



**SOLCYP**

Projet National de R&D

**SOL**licitations **CY**cliques dans les fondations **P**rofondes

## **RAPPORT DE RECHERCHE**

### **THEME 2 : Essais Spéciaux**

**Libellé de la commande : Conception d'un CPT cyclique  
et études de conception et d'adaptation et réalisation d'un  
pressiomètre autoforeur pour essais cycliques**

**Libellé de l'action : PAF et CPT cyclique**

**Organisme : IFSTTAR  
ex-LCPC**

**Auteur : Philippe Reiffsteck**

**LC/10/SOL/10  
R/12/SOL/011  
janvier 2012**

# SOLCYP FICHE SIGNALÉTIQUE

TITRE : conception d'un CPT cyclique et études de conception et d'adaptation et réalisation d'un pressiomètre autoforeur pour essais cycliques

RAPPORT N°: R/12/SOL/011

DATE D'ETABLISSEMENT: janvier 2012

AUTEUR(S) : Monsieur P. REIFFSTECK

ORGANISME(S) CHARGE(S) DE L'ACTION : IFSTTAR ex LCPC

THEME DE RATTACHEMENT : thème 2 : essais spéciaux

LETTRE DE COMMANDE : LC/10/SOL/10

# Sommaire simplifié

INTRODUCTION	4
1 VALIDATION DE LA CONCEPTION	7
2 MANCHON DE FROTTEMENT CYCLIQUE	10
3 PRESSIOMETRE AUTOFOREUR CYCLIQUE	14
4 BILAN DES PROJETS DE DEVELOPPEMENT	15
5 PERSPECTIVES	21
6 CONCLUSIONS	23
7 RÉFÉRENCES	30
8 LEXIQUE OU GLOSSAIRE	31

## Résumé français

Ce rapport retrace la validation de dispositifs capable de solliciter cycliquement un essai de pénétration statique mis en place par fonçage et d'expansion en forage.

### Abstract

This report describes the validation of devices able to apply cyclic loading a standard friction sleeve placed using the standard cone penetration test protocol and an expansion test.

**Mots-Clés** : pénétromètre, piézocone, CPT, frottement, pressiomètre autoforeur, PAF, cyclique

**Keywords**: penetration test, piezocone, CPT, sleeve friction, self boring pressuremeter, expansion, SBP, cyclic

## Conclusion

Les matériels sont fonctionnels. Les essais sur le terrain ont montré la robustesse des concepts mis en œuvre. Il n'est pas encore possible dans leur configuration actuelle de réaliser des chemins de chargement aussi évolué qu'espéré.

## Références bibliographiques

- Baguelin F. (1982) Règles de calcul des fondations à partir de l'essai au pressiomètre autoforeur, Symposium sur la pressiométrie et ses applications en mer, Paris, Éditions Technip, pp. 359-373
- CEN/ISO (2005) Geotechnical investigation and testing - Field testing - Part 1: Electrical cone and piezocone penetration tests, EN/ISO 22476-1, 41 p
- CEN/ISO (2010) Geotechnical investigation and testing – field testing- Part 6 : Self boring pressuremeter test, EN/ISO 22476-6, 22 p
- Dupla J.C. (1995) Application de la sollicitation d'expansion de cavité cylindrique à l'évaluation des caractéristiques de liquéfaction d'un sable. PhD thesis Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Paris, France.
- Jézéquel J.F., Le Méhauté A. (1982) Essais cycliques au pressiomètre autoforeur, Symposium sur la pressiométrie et ses applications en mer, Paris, Éditions Technip, pp. 221-233
- Puech A., Brucy F., Ma E., (1982) Calcul de la capacité axiale des pieux de fondations marines à partir du pressiomètre autoforeur, Symposium sur la pressiométrie et ses applications en mer, Paris, Éditions Technip, pp. 373-388
- Reiffsteck P., (2010) PAF cyclique, rapport R/09/SOL/01 du PN Solcyp, 32 pages
- Reiffsteck P., (2010) CPT cyclique, rapport R/09/SOL/02 du PN Solcyp, 32 pages

## AUTEUR

Philippe REIFFSTECK  
 IFSTTAR - Département GER  
 point de distribution 26  
 58, bd Lefebvre 75732 PARIS cedex 15  
 téléphone : 01 40 43 52 73 - télécopie : 01 40 43 65 11  
 Mel : [philippe.reiffsteck@ifsttar.fr](mailto:philippe.reiffsteck@ifsttar.fr)

## COAUTEURS

Nom	Etablissement
Sonia FANELLI	IFSTTAR, GER
Jean-Louis TACITA	IFSTTAR, GER
Gilles DESANNEAUX	CETE de l'Ouest, LRPC Saint Briec
Franck PILNIERE	CETE de l'Ouest, CECF Angers

## PARTICIPANTS

Nom	Etablissement	Période
Alain LE KOUBY	GER	2008 →
Alain PUECH	FUGRO	2008 →
Stanislas PO	FUGRO	2008 →
Olivier MALASSINGNE	LRPC St Briec	2008 →

*Ce document comporte un seul volume de 37 pages consacré à la validation des matériels. Les résultats d'essais et leurs représentations, les plans, photographies et dessins sont des créations originales de l'IFSTTAR et de ses partenaires des CETE. Certains documents tels que rapports de recherches ou photographies proviennent des archives ou publications du LCPC ou ont été prises lorsqu'elles sont libres de droits sur des sites Internet ou des plaquettes publicitaires.*

# SOMMAIRE

<b>INTRODUCTION</b>	<b>4</b>
<b>1 VALIDATION DE LA CONCEPTION</b>	<b>7</b>
1.1 PROGRAMME DE VALIDATION	7
1.2 SITE CHOISI POUR LES EXPÉRIMENTATIONS : CRAN	7
<b>2 MANCHON DE FROTTEMENT CYCLIQUE</b>	<b>12</b>
2.1 MATÉRIEL	12
2.2 ESSAIS À VIDE	15
2.3 SONDAGE 1	16
2.3.1 ESSAI À 1 M	16
2.3.2 ESSAI À 2 M	16
2.3.3 ESSAI À 3 M	18
2.3.4 ESSAI À 4 M	19
2.3.5 FIN DE SONDAGE	19
2.4 SONDAGE 2	20
2.4.1 ESSAI À 1 M	20
2.4.2 ESSAI À 2 M	20
2.4.3 ESSAI À 3 M	21
2.4.4 ESSAI À 4 M	22
2.5 SONDAGE 3	22
2.5.1 ESSAI À 1 M	22
<b>3 PRESSIOMÈTRE AUTOFOREUR CYCLIQUE</b>	<b>24</b>
3.1 MATÉRIEL	24
3.1.1 SONDE	24
3.1.2 POSTE DE PILOTAGE	26
3.2 ÉTALONNAGE	26
3.3 PROGRAMME D'ESSAIS	27
3.4 SONDAGE 1	28
<b>4 BILAN DU PROJET DE DÉVELOPPEMENT</b>	<b>30</b>
4.1 BILAN TECHNIQUE :	30
4.2 BILAN DES ESSAIS CPT CYCLIQUE	30
4.3 BILAN DES ESSAIS PAF CYCLIQUE	30
<b>5 PERSPECTIVES</b>	<b>31</b>
5.1 PROGRAMME DES ESSAIS DE MERVILLE	31
5.1.1 ESSAIS CPT CYCLIQUE	31
5.1.2 ESSAIS PAF CYCLIQUE	32

<b><u>6</u></b>	<b><u>CONCLUSION</u></b>	<b><u>35</u></b>
<b><u>7</u></b>	<b><u>RÉFÉRENCES</u></b>	<b><u>36</u></b>
<b><u>8</u></b>	<b><u>LEXIQUE OU GLOSSAIRE</u></b>	<b><u>37</u></b>

## INTRODUCTION

L'objectif de cette tâche est de concevoir et tester des dispositifs capables de solliciter cycliquement une sonde pressiométrique et une pointe de pénétromètre statique, ce qui permettra de mesurer in situ l'évolution du module pressiométrique et du frottement latéral sur le manchon de frottement, ce qui est directement transposable aux méthodes de dimensionnement des fondations profondes soumis à des sollicitations cycliques axiales ou latérales.

L'objet de ce rapport est de présenter les premières expérimentations de tels appareillages.

- ◆ La première partie détaille le site d'essais choisi,
- ◆ La deuxième partie décrit les essais avec le manchon cyclique,
- ◆ La troisième partie est consacrée aux essais pressiométriques autoforés cycliques,
- ◆ La quatrième partie fait le bilan de cette première phase de tests,
- ◆ Finalement, la dernière partie tire quelques conclusions et perspectives.

# 1 VALIDATION DE LA CONCEPTION

## 1.1 Programme de validation

L'objectif de ce rapport est de présenter les travaux de l'année 2011 qui ont principalement consisté en la validation de la conception des dispositifs d'essais cycliques.

On rappelle que la conception des matériels a été décrite dans deux rapports de septembre 2010 :

- R/09/SOL/01 : PAF cyclique
- R/09/SOL/02 : CPT cyclique

Une première série d'essais avec le PAF cyclique réalisée en Guadeloupe sur le site de Gosier avait permis de mettre en avant le besoin de modifier l'outil désagrégateur de la sonde pressiométrique pour pouvoir aller sur les sites d'essais de pieux du PN.

Les deux matériels modifiés, il a été décidé de faire une validation sur le site de Cran qui a été le lieu par le passé d'expérimentations de pieux chargés cycliquement et d'essais au pressiomètre autoforeur (Jézéquel et le Méhauté, 1982 ; Puech et al., 1982).

## 1.2 Site choisi pour les expérimentations : Cran

Pour réaliser l'étude expérimentale, notre choix s'est porté sur le site du pont de Cran situé sur la commune de Rieux (franchissement de la Vilaine en aval de Redon, figures 1 a et b). Le site a fait l'objet de nombreuses études dans le cadre de recherches programmées par les Laboratoires des Ponts et Chaussées. Les caractéristiques qui ont présidé au choix ont été une relative homogénéité d'ensemble puis une profondeur minimale de 5 à 10 m de sédiments meubles, cohérents de consistance moyenne.

La plaine alluviale de la Vilaine en aval de Redon est une vallée sédimentaire de près de 2 km de large. On y rencontre un dépôt d'argile sur une épaisseur de 10 à 20 m, reposant sur une couche de sable et de galets qui recouvre le substratum rocheux. À Cran, la rive droite est constituée par un dépôt d'argile molle marine de 17 m d'épaisseur reposant sur un substratum rocheux (schiste et phanites). La couche d'alluvions compressibles est d'origine relativement récente. Elle est composée d'alluvions post-glaciaires, dont les périodes de formation s'échelonnent entre la période boréale (7500 ans) et la période subatlantique (2500 dernières années). L'argile de Cran contient environ 40 à 50 % d'éléments inférieurs à 2  $\mu\text{m}$ , la fraction fine étant surtout constituée de montmorillonite, d'illite et de kaolinite en proportion plus faible.

D'une manière générale, l'argile de Cran est grise et contient des fibres végétales (roseaux) presque toujours verticales. Un certain nombre de surfaces lustrées rencontrées dans les prélèvements, témoignent de glissements anciens qui ont dû se produire lors de la variation du lit de la rivière. La Figure 2 montre les variations des principales caractéristiques géotechniques obtenues sur un sondage avec prélèvements d'échantillons intacts, réalisé par le Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées de Saint-Brieuc.

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).

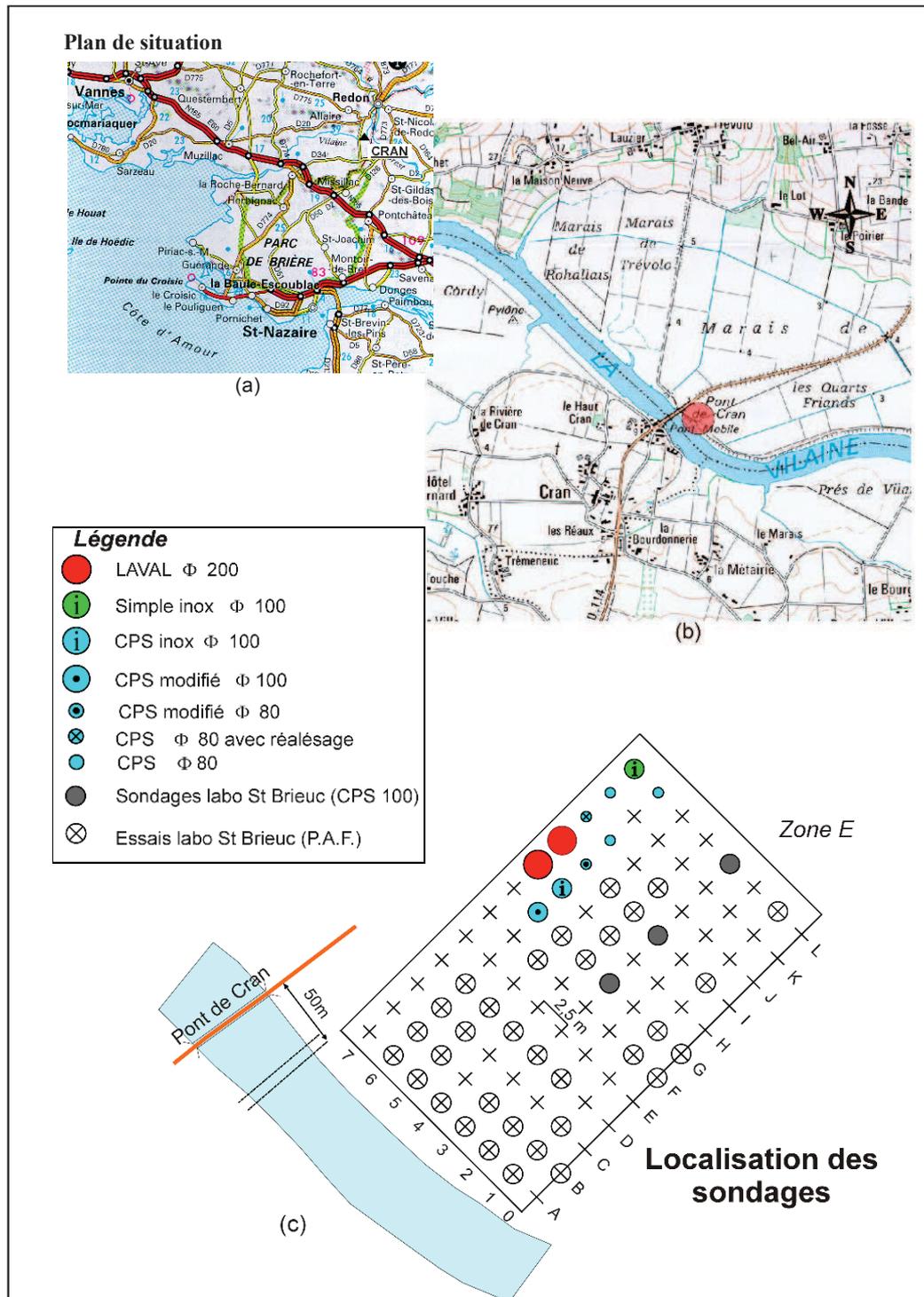


Figure 1. Plan de situation Site de Cran

La nappe phréatique est généralement à 50 cm de profondeur. Le substratum rocheux est recouvert localement d'une couche d'environ 1,50 m d'épaisseur de graves de pliocène compactes.

