

INFLUENCE DE LA QUALITÉ DU FORAGE SUR LES RÉSULTATS DES ESSAIS PRESSIOMÉTRIQUES

INFLUENCE OF DRILLING QUALITY ON THE RESULTS OF PREBORED PRESSUREMETER ESSAIS

REIFFSTECK Philippe¹, SAUSSAYE Lucile², HABERT Julien³

¹ Université Gustave Eiffel, Paris

² Cerema, Blois

³ Terrasol, Paris

RÉSUMÉ – Cet article présente une étude de l'influence du mode de mise en place de la sonde pressiométrique sur les essais d'expansion en forage réalisés selon la procédure Ménard. Il analyse les résultats de plusieurs campagnes d'essais croisés, historiques et récentes, qui ont été réalisées sur des terrains de caractéristiques bien documentées, dans des sables, des limons, des argiles, de la craie, et des marnes, et avec différents modes de mise en place de la sonde.

ABSTRACT – This article presents a study of the influence of the mode of installation of the pressuremeter probe on the expansion tests in prebored holes carried out according to the Ménard procedure. It analyzes the results of several campaigns, former and recent, which have been carried out on well-documented sites, in sands, silts, clays, chalk, and marl, and with different modes of probe placement.

1. Introduction

Le module pressiométrique Ménard E_M est très sensible à la qualité du forage dans lequel la sonde pressiométrique est insérée (comme l'est, dans une moindre mesure, la pression limite p_{lM}). À l'origine, le forage effectué avec une tarière à main (dans les sols fins) avec des précautions importantes (par exemple, l'injection de boue bentonitique afin de soutenir ses parois) était considéré comme la technique qui perturbait le moins le sol. Cette méthode de forage, inutilisable dans de nombreux sols et contraignante à partir de profondeurs importantes, a été délaissée au profit de techniques (et moins coûteuses). La large gamme d'outils et de machines de forage a encouragé les études sur l'influence du mode de forage sur les caractéristiques obtenues pour les principaux types de sols et l'élaboration de recommandations, incorporées progressivement dans les procédures d'essai LPC (voir tableau 1), la Norme française NF P94-110-1 (AFNOR, [1]) et la norme internationale NF EN ISO 22476-4 (AFNOR, [2]).

Cependant, les bonnes pratiques ne sont pas toujours suivies et il faut admettre que certaines des valeurs du module E_M (et de la pression limite p_{lM}) retrouvées dans la pratique ne traduisent pas les propriétés mécaniques réelles du sol. Ces pratiques desservent à l'essai pressiométrique, qui est d'une grande valeur et très approprié pour le calcul des fondations (portance, tassement et comportement sous charges transversales) est bien établie [3,4].

Un forage de bonne qualité reste essentiel pour la qualité de l'essai pressiométrique standard. Plusieurs facteurs déterminent la qualité et la fiabilité des paramètres mesurés par le pressiomètre : les outils et les paramètres de forage ainsi que la longueur de passe forée avant l'essai affectent la qualité du trou et influencent les résultats des essais. Ces exigences énoncées depuis les années 70, il a donc les recommandations présentées dans le tableau 1 ont été produites, afin d'obtenir des résultats indicatifs du comportement réel du sol et d'utiliser des méthodes de conception basées sur le pressiomètre.

Tableau 1. Mise en place des sondes pressiométriques - lignes directrices (LCPC, 1971)

