

# ESSAIS CROISÉS AVEC LE PRESSIOMÈTRE DANS LE CADRE D'ARSCOP

## TEST CAMPAIGNS WITH THE PRESSUREMETER IN ARSCOP PROJECT

Michel RISPAL<sup>1</sup>, Patrice DESOURTHEAU<sup>2</sup>, Catherine JACQUARD<sup>1</sup>, Jean-Paul MOURIER<sup>2</sup>, Philippe REIFFSTECK<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Fondasol, Avignon, France

<sup>2</sup> Ginger CEBTP, Chartres, France

<sup>3</sup> Université Gustave Eiffel-IFSTTAR, GERS-SRO, Champs sur Marne, France

**RÉSUMÉ** – Cette communication présente une campagne d'essais comparatifs avec le pressiomètre Ménard réalisés sur différents sites retenus par le projet national ARSCOP. Il s'agit de sols argileux mous et de sols sableux sous la nappe phréatique. Une discussion sur la pertinence des exigences sur le mode de forage pour les sols concernés complète ces éléments.

**ABSTRACT** – This paper presents a campaign of comparative tests with the Ménard pressuremeter carried out on different sites selected by the national ARSCOP project. These were soft clay soils and sandy soils below the water table. A discussion on the relevance of the drilling requirements for these soils completes these elements.

### 1. Contexte

On sait que la réalisation d'essais pressiométriques dans de certains sols est délicate et dépend beaucoup du savoir-faire de l'opérateur. L'objectif de ces campagnes était de comparer dans le cadre de l'axe 1 du projet national ARSCOP, la pratique actuelle avec les recommandations de la norme EN 22 476-4 héritées de la norme française et du mode opératoire des LPC. Le principe a consisté à réaliser une série de forages pour réaliser plusieurs essais d'expansion dans chacun d'eux. Les essais pressiométriques réalisés dans le forage de référence (forage rotatif à trou ouvert avec circulation de boue et sonde avec gaine souple) sont comparés à ceux réalisés dans les forages réalisés avec d'autres outils de forage (tels que les tubes fendus avec enlèvement de matière TUBA® et ROTOSTAF®) et sondes (tube fendu ou d'autres types d'équipement).

La méthodologie mise en œuvre a consisté à choisir des sites de la plus grande homogénéité possible dans ses caractéristiques géotechniques, à réaliser un forage de référence selon NF EN ISO 22476-4, puis des forages annexes en variant les techniques de forage, de sonde, de mode de pilotage, etc.

### 2. Présentation des sites

Les caractéristiques qui ont présidé au choix des sites ont été une relative homogénéité d'ensemble sur une profondeur minimale de 5 à 10 m (Figure 1a).

#### 2.1. Site expérimental de Cran

Le site du pont de Cran est situé sur la commune de Rieux dans le département du Morbihan (franchissement de la Vilaine en aval de Redon, Figures 1b). Le site a fait l'objet de nombreuses études dans le cadre de recherches programmées par les Laboratoires des Ponts et Chaussées. Le site est assez homogène avec une profondeur de 15 m de sédiments meubles, cohérents de consistance moyenne.

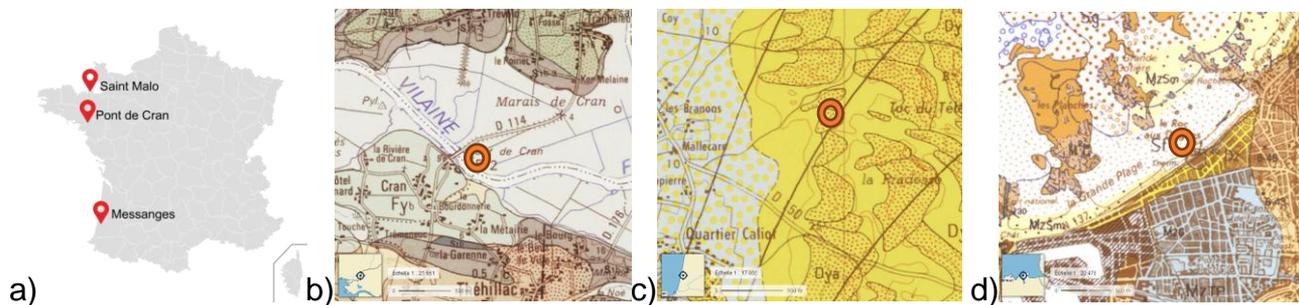


Figure 1: Localisation des sites d'essais (crédits Géoportail).