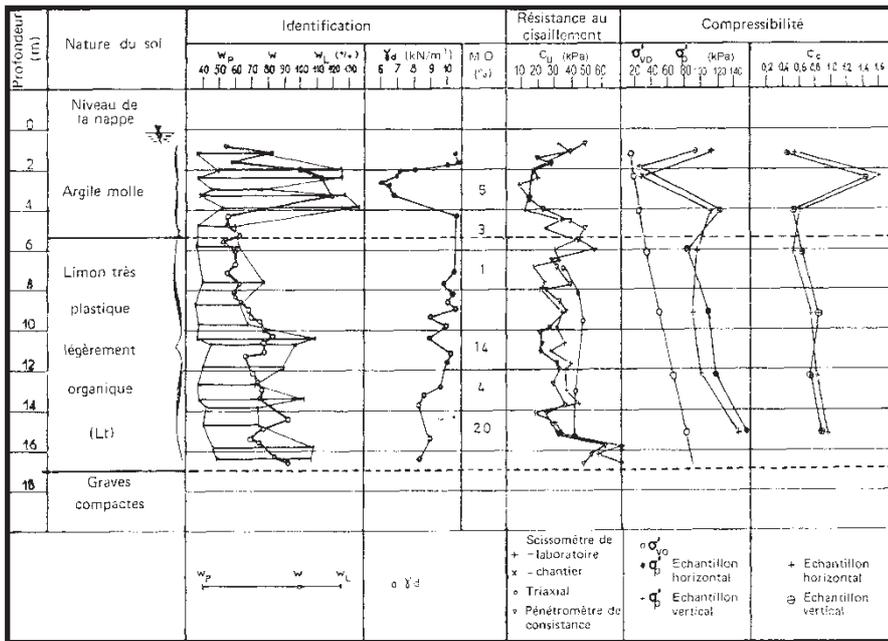


Figure 2. Profil géotechnique du site de Cran (d’après Paute 1973).

Les caractéristiques géotechniques moyennes des couches de sols identifiées dans le site de Cran sont indiquées dans le tableau 1.

Tableau 1. Caractéristiques géotechniques moyennes du sol de Cran, (d’après Paute, 1973).

Couche Profondeur	W (%)	W <sub>L</sub> (%)	I <sub>P</sub>	ρ <sub>d</sub> (Mg/m <sup>3</sup> )	e	MO (%)	C <sub>u</sub> (kPa)	C <sub>c</sub>	σ' <sub>p</sub> (kPa)	σ' <sub>vo</sub> (kPa)	c' - φ' (kPa-degré)
<b>1</b> 0 à 2 m	48	75	30	1,10	1,3	1	45	0,45	160	7	
<b>2</b> 2 à 4 m	108	125	82	0,66	2,9	3	15	1,64	25	16	0,0 - 30
<b>3</b> 4 à 8 m	64	70	31	0,93	1,8	2	40	0,70	96	30	
<b>4</b> 8 à 17 m	73	87	47	0,91	1,7	4	39	0,85	105	67	0,0 - 34

Les couches de sol compressible (couche 2 et couche 3) reconnues sur le site de Cran semblent présenter, chacune, une relative homogénéité de leurs caractéristiques géotechniques, et répondent ainsi à nos exigences expérimentales.

Les profils suivants (Figure 3 à Figure 5) ont pu être dressés à partir des données de la bibliographie et ont servi de base à la construction du programme d’essais cycliques (Amar et al., 1995).

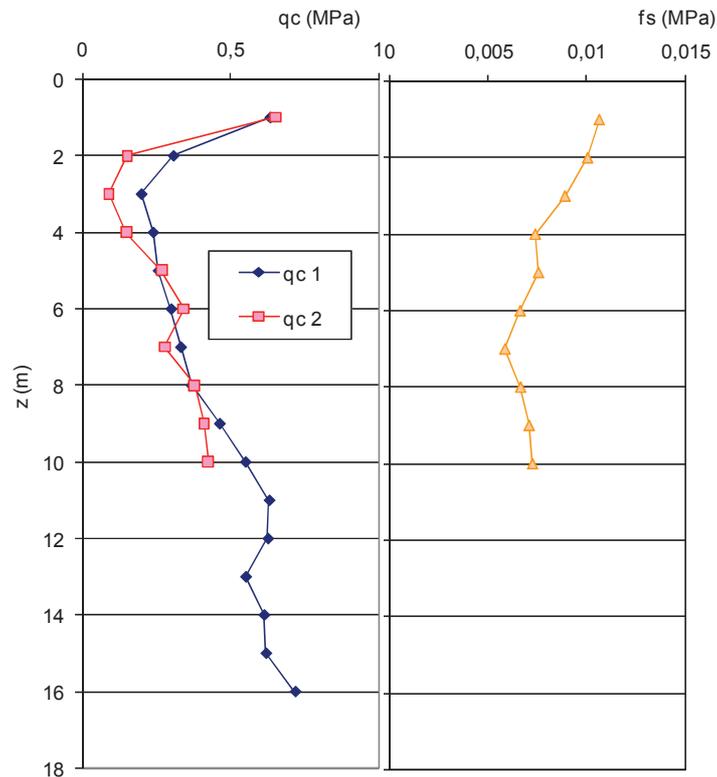


Figure 3. Profil d'essai pénétromètre statique à pointe mécanique

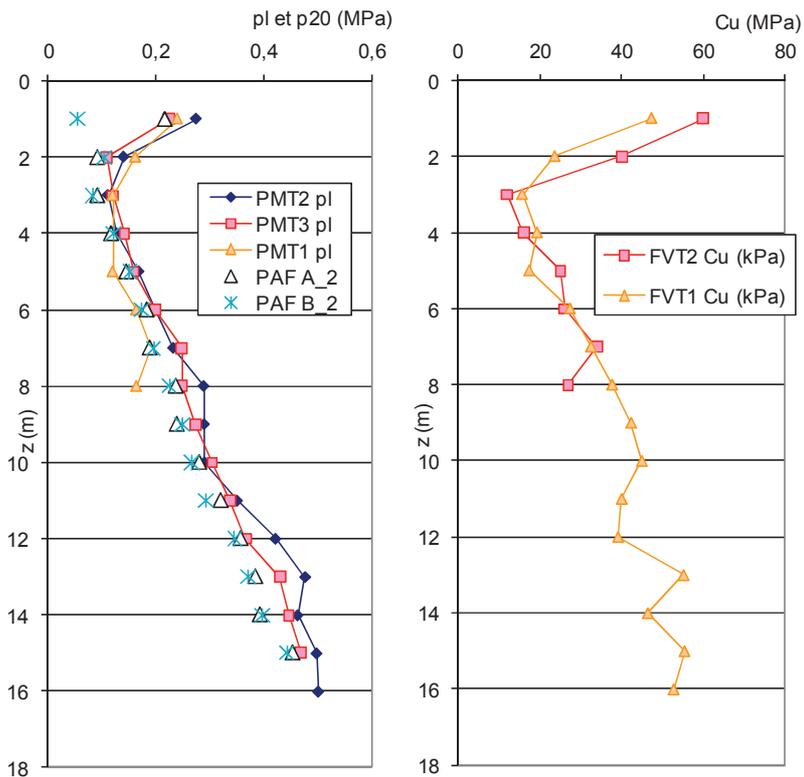


Figure 4. Profil d'essais pressiométrique et scissométrique

Le module de cisaillement à petite déformation mesuré par différentes technique d'essais en place et en laboratoire croît avec la profondeur.

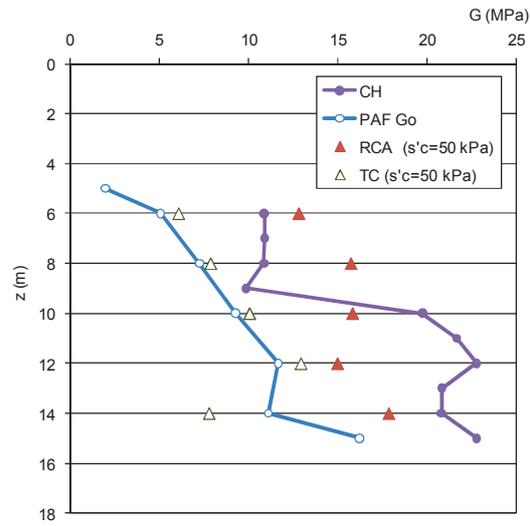


Figure 5. Module mesuré par le PAF, par essais au laboratoire et par Cross-Hole

## 2 MANCHON DE FROTTEMENT CYCLIQUE

Le matériel dont l'étude avait été finalisée en août 2010 a été livré en octobre 2011. Le retard est dû aux difficultés de gestion des achats par l'atelier des prototypes et aux vacances d'été du sous traitant.

Le manchon de frottement cyclique a été finalement assemblé à l'atelier prototype après que la pièce principale ait été refaite suite à la déformation trop importante de la première version lors de son traitement thermique pour durcissement. La cause est sans doute que le diamètre intérieur pour le passage de la prise Lemo est trop important.

### 2.1 Matériel

La Figure 6 présente l'ensemble manchon de frottement et pointe électrique.



Figure 6. Ensemble du matériel avant montage

Le matériel est constitué d'une tige comportant un manchon de frottement mobile actionné par un vérin simple effet en appui sur un ressort de type tore. Le vérin est actionné par un gaz comprimé (de l'azote) via un tube. Le signal du capteur de déplacement est renvoyé en surface par un cablage. Le câble de la pointe CPT a dû être laissé à demeure du fait de l'impossibilité de passer la prise dans l'espace annulaire encombré par le tuyau d'air comprimé et le fil du capteur.

La Figure 7 montre l'ensemble pointe piézocone (marque Geopoint, diamètre 44 mm, N° S15-CFIP.484) et manchon cyclique prêts à être accouplés au train de tige.



Figure 7. Le manchon de frottement fixé au dessus de la pointe (S15-CFIP.484)

Le matériel de fonçage utilisé lors des essais de novembre et décembre est un bâti hydraulique Gouda monté sur un camion Iveco (Figure 8). La pompe hydraulique de la sondeuse Sedidril 350 montée sur le camion est utilisée pour actionner la pompe du groupe hydraulique du Gouda.



a)



b)

Figure 8. Camion en position et bâti hydraulique Gouda

Le système de pilotage de l'essai est constitué d'un contrôleur de pression volume PREVO de marque Jean Lutz et d'un ordinateur PC portable (Figure 9). Celui-ci est piloté à l'aide d'un logiciel spécifique décrit dans le rapport R/09/SOL/01.



Figure 9. Poste de pilotage et enfoncement de l'appareil dans le sol

Du fait du retard de livraison du matériel, le pilotage en déplacement a été différé au profit d'un pilotage en force. Il semble en première approche que le signal du capteur de déplacement puisse être utilisé pour asservir simplement le PREVO, ceci à l'aide d'une DLL adéquat.

Le suivi de la consigne de pression par l'asservissement est satisfaisant (Figure 10). Toutefois, il s'agit d'une mesure en surface qui diffère sans aucun doute des valeurs effectivement subies au niveau de la sonde du fait des pertes de charges. Il peut exister un déphasage du système entre le pilotage et la pression réelle sur le manchon.

