

# Le pressiomètre en forage préalable, confrontation des pratiques nord-américaine et française

## Pressuremeter use in pre-drilling, comparison of North American and French practices

Jean-Pierre BAUD <sup>1\*</sup>, Louis MARCIL <sup>2</sup>

<sup>1</sup> Eurogé, Avrainville, France

<sup>2</sup> Rocrest, Saint-Lambert, QC, Canada, [louis.marcil@roctest.com](mailto:louis.marcil@roctest.com)

\*[baud@eurogeo.fr](mailto:baud@eurogeo.fr)

**RESUME :** L'essai pressiométrique est sensible à l'altération du sol que provoque l'opération de forage préalable et d'introduction de la sonde. Les techniques d'autoforage de la sonde pressiométrique, visant à minimiser cette altération, n'ont pas réussi à le faire au-delà des sols très meubles. L'emploi du pressiomètre en forage préalable reste le plus répandu, praticable des sols mous jusqu'aux roches, depuis 70 ans dans la pratique française du pressiomètre Ménard (ISO 22476-4). Ailleurs dans le monde, depuis presque aussi longtemps, des géotechniciens ont développé leur propre référentiel pour les sondages pressiométriques, en termes de dimensions usuelles des sondes, de contrôleurs pression-volume, de gammes de pression, de techniques de forage.

Le cas de l'Amérique du Nord, (USA et Canada) a été rappelé récemment au Symposium ISP8 : depuis plus de 50 ans l'entreprise Rocrest diffuse des pressiomètres, de type Ménard ou non, et accompagne les utilisateurs, en se référant à la norme ASTM D4719-20, dont la première version (1987) est même antérieure à la première norme française (1991).

Plusieurs publications (Briaud 2013, Marcil 2025), ont montré que malgré cette différence de pratique, il existe une convergence des impératifs fondamentaux pour les opérations de forage préalable et mise en place de la sonde dans la poche d'essai, dans le but de réduire au minimum le risque d'altération des caractéristiques du sol inhérent à ces opérations, et de rendre fiables, et comparables entre elles pour l'utilisateur, les données usuelles déduites de l'essai, module pressiométrique et pression limite.

En comparant les pratiques françaises et nord-américaines, l'article montre qu'il existe des méthodes suffisamment polyvalentes pour permettre leur utilisation dans la majorité des sols. Il montrera également que vouloir accélérer et rentabiliser à outrance la production d'essais pressiométriques amène à s'écarter des principes fondamentaux du forage pressiométrique, et produit une profonde altération de la vision du comportement des terrains.

**ABSTRACT:** The pressuremeter test is sensitive to soil alteration caused by the pre-drilling and probe insertion process. Self-drilling pressuremeter probe techniques, aimed at minimizing this alteration, have failed to do so beyond very soft soils. The use of the pressuremeter in pre-drilling remains the most widespread, practicable from soft soils to rocks, for 70 years in the French practice of the Ménard pressuremeter (ISO 22476-4).

Elsewhere in the world, for almost as long, geotechnical engineers have developed their own standards for pressuremeter surveys, in terms of common probe dimensions, pressure-volume control-units, pressure ranges, and drilling techniques. The case of North America (USA and Canada) was recently highlighted at the ISP8 Symposium: for over 50 years, Rocrest has been distributing pressuremeters, both Ménard and non-Ménard, and supporting users, referring to the ASTM D4719-20 standard, the first version of which (1987) even predates the first French standard (1991).

Several publications (Briaud 2013, Marcil 2025) have shown that despite this difference in practice, there is a convergence of fundamental requirements for preliminary drilling operations and probe placement in the test pocket, with the aim of minimizing the risk of altering soil characteristics inherent in these operations, and making the usual data deduced from the test, such as pressuremeter modulus and limit pressure, reliable and comparable for the user.

By comparing French and North American practices, the article shows that there are methods that are sufficiently versatile to allow their use in most soils. It will also show that wanting to accelerate and excessively make profitable the production of pressuremeter tests leads to a departure from the fundamental principles of pressuremeter drilling, and produces a huge alteration in the vision of the behavior of the grounds.

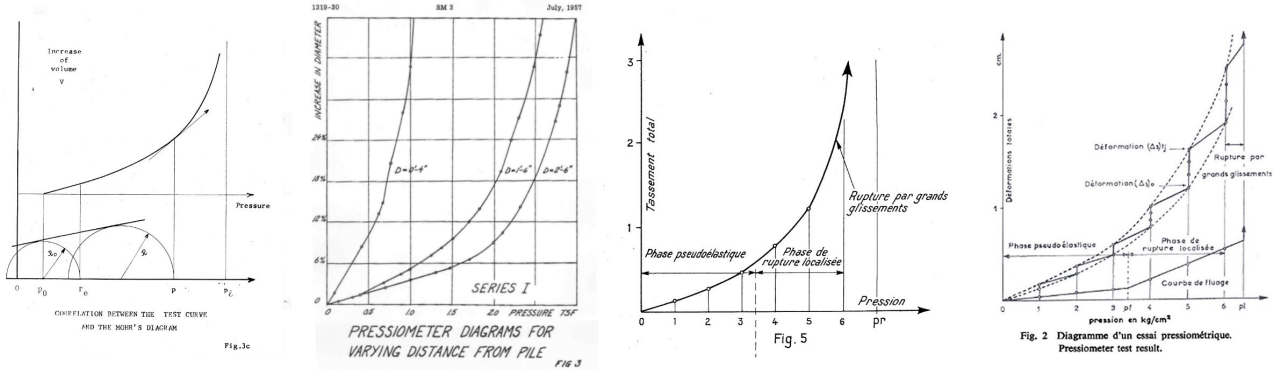
**Mots-clés :** Pressiomètre en forage préalable ; contrôle de qualité ; méthodes d'introduction de la sonde pressiométrique

