

PROCÉDURE POUR LA DETERMINATION DU COEFFICIENT DES TERRES AU REPOS K_0 PAR LES ESSAIS EN PLACE

PROCEDURE FOR DERIVING THE COEFFICIENT OF EARTH PRESSURE AT REST K_0 BY IN SITU TESTS

Philippe REIFFSTECK¹, Jean BENOIT², Julien HABERT³, Panagiotis Georgios KARAGIANNOPoulos^{4,1}, Gilles DESANNEAUX⁵, Sonia FANELLI¹

1, IFSTTAR, Cité Descartes - 14-20 boulevard Newton, 77447 Champs-sur-Marne - Marne-la-Vallée, philippe.reiffsteck@ifsttar.fr

2, UNH, Kingsbury Hall, Durham, New Hampshire, EUA

3, CEREMA DirTer Nord-Picardie, Responsable d'unité MSF, France

4, Jean LUTZ SA, rue de Forbeth, Jurançon, France

5, CEREMA DirTer Ouest, Saint Brieuc, France

RESUME : Cette communication présente les moyens et les procédures utilisables pour évaluer le coefficient des terres au repos K_0 . Quelques exemples d'application sur des sites réels ou expérimentaux, mettent en évidence les difficultés de cette mesure mais aussi la disponibilité relativement immédiate de cette information lors de l'essai pressiométrique.

ABSTRACT: This paper presents the methods and procedures that can be used to evaluate the coefficient of earth pressure at rest K_0 . Some application examples on real or experimental sites highlight the difficulties of this measure but also the relatively immediate availability of this information from the pressuremeter test.

1 Introduction

La connaissance du coefficient des terres au repos K_0 à l'aide de mesures en place peut être très utile à la modélisation des ouvrages. Il intervient en effet lors de l'évaluation de la stabilité des pentes, des poussées ou de soulèvement lors de travaux d'excavation. Des résultats d'essais collectés depuis de nombreuses années avec différents méthodes par l'IFSTTAR et à l'Université du New Hampshire (UNH) sur différents sites français et étrangers sont présentés. On présentera notamment des essais réalisés à l'aide du pressiomètre autoforeur, du pressiomètre Ménard et du dilatomètre Marchetti. On insistera sur les pistes suivies dans le cadre du projet ARSCOP dédié au pressiomètre. Les résultats de ces essais sont présentés et commentés.

2 Contrainte horizontale en place et coefficient de pression des terres au repos

La détermination de la contrainte horizontale en place σ_{ho} a été un objectif affirmé lors du développement des appareillages d'essai in situ. Toutefois, cette mesure est difficile même avec les essais spécifiquement adaptés à celle-ci. Ce paramètre peut être mesuré par la plupart des essais d'expansion mis en place sans remaniement. L'appareil le mieux adapté pour déterminer σ_{ho} est le pressiomètre autoforeur (SBPMT), qui minimise le remaniement lors de sa mise en place (Benoit et Lutenegger, 1992 ; O'Neill, 2000 ; Cransac et al., 2005) (Figure 1). Le coefficient K_0 est un paramètre qui n'est pas intrinsèque au sol mais qui est lié à l'histoire de celui-ci et à sa nature. Il est intimement lié à la détermination de σ_{ho} . Sa définition est

$$K_0 = \frac{\sigma'_{ho}}{\sigma'_{vo}} = \frac{\sigma_{ho} - u_0}{\sigma_{vo} - u_0} \quad (1)$$

Bien sûr, la mesure de la pression interstitielle au niveau de l'essai est un plus pour avoir une évaluation fiable du coefficient K_0 car en son absence une estimation précise par l'analyse de la piézométrie est impérative.