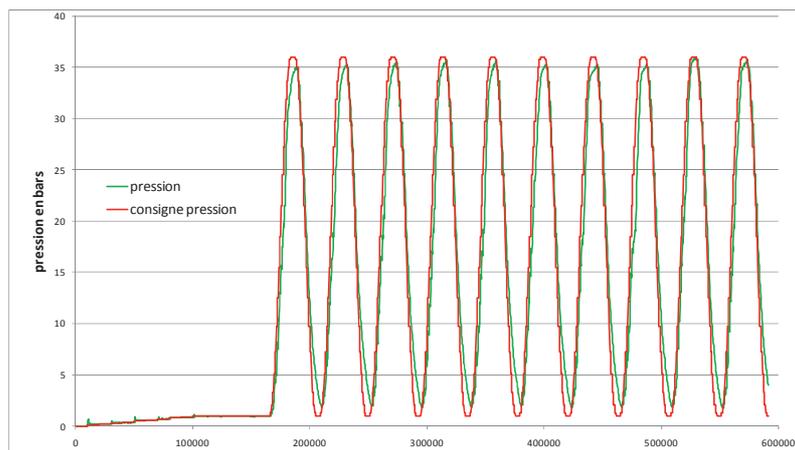


Figure 10. Zoom sur la consigne de pression et l'asservissement réalisé (sondage 2 à 2m)

Cette contrainte ne permettra pas de faire des essais à fréquence élevée et donc le nombre de cycle sera forcément limité.

## 2.2 Essais à vide

Différents essais ont été effectués à vide dans les locaux de l'IFSTTAR.

Ces essais ont été réalisés sur différentes plages avec un signal sinusoïdal : d'abord entre 10 et 25 bars qui sont les bornes maximale de mise en déplacement du manchon. Le manchon commence à se déplacer sous une pression minimale de 10 bars et arrive en butée à 25 bars.

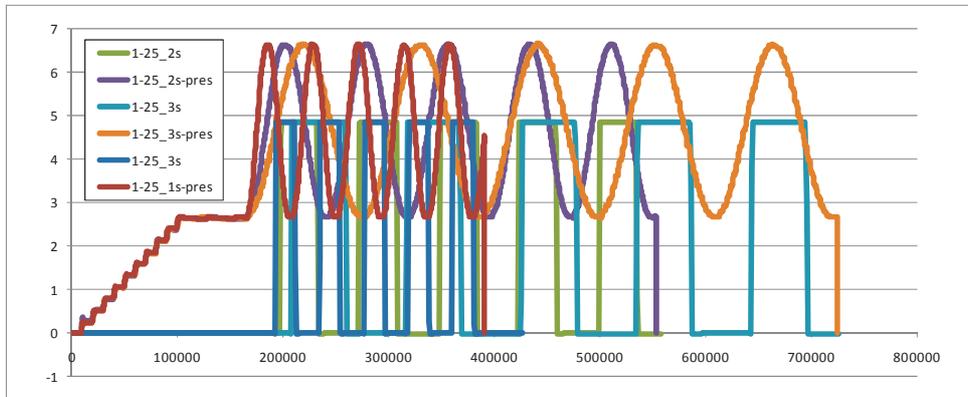


Figure 11. Étalonnage entre 10 et 25 bars

On s'aperçoit que le déplacement donne un signal en créneau, quels que soient les intervalles de temps entre paliers (1, 2 et 3s) (Figure 11). À la montée, une fois le frottement statique vaincu le manchon se déplace très rapidement à la butée opposée et à la descente, le vérin reste en position lorsque la pression décroît puis bouge rapidement à la position au repos.

Il a donc été décidé de tester des pressions minimales supérieures à 10 bars et des pressions maximales inférieures à 25 bars (Figure 12). On observe que l'on arrive à stabiliser le vérin avec le ressort légèrement comprimé en fixant 15 bars comme pression basse mais la diminution de la pression haute à 20 bars conduit à l'immobilité.

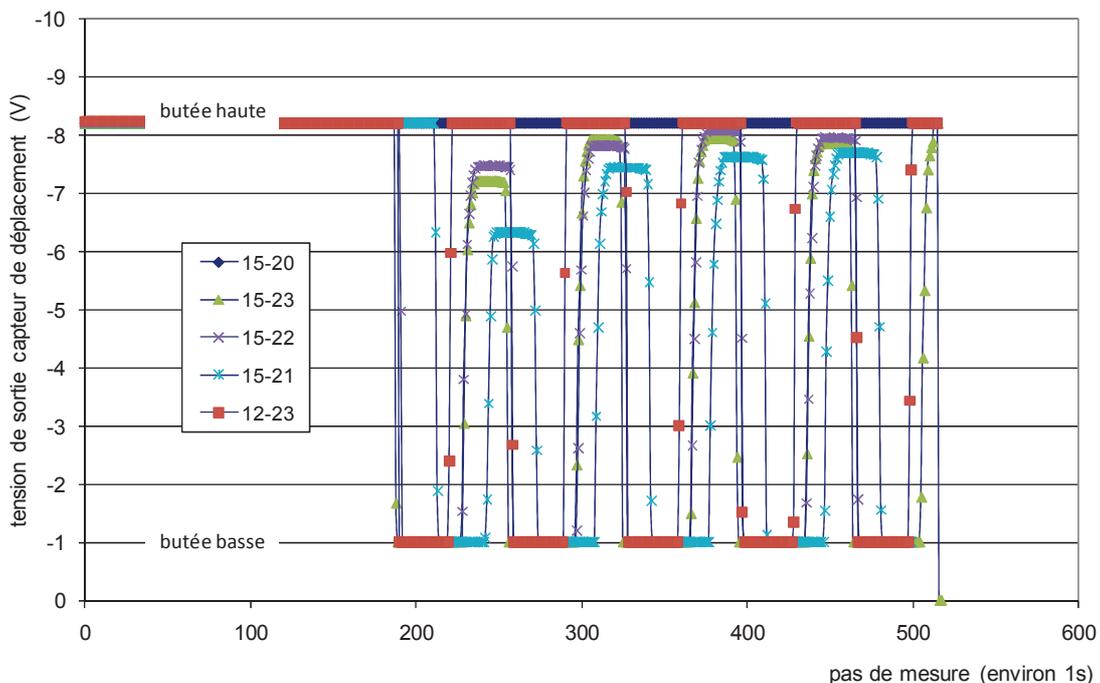


Figure 12. Étalonnage entre 12 et 23 bars

A cette étape des essais persiste une vitesse d'acquisition de la seconde qui ne permet pas de voir avec précision le mouvement du manchon.

Pour vaincre la résistance au cisaillement du sol il peut être nécessaire d'imposer une pression supérieure à 25 bars. Il a donc été choisi de tester la plage 1 et 36 bars (Figure 13).

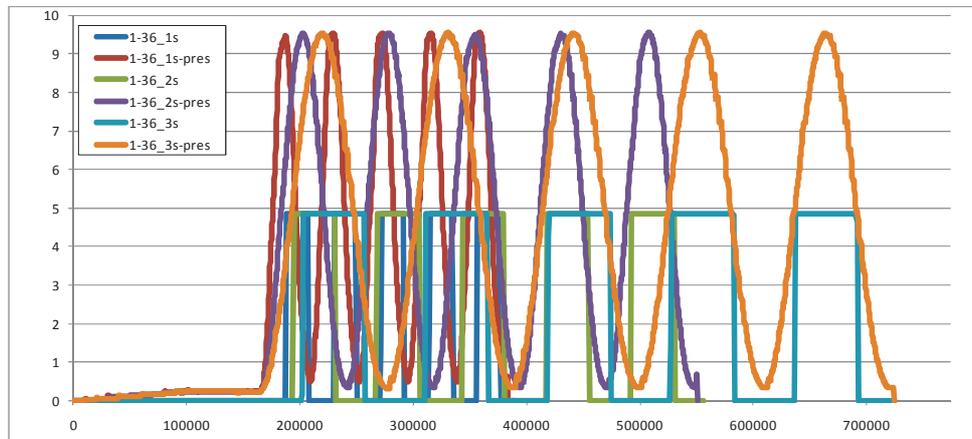


Figure 13. Étalonnage entre 1 et 36 bars

Il semble donc que bien que faisable au niveau logiciel, l'asservissement avec la consigne de déplacement ne pourra pas marcher, car l'ensemble manchon + tubulure + vanne ne sera pas assez réactif (vu du déplacement rapide du manchon quand il commence à partir).

### 2.3 Sondage 1

Le premier sondage réalisé a été positionné dans le coin du site expérimental (vers A-1 sur la Figure 1). En première approche le protocole d'essais choisi a été d'appliquer des cycles de chargement de forme sinusoïdale. Les essais ont été fait tous les mètres jusqu'à 4 mètres avec une amplitude de pression de 10 à 25 bars.

#### 2.3.1 Essai à 1 m

Aucun déplacement n'a été observé dans cette couche considérée comme surconsolidée.

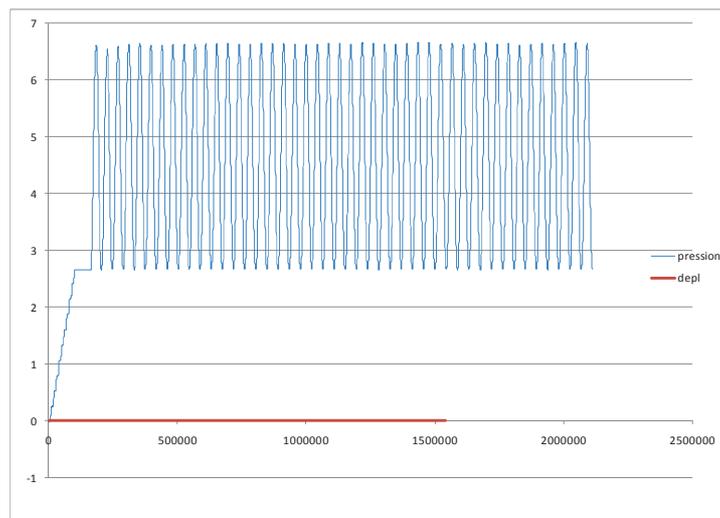


Figure 14. Consigne de pression et signal de déplacement

#### 2.3.2 Essai à 2 m

Lors de cet essai on s'aperçoit que le sol lâche après l'application d'un certain nombre de cycles (Figure 15).

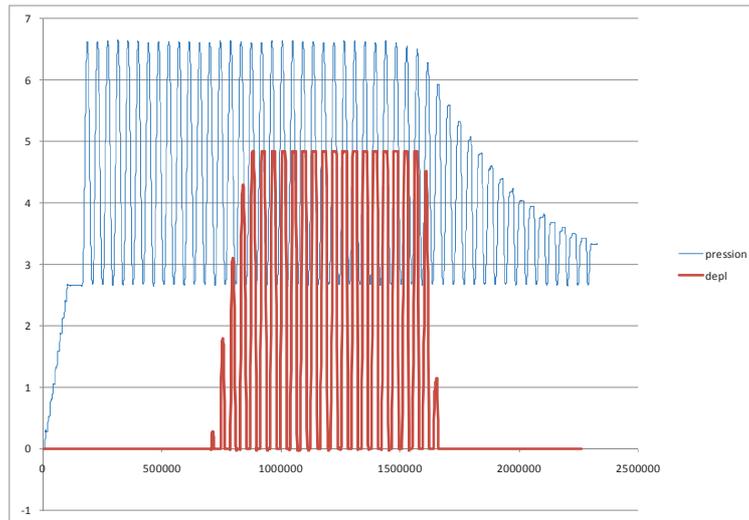


Figure 15. Consigne de pression et signal de déplacement

L'accroissement des cycles de déplacement est progressif jusqu'à atteindre la butée basse (Figure 16). La fin de l'essai est caractérisée par une décroissance par épuisement de la bouteille d'azote (Figure 17).

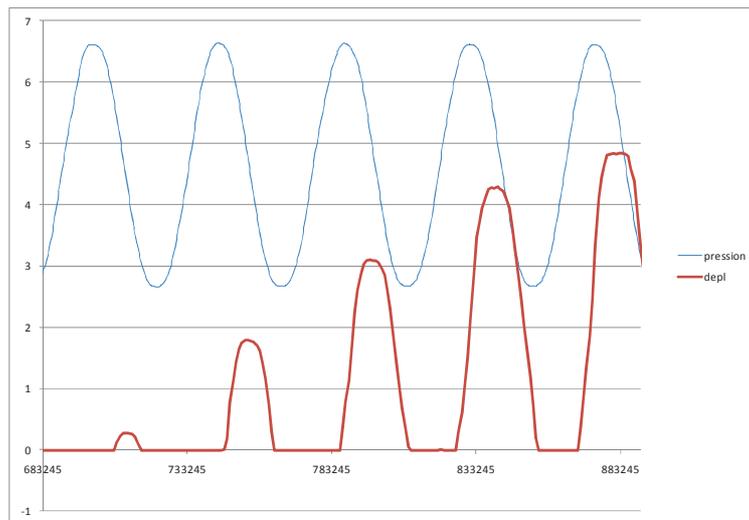


Figure 16. Zoom sur la pression mesurée et le signal de déplacement

Lors de l'accroissement les cycles présentent une forme satisfaisante de sinus.