**Keywords:** Pressuremeter in pre-drilling; quality control; Pressuremeter probe insertion methods.

# 1 LA COURBE PRESSIOMETRIQUE, UN OBJECTIF UNIQUE

Les premiers schémas de courbe pressiométrique donnés par Louis Ménard dans les années 1957 (date de la thèse, Université de l'Illinois) et 1958 (création de la société des Pressiomètres Louis Ménard) et même dans les premières publications pour diffuser la méthode, jusqu'en 1962, sont ceux d'une courbe

presque idéale. Ménard dessine toujours les pressions en abscisse et les volumes en ordonnée et imposera cette habitude en France. Les courbes partent souvent d'un point d'origine ( $P=0, V=0$ ) ou ( $P=P_0, V=0$ ) et dessinent une courbe concave vers les ordonnées dès l'origine, en découpant les phases de l'essai par rapport aux pressions.



Thèse LM 1957      Proceedings ASCE 1957      Revue Génie Militaire 1959      5eme ICSMFE Paris 1961

Figure 1. Représentations de la courbe pressiométrique « idéale » (L. Ménard, 1957-1961)

Dans ces débuts d'exploitation du pressiomètre, Ménard cherchait encore à tirer de la courbe pressiométrique les cercles de Mohr qui auraient donné un angle de frottement.

direct à partir de la pression limite, et du calcul des tassements avec un module dans la phase pseudo-élastique.

Mais assez vite, sans doute dans les discussions avec ses premiers proches collaborateurs, principalement Michel Gambin, Ménard constate que les essais réels dans toutes sortes de terrain et à toutes profondeurs, s'écartent de ce schéma issu d'essais à faible profondeur dans des sols argileux hors nappe.

## 2 PREMIÈRES DIRECTIVES POUR LE FORAGE PRESSIOMETRIQUE

La réalité de l'arrondi systématique des débuts de courbe pour la mise en contact sonde-sol s'impose. En même temps que l'abandon de la recherche d'une phase élastique en début d'essai, l'orientation des travaux de Ménard se fait vers le dimensionnement

Les premières notes de la série D s'intéressent à la méthode de forage, à l'utilisation de la bentonite dans les forages à la tarière à main à injection, et les publications du groupe Ménard se basent sur des courbes « en S » pour l'interprétation des essais, dont on admet qu'elles représentent la forme de la plupart des essais réalisés in situ (Figure 2).

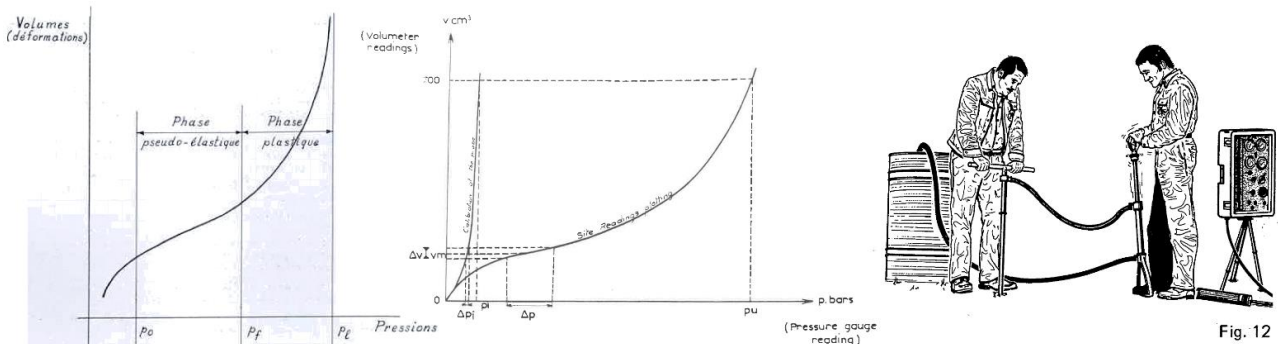


Figure 2. Représentations de la courbe pressiométrique « en S » et de la meilleure méthode, tarière à main avec injection de boue bentonitique (Notices Ménard vers 1965).

Dans ces années de développement d'une utilisation croissante du pressiomètre, entre 1960 et 1970, les directives à l'usage des opérateurs sont mises au point, simultanément

- dans le groupe Ménard – notice D10 (1970) ;
- dans le réseau des LPC – mode opératoire (1971).

Les différentes méthodes connues à cette époque sont déclinées en fonction des types de terrain, dans un cadre à double entrée de notation qui préfigure celui de toutes les normes par la suite. On peut comparer ces deux tableaux qui datent à peu près de la même époque (Figure 3).