On distingue trois couches :

- les deux premiers mètres, surconsolidés par dessiccation, correspondent aux valeurs les plus fortes de cohésion non drainée, de l'ordre de 45 kPa ;
- entre 2 et 4 m de profondeur, une couche de consistance relativement molle, de cohésion non drainée de l'ordre de 15 kPa, présente une forte limite de liquidité. Elle peut être identifiée, selon la classification LPC, à une argile très plastique et faiblement organique (fO-At) ;
- entre 4 et 17 m de profondeur, l'argile a une consistance moyenne ; la teneur en eau est de l'ordre de 70 % et la cohésion non drainée est voisine de 38 kPa. On peut identifier ce sol à un limon très plastique faiblement organique (fO-Lt).

La nappe phréatique est généralement à 50 cm de profondeur.

### 2.1. Site expérimental de Messanges

Le site de la sablière Durruty est situé sur la commune de Messanges dans le département des Landes (figures 1c). La zone d'essais a été implantée dans les sables de dune présentant une puissance supérieure à 20 à 25 m au droit du site. Ces dépôts éoliens forment des dunes paraboliques postérieures aux dépôts marins. L'exploitation a mis à nu les dépôts marins. On distingue quatre couches :

- les deux premiers mètres, sables denses du fait de la dessiccation et surcharge ;
- entre 2 et 7 m de profondeur, une couche de de sable lâche ;
- vers 8 m une couche de sable avec lignite à forte odeur d'hydrocarbure ;
- au-delà de 8 m des sables denses.

La nappe phréatique est généralement à 50 cm de profondeur.

### 2.1. Site de Saint Malo

Le site de la grande plage est situé sur la commune de Saint Malo dans le département de l'Ille et Vilaine (figures 1d). La plage relativement homogène vient recouvrir des dépôts accumulés sur les versants. Ils se trouvent sur de grandes épaisseurs ou en simple placage contre des parois ou d'anciennes falaises. Ces dépôts sont un mélange de limons bruns, argileux et compacts, et de cailloux de 1 à 3 cm de long, anguleux. Les couches ne sont ni horizontales ni parallèles à la surface du sol, la profondeur observée varie en fonction de la proximité du rivage.

On distingue une seule couche de sable.

## 3. Programmes des essais

Le programme a consisté à faire varier les techniques de forages et les moyens d'essais. Cinq modes de forage principaux ont été testés :

- tarière manuelle (TM) avec injection de boue de bentonite (+B), par passes successives de 1m avec réalisation d'un essai pressiométrique après chaque passe ;

- tarière hélicoïdale continue (CFA) sans ou avec circulation de boue, par passes successives de 1 m avec réalisation d'un essai pressiométrique après chaque passe ;
- forage rotatif avec outil à molette (TRIC) ou à lame (TRIL) et circulation de boue ; par passes successives de 1 m ;
- battage de la sonde dans un tube fendu (TF) avec ou sans préforage d'un trou pilote ;
- forage du tube fendu avec enlèvement de matière (TFEM), essais en remontant.

Tableau 1 essais à pont de Cran (printemps 2019) - Ginger CEBTP - Cerema

Sondage	Localisation	Prof. essais (m)	Mode de forage	Sonde	pilotage
0	Argile – champs	1-16	TAM+B	60 GS-1.5	Manu – palier
1	Argile – champs	3-10	TRIC-66+B	60 GS-1.5	Auto - palier
2	Argile – champs	3-10	TRIL+B	60 GS-1.5	Auto - palier
3	Argile – champs	3-10	TRIL+B	60 GS-3	Auto - palier
4	Argile – champs	3-10	TRIL+B	60 GS-4	Auto - palier
5	Argile – champs	3-10	CFA+B	60 GS-4	Auto - palier
6	Argile – champs	3-10	Battage	44-C-3 TF63	Auto - palier
7	Argile – champs	3-10	Battage	44-L-3 TF63	Auto - palier
9	Argile – champs	3-10	CFA	60 GS-1.5	Auto - palier
10	Argile - champs	3-15,5	TRIL+B	60 GS-1.5	Auto - palier

Tableau 2 essais à Messanges (printemps 2019 et septembre 2021) – Fondasol &amp; Eurogé - UGE

