RAPPORT DE RECHERCHE

THEME 2 : Essais Spéciaux

Libellé de la commande : Réalisation d'essais PMT et PAF cyclique sur les sites d'essais de chargement de pieux du projet SOLCYP

N° de la Commande : LC/12/SOL/36

Libellé de l'action : PAF et CPT cyclique

Organisme : IFSTTAR
ex-LCPC

Auteur : Philippe Reiffsteck

Numéro du rapport :
R/13 /SOL/014

Date de réalisation du rapport :
Novembre 2012

- Président : Alain PECKER – GS
- Directeur Technique : Alain PUECH – FUGRO
- Gestion administrative et financière : IREX

10 rue Washington – 75008 PARIS – Tél. : 01 44 13 32 77 – irex@wanadoo.fr

Sommaire simplifié

NTRODUCTION		4
1	PROGRAMME DES ESSAIS DE MERVILLE	7
2	PREMIÈRE SEMAINE D'ESSAIS	10
3	DEUXIÈME SEMAINE D'ESSAIS	26
4	DÉTERMINATION DE MODULES CYCLIQUES	35
5	PROGRAMME DES ESSAIS DE LOON-PLAGE	46
7	RÉFÉRENCES	48

Résumé français

Ce rapport retrace la validation sur le site de Merville (Nord) de dispositifs capable de solliciter cycliquement un essai d'expansion en forage mis en place par autoforage.

Abstract

This report describes the validation on Merville experimental site of testing devices able to apply cyclic loading during an expansion test.

Mots-Clés : pressiomètre autoforeur, PAF, pressiomètre Ménard, PMT, cyclique

Keywords: self boring pressuremeter, SBP, cavity expansion test, Ménard pressuremeter test, PMT, cyclic

Conclusion

Les essais sur le terrain ont montré la robustesse des concepts mis en œuvre. Il semble nécessaire de mieux définir les valeurs des pressions limitant les cycles pour obtenir des informations sur la dégradation du module.

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

COAUTEURS

Nom	Etablissement
Sonia FANELLI	IFSTTAR, GER
Jean-Louis TACITA	IFSTTAR, GER
Gilles DESANNEAUX	CETE de l'Ouest, LRPC Saint Brieuc

PARTICIPANTS

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

Ce document comporte un seul volume de 47 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

INTRODUCTION 4

1 PROGRAMME DES ESSAIS DE MERVILLE 6

2 PREMIÈRE SEMAINE D'ESSAIS 9

2.1 MINUTES 9
2.1.1 LUNDI 9 JANVIER 2012 9
2.1.2 MARDI 10 JANVIER 2012 10
2.1.3 MERCREDI 11 JANVIER 2012 11
2.1.4 JEUDI 12 JANVIER 2012 11
2.2 RÉSULTATS DES ESSAIS PAF MONOTONES 12
2.2.1 ESSAI MONOTONE À 5 M 12
2.2.2 ESSAI MONOTONE À 7 M 13
2.2.3 ESSAI MONOTONE À 9 M 14
2.2.4 ESSAI MONOTONE À 11 M 15
2.3 RÉSULTATS DES ESSAIS PAF CYCLIQUES 16
2.3.1 ESSAI CYCLIQUE À 6M 18
2.3.2 ESSAI CYCLIQUE À 8 M 20
2.3.3 ESSAI CYCLIQUE À 10 M 21
2.3.4 ESSAI CYCLIQUE À 12 M 22
2.4 BILAN INTERMÉDIAIRE 24
2.4.1 BILAN 24
2.4.2 PRÉPARATION DE LA DEUXIÈME SEMAINE D'ESSAIS 24