SOIL TYPES		DRILLING METHODS											M		
		A	B	C	D	E	F	G	H	J	K	L			
Fine cohesive soils	Soft, submerged	-	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+
	Medium to soft	+	+	0	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+
	Stiff	+	+	+	+	+	-	-	-	-	-	-	-	0	+
Silt	Submerged	-	0	-	0	-	-	-	-	0	0	0	0	0	+
	Above water table	+	+	+	0	-	0	0	0	-	-	0	0	0	0
Sand	Loose, submerged	-	+	-	0	-	-	-	-	-	-	-	-	0	+
	Medium dense	+	+	+	+	-	0	0	0	0	0	0	0	+	+
	Dense	+	+	+	+	+	+	+	0	0	0	0	0	+	+
Sand and Gravel	Loose submerged	0	0*	0*	0*	0	0	0	0	0	0	0	0	+	+
	Medium dense	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	+	+
	Dense	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	+	+
Rock	Weathered	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
	Solid	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+

MODE DE MISE EN ŒUVRE		NATURE DES TERRAINS															
		Sols fins cohésifs			Limas et silts		Sables			Graves		Rocher					
		1	2	3	1	2	1	2	3	1	2	3	1	2			
Forage avec paroi non maintenue	Rotation	Tarière à main à sec	-	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		Tarière à main avec injection	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
	Mèches hélicoïdales continues	—	0	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	0	0	+
		—	0	+	0	0	0	+	+	+	+	+	+	+	0*	0	+
	Outil plein avec injection	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
	Carottier	-	-	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+
Percussion-Rotation	Battage d'un train de tube lisse fréquemment remonté	-	-	0	-	0	-	0	-	0	-	0	-	0	0	+	
	Vibro-fonçage carottier	-	-	0	-	0	-	0	-	0	-	0	-	0	0	+	
	Battage tube fendu	-	-	0	-	0	-	0	-	0	-	0	-	0	0	+	
Introduction avec refoulement	Vibro-fonçage tube fendu	-	-	0	-	0	-	0	-	0	-	0	-	0	0	+	
	Sonde auto-foreuse	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	
Forage avec paroi maintenue rigide	Forage tube fendu	-	-	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	+	
	Forage tube fendu	-	-	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	+	

— Méthode déconseillée  
 + Méthode recommandée  
 0 Méthode tolérée  
 \* A utiliser surtout pour l'exécution de « trous pilotes »  
 \*\* Après « trou pilote »

1. Mous généralement noyés  
 2. Secs  
 1. Lâches noyés  
 2. Moyennement compacts  
 3. Compacts  
 1. Altéré  
 2. Sain

Figure 3. Tableaux de méthodes de forage pressiométrique. a) Notice Ménard D10\_AN b) Mode opératoire LCPC

On voit que les méthodes de forage destructif avec injection d'une boue de forage (surlignées en jaune), sont développées et recommandées dans une gamme de sols assez large, à peu près la même dans les deux tableaux, ainsi que le forage avec tube fendu ouvert.

Le battage ou vibrofonçage du tube fendu, ou le battage d'un carottier retiré pour descendre la sonde, (surlignage brun) sont tolérés dans un nombre de cas important, de sols granulaires cependant. Pratique qui sera par la suite beaucoup plus restreinte.

Enfin le forage à sec à la tarière à main ou à la tarière hélicoïdale continue est aussi recommandé ou toléré dans un assez grand nombre de sols.

Le tableau LCPC fait figurer la sonde autoforeuse, tandis que le tableau Ménard mentionne la sonde avec rétrojet, témoin des premières utilisations de méthodes d'autoforage (voir plus loin §4.2.1). Mais dès ce moment la distinction est faite entre essais réels à la forme « classique » en S (Fig. 2) et essais espérés de forme hyperbolique constamment croissants dès l'origine (Fig.1). À cette époque également se développent de nombreuses méthodes d'extrapolation de la courbe hyperbolique vers la pression limite au doublement du volume de la cavité. Progressivement dans le développement des normes, c'est la forme hyperbolique de la fin de la courbe qui s'imposera, et sera modélisée soit par la méthode des inverses appliquée à la fin de la courbe au-delà du point de fluage, soit la méthode de la double hyperbole capable de modéliser aussi bien les courbes de type « Fig.2 »

que les courbes de type « Fig.1 » (Van Wambeke et al. 1970, Baud et al. 1992).

### 3 DÉVELOPPEMENT DU PRESSIOMÈTRE EN AMÉRIQUE DU NORD

#### 3.1 Historique et développement.

Louis Ménard, depuis sa thèse à l'Université de l'Illinois, avait gardé des contacts, et l'espoir de développer l'usage du pressiomètre parallèlement en Europe (création d'Eurasol en 1962) et en Amérique. Secondé par Michel Gambin, il s'applique à faire paraître la plupart des notices pour les clients à la fois en français et anglais. Malgré quelques publications universitaires en anglais (Gibson & Anderson 1961, Ladanyi 1963), le développement du pressiomètre se fait tout de même plus rapidement en France, avec la caution de son utilisation par le réseau des LPC, et un certain nombre de bureaux d'études géotechniques privés qui sont en croissance durant les « 30 glorieuses ».

On peut identifier au moins trois éléments ayant contribué significativement à la diffusion de l'essai pressiométrique en Amérique du Nord.

