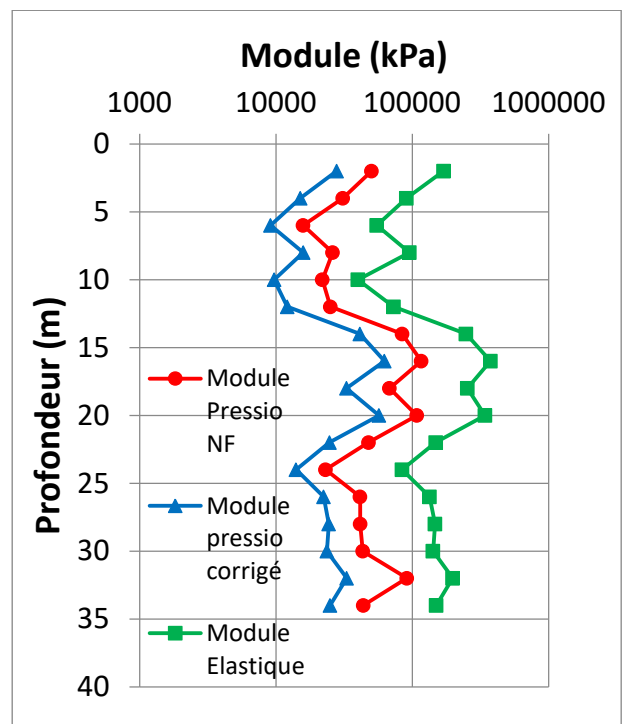


Figure 8 : Profil pressiométrique SP2bis - illustration de la différence importante entre les modules pressiométriques corrigés et calculés selon la norme NF; on remarque un module élastique plus fort que le module pressiométrique

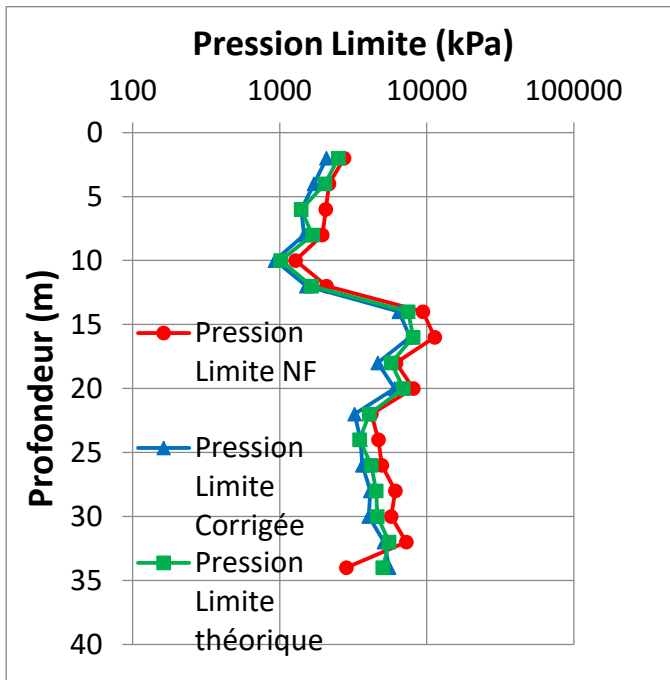


Figure 9 : Profil pressiométrique SP3bis - proximité importante des pressions limites corrigées avec la pression limite théorique et ce en regard de l'approche préconisée par la norme NF qui est un maximum

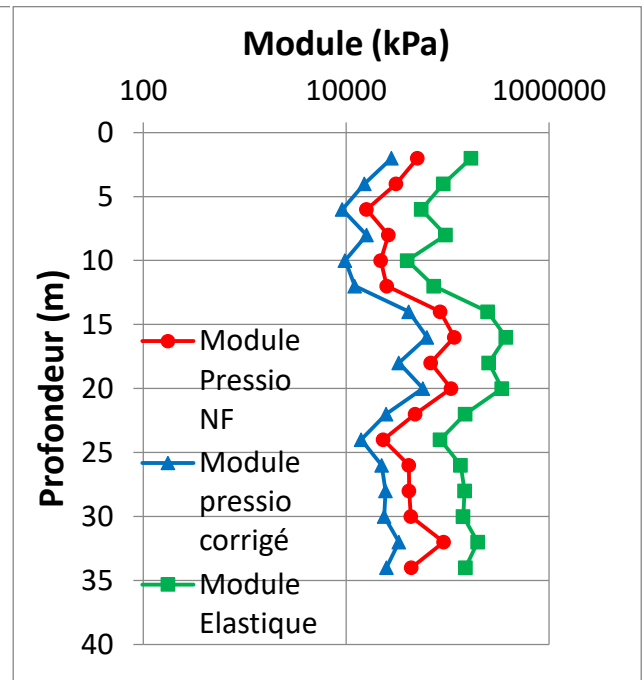


Figure 10 : Profil pressiométrique SP3bis - illustration de la différence importante entre les modules pressiométriques corrigés et calculés selon la norme NF; on remarque un module élastique plus fort que le module pressiométrique

On remarque que les pressions limites théoriques sont très proches des pressions limites corrigées de l'effet membrane (Figure 7, Figure 9) ce qui est intéressant pour le contrôle des résultats. La pression limite normalisée est toujours supérieure.

