

Optimisation des Méthodes de Forage pour Essais Pressiométriques - Expériences Nord-Américaines

Optimisation of Drilling Methods for Pressuremeter Tests - North American Experiments

Louis Marcil ^{1#}, Simon-Pierre Gravel ²

¹Roctest Ltd, 580 Avenue Birch, Saint-Lambert, Québec, Canada

²Englobe, 505 Boul. du Parc-Technologique, Québec, Québec, Canada

[#]Auteur de correspondance : louis.marcil@roctest.com

ABSTRACT

This article describes techniques currently used in North America for the preparation of pressuremeter boreholes. The focus is on the predominant and strongly suggested method, i.e. rotary drilling with mud injection. Tools for validating drilling quality are also given, along with concrete examples of the effects that different drilling methods can have on test results. The aim of this article is to present, from a North American perspective, techniques for optimizing the quality of drilling and, consequently, of pressuremeter testing.

RESUME

Cet article décrit des techniques utilisées en Amérique de Nord pour la préparation de forages pressiométriques. Un focus est mis sur la méthode prédominante et fortement suggérée, soit la méthode par forage rotatif avec injection de boue. Des outils de validation de la qualité du forage sont également donnés, de même que des exemples concrets d'effets que peuvent avoir différentes méthodes de forage sur les résultats d'essais. L'objectif de cet article est donc de présenter, d'un point de vue nord-américain, des techniques d'optimisation de la qualité du forage et par conséquent de l'essai pressiométrique.

Keywords: Pressuremeter test. Drilling method. Rotary drilling with mud injection.

1. Introduction

L'une des particularités de l'essai pressiométrique réside dans le rôle primordial du forage et de l'insertion de la sonde dans le sol. La qualité des informations obtenues grâce à cet essai dépend en grande partie de la bonne maîtrise de ces éléments. L'objectif principal est de réaliser un essai de chargement sur un sol aussi proche que possible de son état naturel. Des efforts ont été déployés depuis longtemps pour contourner ou atténuer cette dépendance. Des sondes mises en place par auto-forage ou par enfoncement ont été développées, mais avec des résultats limités, car ces équipements présentent d'autres limitations d'ordre pratique, ou d'interprétation des résultats. Ces difficultés ont limité leur diffusion. Aujourd'hui encore, les essais pressiométriques dans leur grande majorité sont réalisés à l'aide de sondes préforées. À notre avis, cette situation justifie l'importance d'une bonne maîtrise des techniques de forage et d'insertion des sondes. Cet article vise à décrire l'expérience nord-américaine dans ce domaine, afin de contribuer à une meilleure maîtrise de ces éléments.

Les techniques et les études de cas présentées ici s'appuient en grande partie sur les observations et l'expérience des auteurs et des entreprises pour lesquelles ils travaillent.

2. Qualités requises du forage pressiométrique

Un forage pressiométrique performant requiert deux qualités : la première concerne les dimensions du forage, et la seconde le niveau de perturbation du sol.

Concernant la taille, le diamètre du forage doit dépasser de 3 à 10 % celui de la sonde. Cela signifie que l'utilisation d'une sonde N de 74 mm (couramment utilisée en Amérique du Nord) nécessite un diamètre de forage compris entre 76 et 82 mm. En fait, ce diamètre peut légèrement dépasser ces valeurs – la norme ASTM D4719-20 mentionne 20 % (Standard Test Methods for Pressuremeter Testing in Soils 2024) – mais alors le risque d'obtenir un essai incomplet augmente. Ces dimensions doivent rester uniformes sur toute la longueur du forage. Le forage doit rester linéaire et ses parois aussi lisses que possible (sans cavités).

La deuxième exigence de qualité concerne la perturbation (remaniement) du sol, qui doit être réduite au minimum. La première condition est que le diamètre du forage ne soit pas trop petit, sinon la sonde devrait être enfoncée avec force, risquant de remodeler le sol et d'endommager la sonde. Deuxièmement, il est impératif de respecter les techniques de forage recommandées, c'est-à-dire les moins agressives ou perturbatrices.

3. Méthodes de forage utilisées en Amérique du Nord

La norme ASTM D4719-20 décrit en détail les méthodes de forage jugées acceptables pour les essais pressiométriques. Il est fortement recommandé de s'y référer. Ces méthodes sont associées à des types de sol spécifiques. Celles-ci incluent l'utilisation d'une tarière continue dans le sable dense et la roche altérée, ou d'un échantillonneur à paroi mince dans les argiles raides. L'utilisation d'une tarière manuelle avec injection de boue est théoriquement très intéressante car elle serait utilisable dans plusieurs types de sol. Cependant, en raison de ses limitations de profondeur et de la grande taille des sondes utilisées en Amérique du Nord, qui oblige à utiliser une foreuse pour leur installation, cette méthode manuelle est rarement utilisée. L'utilisation du tube fendu est également assez rare. Elle est principalement utilisée pour les projets de grande envergure dans les sols et les remblais contenant un pourcentage élevé de gravier ou de blocs (20 % ou plus).