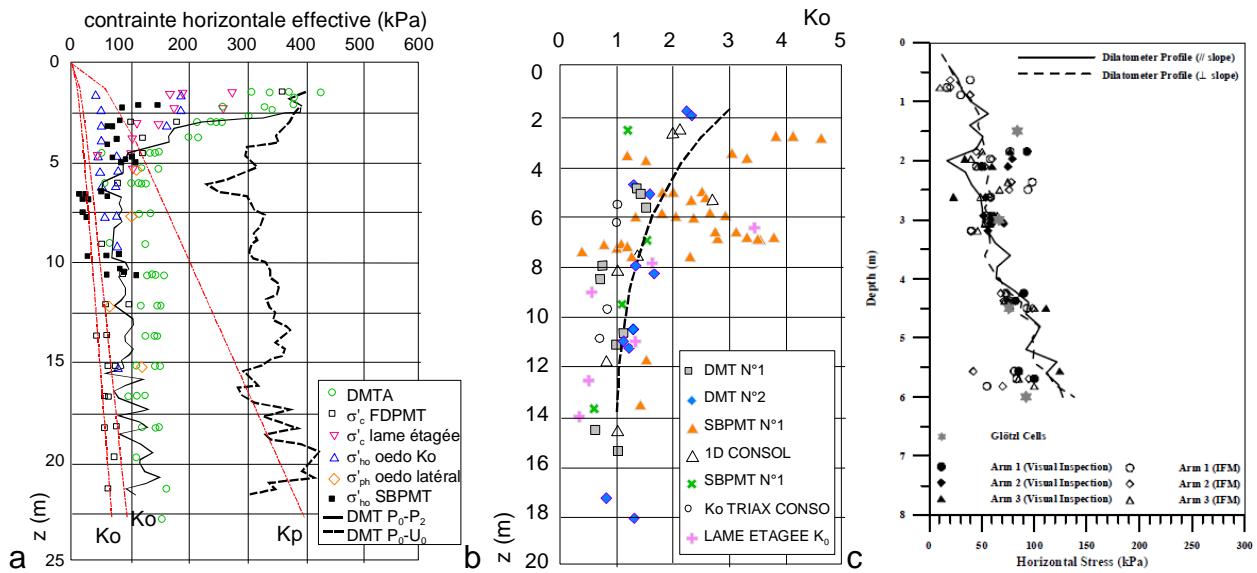


Figure 1. (a) σ'_{ho} obtenu par différents essais dans des argiles (d'après Benoît et Lutenegger, 1992) (b) K_0 obtenu par différents essais dans des argiles (d'après O'Neill, 2000) (c) σ'_{ho} obtenu dans une pente argileuse par différents essais (d'après Cransac et al., 2005)

L'estimation, par les appareils dont la mise en place est réalisée par refoulement est fonction de l'ampleur de celui-ci. Ces essais comme le dilatomètre plat Marchetti (DMT), la lame étagée K_0 et le capteur de pression foncé (même de très faible épaisseur) ont tendance à surestimer σ'_{ho} . Ainsi, le pressio-pénétromètre (FDPMT) du fait du fort refoulement n'est pas recommandée. L'essai de fracturation hydraulique développé spécifiquement est toutefois peu utilisé. Une compilation des corrélations disponibles a été réalisée par Lunne et al. (1984) et Benoît et Lutenegger (1992) dans leurs rapports généraux.

Les essais réalisés dans un forage préalable comme le pressiomètre Ménard (PMT), que nous n'avons pas listés précédemment, occupent une position à part. En théorie aptes à la mesure de la contrainte horizontale en place, ils ne sont pas utilisés et cela pour plusieurs raisons. D'une part, ils sont tributaires de la qualité du forage que nous sommes à l'heure actuelle dans l'impossibilité d'évaluer quantitativement et d'autre part la méthodologie de détermination du point caractéristique de cet état de contrainte sur la courbe reste méconnue et pour les moins entreprenants pas normalisée.

3 Détermination avec le pressiomètre Ménard

Briaud propose dans son ouvrage "The pressuremeter" d'obtenir une valeur du coefficient de pression terrestre au repos, K_0 à partir du début de la courbe pressiométrique sans modifier le protocole de chargement (Briaud, 1992). Il décrit ainsi ce qui se passe au niveau des parois du forage :

"Avant de réaliser le trou de forage, la contrainte horizontale est la contrainte horizontale au repos σ'_{ho} . Lorsque le forage est creusé par l'outil, la paroi du trou se déplace vers l'intérieur et la contrainte horizontale diminue. (...) Après l'insertion de la sonde et lorsque la sonde est gonflée par petits incrément, la paroi du trou de forage est repoussée dans sa position d'origine, puis au-delà. Lors de cette phase, la contrainte horizontale augmente et passe par un niveau spécial de pression correspondant à la pression horizontale au repos σ'_{ho} . On propose que σ'_{ho} se trouve sur la première partie de la courbe pressiométrique au point de courbure maximale (point A sur la Figure 2). Avant le point A, le sol est recomprimé, après le point A, le sol est sollicité dans le comportement vierge. La détermination du point A est relativement facile si le forage est correctement

préparé et est difficile si les parois du trou de forage sont perturbées par le processus de forage.