			Ground classification												
			Sols fins cohérents			Limons et silts		Sables			Graviers			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	+	+		+	+	+	+						
		Tarière hélicoïdale continue	-	o	+	-	+	-	+	+		o	o	+	
		Outil plein avec injection	-	o	+	o	o	o	+	+		o	o	+	+
		Carottier	-	-	+	-	-	-						+	+
	Percussion rotation	-	-	o	-	o	-	o	+		o	o	+	+	
	Battage d'un tube lisse fréquemment remonté	-	-	o	-	o	-	o	+		o		+		
Introduction avec refoulement	Vibro-fonçage	carottier	-	-	o	-	o	-	o	+		o		+	
		tube fendu	-	-	-	o	-	-	o	o	o	o	o		
Forage avec paroi maintenue rigidement	Sonde auto-foreuse	tube fendu	+	+		+	o	+							
		tube fendu	-	-	o	o	o	o	+	+	+	+	+	+	
- méthode déconseillée + méthode recommandée o méthode tolérée			1 mous 2 moyennement consistants 3 très consistants			1 noyés 2 secs		1 lache noyé 2 moyennement compact 3 compacts			1 altéré 2 sain				

2. Sites d'essai

Lors de l'élaboration en 1971 de la procédure du Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC) pour les essais pressiométriques, une étude consacrée aux modes de forage en fonction du terrain a permis de proposer des recommandations [5, 6, 7, 8, 9, 10]. Le tableau figurant dans la référence [5] résumant les techniques recommandées, tolérées ou déconseillées, est l'ancêtre du tableau C.2 extrait de la norme NF EN ISO 22476-4. Les recherches menées dans différents types de sols par les Laboratoires Régionaux des Ponts et Chaussées (LRPC) ont été organisées comme suit : sables de Loire (Angers), argiles et marnes raides (Bordeaux), limons (Lyon et Melun), argiles raides et craie altérée (Rouen), marnes calcaires molles (Melun), argiles et schistes altérés (Saint-Brieuc).

Ces résultats, présentés en partie dans Baguelin et al. [3]., sont repris le Tableau 2.

Tableau 2. Modes de mise en place utilisée dans cette recherche

Mode	Technique	Acronyme	Diam.
Mode 1	Tarière à main, mètre par mètre	HA	60
Mode 2	Tarière hélicoïdale continue, mètre par mètre	CFA	63
Mode 3	Tarière hélicoïdale continue, passe unique	CFA_u	63
Mode 4	Roto percussion, mètre par mètre	ROTOP	
Mode 5	Outil désagrégateur, passe unique	OHD_u	63,5
Mode 6	Outil désagrégateur mètre par mètre	OHD	63,5
Mode 7	tube fendu battu	DST	63
Mode 8	tube fendu vibro-foncé	VDT	63
Mode 9	tube épais battu	OS-TKWH	63
Mode 10	Core drilling		

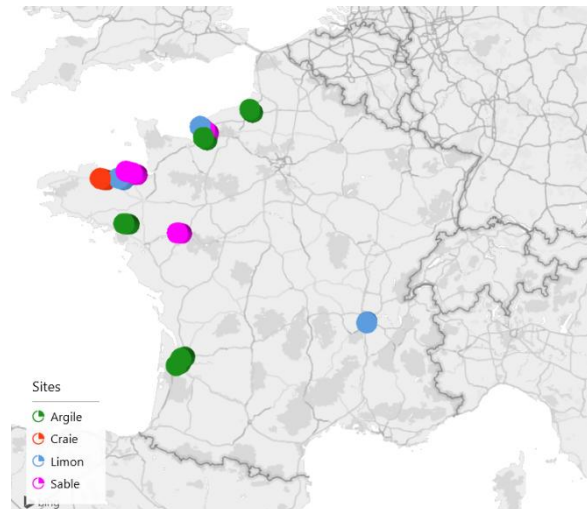


Figure 1. Situation des sites d'essais

Ces campagnes ont été complétées par le laboratoire de Rouen en 1997, le laboratoire de Bordeaux en 2010 et l'IFSTTAR et le laboratoire de Saint-Brieuc en 2018 ainsi que Ginger en 2019 [11, 12, 13, 14]. Ces essais ont été menés sur trois sols (limon, argile très plastique, sable). La situation des sites est reportée sur la Figure 1.