Le premier fut l'entente survenue à la fin des années 60 entre le groupe Ménard et la société Roctest, accordant l'exclusivité à celle-ci concernant la promotion et la distribution de pressiomètres sur ce territoire.

Le second élément a été la conception d'équipements mieux adaptés à ce marché, lequel a des exigences particulières. D'abord, il requiert l'utilisation de composantes de dimensions impériales afin de permettre la maintenance des équipements. Ensuite, des capacités plus élevées en pression (10 à 20 MPa) sont nécessaires afin de pouvoir tester des sols très durs et des roches altérées, prestations couramment requises en Amérique du Nord. Finalement, une robustesse accrue est requise afin de permettre une utilisation dans des conditions climatiques difficiles et d'éloignement significatif, telles que souvent rencontrées sur ce continent.

Ce développement a débuté avec un pressiomètre de type Ménard répondant mieux à ces exigences, soit le modèle G-AM apparu au début des années 70. Il s'est poursuivi avec le pressiomètre Texam, développé au début des années 80 par le professeur Jean-Louis Briaud de l'Université Texas A&M avec l'aide de Roctest. Non seulement ce nouveau pressiomètre répond bien aux exigences décrites ci-dessus, mais en plus, il facilite grandement la réalisation de l'essai. Cette particularité, fort appréciée sur un continent où l'essai pressiométrique n'était pratiqué que sporadiquement, a largement contribué à la diffusion de ce type d'appareil, au point où, aujourd'hui, la grande majorité des essais pressiométriques y sont effectués avec cet équipement.

Il faut préciser que certains principes du Texam diffèrent de ceux de Ménard :

- il utilise une sonde monocellulaire hydraulique, sans cellules de garde ; c'est une rupture avec Ménard, qui considérait la présence de cellules de garde comme un des points essentiels de son brevet ; elle est remplacée par une obligation d'élanement  $L/D > 6,5$ , dont il a été démontré qu'il suffisait pour négliger les effets de bord de la cellule de mesure ;
- la dilatation est réalisée par paliers de volume par le déplacement d'un piston pressurant le liquide utilisé, pour la dilation et sa mesure ; c'est également une différence importante par rapport à l'idée de Ménard d'imposer au sol une contrainte connue et de constater la déformation.

Ceci n'a pas empêché que ce pressiomètre soit développé "dans l'esprit Ménard", c'est à dire avec l'objectif d'obtenir un équipement produisant des résultats comparables, en termes de module et de pression limite, donc utilisables dans les méthodes de dimensionnement direct initiées par Ménard. Différentes études ont été faites en vue d'évaluer l'influence du mode de chargement et de la sonde monocellulaire (Marcil 2015, Marcil et al. 2021).

Le troisième élément ayant favorisé l'utilisation du pressiomètre en Amérique du Nord est la préparation dès 1984 de la norme ASTM D4719, sous l'impulsion de J-L Briaud et de M. Gambin, ainsi que la tenue du Symposium ISP2 aux États-Unis, à Texas A&M University en 1986.

La norme ASTM D4719 (ASTM 1987-2020) est venue officialiser l'essai pressiométrique Ménard en Amérique du Nord, avant même la première norme française NFP94-110 (Afnor 1991). Elle a dès lors autorisé l'utilisation d'autres types d'équipements, dont la sonde monocellulaire, et de protocoles d'essais, en admettant la déformation imposée aussi bien que la pression imposée, pour autant que ceci conduise à des résultats jugés comparables au pressiomètre Ménard. Bien que des différences aient été observées, dues notamment à la méthode de chargement, en général ces études ont montré que les résultats sont comparables ou légèrement plus conservateurs dans le cas du Texam (Marcil & Sedran 2024, Sedran et al. 2025).

### 3.2 Mise en place de la sonde.

La norme ASTM (Table 2 « Directives pour le choix des méthodes et outils de préparation des forages », voir figure 5) expose également les méthodes recommandées pour la mise en place de la sonde, et en cela les préoccupations de qualité du forage et de respect d'un temps limité entre forage et mise en place de la sonde ont exactement les mêmes motivations de recherche d'une décompression et d'un remaniement minimaux des parois du forage, et s'inspirent des principes des tableaux de la figure 3.

J.-L. Briaud, dans l'exposé de sa Ménard Lecture au 18<sup>ème</sup> congrès à Paris (Briaud, 2013) a résumé les règles fondamentales d'un forage en rotation avec injection (Figure 4).

#### RECOMMENDATIONS FOR A QUALITY PMT BOREHOLE WITH THE WET ROTARY METHOD

1. Diameter of drilling bit should be equal to the diameter of the probe
2. Three wing bit for silts and clays (carving) roller bit for sands and gravels (washing)
3. Diameter of the rods should be small enough to allow cuttings to go by
4. Slow rotation of the drill (60 rpm)
5. Slow mud circulation to minimize erosion
6. Drill 1 m past the testing depth for cuttings to settle
7. One pass down and one withdrawal (no cleaning of the hole)
8. One test at a time

Figure 4. Recommandations pour un forage pressiométrique de qualité par la méthode de forage préalable en rotation avec injection (Briaud, 2013)