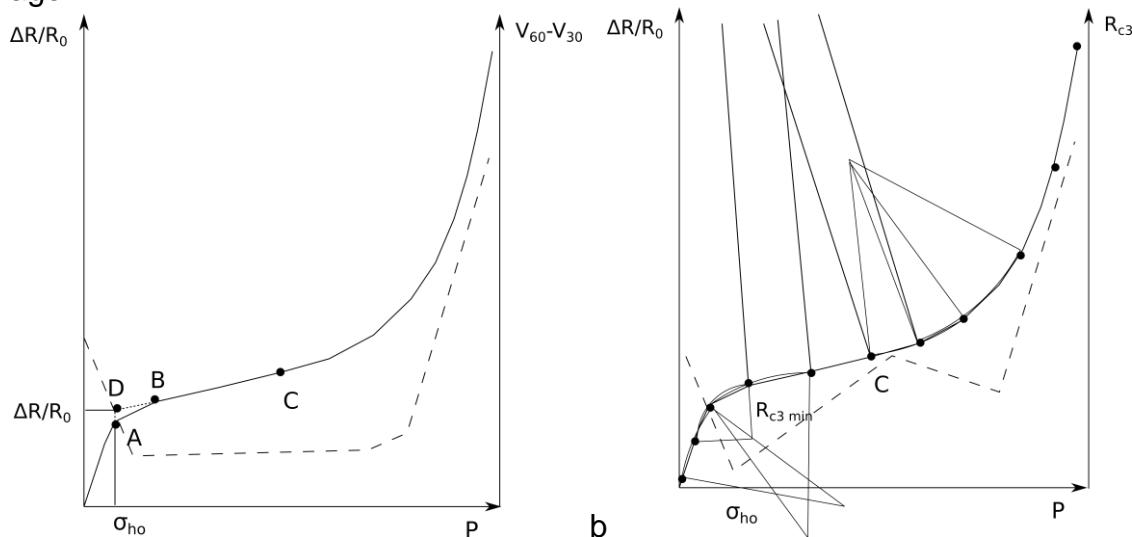


Figure 2. (a) Méthode pour obtenir la pression au repos (adapté de Briaud, 1992) (b) méthode du rayon de courbure

Avec un forage correctement préparé, la transition entre la re-compression et le comportement vierge est nette ; avec un forage perturbé, cette transition est progressive et conduit à un début de courbe bien arrondi à partir duquel il est difficile d'obtenir un point de courbure maximum. Une façon d'accentuer cette courbure et de rendre plus facile la détermination de A, le point de courbure maximum, est de tracer les données dans un plan semi-logarithmique pression en fonction de $\log(\Delta R/R_0)$. La pression correspondant au point A est σ_{ho} , la contrainte totale horizontale au repos. (...) Les valeurs de K_0 obtenues de cette manière se sont avérées raisonnables et cohérentes avec d'autres mesures telles que SBPMT (Gan et Briaud, 1987)."

On note qu'ici Briaud considère un forage à sec. Dans le cas général, le fluide de forage limitera la diminution de la contrainte horizontale.

Le coefficient K_0 est donc obtenu par localisation du point de collage de la gaine au sol. La pression de contact est mesurée avec peu de points et le remaniement lié au creusement de la cavité peut limiter la précision de cette évaluation. Plusieurs méthodes alternatives peuvent être envisagées pour automatiser avec un tableur cette détermination, et notamment :

- utiliser la valeur minimum de $V_{60s} - V_{30s}$ qui doit correspondre au moment où la sonde rencontre la paroi, le plateau de cette courbe correspondant à la phase dite "pseudo-élastique" ;
- déterminer le module tangent maximal (calculé pour chaque segment) car lorsque la sonde gonfle dans le fluide de forage ou l'air, la rigidité est faible et proche de celle observée lors de l'essai de résistance propre et maximale lors des premiers incrémentés de chargement de la paroi ;
- localiser le rayon de courbure R minimum qui correspond à ce que Briaud qualifie de point de courbure maximum. On peut calculer, de manière simple, ce rayon à partir d'un triplé de point de manière glissante sur la courbe avec :

$$R_{c3} = \frac{\sqrt{((x_2-x_1)^2+(y_2-y_1)^2)((x_2-x_3)^2+(y_2-y_3)^2)((x_3-x_1)^2+(y_3-y_1)^2)}}{2|x_1y_2+x_2y_3+x_3y_1-x_1y_3-x_2y_1-x_3y_2|}$$

Une alternative intéressante pouvant être utilisée pour pallier à la variabilité de la courbe et de calculer ces rayons sur la double hyperbole calée sur la courbe corrigée.