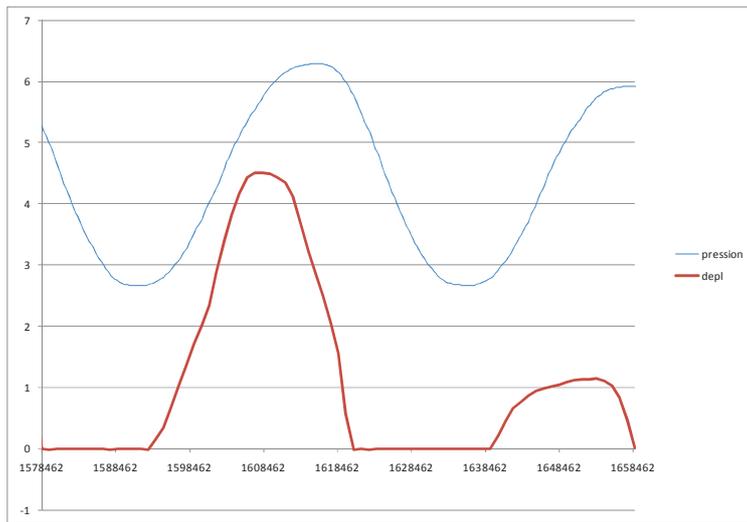


Figure 17. Zoom sur la pression mesurée et le signal de déplacement

### 2.3.3 Essai à 3 m

L'essai à 3 m est réalisé dans le niveau le plus mou du terrain (Figure 2). Dès le début de l'essai le vérin se déplace entre les deux butées.

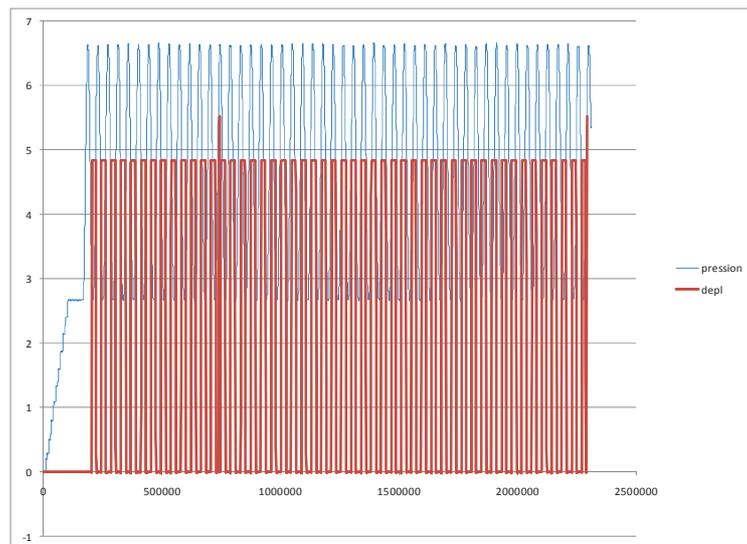


Figure 18. Consigne de pression et signal de déplacement

Le signal est caractérisé par sa forme carrée.

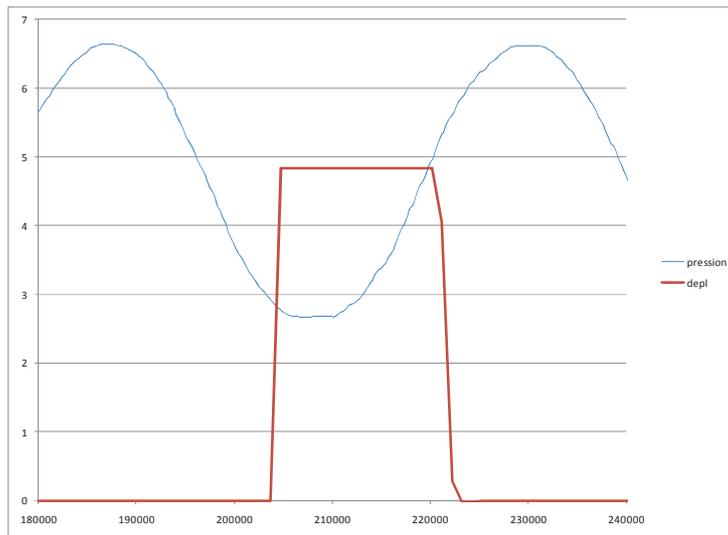


Figure 19. Zoom sur la pression mesurée et le signal de déplacement

### 2.3.4 Essai à 4 m

Les essais réalisés lors de l'essai à 4 m sont très similaires à l'essai à 3 m.

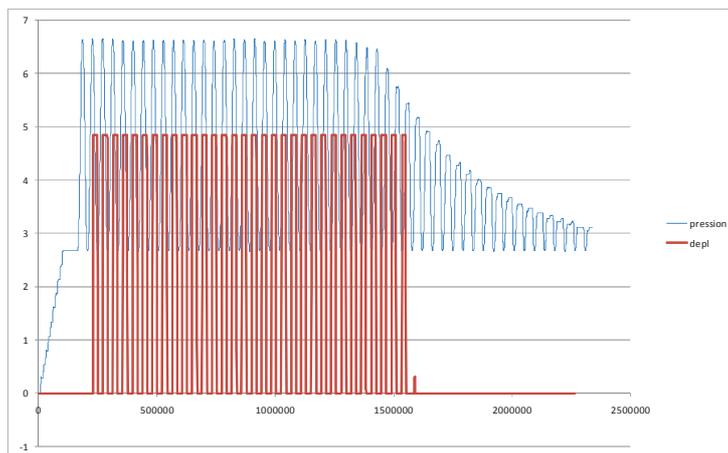


Figure 20. Consigne de pression et signal de déplacement

La fin subit une décroissance par épuisement de la bouteille d'azote.

### 2.3.5 Fin de sondage

Après la réalisation du sondage 1 et la remontée du train de tige le manchon a été testé (Figure 21a). On peut observer sur la photographie le bourrelet d'argile provoqué par la mise en butée du manchon.

Aucune différence sur le signal de déplacement n'a été observée (Figure 21b).

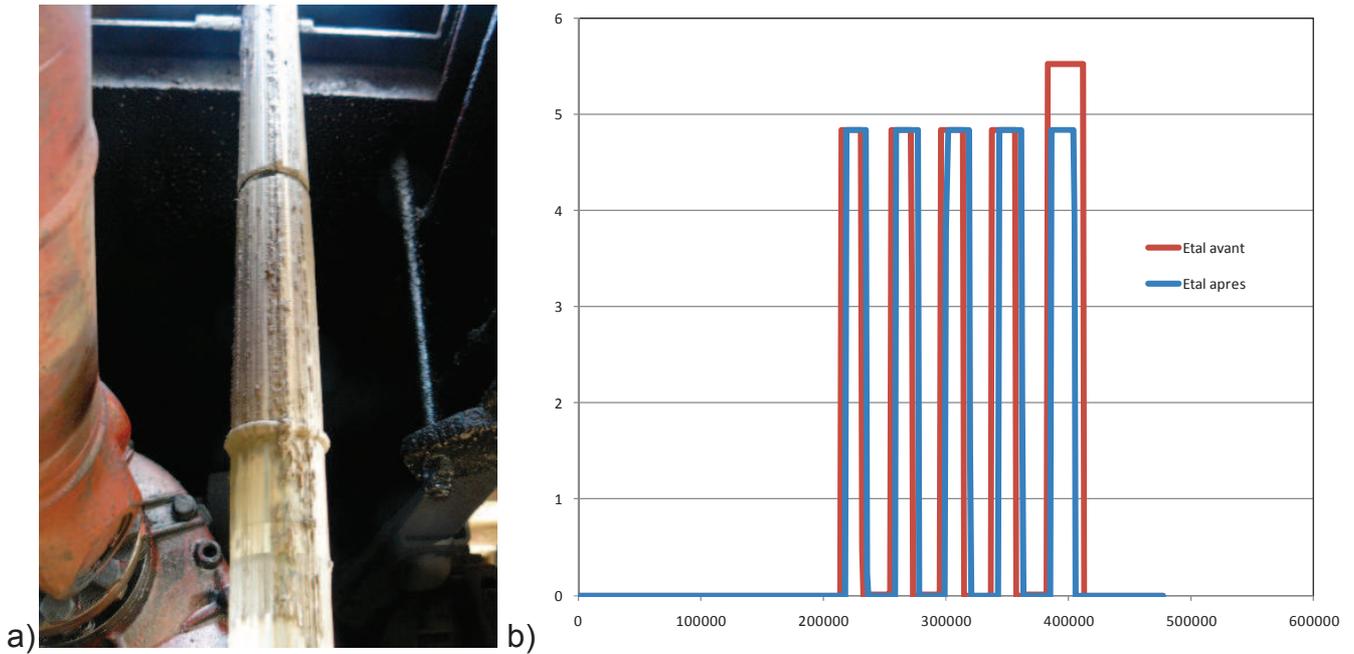


Figure 21. Essais du manchon après extraction à l'issue du sondage 1

## 2.4 Sondage 2

Le sondage 2 est un essai de reproductibilité des résultats.

### 2.4.1 Essai à 1 m

L'amplitude de l'essai à 1 m est de 1 à 36 bars pour tenter de vaincre le frottement latéral important. Le manchon s'est déplacé en butée basse mais il n'est pas revenu. Ce blocage a été attribué à la force insuffisante du ressort.

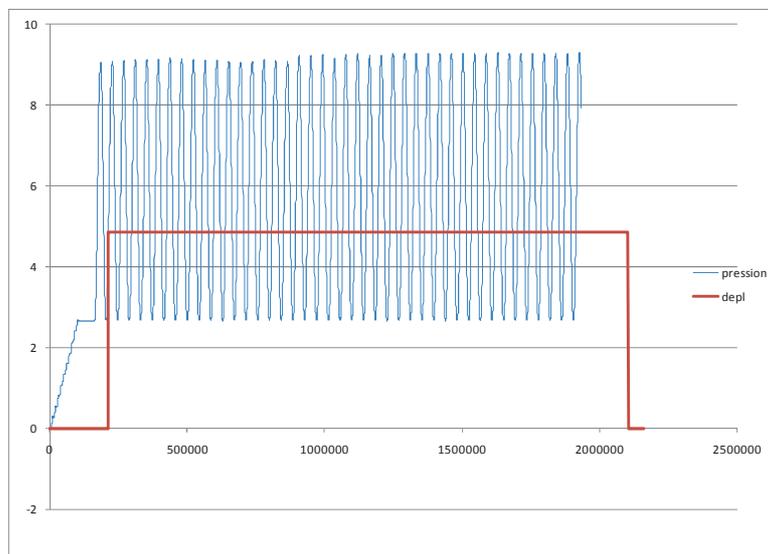


Figure 22. Consigne de pression et signal de déplacement

### 2.4.2 Essai à 2 m

Lors de l'essai à 2 m l'amplitude de pression de 15 bars du sondage 1 a été conservée (Figure 23). Aucun déplacement n'a été observé.

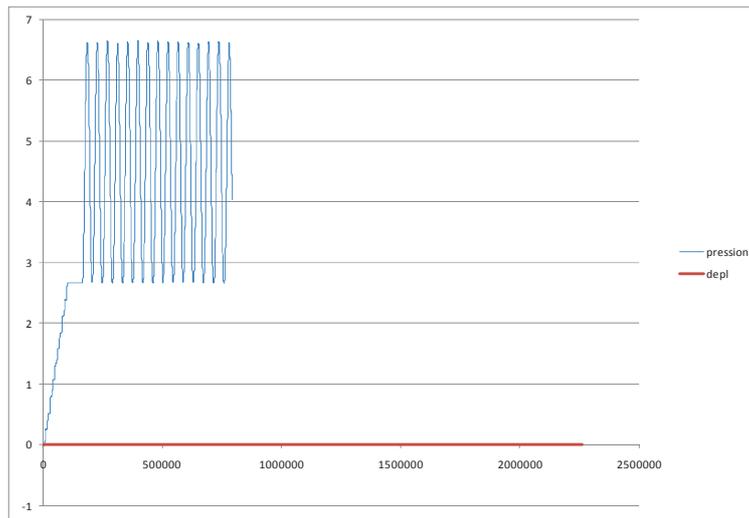


Figure 23. Consigne de pression et signal de déplacement

Il a été décidé d'accroître la pression (variation entre 1 et 36 bars) afin de voir si on pouvait forcer le déplacement du manchon. Le déplacement s'est déclenché immédiatement.

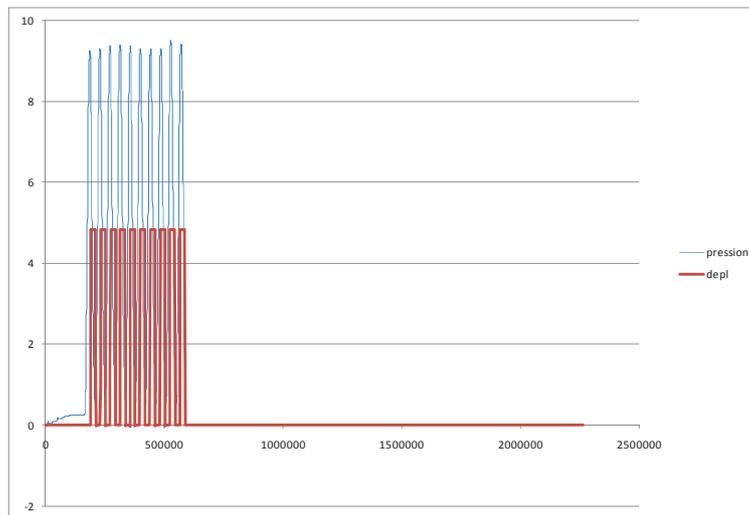


Figure 24. Consigne de pression et signal de déplacement

### 2.4.3 Essai à 3 m

L'amplitude de pression de 15 bars a été conservée. Aucun déplacement n'a été observé.