Une méthode de forage est devenue de plus en plus populaire en Amérique du Nord pour les essais pressiométriques : le forage rotatif avec injection de boue. Plusieurs raisons expliquent le succès de cette méthode. Premièrement, sa grande polyvalence ; elle peut être utilisée, avec les ajustements nécessaires, dans presque tous les types de sol. Deuxièmement, l'équipement requis est peu coûteux et facilement disponible localement. Troisièmement, elle est bien adaptée aux sondes hydrauliques nécessitant le remplissage du forage par un liquide. Enfin, correctement mise en œuvre, cette méthode maintient une faible perturbation du sol, notamment grâce à l'utilisation de boues de forage, qui remplacent en quelque sorte le sol évacué. L'utilisation généralisée de cette méthode peut avoir contribué à l'amélioration de la qualité des forages (ou du moins à leur standardisation) et aux progrès (lents mais assurés) des essais pressiométriques en Amérique du Nord. L'importance de cette méthode de forage justifie la description plus détaillée donnée dans la section suivante.

4. Forage rotatif avec injection - Description

Cette méthode se déroule en deux étapes (voir figure 1). Tout d'abord (1), un forage de plus grand diamètre (environ 100 mm / 4") est avancé près de la profondeur d'essai à l'aide d'une tarière creuse, d'une tarière rotative à boue avec tubage si nécessaire, ou d'une tarière pleine s'il n'y a pas de risque d'effondrement. Ensuite, une zone de 1,5 m (5 pieds) de plus petit diamètre est forée pour créer une « cavité d'essai » ou « zone d'essai ». La sonde est ensuite insérée avec un délai minimal au milieu cette cavité (2) et l'essai est effectué. Cette séquence est répétée pour chaque essai. Cette méthode permet de réaliser de 3 à 8 essais par jour dans un forage, selon la profondeur, le sol et le type d'essai. Préparer une cavité d'essai plus longue, dans laquelle plusieurs essais sont effectués en série, ne donne généralement pas de bons résultats et est à éviter.

4.1. Outil de coupe

L'outil de coupe doit être adapté au type de sol. Nous suggérons d'utiliser un trépan à trois ailettes dans les sols argileux et limoneux (qui découpe le sol), et un trépan type tricône dans les sols sableux/graveleux et les roches tendres (qui détruit le sol). L'outil de coupe doit de préférence être équipé de dents renforcées. Il doit permettre une injection axiale, et non latérale, de la boue afin d'éviter d'agrandir le diamètre du forage. Des exemples de ces outils sont présentés à la figure 2.