3 DEUXIÈME SEMAINE D'ESSAIS 25

3.1 MINUTES 25
3.1.1 LUNDI 23 JANVIER 2012 25
3.1.2 MARDI 24 JANVIER 2012 25
3.1.3 MERCREDI 25 JANVIER 2012 25
3.1.4 JEUDI 26 JANVIER 2012 25
3.2 RÉSULTATS DES ESSAIS PAF CYCLIQUES 26
3.3 RÉSULTATS DES ESSAIS PMT CYCLIQUES 26
3.3.1 ESSAI CYCLIQUE À 5 M 29
3.3.2 ESSAI CYCLIQUE À 7 M 30
3.3.3 ESSAI CYCLIQUE À 9 M 31
3.3.4 ESSAI CYCLIQUE À 11 M 32

4 DÉTERMINATION DE MODULES CYCLIQUES 34

4.1 SYNTHÈSE DES ESSAIS MONO-AMPLITUDE 35
4.2 SYNTHÈSE DES ESSAIS MULTI AMPLITUDE 38
4.3 BILAN INTERMÉDIAIRE 43

5 PROGRAMME DES ESSAIS DE LOON-PLAGE 45

6 RÉFÉRENCES 47

INTRODUCTION

L'objectif de cette tâche est de valider des dispositifs capables de solliciter cycliquement une sonde pressiométrique, ce qui permettra de mesurer *in situ* l'évolution du module pressiométrique, 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 pressiométriques autoforés cycliques,
La troisième partie présente les essais pressiométriques pré-forés cycliques,
La quatrième partie fait le bilan de cette première phase de tests,
Finalement, la dernière partie tire quelques conclusions et perspectives.

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 1a).

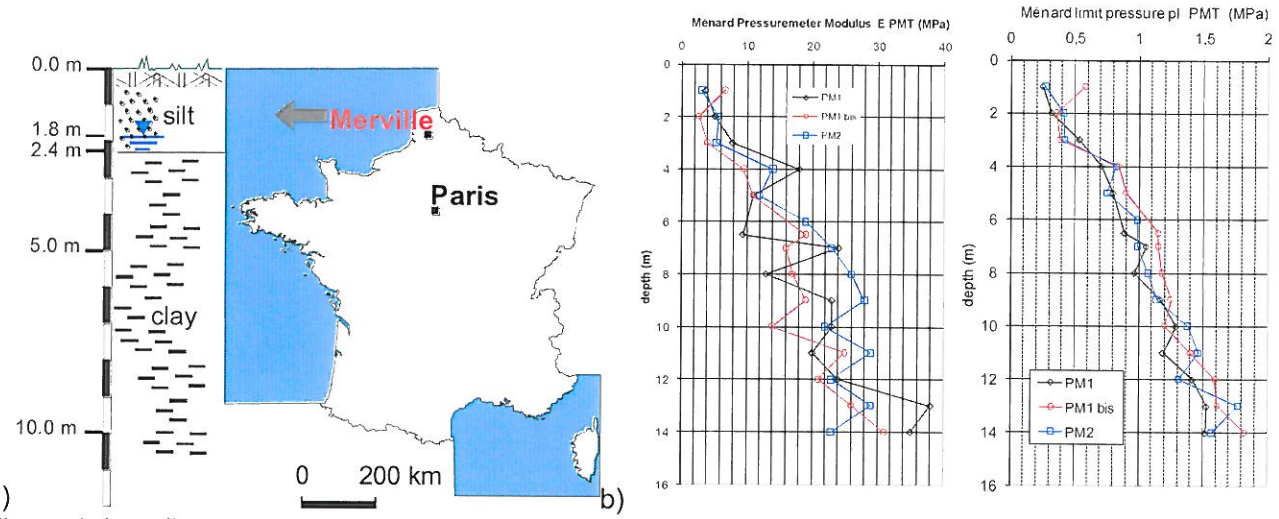


Figure 1. Localisation du site de Merville et log pressio réalisés en 2000

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).