2.1. Sites d'essais argileux

Le premier site, situé près de Bordeaux, comprend cinq forages de 7 à 10 m de profondeur dans une zone carrée de 5 m de côté [6]. La distance minimale entre les trous de forage est de 1 m. Le site est assez homogène, la nappe est à 1,1 m de profondeur, et l'argile marneuse très plastique stampienne repose sur la marne raide peu plastique Sannoisienne

Si l'outil désagrégateur avec de la boue (mode 6) est pris comme référence, le forage à l'eau (modes 6' et 6'') et le carottage (mode 10) et l'outil à lame donnent des résultats plus élevés (Fig.2), mais qui restent dans une fourchette se situant autour de 20% de la valeur moyenne.

Le deuxième site est situé à Pont L'évêque en Normandie [8]. Si la tarière à main (mode 1) est prise comme référence, la figure 3 montre une pression limite surestimée, lorsque la sonde est insérée par déplacement du sol (mode 7) et dans une mesure moindre lors du forage à l'aide d'un outil destructeur (mode 6).

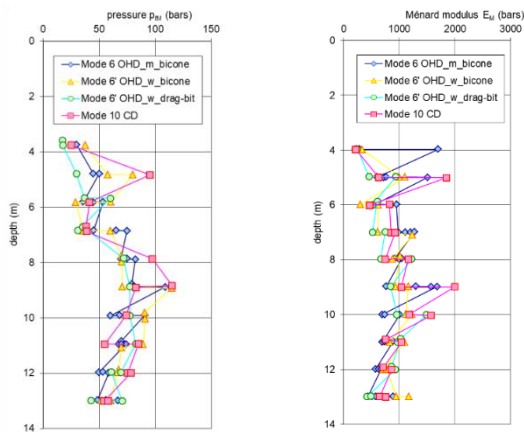


Figure 2. Influence du mode de forage pour une argile raide

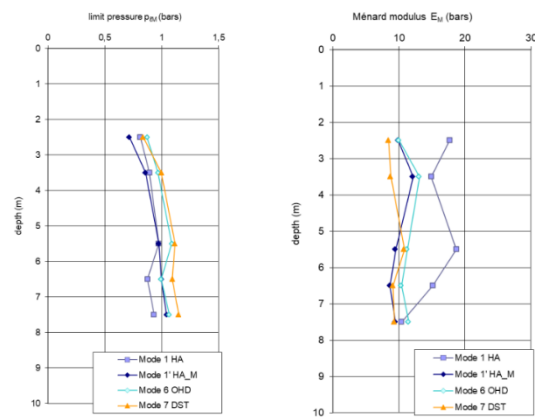


Figure 3. Influence du mode de forage pour une argile molle

Le module Ménard est sous-estimé lorsque la paroi du forage n'est pas stabilisée par la boue ou se déplace lors de l'entraînement de la sonde. Les principales conclusions étaient que pour les sols fins très mous à moyennement raides, la tarière à main avec boue est la méthode la plus adaptée. Si la tarière à main ne peut pas pénétrer les sols fins moyennement à fortement raides, la tarière continue ou le forage rotatif avec de la boue est à préférer.