Sondage	Localisation	Prof. essais (m)	Mode de forage	Sonde	pilotage
1	Sable - bas	3-10	TRIC-63,5+B	60 GS-3	Manu – palier
2	Sable – bas	3-10	TRIC-63,5+B	60 GS-4	Manu – palier
3	Sable – bas	3-10	TRIC-66+B	44-L TF63	Manu – palier
4	Sable – bas	3-10	TRIC-66+B	44-C TF63	Manu – palier
5	Sable - bas	3-10	TFEM-66	44-C TF63	Manu – palier
6	Sable - bas	3-10	TRIC-66,5+B	44-C TF60	Manu - palier
8	Sable - bas	3-10	TFEM-66	44-L TF63	Auto - palier
9	Sable - bas	1-2	TAM+B	60 GS 3	Manu –palier
1	Sable – haut	3-10	TRIC-63,5+B	60 GS	Auto - palier
2	Sable – haut	3-10	TRIC-63,5+B	44-C TF60	Auto - palier
3	Sable – haut	3-10	TRIC-63,5+B	44-C TF63	Auto - palier
4	Sable – haut	3-10	TFEM-66	44-C TF63	Auto - palier
5	Sable – haut	3-6	TRIC-63,5+poly	60 GS	Auto - palier
6	Sable – haut	1-1,5	TAM+B	60 GS	Auto - palier

Tableau 3 essais à Saint Malo (septembre 2018) – UGE et Cerema

Sondage	Localisation	Profondeurs essais (m)	Mode de forage	Sonde	pilotage
0	Sable - Plage	1	Battage	30 GS-1,5	Pilotage - palier
1	Sable - Plage	0,9-5,5	TAM+B	60 GS-3	Pilotage - continu
2	Sable - Plage	1-4	TRIC+B	60 GS-3	Auto - palier
3	Sable - Plage	1-4	CFA	44-L TF63	Auto - palier
4	Sable - Digue	6-9	TRIC+B	60 GS-3	Auto - palier

## 4. Résultats des essais

### 4.1. Site de Pont de Cran

Dix sondages ont été réalisés par Ginger lors de la campagne ARSCOP dans une zone proche de la Vilaine. Les essais n'ont intéressé que la couche de 3 à 10 m.

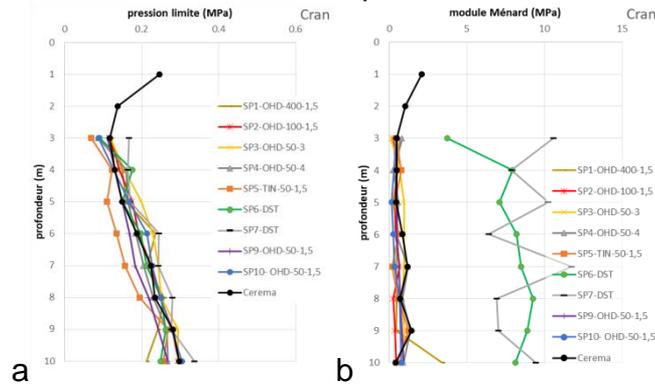


Figure 2: Influence du mode de mise en place dans l'argile sur la pression limite et le module pressiométrique