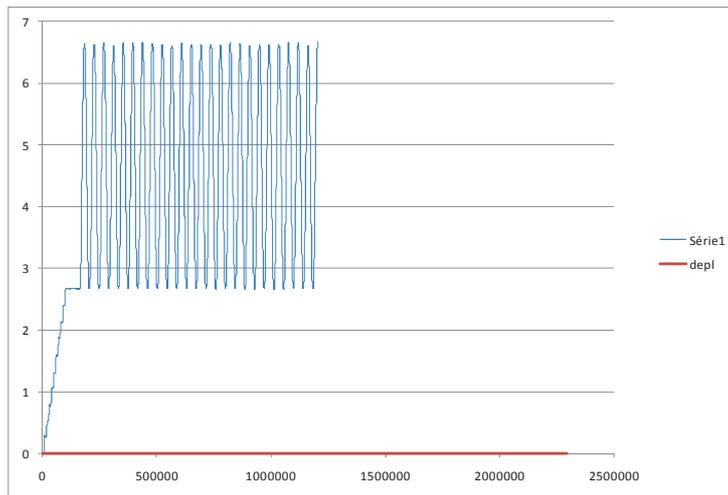


Figure 25. Consigne de pression et signal de déplacement

#### 2.4.4 Essai à 4 m

L'amplitude de pression de 15 bars a été conservée. Aucun déplacement n'a été observé.

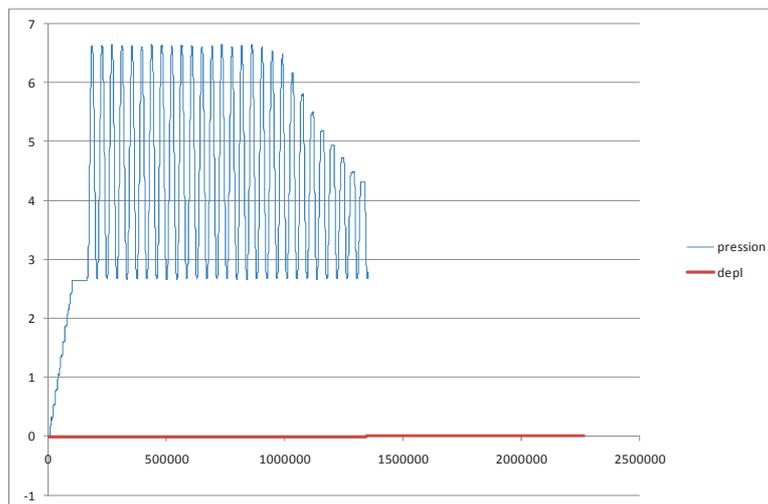


Figure 26. Consigne de pression et signal de déplacement

La fin subit une décroissance par épuisement de la bouteille d'azote.

### 2.5 **Sondage 3**

Le sondage 3 ne comporte qu'un essai à 1 m destiné à répéter l'essai avec une amplitude de 35 bars.

#### 2.5.1 Essai à 1 m

L'essai présente un démarrage progressif puis une alternance entre les deux butées.

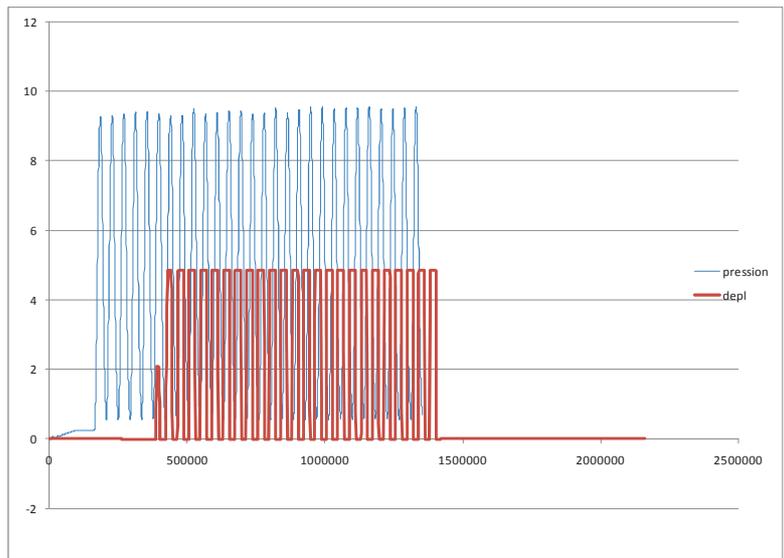


Figure 27. Consigne de pression et signal de déplacement

On peut observer que l'évolution du déplacement se fait sur très peu de cycles avant d'alternier entre les butées.

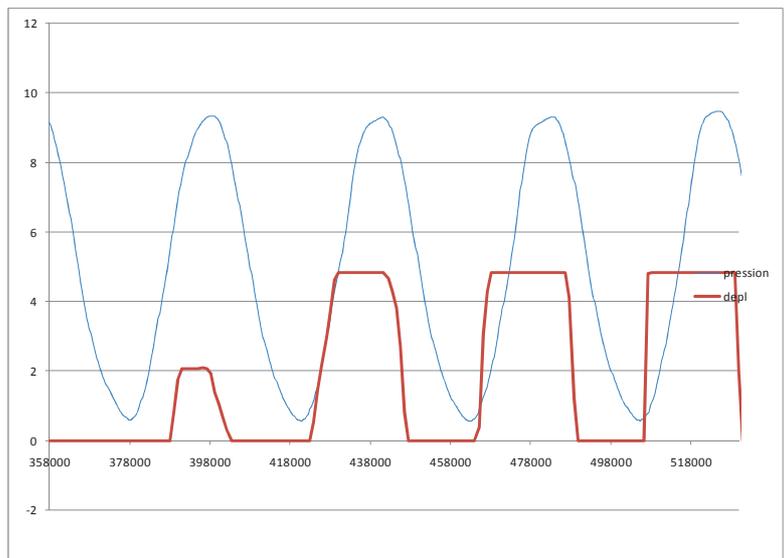


Figure 28. Zoom sur l'asservissement réalisé de la pression d'air et le déplacement observé

### 3 PRESSIOMÈTRE AUTOFOREUR CYCLIQUE

#### 3.1 Matériel

Les essais réalisés avec le matériel sur le site de Gosier en février 2009 avaient mis en évidence la qualité de l'asservissement et la fragilité de la sonde lors des manipulations (voir rapport R/09/SOL/01 du PN Solcyp). Testé avec succès à Cubzac dans une argile molle, il avait montré ses limites lorsque la forabilité du sol par jetting est faible (Reiffsteck et al., 2005 et 2008). De ce fait, une nouvelle sonde réalisée sur les bases de la sonde PAF65 a été mise en service.

##### 3.1.1 Sonde

La Figure 29 montre la sonde en cours de pénétration dans le sondage.



Figure 29. Vue de la pénétration du PAF dans le sol

On a observé des fuites relativement importantes au niveau du touret et un problème de transmission de l'effort de poussée (Figure 29).

L'outil de désagrégation composé d'un outil à molettes de type tricône a permis d'avoir des cuttings de bonne qualité remontants sans difficulté lorsque la pression d'eau est suffisante (Figure 30).

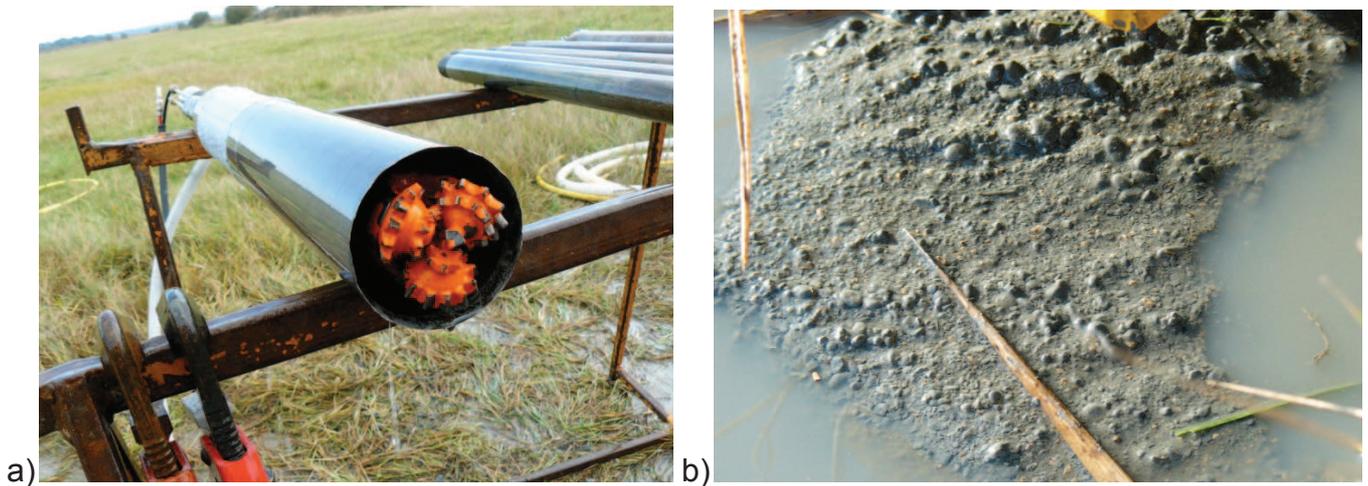


Figure 30. Système de désagrégation par outil à molettes et cuttings obtenus

La Figure 30b montre que les cuttings se présentent sous forme de copeaux de taille infra centimétrique.

Les observations réalisées lors des essais effectués à Cubzac, Merville et Gosier avec la sonde PAF2000 et l'expérience accumulée avec la sonde PAF76, amènent à la conclusion que la protection des membranes par des lamelles métalliques jointives collées ou recouvrantes n'est pas satisfaisante. La sonde a été équipée de nouvelles membranes fabriquée spécialement par la société ACI.

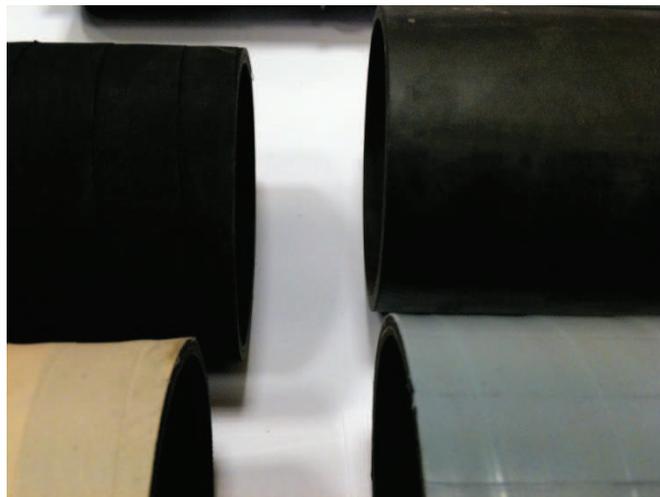


Figure 31. Différentes membrane fabriquées spécifiquement pour les essais (non toilée lisse, toilée, recouverte de Teflon, recouverte de lamelles de PTFE)

La Figure 32 montre la membrane à lamelles après le sondage. On observe un bon comportement de la membrane et ses qualités anti adhésive fonctionnent parfaitement.



Figure 32. Membrane après extraction de la sonde et lavage

### 3.1.2 Poste de pilotage

Le poste de pilotage PREVO a été positionné dans la camionnette de L'IFSTTAR (Figure 33).

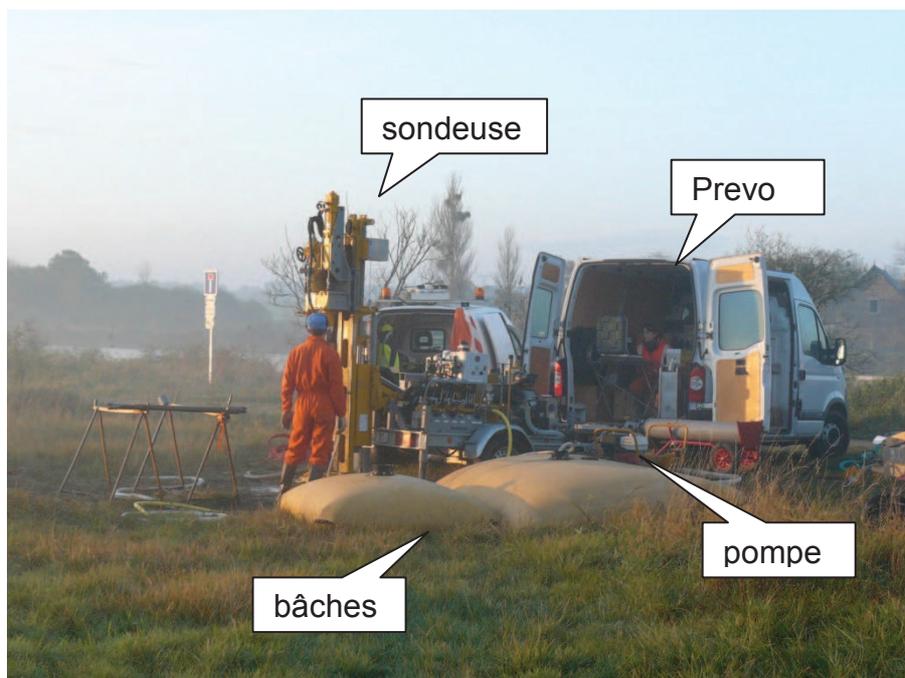


Figure 33. Poste de travail

## 3.2 **Étalonnage**

Des expansions dans l'air (inerties) ont été réalisées pour évaluer la résistance propre de la membrane (Figure 34).