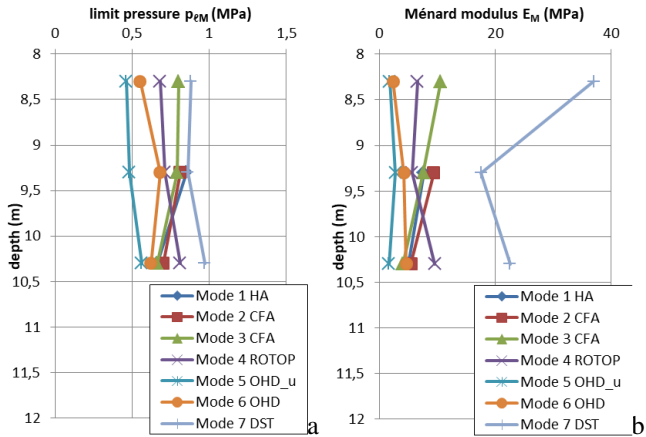


Figure 4. Influence du mode de forage pour une argile ferme

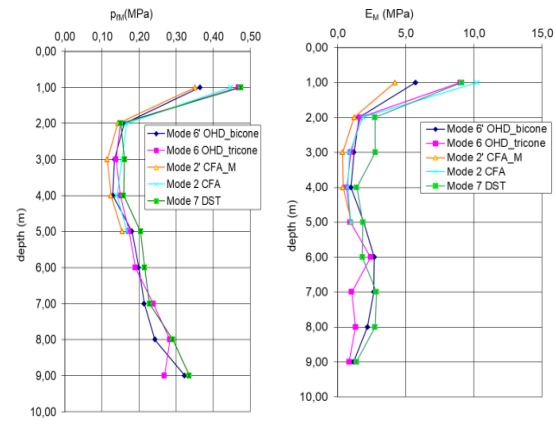


Figure 5. Influence du mode de forage pour une argile organique à Cubzac (d'après Gardet et Leprêtre, [12])

Le troisième site à Challengenville a fait l'objet d'une campagne d'essais croisés en 1997, dans le pli anticlinal exhumé et érodé du Pays de Bray dans le département de la Seine Maritime [11], comprend une argile noire albienne (, argile de Gault), située sous la nappe phréatique. Sept modes de forage ont été utilisés, allant de la tarière à main avec des passes de 1 m (mode 1) au fonçage direct de la sonde (mode 7), protégée par un tube fendu, qui est une méthode absolument interdite.

Les figures 4a et 4b montrent l'influence du mode de forage sur le module E_M . La nature hautement destructrice des modes 5 et 6 (outil de désagrégation sans percussion) est évidente : des valeurs de module E_M très faibles, les pressions limites réduites sont obtenues. La mise en place par refoulement (mode 7) conduit à des modules E_M très élevés: à noter que l'augmentation des pressions interstitielles lorsque la sonde est foncée explique aussi ce résultat. Dans le cas des modes 2, 3, 4 et 1, les modules E_M restent relativement proches.

Une étude menée par Gardet et Leprêtre (Cubzac-les-Ponts, [12]) confirme les conclusions des travaux précédents (Fig. 5) : i) la référence reste pour le sol compressible la tarière continue à injection de boue, ii) la tarière continue donne une valeur surestimée, iii) le trépan à molette biconique avec bentonite donne le meilleur forage et iv) le trépan à molette à trois cônes avec bentonite est probablement mis en œuvre avec une vitesse d'avance excessive et la sonde foncée donne une surestimation sur toute la hauteur.