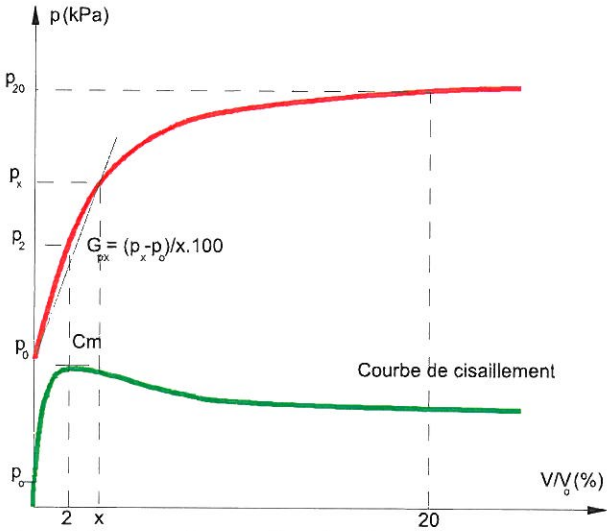


Figure 2. Définition du point de rupture sur la courbe de chargement monotone

Cette rupture de pente est à 2% de déformation volumique (ΔV/Vo). Cette estimation est faite à partir des essais au pressiomètre autoforeur PAF76 du LRPC de Saint Brieuc et au pressio-pénétromètre Fugro.
Elle correspond à une pression aux environs de 300 à 500 kPa sur la Figure 3 et la Figure 4.

On cherche alors la pression pour atteindre 0,5 % de déformation, ce qui correspond environ à 0,5 bar soit 50 kPa.

Le diamètre de la sonde IFSTTAR 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 un volume injecté de 7 cm^3.