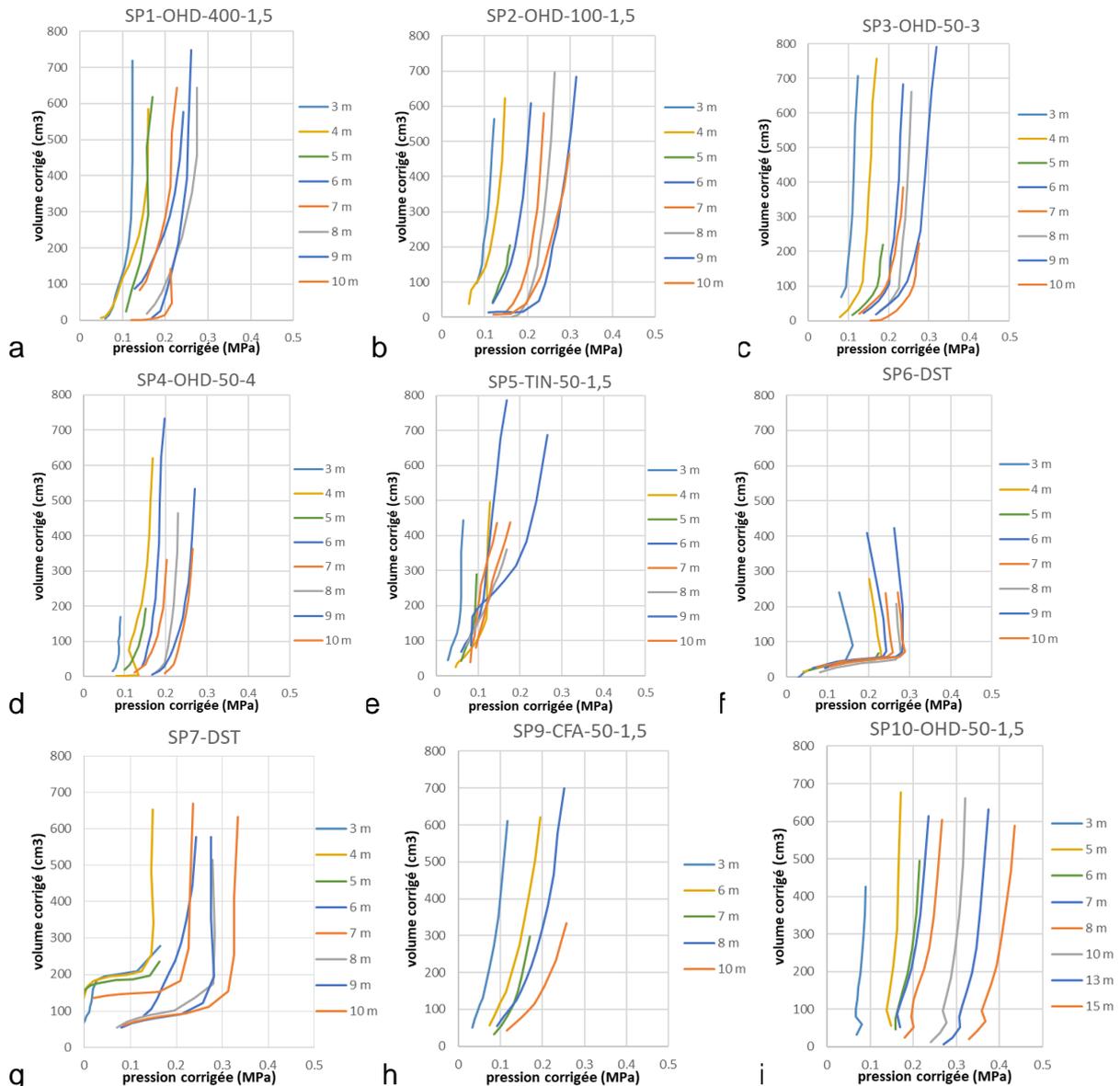


Figure 3: Influence du mode de mise en place sur les courbes d'expansion à Cran

La figure 2 confirme que le mode tube fendu battu (battage-TF dans le tableau 1) donne des valeurs nettement surestimées du module de Ménard et est à proscrire dans ce type de sol. Le mode CFA (avec boue) dans l'argile molle peut créer une succion lors du retrait et donc des valeurs de pression limite faibles. Ces constats sont étayés par la typologie des courbes (Figure 3e, f et g).

Pour les sols argileux mous, la méthode recommandée est donc bien le forage en rotation avec boue (TRIL/ TRIC +B), même si elle sous-estime légèrement les pressions limites, tout autre procédé provoquant un refoulement par fonçage ou vibration, devrait être écarté.

#### 4.2. Site de Messanges

Le site de Messanges a permis de réaliser des essais croisés dans du sable. Deux campagnes ARSCOP ont permis de comparer dans des sondages forés en rotation des essais réalisés avec différentes sondes ou gaines et différents tubes fendus (tableau 2). En outre, deux sondages ont été réalisés par tubage avec enlèvement de matière. La figure 5 montre les différences de volume au contact observées selon les méthodes employées. Les fuseaux de pressions limites obtenus restent assez resserrés sauf en tête ou au niveau de la couche organique présente à 8 m.

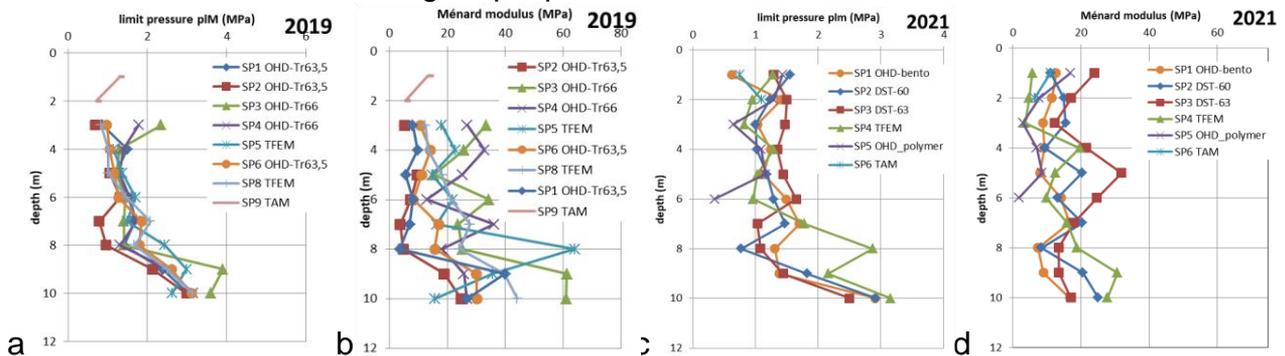


Figure 4: Influence du mode de mise en place dans les sables sur la pression limite et le module pressiométrique