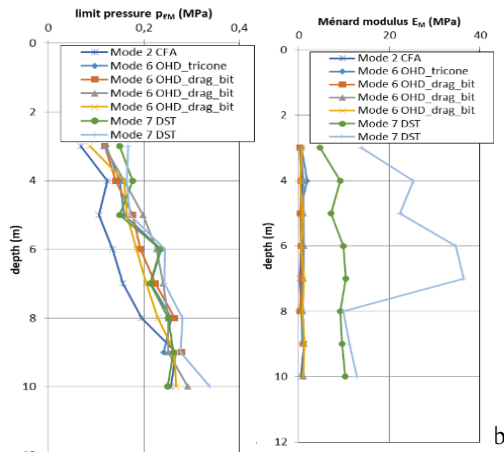


Figure 6. Influence du mode de placement pour une argile organique molle

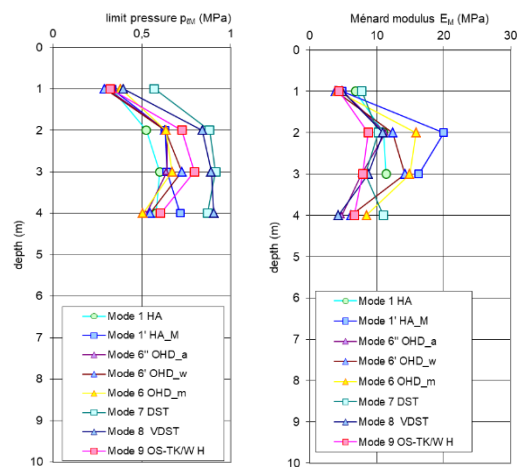


Figure 7. Influence du mode de placement pour un limon

Désourtheau et Mourier ont étudié une épaisse couche d'argile organique molle (Pont de Cran, [13]) : La figure 6 confirme que le mode tube fendu battu conduit à des modules E_M surestimés. Le mode CFA (sans boue) dans l'argile molle peut créer une succion lors du retrait de l'outil et donc conduire à de faibles pressions limites.

2.2. Sites d'essais limoneux

Le premier site, situé aux Minguettes [9], est homogène et constitué de limons surconsolidés de structure fragile et appelés loess. La cavité créée par forage à l'air (OHD_a) donne des volumes initiaux élevés (250 cm³). Si la tarière à main est prise comme référence, le forage outil désagrégateur sous boue donnent des pressions limites légèrement supérieures (5 à 15%) : cette augmentation est plus importante avec l'eau (15 à 30%) et encore plus avec les méthodes par refoulement (50 à 100%) (Fig.7). L'injection d'eau et le fonçage du tube entraînent une augmentation avec la profondeur (5% près de la surface et 30 à 50% plus profondément). Pour le module E_M , les tendances sont moins évidentes : augmentation du module pour les méthodes utilisant de la bentonite (40 à 65%) et diminution pour les autres modes (10% pour les tubes fendus battus ou vibrés). Le deuxième site surplombe le Havre (Le Mont Gaillard), et a été utilisé pour la campagne de 1997. Le sol est un limon éolien à faible plasticité, recouvrant tous les plateaux [11]. Le est présent sur 4 et 5 mètres d'épaisseur, et sa densité augmente avec la profondeur.

Trois modes de forage ont été testés, avec un forage pour chaque mode ; chacun était situé au sommet d'un triangle équilatéral avec des côtés de 2 m.

- Mode 1 (HA). Tarière à main dans des conditions sèches, d'un diamètre de 63 mm. Les passes de 1 m ont nécessité uniquement chacune cinq ou six passages de la cuillère : c'était le mode de forage de référence.
- Mode 2 (CFA). Tarière continue à sec d'un diamètre de 63 mm (mode de forage le plus utilisé dans ce type de sol), selon la procédure suivante qui minimise «l'alésage» de la cavité : i) forage de 0 à 2,5 m avec deux essais pressiométriques effectués à des profondeurs de 2 m et 1 m, ii) de 2,5 à 4,5 m avec un essai pressiométrique effectué à une profondeur de 3 mètres iii) de 4,5 à 5,5 m, avec un essai pressiométrique effectué à une profondeur de 5 mètres.
- Mode 3 (OHD). Outil de désagrégation «à trois lames» d'un diamètre de 64 mm en un seul passage, de 0 à 5 m, puis réalisation des essais de bas en haut.

Les figures 8a et 8b montrent l'effet des modes de forage sur le module E_M . La Fig.8 suscite les remarques suivantes : i) en général, la tarière à main fournit les valeurs de module les plus élevées. En moyenne, les modules E_M de la tarière continue (mode 2 CFA) sont 1,5 fois inférieurs à celles de la tarière à main ($E_M = 10,8$ MPa, contre $E_M = 7$

MPa pour la tarière continue) ; i) l'outil de désagrégation (ODG, une seule passe de forage de 5 m), conduit à une plus grande dispersion entre les résultats, même si le nombre d'essais effectués est faible et que la densité du limon augmente avec la profondeur, comme l'illustrent les profils de pression limite (Fig. 8a).