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

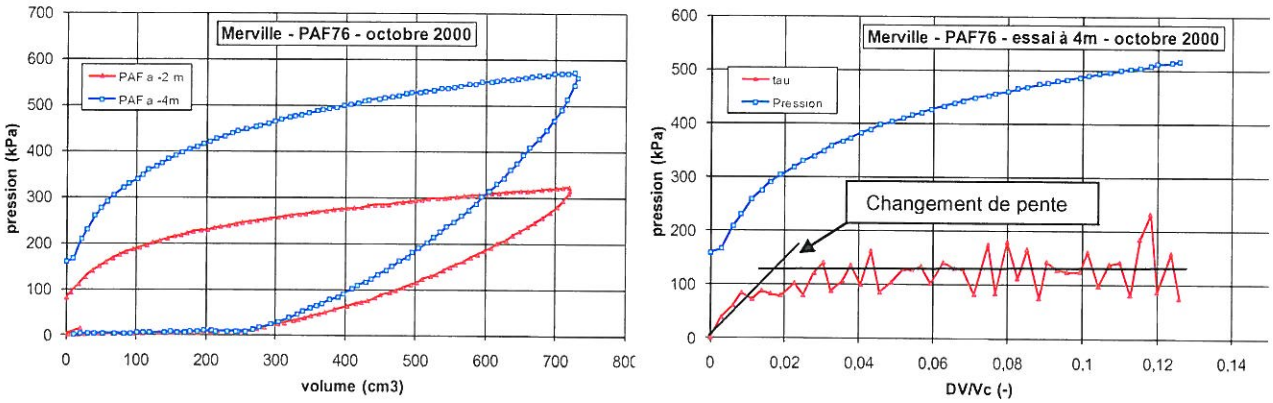


Figure 3. Courbes pressiométriques et courbes de cisaillement dérivées

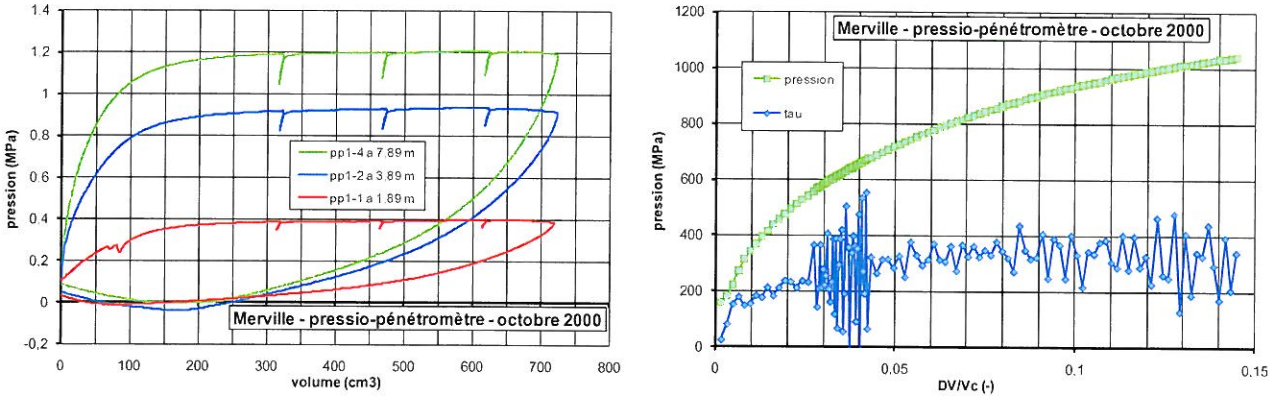


Figure 4. Courbes pressiométriques et courbes de cisaillement dérivées (essais LRPC de Saint Brieuc et Fugro)

Une relaxation d'un temps conventionnel de 10 minutes est appliquée.

La définition du programme cyclique change du programme mis en œuvre sur le site de Cran (Dupla, 1995 ; Reiffsteck 2011). Le principe de celui utilisé est le suivant. À partir d'un événement bien documenté comme une tempête, la sollicitation est définie grâce à une méthode de comptage des cycles par méthode rainflow par exemple (voir norme américaine et norme française plutôt acier). De cela, on procède au calcul des cycles équivalents par une méthode dite NGI ou Andersen ou on fait un programme en plusieurs phases contenant des cycliques d'amplitudes variables (Jézéquel et le Méhauté, 1982).
Selon Wichtman et al. (2004) et Peralta et al. (2010) qui sont des travaux allemands récents, l'ordre des cycles de différentes amplitudes ne semble pas avoir une grande importance.

Le programme cyclique comprend 3 séries de 50 cycles avec une amplitude de pression croissante (1/3, 2/3, 3/3 de Δp) puis décroissante avec un seul palier à 2/3 de l'amplitude Δp.
L'amplitude $\Delta p = p_{0,5} - p_0$ a été choisie selon la bibliographie (Puech et al., 1982)

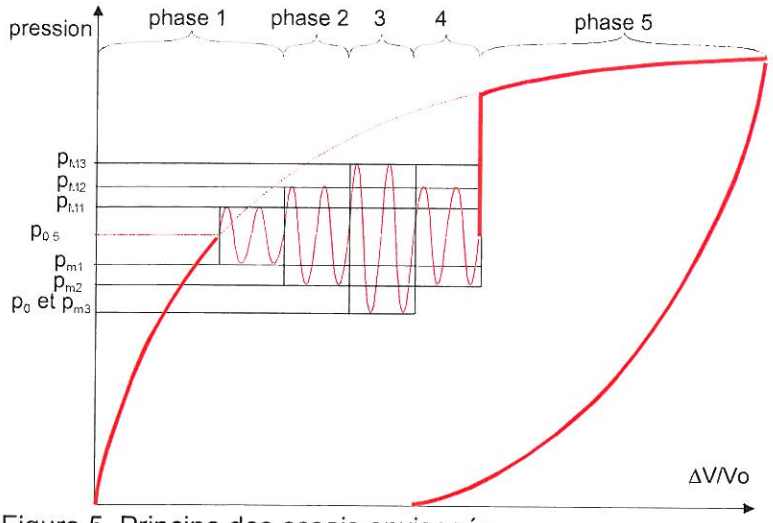
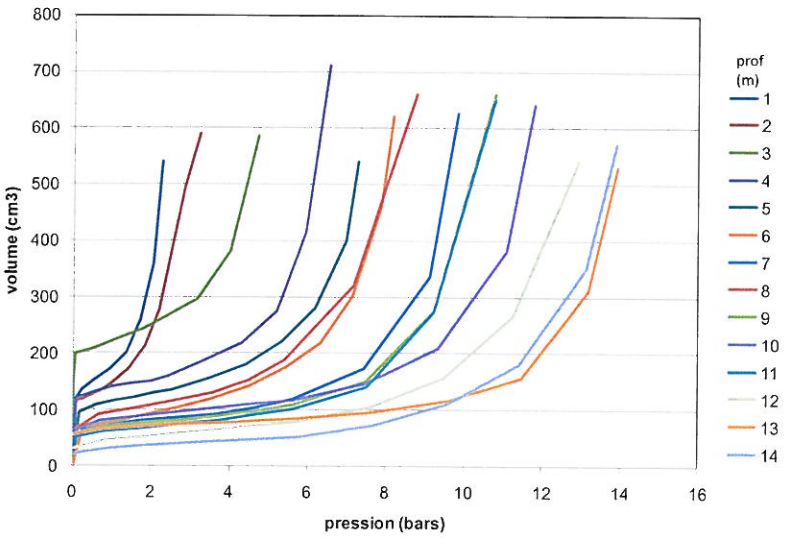