Cependant les profils de modules Ménard présentent une assez grande dispersion autour du forage de référence réalisé en rotation avec boue. Les forages de 2019 avec un alésage trop important montrent une grande variabilité (TRIC 66). La surestimation observée pour les sondes battues reste contenue par rapport à ce qui a pu être observé dans les argiles. Une étude statistique complète a été réalisée par Jacquard et Rispal (2021).

#### 4.1. Site de Saint Malo

Une étude récente a été menée en 2018 sur le bord de mer à proximité de la digue protégeant la ville de Saint Malo. Les premiers forages réalisés sur la plage sous la digue avaient pour but de comparer les techniques de forage et l'influence sur les mesures effectuées avec le pressiomètre Ménard (Tableau 3 et Figures 7 et 8). Les graphiques de la Figure 7 montrent les différents profils obtenus.

Des valeurs similaires sont observées avec les différents modes de mise en place avec une influence significative sur le volume de contact.

Pour ce site, le tube fendu étant placé après le forage d'un trou pilote, les paramètres mesurés ne montrent pas de différence majeure avec les autres techniques (Figures 7 et 8d). Les graphiques de la Figure 8 donnent les différentes courbes d'expansion pressiométrique. Bien que les essais d'expansion n'aient pas été réalisés par paliers de 1 minute selon le protocole Ménard, la vitesse de chargement étant identiques, il n'y a aucune différence sur les paramètres mesurés.