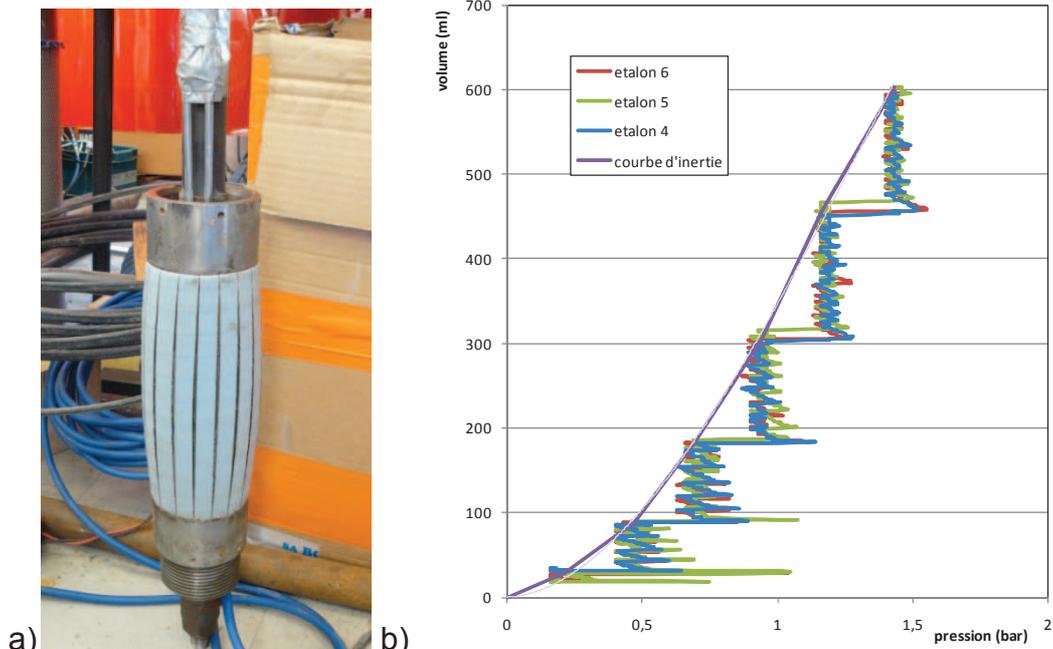


Figure 34. Essais d'inertie monotone ( $p = 6E-09v^3 - 7E-06v^2 + 0,0045v + 0,0933$ )

Du fait du caractère non linéaire de l'accommodation de la membrane lors de l'expansion, il est nécessaire d'adapter le protocole d'étalonnage. Pour cela nous avons utilisé le programme de chargement suivant ou la pression maximale est estimée à partir du protocole d'étalonnage Ménard. Le calibrage reste inchangé.

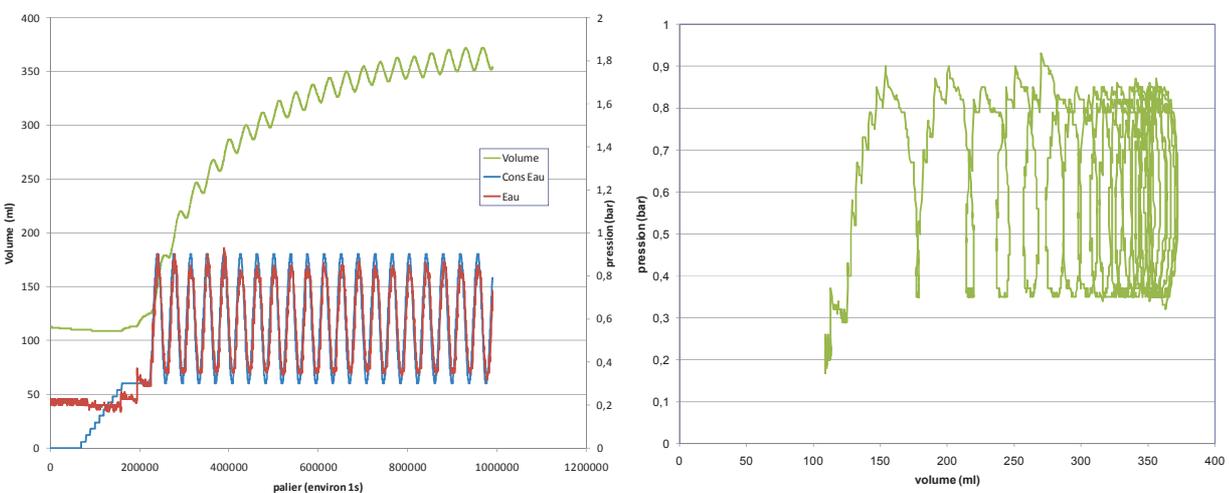


Figure 35. Essai d'inertie cyclique

### 3.3 Programme d'essais

Durant les années 70, l'Association pour la Recherche en Géotechnique Marine rassemblant différentes entreprises, bureaux d'étude et établissements de recherche dans le domaine a mené une campagne sur plusieurs sites d'essais cycliques au pressiomètre. Les détails des expérimentations sont rassemblés dans plusieurs rapports et articles du Symposium sur la pressiométrie et ses applications en mer tenu en 1982 à Paris (Jézéquel, le Méhauté, 1982 ; Puech et al., 1982).

Trois types d'essais furent réalisés :

- des essais de chargement cyclique entre deux bornes de pression  $p_M$  et  $p_m$  (Figure 36b a),
- des essais de chargement entre deux bornes de pression  $p_{M1}$  et  $p_{M2}$ , supérieure à la pression naturelle des terres au repos et estimée à partir de la pression de rupture (40 et 60 % par exemple) (Figure 36b c),
- des essais de chargement entre deux bornes de pression variables, dont la moyenne est cependant constante (ces essais sont dits de type tempête) (Figure 36b d).

Pour tous ces essais, la pression moyenne dans la cellule pressiométrique est égale à la pression obtenue pour une dilatation volumique monotone de 0,5%. La vitesse de déformation volumétrique est de 2% par minute.

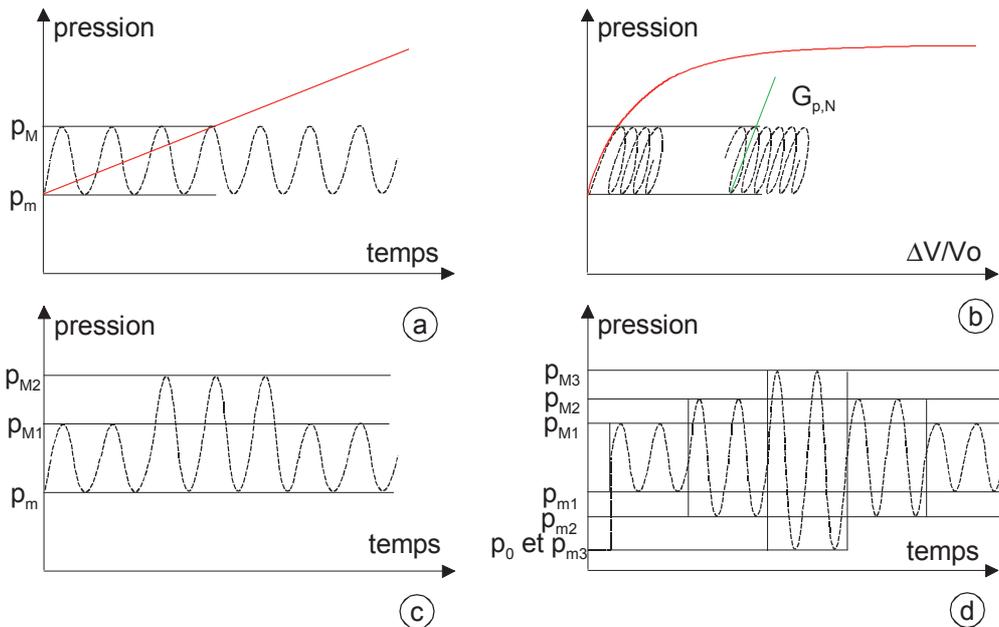


Figure 36 Différents types d'essais cycliques

Le mode d'interprétation était basé sur l'évolution de l'aire caractéristique des boucles de chargement déchargement ainsi que du module sécant des boucles d'hystérésis (Figure 36b). La méthode proposée par Dupla est de tracer uniquement les courbes d'accumulation, en prenant en compte les états résiduels à chaque fin de cycle (Dupla, 1995). Les courbes ainsi obtenues rendent compte de l'accumulation de la déformation irréversible au cours de l'essai.

### 3.4 Sondage 1

La pression initiale  $p_m$  utilisée pour démarrer l'essai est définie comme la contrainte horizontale en place (pression de terre de repos) et la pression maximale  $p_M$  est égale à  $(1+0,8)p_m$  (Dupla, 1995).

Tableau 2. Caractéristiques du site de Cran

Z (m)	$p_l$ (bars)	$p_o$ brut (bars)	$p_o$ corrigé (bars)
1	2,46	2,5	1,9
2	1,37	2	1,4
3	1,17	0,8	0,2
4	1,29	0,8	0,2

La Figure 37b montre, pour les 4 essais du sondage 1, la tendance à la stabilisation de quasiment tous les essais, même si celle-ci n'a jamais été atteinte.

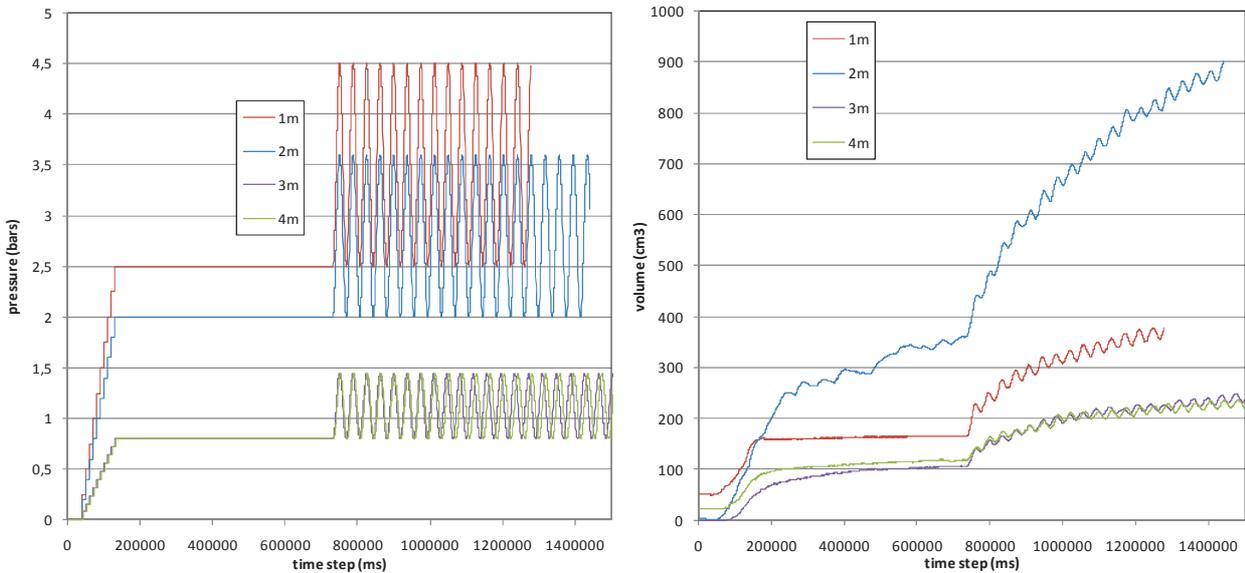


Figure 37. Programmes d'essais d'expansion PAF cycliques et courbes d'expansion résultats

La Figure 38 présente un graphique plus classique représentant en abscisse la déformation volumique obtenue et en ordonnée la pression imposée. À la profondeur 2 m, la courbe de test présentée sur la Figure 38 montre une accumulation de volume élevée conduisant à la conclusion que le test a été effectué dans la couche molle et que la pression initiale a été surestimée.

La correction par la résistance propre de la membrane permet d'observer que le sol à la profondeur 2 m continue à se déformer même pour une pression quasi nulle.

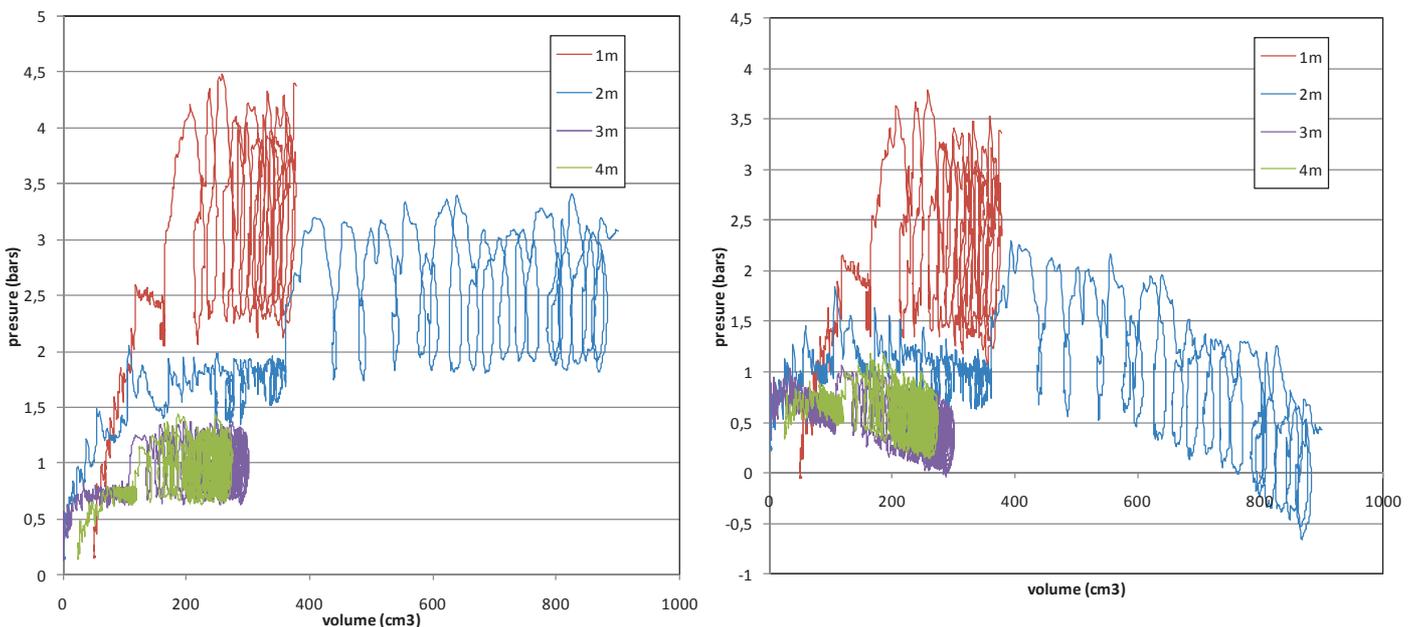


Figure 38. Courbes d'expansion des essais PAF cycliques brutes et corrigées

Le signal obtenu représenté sur la Figure 38 est assez bruité car l'amplitude de la plage de pression est faible, et une interaction entre l'asservissement de l'eau et l'air a été faite dans le pilotage.