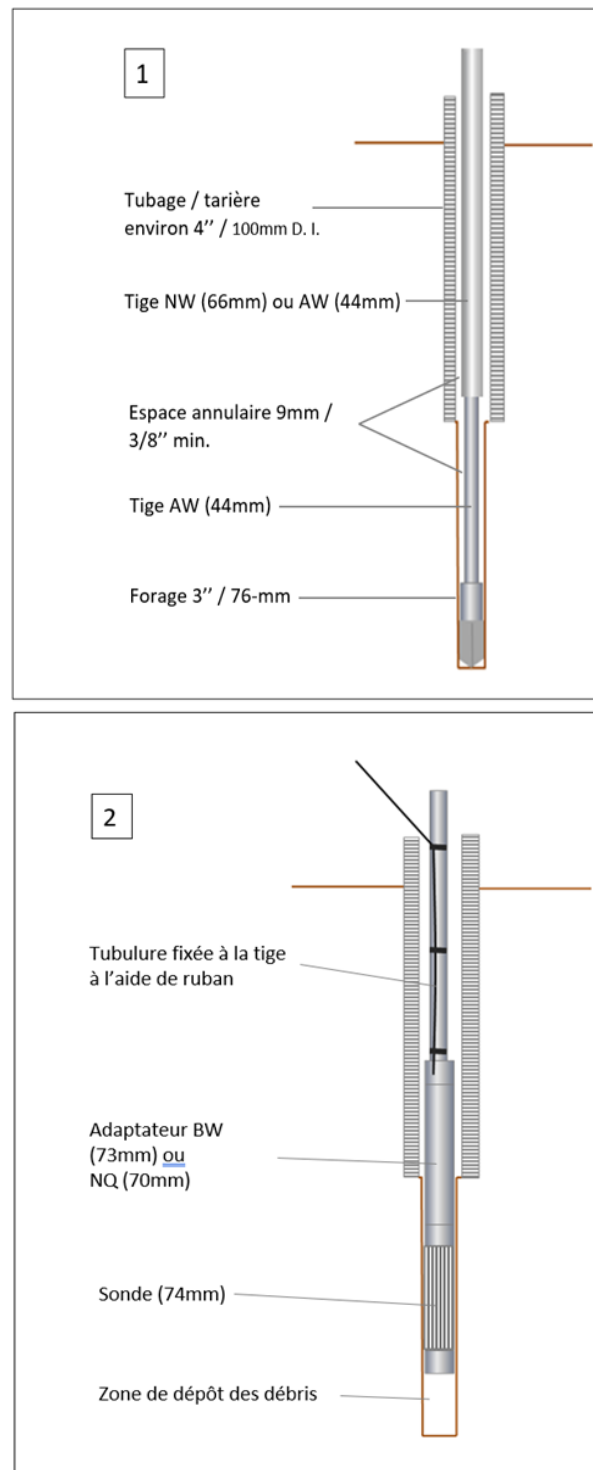


Figure 1. Méthode recommandée pour 1) la préparation de la cavité d'essai et 2) le positionnement de la sonde

L'outil de coupe doit avoir le même diamètre que la sonde, soit 74 mm (2-15/16") pour les forages de taille «N». Dans certains cas, il peut être utile de disposer d'outils de coupe de tailles différentes, allant de 73 mm (2-7/8") à 78 mm (3-1/16")



Figure 2. Outils de coupe généralement utilisés : outil à rouleaux type tricône et outil à lames. Exemple d'outil modifié : outil à deux lames avec tube de guidage

4.2. Espace annulaire pour l'évacuation des déblais de forage

Il est important que l'espace annulaire entre le train de tiges et les parois du forage soit suffisant (9 mm – 3/8" minimum) pour assurer une bonne évacuation des déblais. Cet objectif sera atteint si les mesures suivantes sont respectées.

Les tiges de forage AW (44 mm) sont souvent utilisées avec succès dans les forages de 76 mm. Cependant, avec l'augmentation de la profondeur et de la dureté du sol, ces tiges ont tendance à osciller latéralement, ce qui peut affecter la qualité de la cavité d'essai. Pour éviter ce problème, nous recommandons l'utilisation de tiges de plus grand diamètre (NW-66 mm) avec une seule section AW de 1,5 m (5 pieds) positionnée immédiatement en amont de l'outil de coupe, comme illustré à la figure 1. Une autre option consiste à installer un tube de guidage d'environ 30 cm de long en amont de l'outil de coupe. Idéalement, ce tube de guidage doit rester à l'intérieur du tubage afin de ne pas affecter les parois de la cavité d'essai. Il doit être conçu de manière à ne pas gêner le retour des boues de forage.

Deuxièmement, l'adaptateur entre l'outil de coupe et les tiges doit être de petit diamètre, 60 mm ou moins dans un forage de taille N.

Enfin, certains utilisateurs modifient l'outil de coupe qu'ils utilisent (voir Fig. 2). Cela peut aider, mais n'est généralement pas indispensable.

4.3. Fluide de forage

Le fluide de forage évacue les déblais et limite la décompression et l'affaissement du sol en remplaçant, pour ainsi dire, les sols évacués du forage. Dans l'argile, l'eau seule peut être utilisée, mais plus la granulométrie du sol augmente, plus la viscosité du fluide doit être augmentée. Bien que les boues à base de polymères aient été utilisées avec succès, celles à base de bentonite donnent généralement de meilleurs résultats et sont à

privilegier. En effet, contrairement aux boues à base de polymères en général, les particules de sol restent en suspension dans les boues à base de bentonite, ce qui permet de maintenir de faibles débits d'injection sans affecter l'évacuation des déblais. L'utilisation d'une boue à base de polymère peut obliger d'augmenter le débit d'injection pour assurer une bonne évacuation, notamment à grande profondeur, ce qui peut affecter la qualité de la cavité d'essai.