4.2.3. Analyse des modules pressiométriques

Dans le cas de l'approche « optimisée » de (Monnet et al. 2022b), les résultats corrigés sont presque identiques à ceux que l'on obtiendrait à la sonde nue dans le même sol (Figure 8, Figure 10). Les écarts des valeurs des modules pressiométriques entre l'approche NF (1) et celle dite « optimisée » sont très significatifs, un facteur de 2 environ séparant ainsi les résultats moyens des deux méthodes (Tableau 2). Le module élastique est toujours plus fort que le module pressiométrique.

$$E_M = 2 \cdot (1 + \nu) \cdot \left[V_c + \frac{(V_1 + V_2)}{2} \right] \cdot \frac{(p_2 - p_1)}{(V_2 - V_1)} \quad (1)$$

Tableau 2 : Comparaison des modules du sol selon les deux méthodes

Sol	E_M Standard (MPa)	E_M optimisé (MPa)
Grave sableuse	123.9	60.8
Marne du Pliocene	44.4	21.4

Tableau 3 : Relation entre les modules pressiométriques et les procédés de soutènement

Module pressiométrique	Procédé de battage
$E_M < 40 - 50$ MPa	Battage sans difficultés particulières
$50 \text{ MPa} < E_M < 70$ MPa	Battage difficile, refus localisé envisageable
$70 \text{ MPa} < E_M < 100$ MPa	Battage très difficile, avec possibilités de refus étendus, préforage généralisé requis
$E_M > 100$ MPa	Battage impossible

5. Conséquences pour le Maître d'Ouvrage

Ces écarts très significatifs conduisent à envisager des choix très différents de conception pour les soutènements : si l'on peut encore envisager de battre des rideaux de forte inertie dans des graves sableuses denses pour des modules pressiométriques de 60 MPa (au prix d'une difficulté certaine et éventuellement de préforages), il apparaît illusoire d'envisager une solution de ce type avec des modules pressiométriques de 123.9 MPa. A titre indicatif, en l'absence d'essais de battage, CNR retient souvent dans ces opérations de battage dans les sols granulaires les points de repère empirique suivants :

Dans le cas du projet de Caderousse, on passe donc selon l'analyse considérée des essais d'une exclusion totale d'un soutènement de type palplanche à la possibilité de réaliser ce même type d'ouvrage moyennant quelques compléments de préforage !

On notera qu'il existe par ailleurs une différence de coût significative entre une solution de type palplanche et une solution de type paroi moulée qui pourrait être envisagée dans des terrains à forte compacité. Hors installation de chantier (le prix des installations de paroi s'avérant vite très onéreux), le ratio de coût au mètre carré de soutènement entre une paroi moulée et une paroi en palplanches est de l'ordre de 2.5 à 4 pour les techniques de réalisation et profondeurs conventionnelles.

Le cours actuel élevé de l'acier et l'impact carbone important associé à la fabrication des rideaux de palplanches devraient nous inciter à légitimer la pertinence de l'interprétation de l'essai pressiométriques. Le poids d'acier au ml de palplanche évolue de manière très significative en fonction du module retenu.

Les écarts de coût et de complexité de réalisation ne sont pas du tout les mêmes entre palplanches et parois moulées. On ne peut se satisfaire d'attendre les prémices de la phase chantier pour faire réaliser un coûteux essai de battage préalable avant de changer de direction sur un choix de conception structurant pour l'ouvrage.

De la même manière, peut-on raisonnablement se satisfaire de connaître un paramètre aussi important que le module de déformation d'un sol à 50 % près ? Si pour certaines applications courantes du génie civil, de tels écarts d'estimations ne prêtent pas à conséquences, qu'en serait-il pour des ouvrages très fortement chargés et/ ou requérant des tolérances de déformations très exigeantes ?

À la vue des enjeux d'aujourd'hui, il apparaît important pour CNR que l'interprétation de l'essai pressiométrique puisse évoluer de manière à coller au plus près du comportement réel de l'essai en expansion pressiométrique, qui a grandement contribué à l'essor de la géotechnique moderne. Avec pour objectifs vertueux de fiabiliser nombres de projets dans des contextes géologiques géotechniques difficiles et de construire « au plus juste » des besoins nécessaires pour le projet, tout en minimisant le besoin en ressources et l'impact du projet.