## 4 BILAN DU PROJET DE DÉVELOPPEMENT

### 4.1 Bilan technique :

Globalement les objectifs de la tâche ont été atteints. Les matériels sont fonctionnels et permettent de réaliser des essais in situ dans des conditions maîtrisées. Cependant certains points de difficulté ont été relevés.

### 4.2 Bilan des essais CPT cyclique

Du fait du concept choisi pour le manchon de frottement, il n'est pas possible dans sa configuration actuelle de réaliser des chemins de chargement aussi évolués qu'espérés.

La campagne de Cran ayant fait émerger le besoin d'avoir un ressort développant une plus grande force de rappel, le renforcement du ressort a été regardé par le CECP et Fugro.

Il semble possible d'augmenter un peu les efforts avec un ressort fait avec du fil de 5.6mm. Un modèle existe en standard qui pourrait rentrer dans la sonde, mais cela n'augmenterait pas beaucoup les efforts. Vu l'encombrement on ne pourra pas augmenter de façon considérable les efforts max.

L'autre solution étudiée par Fugro est d'utiliser des rondelles élastiques (type rondelles Belleville). En standard les seules qui rentreraient dans les diamètres que l'on a, sont des rondelles de blocage de roulement mais elles ne sont pas assez rigides.

Le nombre qu'il faudrait en série standard (diamètre int 20mm, extérieure 40mm) pour avoir une idée de la composition en considérant un effort minimum de 200daN (le double de ce que l'on a actuellement) :

- En (20/40/1), il faudrait composer des empilements de 4 pour avoir la rigidité et 30 empilements pour avoir la course de 10mm (total 120 rondelles). La longueur totale serait de 150mm à vide et 149 en précontrainte pour un effort variant de 226daN à 350daN.
- En (20/40/2), pas d'empilement nécessaire, 40 rondelles pour avoir la course de 10mm. La longueur totale serait de 124mm à vide et 114 en précontrainte pour un effort variant de 218daN à 403daN.

Dans les 2 cas, la longueur totale est supérieure à la longueur dispo dans la sonde, donc même avec une fabrication spéciale il ne semble pas que l'on puisse avoir le couple rigidité/course espéré.

L'autre solution est de diminuer la longueur du manchon de frottement. Toutefois, si on passe en manchon plus court, il faut faire également le complément du manchon que l'on monterait libre en dessous de celui de mesure. Comme pendant le fonçage le manchon est en position haute, pour le premier cyclage, on pourrait le faire en effort (par exemple 80% de la valeur max) sur la surface complète des 2 manchons (actif+ libre).

### 4.3 Bilan des essais PAF cyclique

Les essais se sont déroulés conformément aux attentes. Une modification du touret d'injection a été réalisée avec l'ajout d'un palier à rouleau pour améliorer le transfert de poussée.

## 5 PERSPECTIVES

### 5.1 Programme des essais de Merville

Les essais devant être réalisés sur le site expérimental de Merville s'intéressent à la couche d'argile des Flandres entre 3 et 12m (Figure 39a).

#### 5.1.1 Essais CPT cyclique

Les essais CPT réalisés en 2006 sur le site donnent des frottements sur manchon  $f_s$  très constants entre 6 et 10 m et voisins de 80 à 100kPa sur la couche.

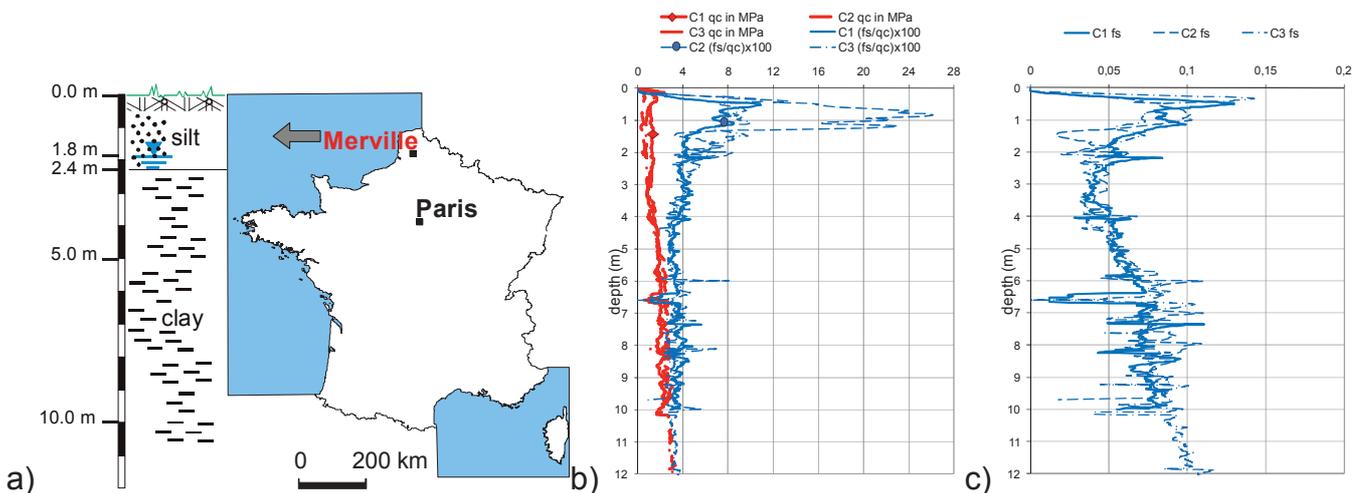


Figure 39. Localisation du site de Merville et pénétrogrammes réalisés en 2006

Lors de la thèse d'Hassan Ali des mesures de frottement latéral ont été faites lors des essais de chargement de pointe (Ali, 2010). Elles donnent des valeurs variant de 20 à 60 kPa soit environ deux fois moins que les valeurs obtenues sur un pieu foré (Figure 40).

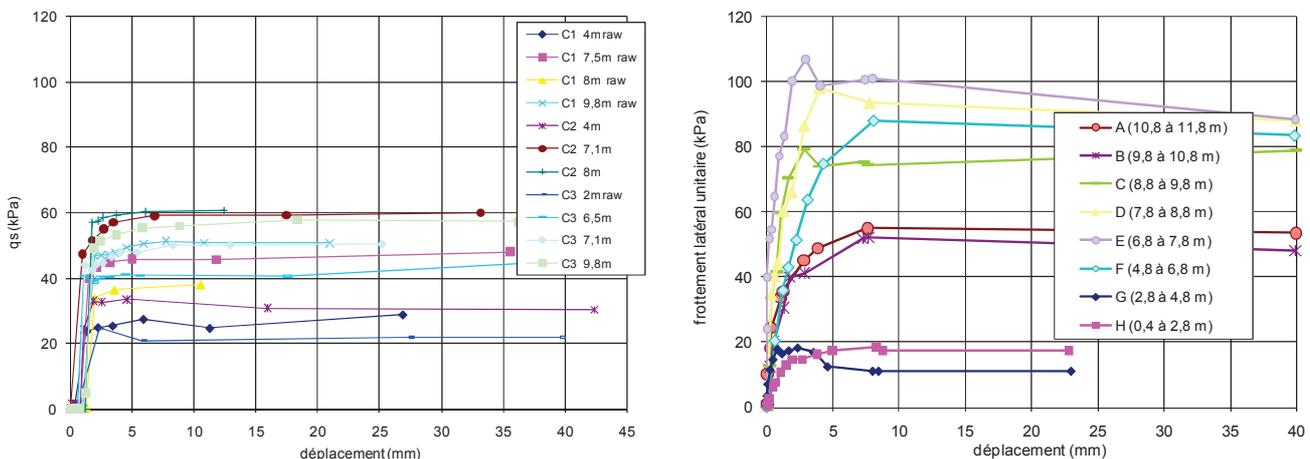


Figure 40. Courbes de frottement des essais de chargement de pieux forés et de pénétromètre statique

Pour ces essais, on verra s'il est possible de modifier le système de ressort.

La vitesse d'acquisition sera accrue en passant par un conditionneur analogique et une acquisition par un boîtier NI.

Il faudrait approfondir un peu le protocole de test. Des essais cyclique de « fatigue » rapide, puis des essais quasi statique lent permettraient peut être la mesure de pression à laquelle le frottement cède.

Les profondeurs d'essais sont 6, 8 et 12 m

5.1.2 Essais PAF cyclique

Il est prévu de réaliser deux sondages au pressiomètre autoforeur et un au pressiomètre Ménard, avec des essais à 6, 8 et 12 m en alternance avec expansion monotone croissante à 5, 7 et 11 m.

Pour des raisons pratiques, il sera réalisé un préforage à la tarière hélicoïdale.

Le programme d'essai est défini à partir des résultats d'essais réalisés en 2000 lors de la recherche menée sur la caractérisation de la déformabilité des sols (Borel et Reiffsteck, 2006). La rupture est définie à partir du point d'inflexion de la courbe de la contrainte de cisaillement de l'essai d'expansion monotone (courbe dérivée) (Baguelin, 1982). Cette rupture de pente est à 2% de déformation volumique ( $\Delta V/V_0$ ). Cette estimation est faite à partir des essais au pressiomètre autoforeur PAF76 du LRPC de Saint Briec et au pressio-pénétrömètre Fugro.

Elle correspond à une pression aux environs de 300 à 500 kPa sur la Figure 42. On cherche alors la pression pour atteindre 0,5 % de déformation, ce qui correspond environ à 50 kPa.

Le diamètre de la sonde et la longueur de la cellule de mesure utilisée étant respectivement de 90 mm et 220 mm, une variation de volume de 0,5 % correspond à 7 cm<sup>3</sup>.

Ces estimations seront vérifiées lors des essais d'expansion monotone.

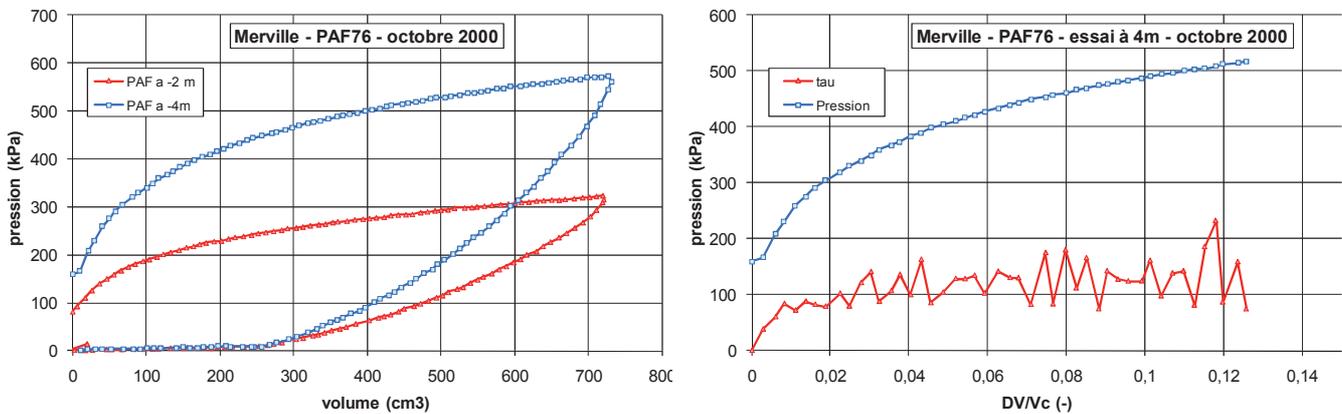


Figure 41. Courbes pressiométriques et courbes de cisaillement dérivées

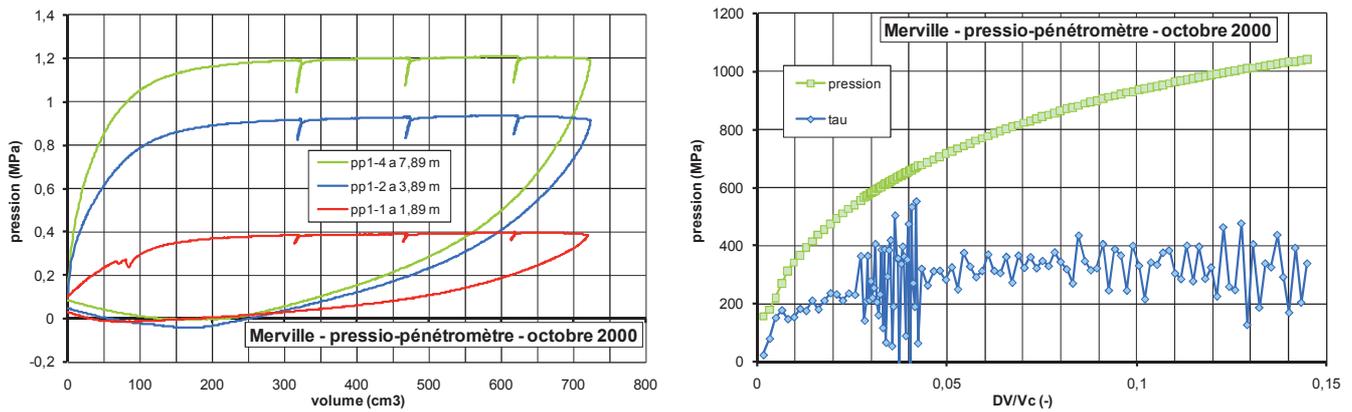


Figure 42. Courbes pressiométriques et courbes de cisaillement dérivées

On fera une relaxation d'un temps conventionnel de 10 minutes.