Certains polymères sont parfois ajoutés aux boues à base de bentonite pour, par exemple, réduire l'effet collant de l'argile ou simplement augmenter la viscosité du mélange. Dans certains cas, il est utile de densifier la boue, par exemple en ajoutant de la barytine. Il s'agit notamment des sols peu cohésifs (sables meubles), des argiles très molles où le forage a tendance à s'effondrer, et des forages artésiens. Il convient toutefois de noter qu'une densification et une viscosité accrues peuvent avoir des effets indésirables, comme une pression d'injection plus élevée pour le retour des déblais et une aspiration accrue lors de la manipulation des tiges de forage. Un tubage de plus grand diamètre peut être nécessaire pour contrer ces effets.

4.4. Recommandations générales

Il est important de forer lentement afin d'éviter un élargissement excessif de la cavité d'essai. Cela signifie :

- Maintenir une faible vitesse de rotation de l'outil de coupe (viser 60 tr/min), en particulier dans les sols érodables.
- Ne pas appliquer une force excessive sur les tiges : moins de 100 kg (220 lb) dans un forage N (et beaucoup moins dans l'argile molle).
- Appliquer un faible débit de boue, inférieur à 20 l/min (5 gallons/min).
- Maintenir une pression d'injection stable. Une augmentation de pression se produira, par exemple, lorsque des débris argileux s'accumuleront en amas sur le trépan, bloquant le retour de boue et risquant de surpressuriser la cavité d'essai. Cela peut être dû à une descente trop rapide du trépan ou à une boue trop visqueuse.

Le forage doit dépasser la profondeur d'essai prévue (0,75 m) pour permettre aux débris de s'y déposer si nécessaire. Enfin, le forage ne doit pas être trop nettoyé à fond. Un second passage est possible, sauf dans les sables meubles. Une passe finale peut également être effectuée sans injection ni rotation afin de vérifier que le trou de forage reste ouvert. Lors du retrait de l'outil de coupe, il faut maintenir un niveau élevé de fluide de forage dans le tubage afin d'éviter une sous-pression au niveau de la cavité d'essai. Avec ces méthodes, la préparation d'une cavité d'essai de 1,5 m prend de 5 à 20 minutes.

Nous insistons sur l'importance de contrôler la préparation de la cavité d'essai. Failmezger (Failmezger 2025) suggère ainsi de :

- Mesurer le débit d'injection en notant le temps nécessaire pour remplir un seau de 5 gallons.
- Tracer une marque verticale à la craie sur les tiges de forage et enregistrer la vitesse de rotation.

- Tracer des marques horizontales tous les 30 cm (1 pied) sur les tiges et mesurer la vitesse de pénétration. Ceci est utile, entre autres, pour localiser les transitions entre des couches de sol très différentes. Ces transitions doivent être évitées lors du positionnement de la sonde.
- Vérifier approximativement la composition du sol en observant les déblais remontés du forage

Les tiges utilisées pour forer la cavité d'essai serviront également à mettre la sonde en place. Celle-ci ne doit pas être enfoncée avec une force excessive. Deux personnes peuvent appuyer sur les tiges à l'aide de clés à tubes. La force hydraulique de la foreuse ne doit pas être utilisée à cette fin. Une poussée excessive peut remodeler le sol, endommager la sonde et même provoquer un reflux de déblais autour de celle-ci. À cet effet, il est important de bien mesurer la longueur des tiges et des adaptateurs utilisés afin de connaître l'altitude exacte de la sonde.

Tout ce qui précède est souvent contraire aux méthodes de forage habituellement utilisées par les foreurs. Un apprentissage de leur part, approprié au pressiomètre, est donc nécessaire.

5. Validation

La validation de la qualité du forage est essentielle. Elle doit être effectuée après les premiers essais, et les ajustements nécessaires portés à la méthode de forage. Les deux principaux outils de validation sont : la forme de la courbe et le rapport entre le module pressiométrique de premier chargement et la pression limite Ep/Pl .

5.1. Forme de la courbe

La figure 3 et le tableau 1 décrivent les principales formes que peut prendre la courbe pressiométrique. La courbe idéale (3) est composée de trois zones distinctes (zone d'approche où la sonde n'est pas encore en contact avec le sol, zone pseudo-élastique quasi-linéaire et zone de fluage avec déformation croissante du sol).

Outre d'une forme appropriée, la courbe doit être lisse. Une dispersion importante peut indiquer un problème avec la méthode de forage ou d'essai.