Soil	Type	Rotary Drilling With Bottom Discharge of Prepared Mud	Pushed Thin Wall Sampler	Pilot Hole Drilling and Subsequent Sampler Pushing	Pilot Hole Drilling and Simultaneous Shaving	Continuous Flight Auger	Hand Auger in the Dry	Hand Auger With Bottom Discharge of Prepared Mud	Driven or Vibro-driven Sampler	Core Barrel Drilling	Rotary Percussion	Driven Vibro-driven or Pushed Slotted Tube
Clayey soils	Soft	2 <sup>B</sup>	2 <sup>B</sup>	2	2	1 <sup>B</sup>	NR	1	NR	NR	NR	NR
	Firm to stiff	1 <sup>B</sup>	1	2	2	NR	1	1	NR	NR	NR	NR
	Stiff to hard	1	2	1	1	1 <sup>B</sup>	NA	NA	NA	1 <sup>B</sup>	2 <sup>B</sup>	NR
Silty soils	Above GWL <sup>C</sup>	1 <sup>B</sup>	2 <sup>B</sup>	2	2 <sup>B</sup>	1	1	2	2	NR	NR	NR
	Under GWL <sup>C</sup>	1 <sup>B</sup>	NR	NR	2 <sup>B</sup>	NR	NR	1	NR	NR	NR	NR
Sandy soils	Loose and above GWL <sup>C</sup>	1 <sup>B</sup>	NR	NR	2	2	2	1	2	NA	NR	NR
	Loose and below GWL <sup>C</sup>	1 <sup>B</sup>	NR	NR	2	NR	NR	1	NR	NA	NR	NR
	Medium to dense	1 <sup>B</sup>	NR	NR	2	1	1	1	2	NR	2 <sup>B</sup>	NR
Sandy gravel or gravelly sands below GWL	Loose	2	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NR	NA	2	2
	Dense	NR	NA	NA	NA	NR	NA	NA	NR	NA	2	1 <sup>D</sup>
Weathered rock	...	1	NA	2 <sup>B</sup>	NA	1	NA	NA	1	2	2	NR

<sup>A</sup> 1 is first choice; 2 is second choice; NR is not recommended; and NA is nonapplicable.  
<sup>B</sup> Method applicable only under certain conditions (see text for details).  
<sup>C</sup> GWL is groundwater level.  
<sup>D</sup> Pilot hole drilling required beforehand.

Figure 5. Recommandations de la norme ASTM D4719 pour le forage pressiométrique préalable

Nous comparerons ces recommandations de la norme ASTM, qui ont peu changé de 1987 à 2020 (dernière édition), avec celles de la version en vigueur de la norme ISO (2021).

### 3.3 Pratiques spécifiques

Suivant l'expérience et les recommandations développées en France dans les années 60 et 70, la norme ASTM D4719 insiste sur la nécessité de produire un forage de bonne dimension et en altérant au minimum l'état naturel du sol. Ainsi, différentes méthodes y sont décrites et autorisées selon les types de sols, tel que présenté dans la « Table 2 » reproduite en figure 5.

Or, au fil des ans, une de ces méthodes s'est généralisée en Amérique du Nord : 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, lorsque correctement mise en œuvre, cette méthode assure une faible perturbation du sol, notamment grâce à l'utilisation de boues de forage, qui remplacent en quelque sorte le sol évacué et amènent une contrainte soutenant la paroi du forage.

Cette méthode reprend essentiellement des techniques développées en France, mais a été adaptée au contexte et à l'expérience nord-américaine. Elle se déroule en deux étapes (voir figure 6).

Tout d'abord (1), un forage de plus grand diamètre (environ 100 mm) 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 de plus petit diamètre est forée pour créer une « poche d'essai ». La sonde est ensuite insérée avec un délai minimal au milieu de cette zone (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 selon la profondeur et le type de sol. Préparer une cavité d'essai plus longue, dans laquelle plusieurs essais sont effectués en série, ne donne souvent pas de bons résultats et est généralement proscrit.

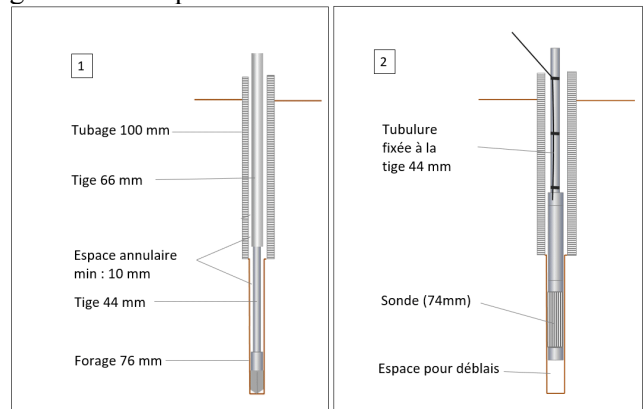


Figure 6. Étapes typiques de forage pressiométrique (Marcil, 2025).

Un outil de coupe du même diamètre que la sonde est généralement utilisé. D'autres dimensions seront souvent gardées à portée de main selon les types de sols. Un outil à rouleaux type tricône permettant une évacuation axiale sera généralement utilisé. Dans les sols argileux, il sera parfois remplacé par un outil à lames.

Tel qu'illustré (Fig. 6), un soin sera apporté au diamètre des accessoires utilisés (tiges, tubes,

adaptateurs) afin d'assurer une bonne évacuation des déblais.