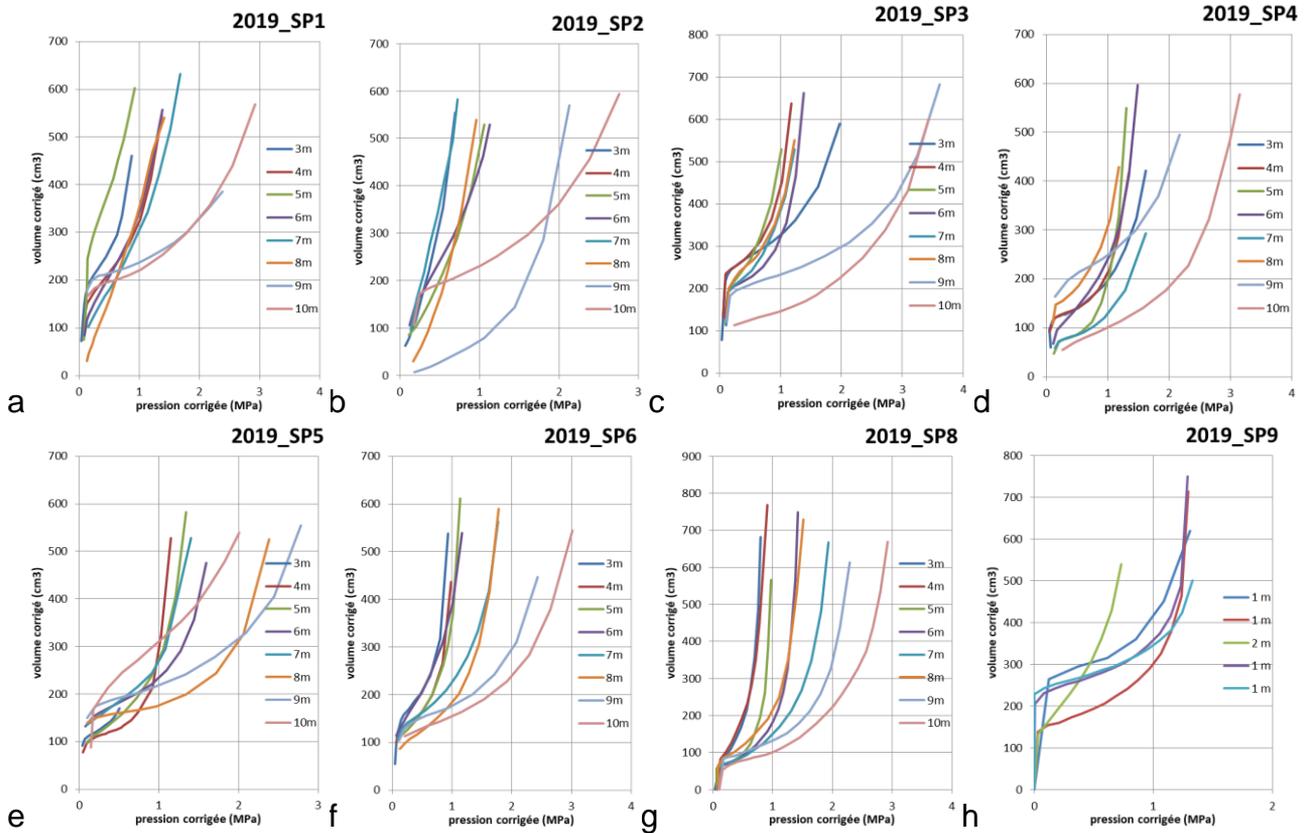


Figure 5: Influence du mode de mise en place à Messanges campagne de 2019

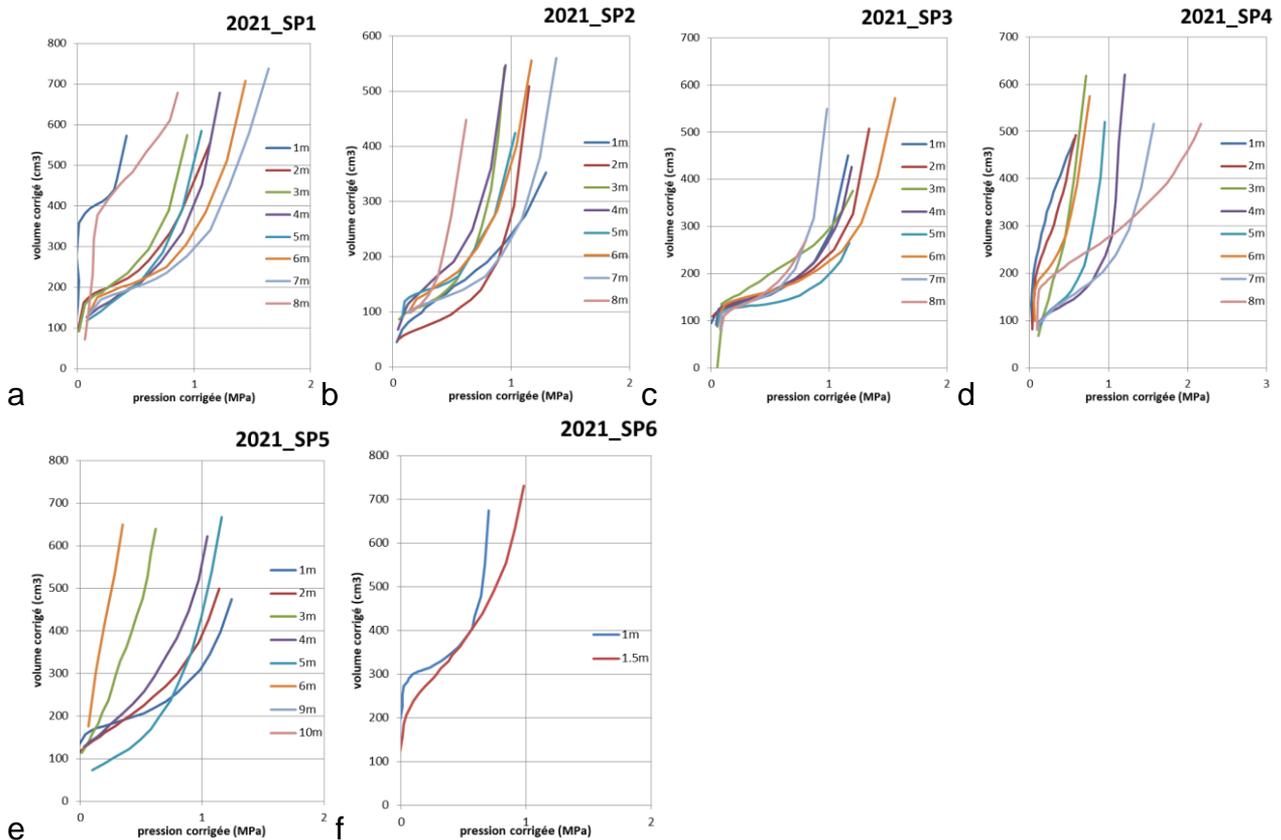


Figure 6: Influence du mode de mise en place à Messanges campagne de 2021

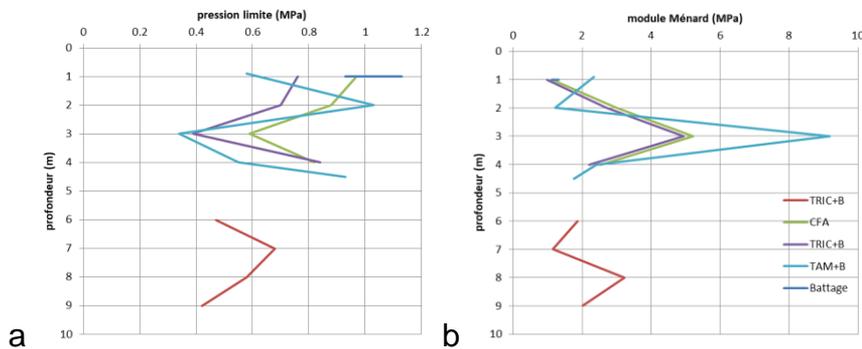


Figure 7. Profils des modules et pression limite pour les essais Ménard selon les techniques de forage dans un sable à Saint Malo.

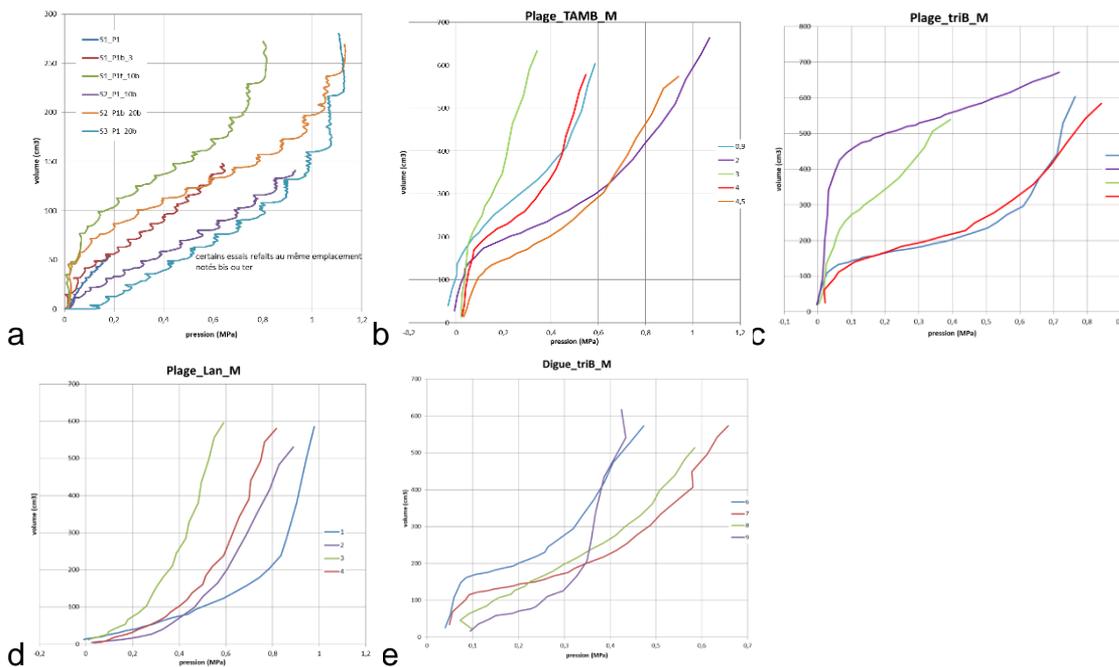


Figure 8: Courbes pression volume pour les essais Ménard par palier ou à vitesse de pression constante

Ces essais montrent la difficulté de forer dans un sable sous la nappe phréatique. Conformément aux questions soulevées lors de la révision de la norme pressiométrique au sein de l'ISO TC182/WG08, du projet national ARSCOP et de la commission de normalisation française, il semble que la technique de forage rotatif à la boue soit avec la technique du tube fendu avec pré-forage, adaptée à la condition de contrôler le centrage de l'outil (pour limiter les oscillations).

### 5. Discussion sur l'automatisme

Ces campagnes et quelques autres non cités ici par manque de place ont permis également de comparer les différents modes de réalisation des essais : manuel, par palier avec les programmes proposés par les fabricants de CPV et un pilotage dédié par ordinateur ou continu comme dans la norme ASTM 4719 (Reiffsteck et al., 2018).