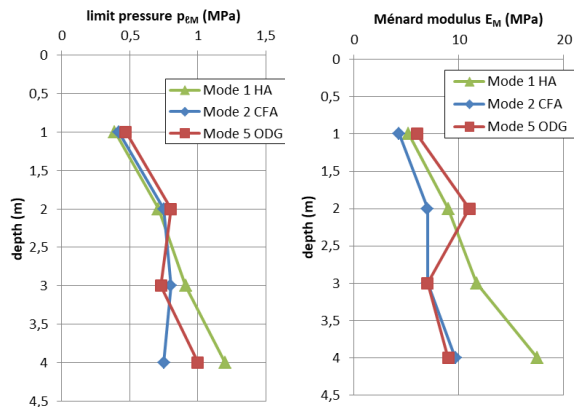


Figure 8. Influence du mode de placement pour un limon

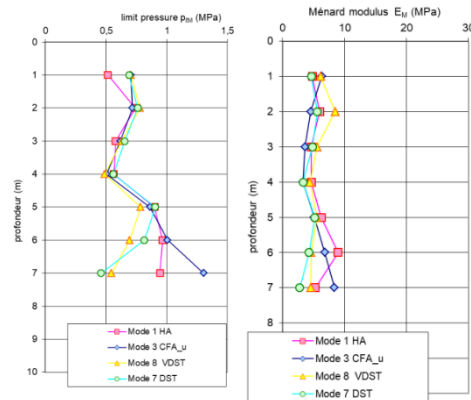


Figure 9. Influence du mode de placement pour un sable

2.3. Sites d'essai sableux

Le premier site est une plage de Saint Jean de la Croix sur la rive gauche de la Loire [10] : la couche de sable est légèrement lâche et considérée comme homogène. La nappe phréatique reliée à la rivière est stable autour de 1,3 m de profondeur (Fig. 9). Les valeurs obtenues pour les pressions limites semblent indépendantes du mode de forage. Pour le module E_M , la tarière à main donne des valeurs plus élevées que le mode tube fendu vibré et le mode tube fendu battu. Dans ce sol, le vibrofonçage du tube fendu donne des résultats proches de ceux de la tarière à main. Pour les sables lâches à compacts et grossiers, la méthode recommandée est donc, la tarière à main ou par défaut la tarière continue : tout autre processus provoquant une poussée par battage ou vibration, doit être écarté. Si ces sols présentent une cohésion, le vibrofonçage du tube fendu peut être tolérée.

Des essais dans le sable fin de la rivière ont été également effectués en 1997 à Honfleur [11] sur la rive sud de la Seine sous la nappe phréatique, à des profondeurs de 6, 7 et 8 mètres (Fig. 10). Quatre modes de forage ont été comparés, avec deux forages par mode :

- Mode 1 (HA): tarière à main avec injection de boue et passes de 1 m,
- Mode 2 (CFA): tarière continue à boue et passes de 1 m,
- Mode 3 (CFA) : tarière continue à circulation de boue, une seule passe de forage des essais du bas vers le haut, Mode 4 (ROTOP): forage par percussion rotative et passes de 1 m.

Malgré le petit nombre d'essais, l'influence des modes de forage sur les paramètres pressiométriques est nette.

Dans le cadre d'une étude récente menée en 2018 (Saint Malo [14]), de premiers forages ont comparé les modes de placement (Fig.11) : des résultats similaires sont obtenus, même si le mode de placement a une influence forte sur le volume de contact. Le tube fendu mis en place après pré-forage montre une très faible différence avec les résultats obtenus avec l'outil désagrégateur. Ces essais montrent la difficulté de forer dans le sable sous la nappe. Conformément à la révision de la norme EN ISO 22476-4 (2018 – en cours) et du PN ARSCOP, le forage rotatif à la boue et le tube fendu avec pré-forage sont adaptés à condition d'assurer le centrage de l'outil.