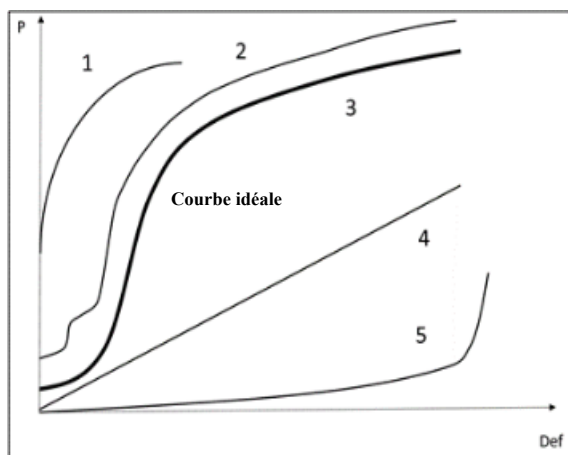


Figure 3. Formes possibles de courbes d'essai (d'après Baguelin, 1978)

Table 1. Types de courbes et commentaires

1 Diamètre de forage trop petit	Pl utilisable, Ep potentiellement affecté
2 Présence de matériau entre la sonde et le forage	Résultats généralement utilisables
3 Courbe idéale	Résultats utilisables
4 Forage fortement remanié	Résultats non utilisables
5 Diamètre du forage trop grand	Ep partiellement utilisable

Notez que la forme de la courbe idéale 3 varie selon que le sol est argileux ou sableux. Dans le premier cas, la partie finale de la courbe sera plus marquée, tandis que dans le second, la rupture du sol semblera plus progressive.

Un cas non illustré à la figure 3 est celui où la zone quasi-linéaire de la courbe présente deux pentes distinctes. Cette situation rare peut être due à la composition du sol, par exemple des sols présentant une alternance de fines couches dures et tendres, ou des sols contenant des blocs enfouis dans des sols fins et peu rigides. Dans ce cas, la sonde pressiométrique peut mesurer tour à tour les réactions des éléments les plus tendres et les plus durs du sol. Ce type de courbe peut également être dû à une erreur de manipulation, par exemple si l'opérateur positionne la sonde de manière à ce qu'elle chevauche deux couches de rigidité très différente. Cette situation peut être évitée en respectant les précautions décrites à la section 4.4.

5.2. Rapport Ep/Pl

Le rapport Ep/Pl est un outil essentiel pour estimer le niveau de perturbation du sol et, par conséquent, la qualité de l'essai. Ce rapport doit être relativement constant pour un type de sol et se situer dans certaines limites (voir tableau 2). La perturbation du sol affecte généralement davantage Ep que Pl , modifiant ainsi le rapport Ep/Pl . Un rapport trop faible (par exemple inférieur à 5 pour le sable et à 7 pour l'argile) découle souvent d'un vice d'exécution et doit donc amener à considérer faire des ajustements.

Table 2. Valeurs typiques du rapport Ménard Ep/Pl (Société Canadienne de Géotechnique, 1985)

Type de sol	Ep/Pl	
Silt, sable, et graviers	Meubles à denses	5 - 14
	Très dense	> 14
Argiles	Altérées	7 - 9
	Normalement consolidées	9 - 16
	Surconsolidées	> 16

D'autres outils peuvent aider à valider les essais, tels que les valeurs typiques Ep et Pl^* (pression limite nette) selon les types de sols - voir le tableau 3 -, le rapport entre

la pression de fluage (P_f) et la pression limite, et les corrélations avec d'autres paramètres.

Table 3. Valeurs attendues pour E_p et P_l (Briaud 2013)

Type de sol		P_l^* (kPa)	E_p (kPa)
Argile	Molle	0-200	0-2500
	Meuble	200-400	2500-5000
	Raide	400-800	5000-12 000
	Très raide	800-1600	12 000-25 000
	Dure	> 1600	>25 000
Sable	Lâche	0-500	0-3500
	Compact	500-1500	3500-12 000
	Dense	1500-2500	12 000-22 500
	Très Dense	> 2500	> 22 500

6. Forage dans le rocher

La préparation d'un forage pressiométrique est généralement plus facile dans la roche, car le diamètre du forage et le niveau de perturbation sont plus faciles à contrôler. Cependant, plusieurs particularités et difficultés doivent être prises en compte pour garantir la qualité des mesures et la durabilité de l'équipement :

- Le forage doit être parfaitement ajusté. Idéalement, il devrait dépasser de 2 à 5 % le diamètre de la sonde.
- Les parois du forage doivent être lisses pour assurer un bon contact de la membrane.
- La membrane doit être entièrement positionnée dans une zone relativement uniforme. Les zones altérées ou meubles plus petites que la longueur de la membrane doivent être évitées.
- Une attention particulière doit être portée à éviter tout blocage de la sonde.