Cette pression de contact devrait correspondre à une valeur proche de σ_{h0} . L'essai étant considéré comme rapide ($V=0,7 \text{ cm}^3/\text{s}$), cette pression est diminuée de la pression interstitielle et normalisée par la contrainte verticale en place effective afin d'obtenir K_0 . D'autres méthodes basées sur un processus itératif de détermination de la contrainte horizontale sur un plan pression– $\ln(\Delta V/V)$ sont aussi efficaces (Marsland et Randolph, 1977 ; Hawkins et al., 1990).

4 Application à l'argile verte du bassin parisien

Les essais utilisés proviennent de 3 sondages qui ont été réalisés par deux prestataires de manière indépendante à notre étude (Saussac et al., 2018). La Figure 3 montre un exemple d'application de ces trois méthodes. On observe que pour certains essais au moins une de ces méthodes est mise en défaut. On peut lister :

- pour la vitesse de déformation volumique, certains essais ont une vitesse continument décroissante, ne permettant pas de déterminer un minima. Le comportement est sans doute lié au remaniement suffisamment important de la paroi de forage ;
- pour le module, certains essais fournissent un pic net, ce qui n'est pas toujours observé (cas des sols mous ou remaniés) ;
- pour le rayon de courbure, il arrive d'observer des valeurs minimales au niveau de la pression de fluage, la valeur conservée est la première.

Une combinaison de ces méthodes est donc privilégiée.