Figure 5. Principe des essais envisagés

La pression horizontale peut être estimée en première approche avec les pressions de contact des essais pressiométriques Ménard faits sur le site et à partir de la contrainte verticale en place connaissant Ko (Figure 5 et Figure 6).
Le profil moyen donne des valeurs corrigées supérieures dans la couche d'argile au profil estimé à partir de la contrainte géostatique multipliée par Ko estimé par la formule de Jacky.
Ce phénomène est sans doute à relier à la surconsolidation et donc à une tendance des forages à se refermer sur les sondes.



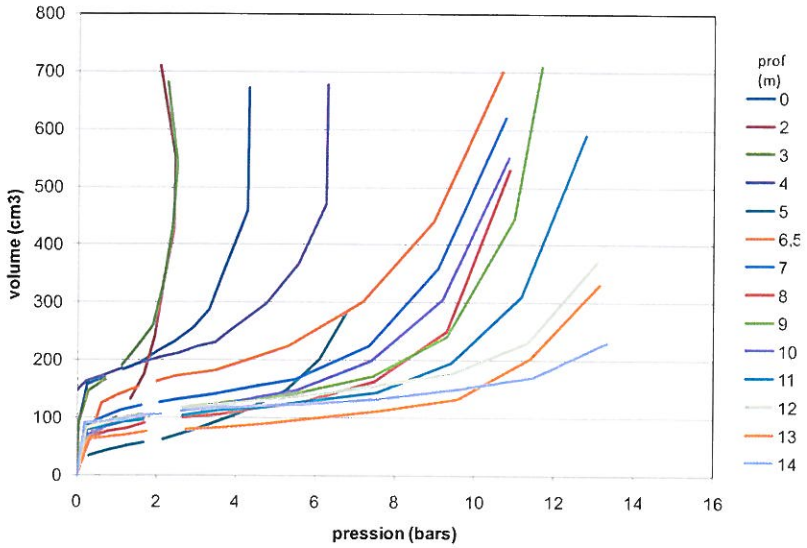


Figure 6. Courbes pressiométriques Ménard

Tableau 1. Caractéristiques du site de Merville

Z (m)	p_l (bars)	p_o moyen (bars)	$p'_o = p_o - u_o$ (bars)
1	4	0.14	0.14
2	3	0.27	0.27
3	4	0.44	0.14
4	7	0.55	0.15
5	7	0.98	0.48
6	9	1.33	0.73
7	10	1.28	0.58
8	10	1.34	0.54
9	11	1.50	0.60
10	12	1.61	0.61
11	13	2.44	1.34
12	13	2.67	1.47
13	16	2.36	1.06
14	16	2.77	1.37