Le programme cyclique comprend 3 séries de 100 cycles avec une amplitude de pression croissante puis décroissante avec un seul palier à 2/3 de l'amplitude  $p_{0,5} - p_0$ .

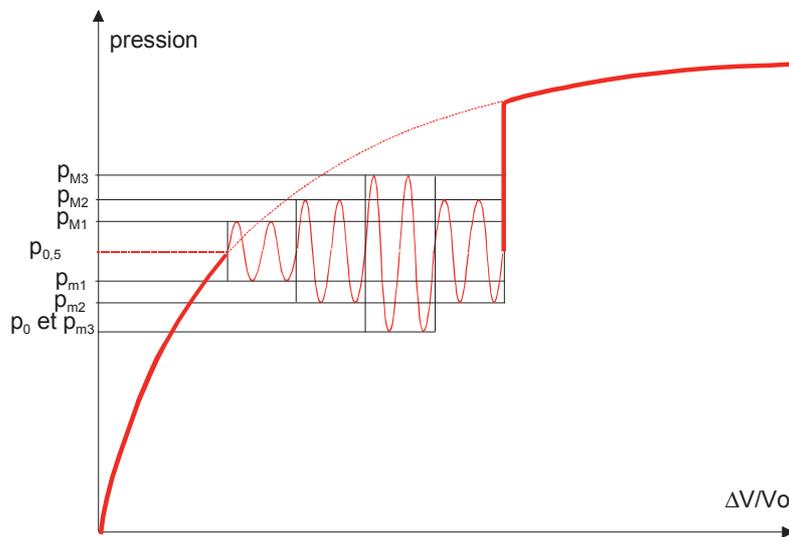


Figure 43. Principe des essais envisagés

La pression horizontale peut être estimée en première approche avec les pressions de contact des essais pressiométriques Ménard faits sur le site (Figure 43 et Figure 44).

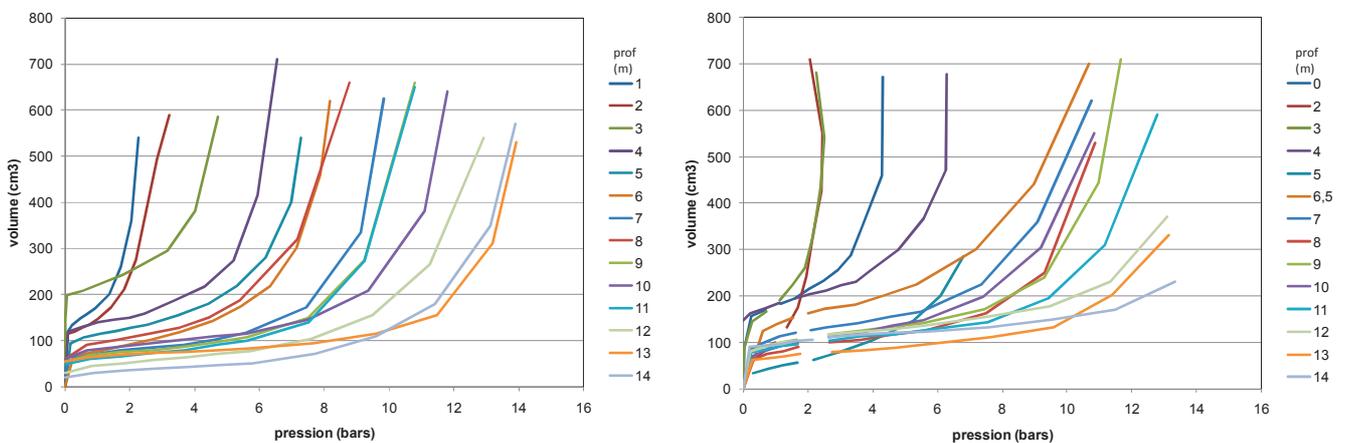


Figure 44. Courbes pressiométriques Ménard

Tableau 3. Caractéristiques du site de Merville

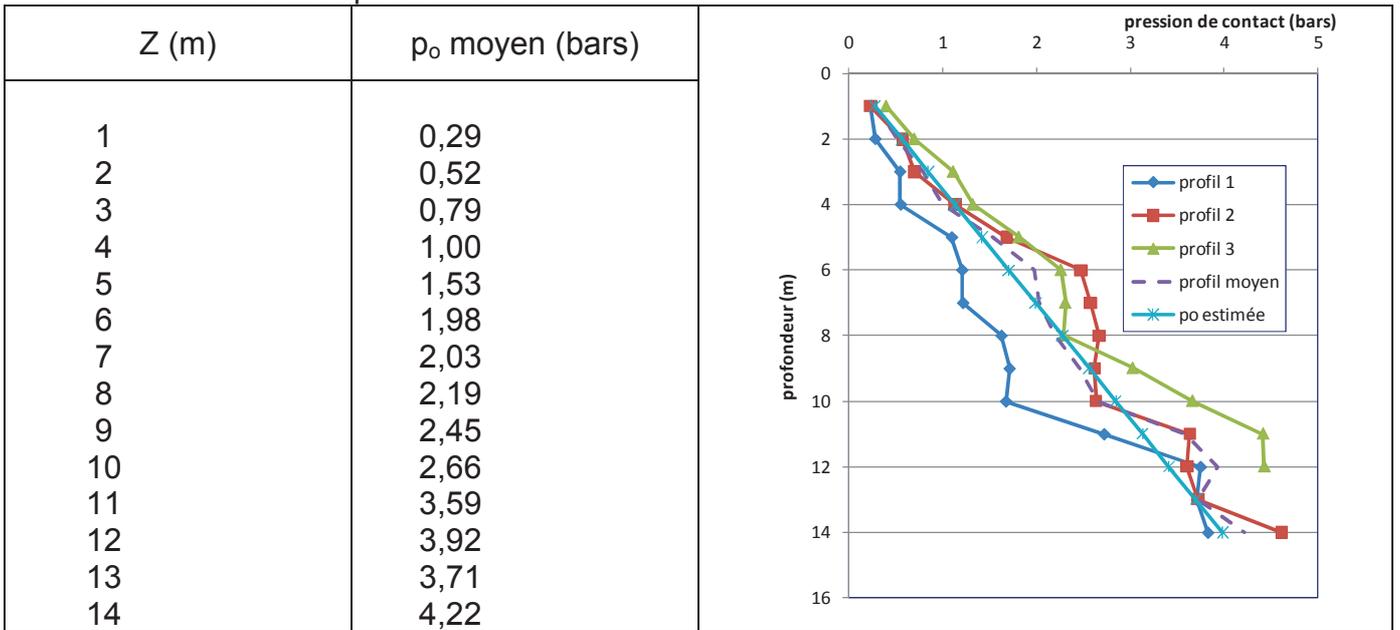


Figure 45. Profils de  $p_0$  estimés à partir des courbes pressiométriques Ménard

## 6 CONCLUSION

Les matériels sont fonctionnels. Les essais sur le terrain ont montré la robustesse des concepts mis en œuvre. Il n'est pas encore possible dans leur configuration actuelle de réaliser des chemins de chargement aussi évolué qu'espéré.

Le manchon de friction cyclique est un nouvel outil de test in situ, qui permet, sous certaines conditions une approche qualitative en continu et le profil quantitatif de la résistance au cisaillement cyclique avec la profondeur.

Reste à :

- faire les campagnes de Merville et Dunkerque,
- rédiger la documentation technique du matériel et mode opératoire.

## 7 RÉFÉRENCES

- Ali H., (2010) Caractérisation améliorée des sols par l'essai de chargement de pointe au piézocone – application au calcul des fondations profondes, Thèse de l'université Blaise Pascal, Clermont Ferrand 2, 323 pages
- Amar, S, Baguelin, F, Frank, R, Jezequel, JF (1995), Courbe pressiometrique adimensionnelle dans les argiles sous sollicitations non drainées, 11th European conference on soil mechanics and foundation engineering, Copenhagen, May-June 1995., vol. 1, 1.7-1.11
- Baguelin F. (1982) Règles de calcul des fondations à partir de l'essai au pressiomètre autoforeur, Symposium sur la pressiométrie et ses applications en mer, Paris, Éditions Technip, pp. 359-373
- Bat A. (1999) Incidence des procédures de prélèvement et des procédures d'essais sur les paramètres géotechniques mesurés, PhD thesis Université de Caen-Basse Normandie, 185 pages
- Borel S., Reiffsteck Ph., (2006) Caractérisation de la déformabilité des sols au moyen d'essais en place. LCPC Paris, 132 p.
- CEN/ISO (2005) Geotechnical investigation and testing - Field testing - Part 1: Electrical cone and piezocone penetration tests, EN/ISO 22476-1, 41 p
- CEN/ISO (2010) Geotechnical investigation and testing – field testing- Part 6 : Self boring pressuremeter test, EN/ISO 22476-6, 22 p
- Dupla J.C. (1995) Application de la sollicitation d'expansion de cavité cylindrique à l'évaluation des caractéristiques de liquéfaction d'un sable. PhD thesis Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Paris, France.
- Jézéquel J.F., Le Méhauté A. (1982) Essais cycliques au pressiomètre autoforeur, Symposium sur la pressiométrie et ses applications en mer, Paris, Éditions Technip, pp. 221-233
- Paute J.L. (1973) "Etude des tassements. Remblai de Cran". Bulletin des laboratoires des Ponts et Chaussées Spécial T, Mai, pp. 105-118.
- Puech A., Brucy F., Ma E., (1982) Calcul de la capacité axiale des pieux de fondations marines à partir du pressiomètre autoforeur, Symposium sur la pressiométrie et ses applications en mer, Paris, Éditions Technip, pp. 373-388
- Reiffsteck P. Reverdy G., Vincelas G., Sagnard N. (2005) Pressiomètre autoforeur nouvelle génération, Symp. Int. ISP5-PRESSIO2005, 50 ans de pressiomètres, Gambin et al. (eds.), vol. 1, Presses de l'ENPC/LCPC, pp. 113-126.
- Reiffsteck P., Nguyen Pham P. T., Reverdy G. (2008) Development of a seismic self-boring pressuremeter, 3rd International conference on Site Characterization, Taipei, pp. 1353-1358
- Reiffsteck P., (2010) PAF cyclique, rapport R/09/SOL/01 du PN Solcyp, 32 pages
- Reiffsteck P., (2010) CPT cyclique, rapport R/09/SOL/02 du PN Solcyp, 32 pages

## 8 LEXIQUE OU GLOSSAIRE

Besoins : demande formulée ou non pour une technologie

Cahier des charges fonctionnel (CDCF) : permet de décrire et lister les fonctions primaires, secondaires et contraintes du système étudié

Contrainte : condition à satisfaire

Fonction : Il existe deux types de fonctions :

- Fonctions de service qui constituent une relation entre le système et le milieu extérieur, elle traduisent l'action attendue ou réalisée par le produit pour répondre à un élément du besoin d'un utilisateur donné. Il faut souvent plusieurs fonctions de service pour répondre à un besoin. Dans une étude donnée, leur énumération et leur formulation qualitative et quantitative résultent de l'analyse du besoin à satisfaire et le décrivent d'une manière nécessaire et suffisante.

Il existe deux types de fonctions de service :

- les fonctions principales, correspondant au service rendu par le système pour répondre aux besoins
  - les fonctions contraintes, traduisant des réactions, des résistances ou des adaptations à des éléments du milieu extérieur.
- Fonctions techniques qui sont internes au produit, elles sont choisies par le constructeur dans le cadre d'une solution, pour assurer une fonction de service.

Prototype : désigne le premier, ou l'un des premiers exemplaires d'un produit industriel (voiture, avion...). Cet exemplaire permet des tests afin de valider les choix de conception de l'ensemble.

Spécification technique des besoins (STB) : description des fonctions d'un matériel, en vue de sa réalisation. La STB est un document contractuel établi entre l'utilisateur et le concepteur qui reprend les besoins exprimés dans le CdCF en termes d'exigences et de contraintes techniques spécifiques du concept retenu

Validation : ensemble des activités de vérification dans le but de confirmer une hypothèse, un travail, une théorie, un mode de fabrication