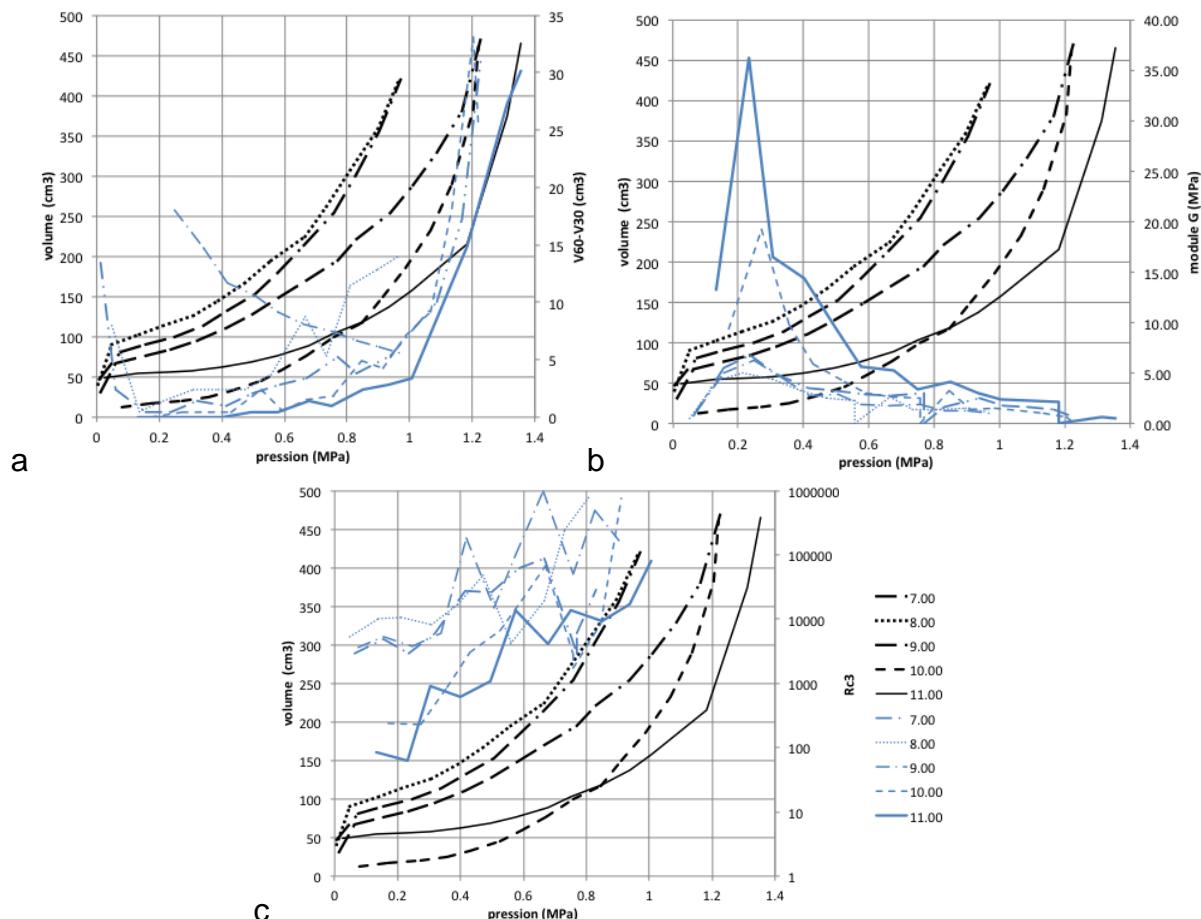


Figure 3. Exemple d'application sur des essais pressiométriques réalisés par un prestataire sur l'argile verte méthodes (a) de la vitesse (b) du module (c) du rayon de courbure

La Figure 4.a compare les trois méthodes. On observe qu'au-delà des variations inter et intra-forages, une tendance nette est lisible avec une diminution de 2 à 0,7 en partie supérieure puis une constance plus profondément. Pour un des prestataires, le critère de vitesse est mis en défaut (symboles creux) alors qu'il est correct pour l'autre (symboles pleins).

Il faut noter que le caractère gonflant de l'horizon d'argile verte a pu être déclenché par le fluide de forage et introduit une variabilité d'amplitude non connue.

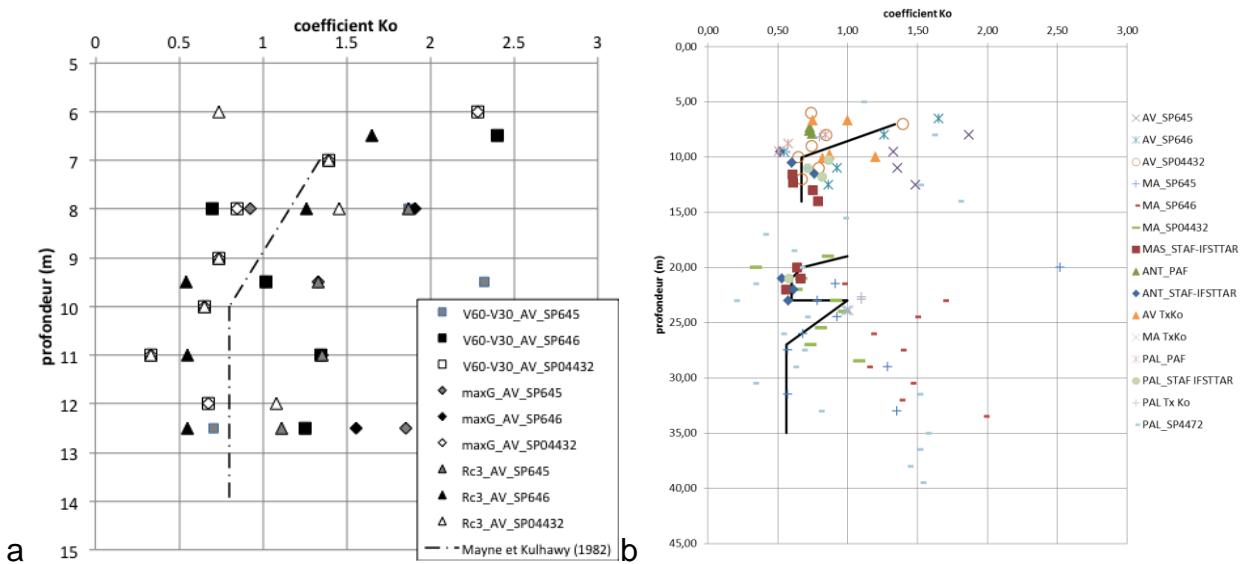


Figure 4. Comparaison des profils obtenus

Cette technique d'analyse étant appliquée à des essais réalisés plus pour obtenir la phase pseudo élastique et plastique (E_M et p_l), une dispersion non négligeable est observée (de l'ordre de grandeur de celle obtenue pour la pression limite et le module), mais des tendances nettes apparaissent quand même. La dispersion devrait diminuer une fois qu'un nombre suffisant de points sera défini dans cette phase initiale de l'expansion par un mode opératoire adapté.