Un fluide de forage à base de bentonite est généralement utilisé en Amérique du Nord, celui-ci étant reconnu comme produisant de meilleurs résultats que ceux ne comportant que des polymères.

Les recommandations générales quant à l'importance de forer lentement et à basse pression sont généralement suivies.

L'usage est que dès les premiers essais, une validation basée sur la forme de la courbe et sur le ratio  $E_M/P_{LM}$  soit effectuée, et au besoin, des ajustements apportés à la méthode de forage.

L'utilisation généralisée de la méthode décrite ci-dessus semble 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.

En résumé, les pratiques nord-américaines marquent un certain nombre de différences avec les habitudes françaises, qui ont progressivement figé les sondes tricellulaires type G de diamètre 60 mm (2-1/2'') comme le diamètre de référence.

- Usage des sondes de diamètre 76 mm (3''), en raison du fait que les outils de forage disponibles sont dans ces diamètres, les diamètres autour de 2-1/2'' (60 mm) étant moins répandus sur le marché nord-américain.
- Utilisation plus fréquente des sondes monocellulaires, avec le contrôleur pression-volume type Texam, que des sondes tricellulaires avec le contrôleur pression-volume type G-AM.
- La pratique autorisée par la norme ASTM D4719 de la procédure par paliers de volume, en rupture avec la pratique Ménard.

Malgré ces différences, la majorité des essais effectués en Amérique du Nord s'apparentent à l'essai pressiométrique Ménard en ce qu'ils visent à obtenir un module de premier chargement et une pression limite de type Ménard. La norme ASTM et la pratique prescrivent donc des façons de faire permettant l'atteinte de cet objectif de qualité, notamment en matière de réalisation du forage et temps avant l'essai.

## 4 OBJECTIF D'UNE MISE EN PLACE DE LA SONDE DANS UN SOL LE PLUS VIERGE POSSIBLE

### 4.1 Le temps de décompression, principal facteur d'altération du sol

La perturbation du début de la courbe pressiométrique par le forage préalable a bien été identifiée par les praticiens, dès les débuts de la pratique systématique de l'essai.

La cause principale de cette perturbation provoquant une phase de mise en contact « arrondie » en début d'essai, est unique : c'est le temps écoulé nécessaire au retrait de l'outil en fin de passe de forage, et son remplacement par la sonde et sa mise au contact du sol, qui laisse se développer une déformation par fluage du sol entre sa pression initiale au repos ( $p_0$ ) et la pression dans la cavité de forage qui est soit nulle (à la pression atmosphérique) si le forage est à sec, soit à une valeur intermédiaire si la paroi de forage est maintenue par une colonne de boue, qui joue donc un rôle important de retardateur, au moins partiel, de la décompression.

Ce temps de décompression entre forage et mise en place de la sonde dépend de 3 facteurs : la durée des manœuvres, fonction de la profondeur, le nombre d'essais par passe de forage, le temps d'expansion de la sonde dans le vide annulaire du forage avant d'atteindre la pression  $p_0$  initiale.

### 4.2 Deux voies pour limiter l'altération du sol

La nécessité de maîtriser et de limiter autant que faire se peut cette perturbation a conduit à deux types de démarches :

1. Soit développer la notion et la pratique de l'autoforage de la sonde, notion née dès les années 70 en même temps dans le réseau des LPC (Baguelin et al. 1972), et à l'Université de Cambridge (Camkometer pour recherche de  $K_0$ ). Chacun a construit des sondes munies d'un outil interne permettant sa mise en place « directe » par une combinaison de forage par l'outil interne et poussée sur le corps de sonde dont le sabot n'est donc pas foré : Pressiomètre Autoforeur (PAF) des LPC et Sonde CamInSitu. Les essais se présentent effectivement sans décompression, mais souvent au contraire avec une pression initiale à la déformation nulle ; certains utilisateurs considèrent cette valeur comme  $p_0$ .

Après quelques années, le PAF a démontré que les modules obtenus étaient en moyenne nettement plus élevés que les modules Ménard, et que la pression limite pouvait être atteinte pour une déformation de 20% en rayon de la sonde de 140 mm de diamètre. Ces résultats n'ont pas été employés en pratique pour le dimensionnement des fondations, et la pratique de l'appareil a progressivement décliné.

Les sondes de Cambridge InSitu ont connu un développement commercial plus régulier. Elles sont employées majoritairement pour la mesure de modules avec cycles en déformation imposée, selon la pratique anglaise, mais leur expansion limitée à environ 15% en rayon ne permet pas de mesure de la pression limite, et les résultats ne sont pas utilisés pour le

dimensionnement par la méthode directe, comme il est d'usage pour le pressiomètre Ménard.

2. Soit travailler à l'amélioration des méthodes de mise en place de la sonde, dans le but d'aboutir à ce que Michel Gambin appelait un « remaniement normalisé » qui permette de continuer à obtenir des résultats comparables entre eux quelle que soit la méthode, en conservant pour le protocole d'essai celui mis en place par Ménard. Ce travail s'est poursuivi au gré de l'évolution des normes françaises NF P94-110 (1991), NF P94-110-1 (2000), puis européennes (CEN) et internationales (ISO) CEN-ISO 22476-4 (2009), CEN-ISO 22476-4 (2021), et parallèlement des versions successives de la norme ASTM D4719, plusieurs fois révisées entre 1987 et 2020.