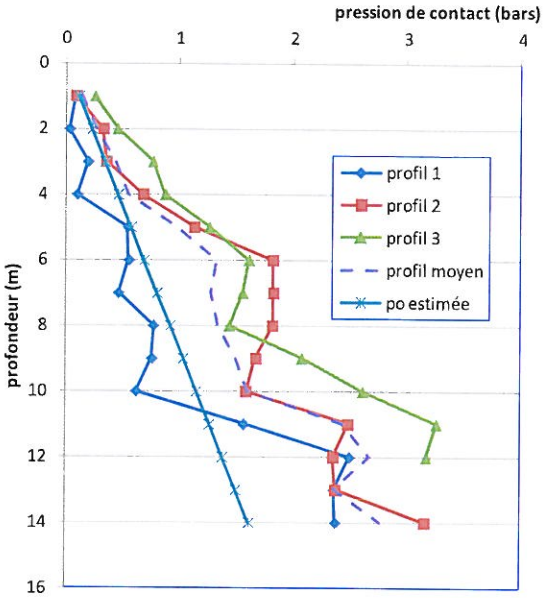


Figure 7. Profils de p_o estimés à partir des courbes pressiométriques Ménard

2 PREMIÈRE SEMAINE D'ESSAIS

2.1 Minutes

2.1.1 Lundi 9 janvier 2012

Positionnement de la sondeuse de niveau sur le premier forage et réalisation d'un préforage à la tarière hélicoïdale jusqu'à 4,5 m en 80 mm de diamètre. Pour cela un premier forage à la tarière hélicoïdale continue 63 mm a été effectué sur 4,5 m et réalésé en 80 mm sur 3 m.

Figure 8. Sondeuse en position pour le forage

2.1.2 *Mardi 10 janvier 2012*

Après vérification sur le mode opératoire de Saint Brieuc, la vitesse d'expansion lors d'un essai statique est de 75 cm^3 / minutes
Cette vitesse correspond à un p_{LM} de 0,9 MPa en 10 minutes (10 bars en 10 minutes => 1 bar par minute).

L'autoforage est réalisé jusqu'à 5 m sans difficultés avec des copeaux fins de limon (Figure 10).
La poussée sur outil augmente à partir de 3 m lorsque l'on arrive dans la couche argileuse (Figure 9).

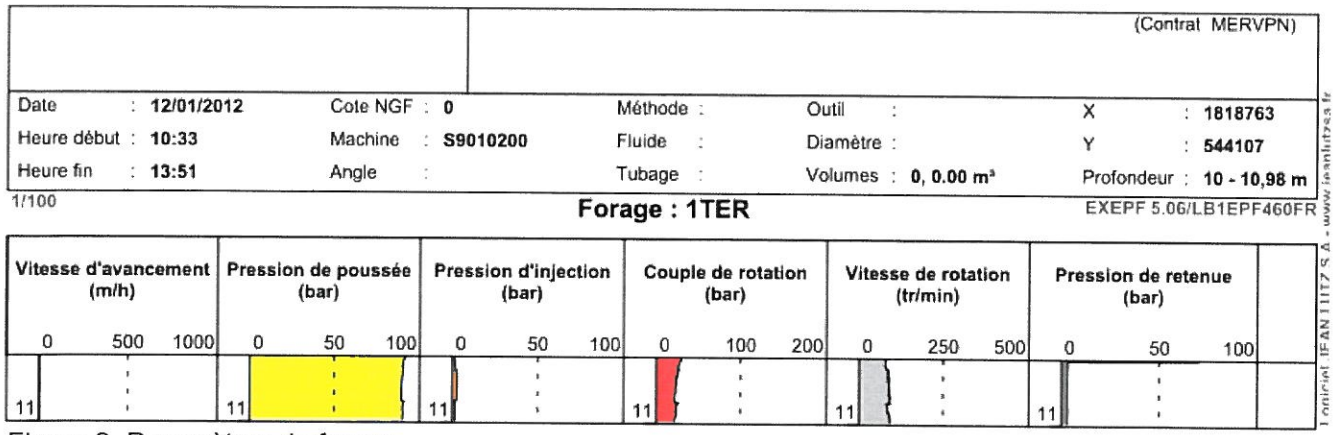


Figure 9. Paramètres de forage

On voit que les paramètres de forage imposés au PAF restent constant :

- PO 80 à 100 bars
- VA 1 à 3 m/h
- CR 20 à 30 bars
- VR de 80 à 90 tr/mn

La poussée est très forte, la rotation modérée du fait de l'utilisation d'un outil à molette. La consommation finale a été d'environ 13 m^3 d'eau soit 1 m^3 par mètre foré.