La Figure 4.b superpose la méthode basée sur le pressiomètre Ménard aux résultats d'essais au pressiomètre autoforeur (PAF) et avec la méthode du tube fendu avec enlèvement de matière (TFEM), parfois confondue avec une méthode d'autoforage, de marque STAF modifiée par l'IFSTTAR ainsi que des résultats d'essais de laboratoire de type triaxiaux K_0 . Le protocole d'essai avec les PAF et TFEM est celui de la norme NF EN ISO 22475-6 du pressiomètre autoforeur. La dispersion des K_0 déduits de ces techniques est bien sûr plus faible que celle obtenue pour les K_0 calculés à partir des essais pressiométrique de production.

La corrélation de Mayne et Kulhawy (1982) se place au milieu du nuage de points.

La Figure 5 compare les prédictions sur un exemple d'un site expérimental des laboratoires des Ponts et Chaussées. Les profils des 3 sondages réalisés à Merville par les LPC montrent la variabilité propre à ces essais au niveau de la pression limite et du module Ménard. Sur la figure ont été superposées les données des essais au pressiomètre autoforeur utilisées comme référence dans l'article d'Henri Josseaume sur l'argile des Flandres et jugées par l'auteur comme pessimistes à 5 et 8 m (Josseaume, 1998). Une bonne concordance est observée. On retrouve la localisation de la zone de transition des limons aux argiles des Flandres.

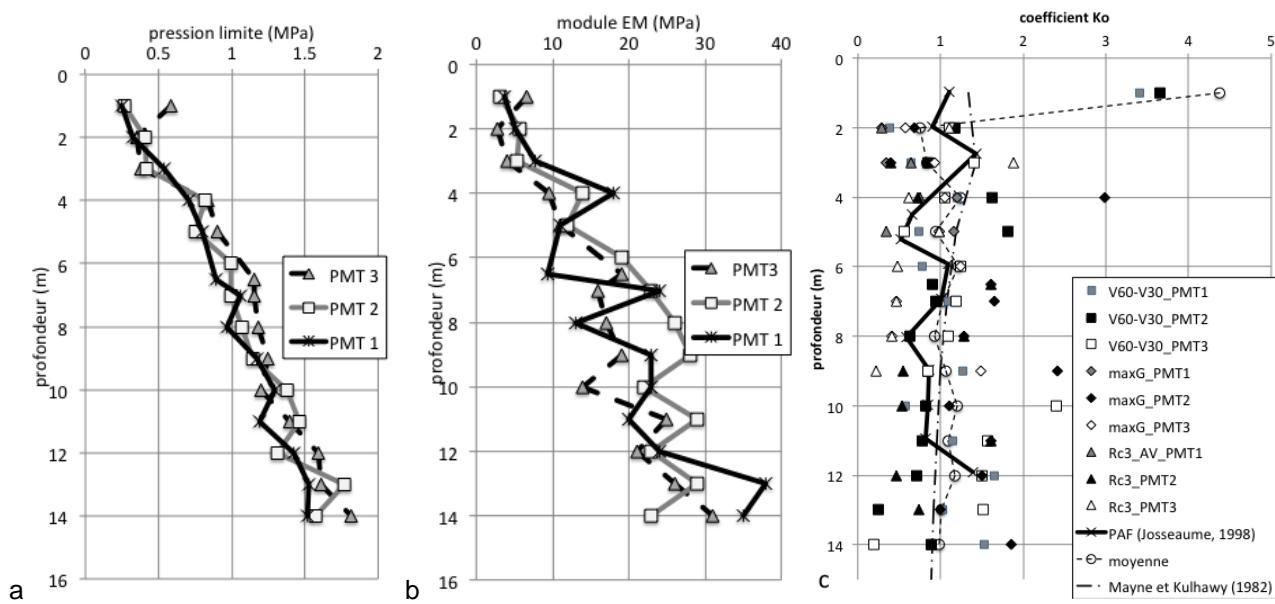


Figure 5. Comparaison des profils obtenus pour le site de Merville

5 Essais à Dover, New Hampshire

Dans le cadre de la construction d'un remblai d'une bretelle autoroutière pour les services de l'état du New Hampshire (NHDOT), l'UNH a réalisé une reconnaissance du sol compressible support de cette infrastructure. L'IFSTTAR est venu réaliser en 2017 plusieurs sondages pressiométriques avec l'UNH et Jean Lutz (Figure 6). Ici le chargement est réalisé en conformité avec le projet de norme NF EN ISO 22476-6.