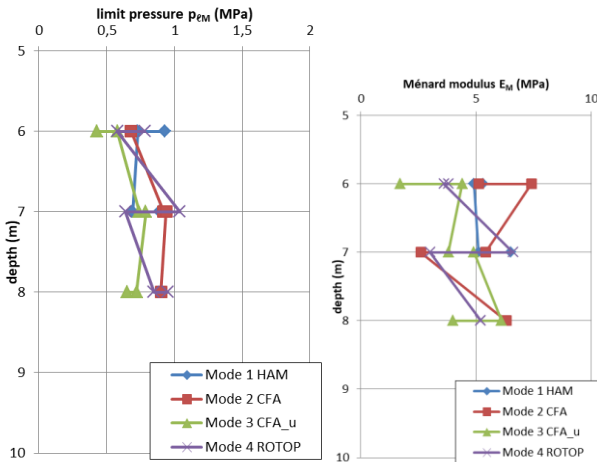


Figure 10. Influence du mode de placement pour un sable alluvial

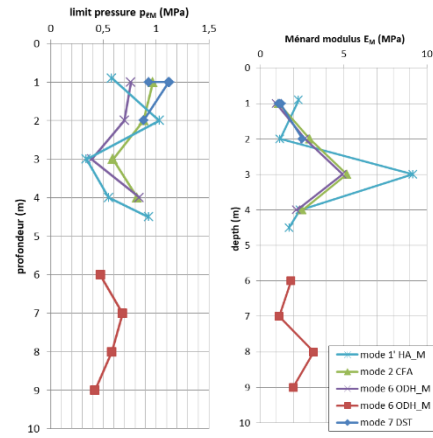


Figure 11. Influence du mode de placement pour un sable

3. Discussion

La principale conclusion est l'élimination de la méthode de carottage à l'aide d'un tube battu (tube lisse fréquemment soulevé) dans des sols fins, des limons et des limons cohésifs ainsi que du sable ou du gravier compact. La tarière à main reste la panacée, même si elle ne permet pas des cadences importantes.

Dans les sols fins et mous, les modes risquant de provoquer une succion à la remontée (CFA et carottage) doivent être écartées. La figure 13 montre que pour l'argile, la tarière continue sous-estime de 10 % la pression limite par rapport à la tarière à main et les autres techniques la surestiment de 5 à 15% pour l'outil de désagrégation et le tube fendu battu respectivement. Les méthodes par introduction directe du tube fendu battu doivent laisser le pas à la méthode par vibration qui semble moins perturber le sol tout en étant plus rapide. La pression limite dans la majorité des cas est moins sensible au vibrofonçage qu'au battage du tube fendu tout comme le module E_M mais l'étude des sols hétérogènes (craie grêlée, argile à silex, flysch ou tout autre type de sols consistant en un enrobage matriciel mou d'éléments durs) doit faire l'objet d'une étude particulière. Les méthodes de carottage peuvent être pertinentes dans les terrains raides et les roches tendres, sous réserve d'un certain doigté pour obtenir un forage bien calibré.

4. Conclusion

Les essais pressiométriques effectués dans un forage avec les différentes techniques décrites précédemment, acceptées ou interdites, montrent plus d'influence sur les valeurs de module E_M dérivées de l'essai que sur la pression limite. Il est nécessaire lors de la réalisation des essais pressiométriques de s'assurer que le mode de mise en place est correctement sélectionné et que le forage est correctement effectué. Nous recommandons donc de suivre les règles fixées dans le tableau 3 extrait de [2].

L'expérience montre que la pression limite est généralement insensible à la mise en œuvre, à condition que le forage soit bien calibré.

5. Remerciements

Les auteurs remercient le PN ARSCOP, le Ministère de la Transition Ecologique et Solidaire pour le financement de ce projet de recherche ainsi que leurs collègues R. Benot, G. Desanneaux du Cerema pour leur assistance dans ce projet.