Pour l'Amérique du Nord, J. Benoit (2014) a fait une analyse comparée de l'usage du pressiomètre en autoforage ou en forage préalable.

## 5 COMPARAISON DES EXIGENCES NORMATIVES ASTM ET ISO ET CONSÉQUENCES

Les sols et roches testés, même s'ils présentent des répartitions géologiques spécifiques, se retrouvent globalement présents dans les deux régions concernées par les deux normes. Les fournitures de machines et outils de forage diffèrent un peu selon les constructeurs présents sur ces deux marchés.

Nous avons réalisé un tableau composite juxtaposant les réponses des deux normes historiques (Fig. 3), de la norme ASTM actuelle (Fig. 4) et de la norme ISO en vigueur (2021). Le résultat trop volumineux pour être présenté ici fait l'objet d'une notice consultable par ailleurs (Eurogé DT26/2026).

On notera plus particulièrement les principaux sujets de convergence ou de divergence entre les pratiques ASTM et ISO :

- Il y a accord pour dire que le forage rotatif avec injection de boue est la méthode la plus universelle pour tous les types de sols.
- La norme ASTM garde une certaine prévention contre la rotopercussion, comme le mode opératoire de 1971, alors que la norme ISO a évolué pour reconnaître que la qualité de forage tend dans beaucoup de cas à être équivalente. Pour trancher le débat, on peut faire remarquer que les marteaux de rotopercussion diminuent automatiquement la fréquence si le sol oppose peu de résistance, et que par ailleurs le foreur a la possibilité de ne pas enclencher la frappe et rester en rotation pure.
- Le tube fendu ouvert ou autoforé est recommandé dans beaucoup de sols, mais recueille un nombre

d'étoiles moins important que le forage préalable à la boue.

- La divergence principale est l'item 8 du tableau en figure 5 « *Un seul essai par passe de forage* », gage de qualité, alors que la norme ISO, à la suite des normes NF, conserve la possibilité de réaliser 2 à 5 essais par passe de forage, selon les sols.
- L'attention portée en Amérique du Nord à ce que les tiges de forage restent dimensionnées pour laisser un passage suffisant pour les cuttings est également un oubli complet de la norme ISO.

Ces différences peuvent paraître de détail, elles ont des conséquences majeures sur la qualité des essais. Les essais réalisés un par un dans une poche de forage spécifique, avec injection de bentonite et utilisation de tiges de diamètre inférieur à l'outil, ont une incidence sur le nombre d'essais moyen dans un poste de travail, mais assurent une représentativité des essais proche de l'état naturel. La pratique de trop d'essais par passes de forage, parfois au-delà même de la limite normative, et souvent accompagné d'une vitesse de forage excessive, ainsi que l'abandon de la bentonite pour des boues aux polymères, voire à l'eau claire, affectent à la baisse le module et la pression limite, au point d'avoir un impact négatif sur le coût et le planning des projets (Duplaine et Baud, 2025).

## 6 CONCLUSIONS

La recherche d'optimisation de la qualité des essais dans la pratique nord-américaine du pressiomètre, exposée en détail par L. Marcil (2025) est héritée en grande partie de l'expérience pressiométrique pionnière des premiers concessionnaires de Louis Ménard et du réseau des Laboratoires des Ponts et Chaussées. Quelques principes nécessaires à la représentativité des essais en ressortent :

- Prépondérance du forage rotatif avec injection de boue, conduisant à une uniformisation et un contrôle accru de la méthode de forage
- Importance de la limitation de la longueur de la poche de l'essai afin de ne permettre qu'un seul essai à la fois
- Contrôle du diamètre des tiges de forage afin d'assurer l'espace annulaire approprié à l'évacuation des boues de forages
- Utilisation généralisée des boues de bentonite
- Restriction de l'usage du tube fendu en battage ou fonçage direct dans les sols bouillants.
- Le tube fendu en pré-forage est peu utilisé en Amérique du Nord, nettement plus fréquent chez les utilisateurs de la norme ISO, soit en forage préalable « pilote », soit en tube fendu ouvert avec enlèvement des déblais de forage. Le sujet difficile du calcul du module avec

tube fendu a reçu récemment une réponse (A. Finiasz et al. 2026).

Ces conclusions rappellent l'importance, toujours actuelle, d'assurer un forage de qualité limitant la perturbation du sol, et déterminent le temps à consacrer aux mesures pressiométriques pour l'atelier de sondages qui est un « laboratoire in situ ». La recherche d'une productivité dans la reconnaissance géotechnique, en outrepassant les principes rappelés, n'est pas compatible avec l'objectif d'une optimisation du dimensionnement des fondations (Magnan, 2002).

Une convergence devrait être recherchée entre les commissions ISO TC341 WG5 « Borehole expansion tests » et ASTM D4719 pour une meilleure définition des conditions nécessaires à la réalisation d'essais représentant mieux la réalité des terrains testés.

## REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient le Comité International sur le Pressiomètre, ICP (<https://icp-pressuremeter.com/>).