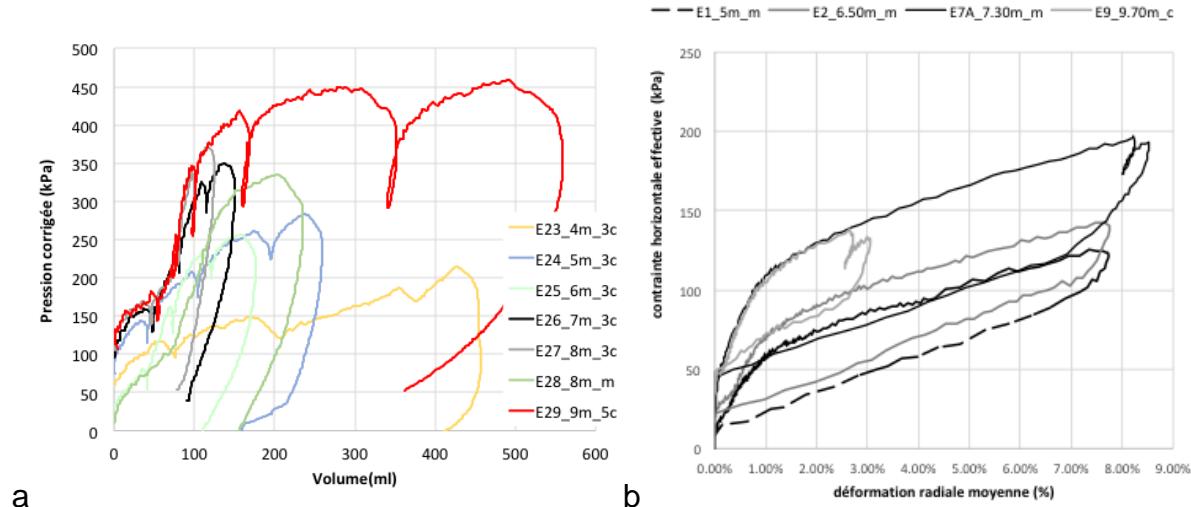


Figure 6. Courbes d'essais pressiométriques préforés et autoforés obtenues sur le site de Dover

La Figure 7c montre la bonne cohérence entre les différentes techniques pour le sol compressible (vase) testée. Le soin apporté à ces essais réalisés spécifiquement abouti à une dispersion moindre. La difficulté technique plus faible (faible profondeur) et la réalisation des forage pour le pressiomètre Ménard avec la tarière à main sont sans doute à l'origine de ce constat.

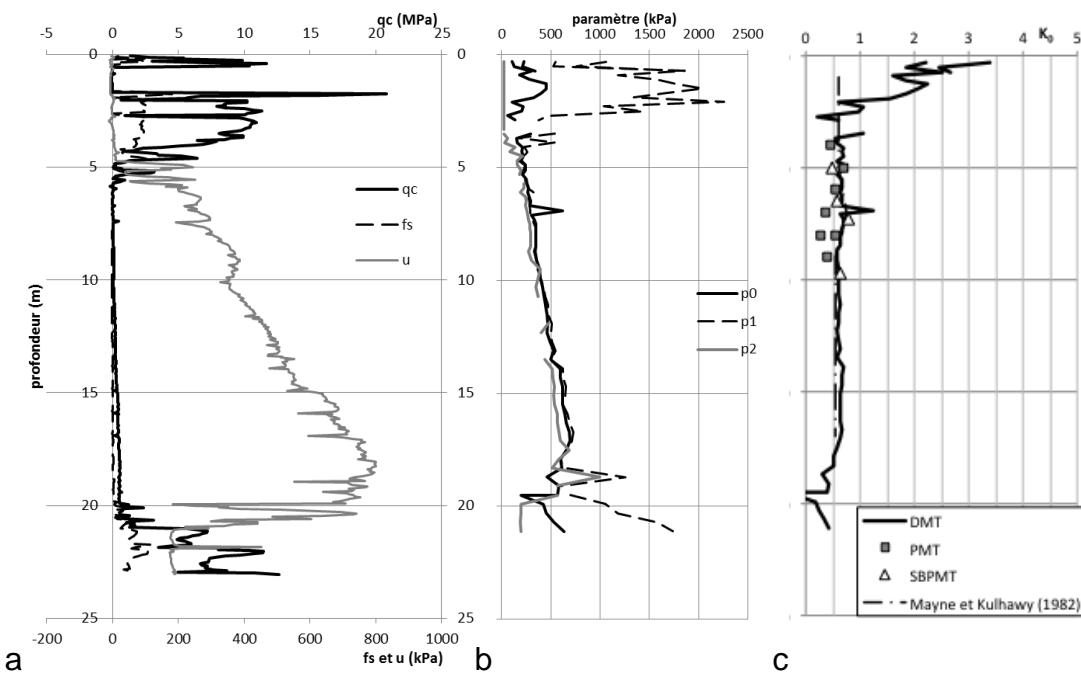


Figure 7. Comparaison des profils CPT, DMT et K_0 obtenus pour le site de Dover, NH