Lors de la reprise du forage après ce premier essai, les copeaux d'argile s'avèrent de belle qualité, le forage a pu être poursuivi jusqu'à 7 m sans trop de difficultés.

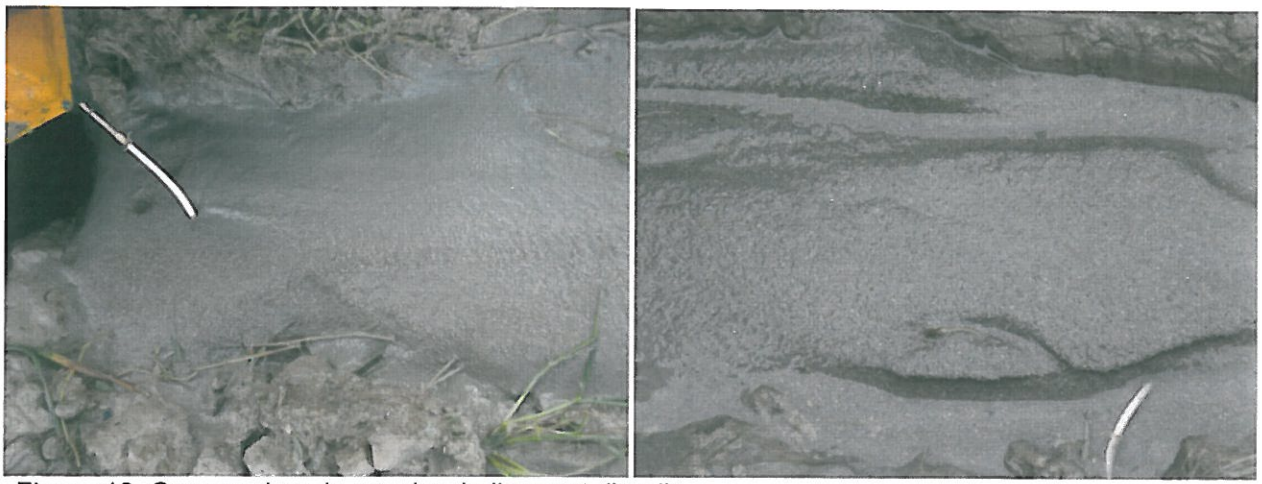


Figure 10. Copeau dans la couche de limon et d'argile

On réalise un essai monotone à 7 m.

2.1.3 *Mercredi 11 janvier 2012*

Réalisation des essais cyclique à 8m et monotone à 9m puis descente à 10 m.
Pas d'évènements notables
Lors du forage qui a suivi l'essai cyclique, le volume n'est pas revenu aussi facilement à un faible volume que les autres fois.

2.1.4 *Jeudi 12 janvier 2012*

Réalisation des essais cyclique après que la sonde ait passé la nuit à 10m.
Essais monotone à 11m puis essai cyclique à 12 m.
Les essais sont finis vers 16h30, on procède à l'extraction de la sonde.