Les points importants de cette interprétation optimisée portent sur :

- Une grande fiabilité de l'interprétation validée par le calcul aux éléments finis (Monnet et al. 2022b),
- Des résultats (E_M , E_e , p_{LM} , Φ) pour lesquels la précision est calculée et connue (Monnet 2021)
- La détermination directe des caractéristiques de frottement du sol, sans passer par des corrélations approximatives (Monnet 2012a) (Monnet 2012b)
- Une prise en compte de l'épaisseur de la membrane séparant le fluide de chargement interne à la sonde et du sol externe à la sonde (Monnet et al. 2022b)
- Une prise en compte de la déformée réelle de la sonde (Monnet et al. 2022b)
- Une meilleure adaptation de l'ouvrage au sol environnant et une économie significative sur le projet
- Une amélioration de la sécurité en service

6. Conclusion

En conclusion nous avons présenté de nouvelles corrections et interprétations de l'essai pressiométrique dans les graves du Rhône pour le PCH de Caderousse. Cette analyse a permis de justifier de caractéristiques du sol plus favorables à la construction et menant à une économie extrêmement importante sur le cout des ouvrages, sans nuire à la sécurité.

7. Bibliographie

- AFNOR, 2015. NF EN ISO 22476-4 Essai pressiométrique Ménard. AFNOR, Reconnaissance et essais géotechniques.
- AFNOR, 2013. NF P94-261 Justification des ouvrages géotechniques - Normes d'application de l'Eurocode 7 - Fondations superficielles - Calcul géotechnique.
- AFNOR, 2012. NF P94-262 Justification des ouvrages géotechniques - Normes d'application nationale de l'Eurocode 7 - Fondations profondes.
- Baguelin, F., Jezequel, J.F., Shields, D.H., 1978. The pressuremeter and foundation engineering,. Trans Tech Publications, Aedermannsdorf, Switzerland.
- Clarke, B.G., Gambin, M., 1998. Pressuremeter testing in onshore ground investigation. ISC 98 1–34.
- Fahey, M., Carter, J.P., 1992. A finite element study of the pressuremeter test in sand using a nonlinear elastic plastic model. Canadian Geot. Journal 30, 348–362.
- Hughes, J., Wroth, C.P., Windle, D., 1977. Pressuremeter tests in sands. Geotechnique 24, 455–477.
- Mair, R.J., Wood, D.M., 1987. Pressuremeter testing: Methods and interpretation, in: Report : In Situ Testing. Butterworths, London.
- Monnet, J., 2021. Expected precision of the pressuremeter results, in: 6th International Conference on Geotechnical and Geophysical site characterisation. Presented at the ISC6, Budapest, p. p.1-10.
- Monnet, J., 2020. Précision des résultats de l'essai pressiométrique, in: 10ème Journées Nationales de Géotechnique et de Géologie de l'Ingénieur. Presented at the JNGG2020, Lyon, p. p.1-8.
- Monnet, J., 2012a. Elasto-plastic analysis of the pressuremeter test in granular soil – part I: theory: European Journal of Environmental and Civil Engineering 16, 699–714.
- Monnet, J., 2012b. Elasto-plastic analysis of the pressuremeter test in granular soil part 2: numerical study. European Journal of Environmental and Civil Engineering 16, 715–729.
- Monnet, J., Boutonnier, L., Mahmutovic, D., 2022a. Proposition d'une correction de membrane pour le pressiomètre, in: 11ème Journées Nationales de Géotechnique et de Géologie de l'Ingénieur. Presented at the JNGG2022, Lyon, p. p.1-8.
- Monnet, J., Boutonnier, L., Mahmutovic, D., Ouedraogo, M., 2022b. Improved interpretation of the pressuremeter test by taking into account the deformation of the membrane. European Journal of Environmental and Civil Engineering.
- Monnet, J., Boutonnier, L., Mahmutovic, D., Ouedraogo, M., 2022c. Correction de membrane pour le pressiomètre, in: Proceedings of the 20th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. Sydney.
- Silvestri, V., 2001. Interpretation of pressuremeter tests in sands. Canadian Geotechnical Journal 38, 1155–1165.
- Silvestri, V., Abou-Samra, G., 2012. Analytical solution for undrained plane strain expansion of a cylindrical cavity in modified Cam Clay. Geomechanics and Engineering 19–37.
- Wroth, C.P., Windle, D., 1977. Use of Self boring pressuremeter to determine the ubdrained properties of clay. Ground Engineering 37–45.