6 Conclusion

Cette communication a montré qu'il est possible de déterminer la contrainte horizontale en place et par conséquent le coefficient des terres au repos K_0 de manière simple avec le pressiomètre Ménard. Il est nécessaire pour améliorer la précision de réaliser plus de point lors de la montée en pression par paliers et bien sûr d'avoir un forage de bonne qualité. Cette solution simple (quois qu'en pense certains "praticiens" qui sont sans doute plus des utilisateurs de résultats) impose de s'affranchir du dogme de la norme, ce qui n'est pas évident face à un certain conservatisme de notre métier.

La dispersion observée n'est pas plus élevée que celle mise en évidence lors de campagne menées dans un objectif de recherche (Figure 1) ou celle acceptées par les maîtrise d'œuvre sur les profils pressiométriques utilisées lors de la conception des ouvrages. Mais il reste peut-être plus facile d'estimer ce paramètre pour un maître d'œuvre que de justifier la dispersion.

La méthode TFEM combinée avec le programme de chargement du pressiomètre autoforeur peut être une voie alternative intéressante. Les pistes proposées ici font l'objet de fiches de recherche du projet national ARSCOP.

7 Remerciements

Ce projet a été réalisé dans le cadre du programme de recherche collaboratif Egide de l'IFSTTAR et du Cerema ainsi que du Projet National ARSCOP. Un support important a été apporté par la société Jean Lutz pour les essais réalisés avec l'UNH.

8 Références bibliographiques

- Briaud, J.-L (1992) The pressuremeter, Balkema Eds., 322 pages
 Benoît J., Lutnenegger A.J., (1992) Determining lateral stress in soft clays, Predictive soil mechanics, Proceedings of the Wroth Memorial Symposium, Oxford, Housley and Schofield Eds., 135-155

- Cransac D., Benoit J., Sève G., Blivet J.-C. (2005) lateral stress evaluation of an unstable slope in Sallèdes, France, Pressio2005/ISP5, Presses des Ponts-LCPC, 217-226
- Gan K.C., Briaud J.-L. (1987) Use of the Stepped Blade in Foundation Design and Comparison with the Pressuremeter, Research Report 7032 to Iowa State Univ. and the Federal Highway Administration, Civil Engineering, Texas A&M University
- Getchell A., Santamaria A., Benoît J. (2014) Geotechnical Test Embankment Dover, NHDOT Project Newington-Dover 11238-M In Situ and Laboratory Testing, University of New Hampshire, 103 pages
- Hawkins, P.G., Mair, R.J., Mathieson, W.G. and Muir Wood, D. (1990), Pressuremeter measurement of total horizontal stress in stiff clay, *Proceeding of the 3rd International Symposium on pressuremeter*, Oxford, 321-330.
- Josseaume H. (1998) Propriétés mécaniques de l'argile des Flandres à Dunkerque et Calais. *Revue Française de Géotechnique*, 84:3-26
- Lunne T., Lacasse S., Rad N.S. (1984) General report: SPT, CPT, pressuremeter testing and recent developments in in situ testing, 12ème ICSMFE, Rio de Janeiro, 2339-2362
- Marsland, A. and Randolph, M.F. (1977), Comparisons on the results from pressuremeter tests and large in-situ plate tests in London clay, *Géotech.*, 27(2), 217-243.
- Mayne PW, Kulhawy FH. (1982) Ko-OCR (At rest pressure - Overconsolidation Ratio) relationships in soil, *J. Geotech. Eng. Div. ASCE*. 108(GT6):851-872
- O'Neill M.W. (2000) National geotechnical experimental site – University of Houston, Geotechnical Special Publication N° 93, ASCE, Reston, Virginia, 72-101
- Reiffsteck P., Lossy D., Benoît J. (2012) Forages, sondages et essais in situ géotechniques, Les outils pour la reconnaissance des sols et des roches, Presses des Ponts, ISBN : 978-2-85978-466-9, 800 pages
- Saussac L., Cahn M., Bernardet A., Reiffsteck P. (2018) Apport des reconnaissances pour la conception des écrans de soutènement dans les horizons peu perméables du Sannoisien et perméables du Sannoisien et du Ludien, JNGG2018