Dans la roche saine, le carottage au diamant permet généralement de répondre à ces exigences. Cette méthode est la plus répandue dans la roche car elle permet non seulement de produire une cavité d'essai de qualité, mais aussi des échantillons pouvant être analysés pour le positionnement de la sonde. Un critère clé est le taux de récupération, qui devrait normalement se situer autour de 100 %.

Si des zones de moindre qualité doivent être testées, l'utilisation d'une méthode de forage moins agressive, comme le forage rotatif au tricône à la boue, peut être envisagée.

Il est également important d'éviter que des fragments de roche ne tombent sur la sonde et ne la bloquent. Les parois du forage au-dessus de la sonde peuvent donc être soutenues par un tubage, comme illustré à la figure 1. Une option plus courante consiste à utiliser des tiges de même diamètre que la sonde pour carotter la cavité d'essai et y abaisser la sonde (généralement des tiges HQ ou NQ). Cette option est d'autant plus intéressante qu'elle facilite la réalisation de plusieurs essais en série en préparant une cavité d'essai plus longue et en commençant les essais du bas vers le haut. Avec cette méthode, entre cinq et dix essais peuvent être effectués par jour, selon la profondeur et le type d'essai.

De plus amples détails sur le forage dans la roche sont disponibles dans la norme ASTM D8359-21 (Standard Test Method for Determining the In Situ Rock Deformation Modulus and Other Associated Rock Properties Using a Flexible Volumetric Dilatometer, 2024)

7. Description de cas

Voici trois exemples d'effets néfastes liés à la méthode de forage dans le sol.

7.1. Perturbation due à l'utilisation d'un tube à paroi épaisse (tube échantillonneur fendu)

La préparation de la cavité d'essai à l'aide d'un tube échantillonneur fendu peut perturber considérablement le sol. Le cas illustré ici, tiré d'un projet de construction d'hôpital réalisé en Illinois (USA), en est un parfait exemple. Des essais pressiométriques ont été réalisés avec une sonde monocellulaire Texam dans deux forages adjacents, à des profondeurs comprises entre 16 et 22 m. Le sol testé était uniforme et composé d'argile très raide avec traces de sable, de limon et de gravier, et avec des valeurs de N-SPT d'environ 30. Les cavités d'essai ont été préparées par forage rotatif avec injection de boue bentonitique, à l'aide d'un tricône de 2-15/16".

Les résultats des essais étaient reproductibles et conformes aux attentes, sauf dans le cas où la cavité d'essai a été préparée par battage d'un tube échantillonneur fendu. Comme le montrent la figure 4 et le tableau 4, l'utilisation d'une tube échantillonneur fendu a réduit la valeur E_p de moitié sans affecter significativement la P_l , abaissant ainsi le rapport E_p/P_l à des valeurs non conformes (de 7,64 à 3,39).

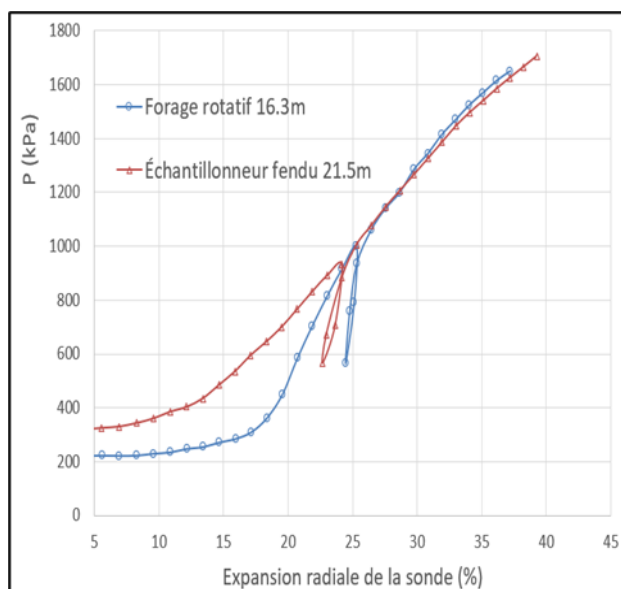


Figure 4. Effets des méthodes de forage (tube échantillonneur à paroi épaisse vs. forage rotatif à la boue)

Il est intéressant de noter que la divergence est plus prononcée au début qu'à la fin de la courbe. Ceci est cohérent avec le fait que le niveau de perturbation diminue généralement avec la distance radiale par rapport aux parois du forage, ce qui explique pourquoi E_p est plus sensible à la perturbation du sol que P_l .