Tableau 3. Mise en place de la sonde selon NF EN ISO 22476-4 (AFNOR, 2015)

Refolement du sol			sans								avec	
			rotation				Roto-perc.		Tube battu			
Technique de forage → type de sol et de roche EN ISO 14688-1&2 et 14689 ↓			OHD (M)	HA (M)	CFA	CD	RP (M)	ST DT (M)	OS		VD	DST
									T	Tk		
fin	argile	Mou	++	+++	+	+		+	+++	-		
		ferme	+++	+++	++	++		++	++	+		
		raide	+++	+	+++	+++	-/+	++	+	+	-	
		limon au-dessus de la nappe	+++	+++	+++	++	-/+	++	++	-	+	-
		limon sous la nappe	+++	++	-	+		-	-	-	+	
gros sier	sable au-dessus de la nappe		+++	+++	++	+		++	-	-	-	-
		sable sous la nappe	+++	++	-	-	-/+	++	-	-	-	+
		graviers	++	-	-	+	-/+	+++		+	+	+++
très gros si er		galets, galets avec graviers, blocs	++			++	++/+++	++		-	-	++
Inter mé diaire		sols non homogènes cohérents et non-cohérents	++	-/+	+	++	+ / ++	++		+	+	+
roc her	craie		+++	+/-	+	++	++	+++		+	-	
		roche altérée, tendre				+++		++		-	-	
		Rocher sain	++		-	+++	+++	+		-	-	

6. Références bibliographiques

- [1] AFNOR, Essai pressiométrique Ménard - Partie 1 Essai sans cycle NF P94-110-1, 2000, 43 pages
- [2] AFNOR, Reconnaissances et essais géotechniques. Essais sur le terrain. Essai pressiométrique Ménard, NF EN ISO 22476-4, 2015, p. 43.
- [3] Baguelin F., Jézéquel J., Shield D.H., Le pressiomètre et l'ingénierie des fondations, Publications Transtech, 1978, 618 pages
- [4] Briaud, J.L., Le pressiomètre, Balkema Eds., 1992, 322 pages
- [5] LCPC Essai pressiométrique normal, mode opératoire MS-IS-2, Eds Dunod, Paris, 1971, 50 pages
- [6] Bru J.P., Espagnet J.C., Etude de la mise en œuvre du pressiomètre dans les argiles et marnes raides méthodes de forage GEESEP, FAER 1.05.11.1, 1971, 29 pages
- [7] Bigot G., Mise en œuvre de la sonde pressiométrique dans les limons, dossier 2457, GEESEP, FAER 1.05.11.1, 1972, 20 pages
- [8] Combarieu O., Mise en œuvre du pressiomètre dans la craie altérée GEESEP, FAER 1.05.25.1, 1973, 44 pages
- [9] Marchal J., Influence du mode de mise en place de la sonde pressiométrique, Loess des Minguettes, GEESEP, FAER 1.05.11.1, 1972, 61 pages
- [10] Nazaret M., Influence du mode de mise en place de la sonde pressiométrique, Sable de Loire, GEESEP, FAER 1.05.11.1, 1972, 47 pages
- [11] Combarieu O., Canépa Y., L'essai pressiométrique de déchargement-rechargement, BLPC, 2001, 233: 37-65
- [12] Gardet S., Leprêtre F. Site expérimental de Cubzac les ponts Etude de la mise en œuvre du pressiomètre dans les argiles molles : méthodes de forage, Dossier 14.75.C698, 2010, 21 pages
- [13] Désourtheau P., Mourier J.P. Essais croisés Pont de Cran, Rapport de projet ARSCOP, LC / 19 / ARSC / 15, 2019, 15 pages
- [14] Reiffsteck P., Fanelli S., Karagiannopoulos P.G., Desanneaux G., Partie 1 : Essais pressiométriques cycliques avec mesure de la pression interstitielle à Newington, Plancoët, Saint-Benoit des Ondes et Saint Malo, Rapport du projet ARSCOP LC / 17 / ARSC / 05 (RP2-E17052), 2018, 54 pages