Les figures 9 et 10 montrent que pour des conditions de forage identiques aucunes différences notables ne sont visibles. La dispersion observée n'est pas plus grande que celle due au mode de forage. Cela peut être également observé pour les essais de Saint Malo et aussi pour l'essai 8 de Messanges.

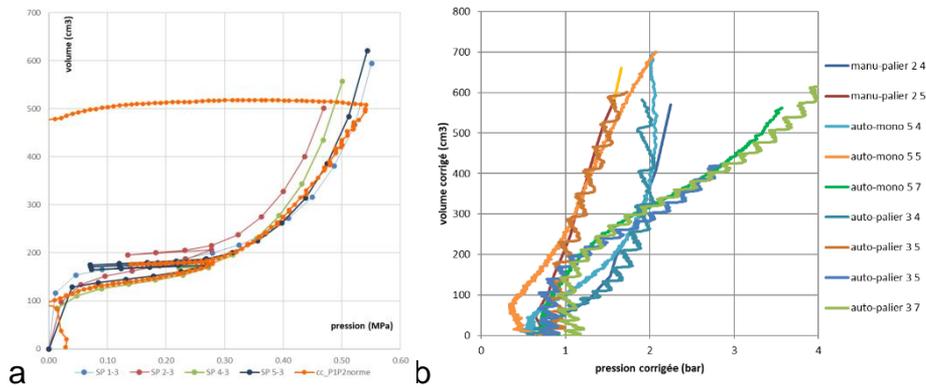


Figure 9. Courbes d'expansion selon différents mode de pilotage (a) Jossigny (b) Plancoët

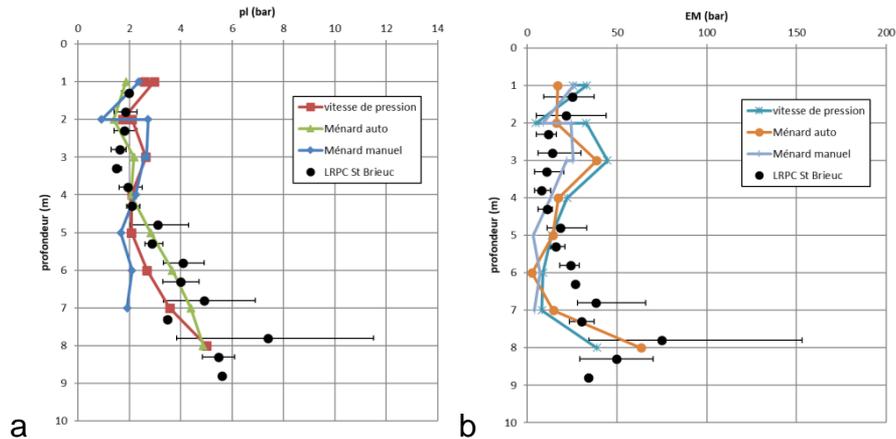


Figure 10. Courbes d'expansion selon différents mode de pilotage à Plancoët

## 6. Conclusions

Cette communication a montré que les essais pressiométriques réalisés dans un forage avec différentes techniques, qu'elles soient acceptées, tolérées ou interdites, font ressortir une influence plus importante sur les valeurs de module dérivées de l'essai que sur la pression limite. Le module Ménard y reste très sensible, une mise en œuvre défectueuse pouvant faire chuter ce module de moitié ou plus.

## 7. Remerciement

Les auteurs remercient leurs collègues et clients qui leur permis d'accéder aux sites, le projet national ARSCOP et le ministère de la Transition écologique et solidaire pour le financement de ce projet de recherche ainsi que leurs collègues R. Benot, G. Desanneaux, J. Rebours et J. Mauxion du CEREMA pour l'aide apportée aux essais.

## 8. Références bibliographiques

- CEN, Geotechnical investigation and testing. Field testing. Ménard pressuremeter test, EN ISO 22476-4, 2012, pp. 43.
- Désourtheau P., Mourier J.-P. Essais croisés Pont de Cran, ARSCOP project report, LC/19/ARSC/15, 2019, 15 pages
- Jacquard C., Rispal M., 2021, Ménard Pressuremeter Tests cross-checked under the ARSCOP program in sandy soil, ISC6 Budapest, 8 pages
- Reiffsteck Ph., 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, (ARSCOP project report LC/17/ARSC/05 - RP2-E17052), 2018, 54 pages.