Table 4. Exemples d'effet de la méthode de forage sur les résultats

Prof. (m)	Méthode de forage	E_p (MPa)	E_r (MPa)	Pl (MPa)	E_p/Pl
16.3	Rotatif à la boue	16.9	71.0	2.22	7.64
21.5	Tube échantillonneur fendu	7.97	34.9	2.35	3.39

Nous notons également l'effet significatif du changement de méthode de forage sur le module de rechargement (E_r), ce qui peut surprendre puisque ce paramètre est généralement considéré comme moins sensible à la perturbation que le module de première charge E_p . Cependant, ce résultat est cohérent avec celui observé par Combarieu (Combarieu 2001). Un module de rechargement mesuré à un niveau de déformation plus élevé aurait probablement été, comme Pl , moins affecté par la perturbation du sol. Il demeure que l'effet potentiel du remodelage sur E_r renforce, à notre avis, l'importance de contrôler la qualité de la méthode de forage.

Il convient de garder à l'esprit que le battage d'un tube échantillonneur fendu peut avoir des effets variables, voire opposés, selon le type de sol. Certains sols sont essentiellement densifiés et donc renforcés, tandis que d'autres sont déstructurés et donc fragilisés. Cette importante variabilité rend généralement difficile l'estimation de ces effets. Ce phénomène peut s'appliquer à tout type d'équipement provoquant un déplacement significatif du sol, comme le battage du tube fendu régulier ou la sonde pressiométrique foncée (Baguelin 1978, Briaud 1992).

7.2. Interposition de matériau entre la sonde et le sol

Le deuxième exemple, tiré d'un projet de construction de stationnement étagé au Minnesota (USA), illustre les effets de l'interposition de matériaux parasites entre la sonde et le sol. La figure 5 et le tableau 5 présentent les résultats de trois essais consécutifs effectués avec un pressiomètre Ménard dans un forage préparé selon la méthode de forage rotatif à la boue. Le sol, composé d'argile humide sableuse et maigre avec une trace de gravier, est uniforme et de rigidité moyenne.

Le premier essai à 5,2 m est concluant. Hormis un léger pic de pression initiale, la forme de la courbe est acceptable. Elle ressemble à la courbe 2 de la figure 3, suggérant la présence d'une faible quantité de matériel parasite entre la sonde et le forage. La valeur E_p/Pl est également satisfaisante. En revanche, les essais suivants (à 8,2 et 12,2 m) sont de mauvaise qualité, même si la méthode de forage et le type de sol restent inchangés. La forme des courbes ressemble maintenant à la courbe 4 de la figure 3, et les valeurs E_p/Pl sont anormalement faibles.

Le problème, dans ce cas, résidait dans une mauvaise évacuation des déblais. L'utilisation de tiges de forage de gros diamètre (66 mm) sur toute la longueur du forage et d'une tarière externe de faible diamètre intérieur (82,5 mm ou 3-1/4"), a considérablement réduit l'espace annulaire nécessaire à une évacuation adéquate. Et ce problème s'est aggravé avec la profondeur. Les déblais se

sont comprimés sur les parois du forage, créant un effet de « colmatage ». Les courbes illustrent moins la réaction du sol chargé par la sonde pressiométrique que celle des déblais comprimés par celle-ci.

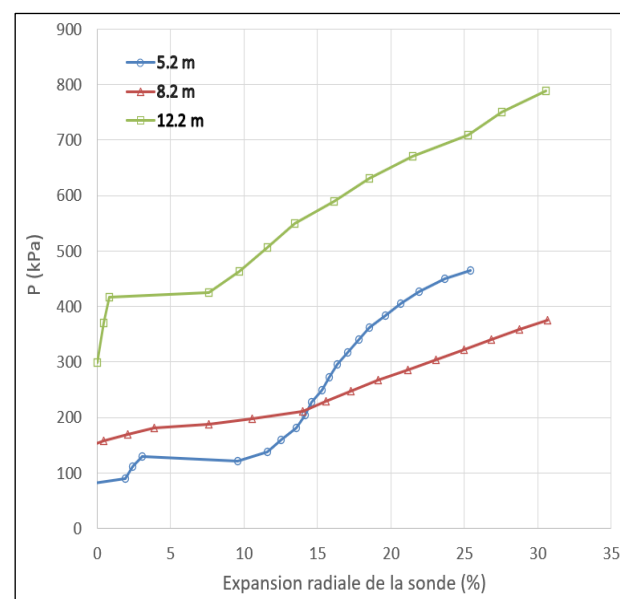


Figure 5. Effets de l'interposition de matériaux parasites entre la sonde et le forage

Table 5. Effets de l'interposition de matériaux parasites entre la sonde et le forage

Prof. (m)	E_p (kPa)	Pl (kPa)	E_p/Pl
5.2	6480	580	11.2
8.2	1590	418	3.80
12.2	3125	850	3.68

7.3. Utilisation d'un tube échantillonneur à paroi mince

Le dernier cas présente les résultats d'essais comparatifs entre deux méthodes de forage, utilisant un tube échantillonneur à parois minces (type Shelby) et un forage rotatif avec injection de boue. Les essais ont été réalisés dans le sud du Québec (CAN) à l'aide d'une sonde monocellulaire Texam dans deux forages adjacents. Le sol testé était constitué d'argile sensible de consistance molle à moyenne, avec une résistance au cisaillement comprise entre 20 et 60 kPa.