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ASTM (2020). Annual Book of ASTM Standards, Section 4: Construction, Vol. 04.08: Soil and Rock (1): D4719-20 <https://www.astm.org/search/result?q=D4719>
- Baguelin F., Jézéquel J., Le Mée E., Le Méhauté A. (1972) Expansion de sondes cylindriques dans les sols cohérents. Bull. Labo. P.et Ch, 61, 189-202
- Baud J.-P., Gambin M., Uprichard S. (1992) Modeling and automatic analysis of a Menard pressuremeter test. Géotechnique et informatique, Presses des Ponts, Paris. <https://www.researchgate.net/publication/387075209>
- Benoît, J. and Howie, J.A. (2014) A view of pressuremeter testing in North America, Soils and Rocks, São Paulo, 2014, 37(3): 211- 231, September-December. <https://soilsandrocks.com/sr-373211>
- Briaud J.-L. (2013) "Ménard Lecture. The pressuremeter test: Expanding its use". Proceedings of the 18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Paris 2013, p. 107-126, Presses des Ponts et Chaussées, Paris, France. <https://www.issmge.org/uploads/publications/1/2/107-126.pdf>
- Duplaine H. et Baud J.-P. (2025) Incidence de la qualité des essais pressiométriques sur le coût et le planning d'un ouvrage. Proceedings of the 8th International Symposium on Pressuremeters, ISP8, Luxembourg, <https://www.issmge.org/uploads/publications/105/136/ISP2025-41.pdf>
- Finiasz A., Grégoire M., Rispal M., Habert J., Désourtheau P., Baud J.-P., Reiffsteck P., Aguado P. (2026) Effets de l'utilisation du tube fendu sur les paramètres pressiométriques Ménard. JNGG 2026, Grenoble.
- Gibson, R.E. and Anderson, W.F. (1961) In Situ Measurement of Soils Properties with the Pressuremeter. Civil Engineering and Public Works Review, 56, 615-618. [https://reports.cambridge-](https://reports.cambridge-insitu.com/resources/references/situ-measurement-soil-properties-pressuremeter)
- [insitu.com/resources/references/situ-measurement-soil-properties-pressuremeter](https://insitu.com/resources/references/situ-measurement-soil-properties-pressuremeter)
- ISO 22476-4: 21 Geotechnical investigation and testing — Field testing, Part 4: Prebored pressuremeter test by Ménard procedure, 2nd Edition, ISO, 09/2021, <https://www.iso.org/fr/standard/75662.html>
- Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, (1971) "Mode opératoire de l'essai pressiométrique", Dunod, éd. <https://web.archive.org/web/20190410204649/http://icp-pressuremeter.com/wp-content/uploads/2018/04/mode-op%C3%A9ratoire-LCPC-1971-du-Pressio.pdf>
- Ladanyi, B. 1963. Expansion of a cavity in a saturated clay medium. Proc. ASCE, 89, SM4, pp.127-161.
- Magnan, J.-P. (2002) "L'organisation du travail en géotechnique : développement, normalisation et artisanat." Rev. Fr. Géotech. N° 99, pp. 73-80, Paris (2002). <https://doi.org/10.1051/geotech/2002099073>
- Marcil L., Sedran G., and Failmezger R., (2015) Values of pressuremeter modulus and limit pressure inferred from stress or strain controlled PMT testing. Symposium International ISP7/PRESSIO 2015, pp. 173-179. <https://roctest.com/wp-content/uploads/2017/01/ISP119-Paper-Marcil-Sedran-Failmezger-vfr.pdf>
- Marcil L. (2021) Comparison between pressuremeter tests carried out in a controlled environment with monocell vs Menard-type tricell pressuremeters. 6th International Conference on Geotechnical and Geophysical Site Characterization, Budapest (Hungary). <https://doi.org/10.53243/ISC2020-200>
- Marcil, L., and Sedran, G. (2024) "Comparative Tests between Texam and Menard Pressuremeters", in: Proceedings of the 7th Inter. Conf. on Geotechnical and Geophysical Site Characterization, Barcelona, Spain, 2024. <https://doi.org/10.23967/isc.2024.085>
- Marcil L. and Gravel S.P. (2025) Optimisation of Drilling Methods for Pressuremeter Tests - North American Experiments. Proceedings of the 8th International Symposium on Pressuremeters, ISP8, Luxembourg, <https://www.issmge.org/uploads/publications/105/136/ISP2025-42.pdf>
- NF P 94-110-1, (2000) Essai pressiométrique Ménard Partie 1 : Essai sans cycle. [https://www.academia.edu/36530841/Essai\\_pressiométrique\\_Ménard](https://www.academia.edu/36530841/Essai_pressiométrique_Ménard)
- Sedran G., Marcil L., Failmezger R., and Sedran A. (2025) Work criterion to assess rate effects on pressuremeter testing: stress- vs strain-controlled procedures. Proceedings of the 8th International Symposium on Pressuremeters, ISP8, Luxembourg, <https://www.issmge.org/uploads/publications/105/136/ISP2025-38.pdf>.
- Techniques Louis Ménard (1970) Notice D10, dite « Notice exécution ». Règles relatives à l'exécution des essais pressiométriques sur le terrain. <https://web.archive.org/web/20190410012437/http://icp-pressuremeter.com/wp-content/uploads/2018/04/D10-notice-execution.pdf>
- Van Wambeke A., d'Henricourt J. (1971) Courbes pressiométriques inverses : Méthode d'interprétation de l'essai pressiométrique. Sols-Soils (VII), 25, 15-16