Les résultats présentés dans le tableau 6 montrent que l'utilisation d'un échantillonneur à parois minces a réduit E_p d'environ la moitié, sans affecter significativement Pl . Cela a eu pour effet de réduire le rapport E_p/Pl à des niveaux inacceptables. La relativement faible consistance et la sensibilité de l'argile ont certainement renforcé la pertinence des recommandations de la norme D4719, qui préconisent l'utilisation d'un échantillonneur long pour créer la cavité d'essai en un seul passage et un retrait très lent de celui-ci pour réduire la succion.

Ce cas illustre à nouveau l'importance de l'utilisation du rapport E_p/Pl pour valider les techniques de forage.

Table 6. Essais comparatifs : échantillonneur à parois mince vs forage rotatif avec injection

Méthode de forage	Prof. (m)	E_p (kPa)	P_l (kPa)	E_p/P_l
Forage rotatif	3.05	2798	258	10.85
	6.25	3069	345	8.89
	9.15	4974	461	10.79
Échantillonneur à paroi mince	3.06	1333	299	4.46
	6.01	2237	342	6.54
	9.13	2242	451	4.97

8. Conclusion

Une bonne pratique des techniques de forage est essentielle pour garantir la qualité des essais pressiométriques. Le choix d'une méthode de forage ne doit pas se baser principalement sur sa facilité ou sa rapidité apparentes. La qualité des résultats doit primer sur ces facteurs.

La méthode de forage rotatif avec injection axiale de boue s'est imposée en Amérique du Nord grâce à son efficacité et sa polyvalence. Son utilisation généralisée peut avoir contribué à l'amélioration de la qualité des forages (ou du moins à leur standardisation) et à la progression (lente mais certaine) des essais pressiométriques en Amérique du Nord. Cet article présente cette méthode de forage en détail. Il illustre l'importance d'utiliser la forme de la courbe et le rapport E_p/P_l comme outils de validation. Enfin, il présente quelques exemples de l'impact des méthodes de forage utilisées.

Cet article peut être considéré comme un guide des meilleures pratiques de préparation et de validation des forages, utilisant la méthode de forage rotatif à la boue, afin d'optimiser la qualité des essais pressiométriques.

Remerciements

Les auteurs remercient Jason Mapes de Mapes In-situ LLC et Bill Villalpando de Roctest Inc. pour leur contribution à cet article

Références

- ASTM. 'Standard Test Methods for Pressuremeter Testing in Soils' Annual Book of ASTM Standards, Section 4: Construction, Vol. 04.08: Soil and Rock (I) : D4719-20, 2024.
- ASTM. 'Standard Test Method for Determining the In Situ Rock Deformation Modulus and Other Associated Rock Properties Using a Flexible Volumetric Dilatometer, 2024' Annual Book of ASTM Standards, Section 4: Construction, Vol. 04.09: Soil and Rock (II) : D8359-21, 2024.
- Baguelin F., Jezequel J. F., Shields D.H., 'The Pressuremeter and Foundation Engineering', Trans Tech publication, Clausthal, Germany, 1978. 617 p.
- Briaud J. L., 'The Pressuremeter', Balkema, Rotterdam, The Netherlands, 1992. 322 p.
- Briaud, J. L., 'Geotechnical Engineering: Unsaturated and saturated Soils', John Wiley & sons, 1000 P. 2013. <http://doi.org/10.1002/9781118686195>

Canadian Geotechnical Society, 'Canadian Foundation Engineering Manual' 2nd edition, Vancouver, BiTech Publishers Ltd, 1985, 456 p.

Combarieu O, Canépa Y. 'L'essai cyclique au pressiomètre' (Cyclic Testing with the Pressuremeter) Bulletin des LPC, 233 Réf 4381, pp. 37-65. 2001. (in French)

Failmezger R."PressuremeterTest" Available at: <https://insitusoil.com/soil-pressuremeter-test/#performing> accessed : 01/27/2025