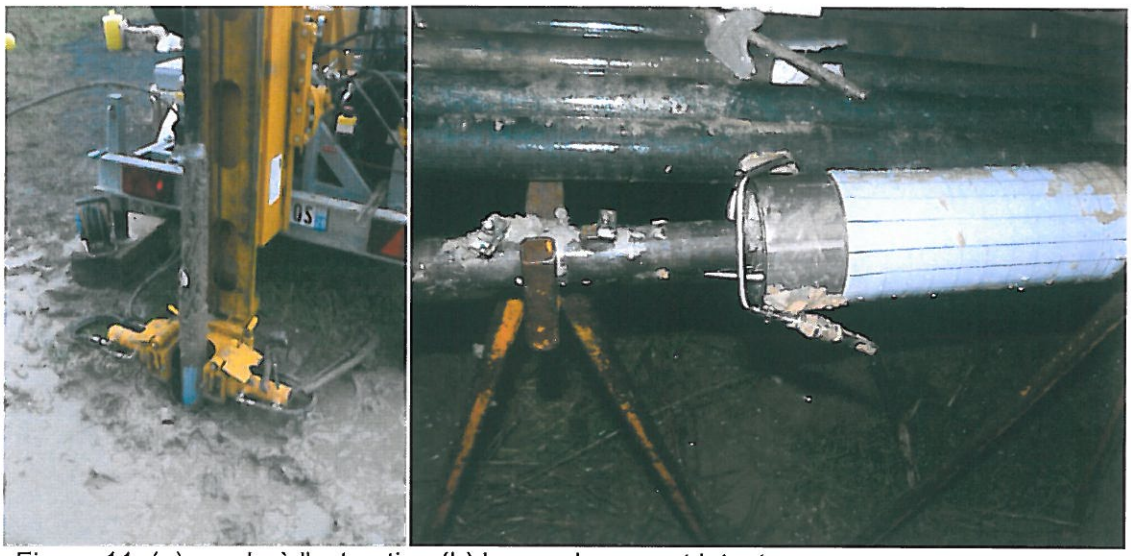


Figure 11. (a) sonde à l'extraction (b) la membrane est intacte

A part le fait que la tubulure de purge ait été pliée à la remontée, la sonde est en parfait état. La membrane n'a subit aucun dommage. La zone de l'outil est propre, preuve que le système de désagrégation a bien fonctionné.

2.2 Résultats des essais PAF monotones

Des essais de chargement monotones ont été réalisés à 4 profondeurs.

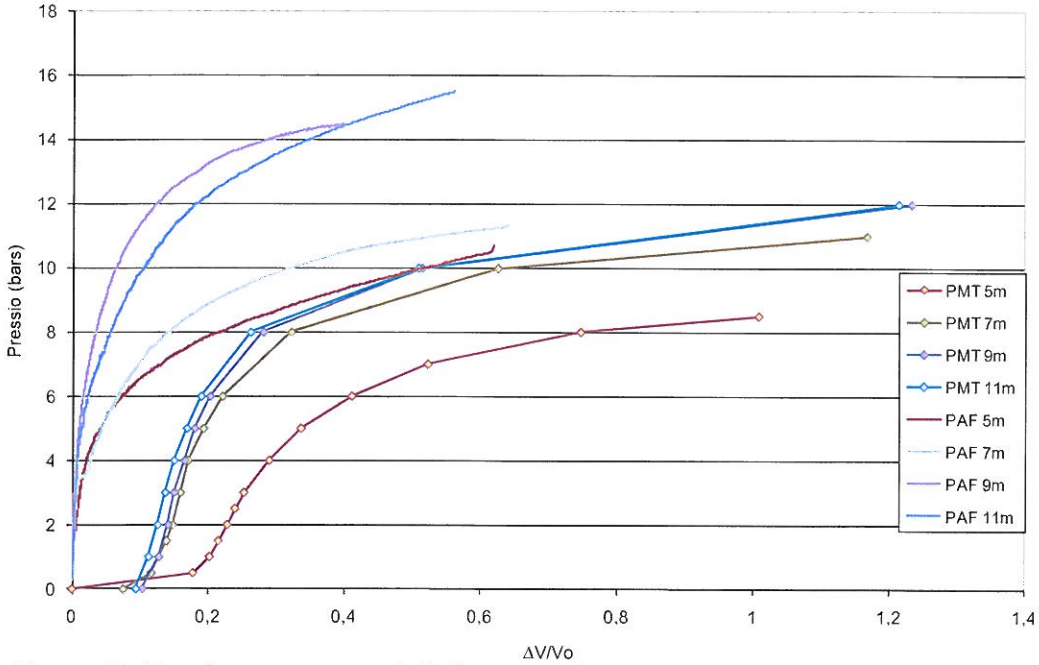
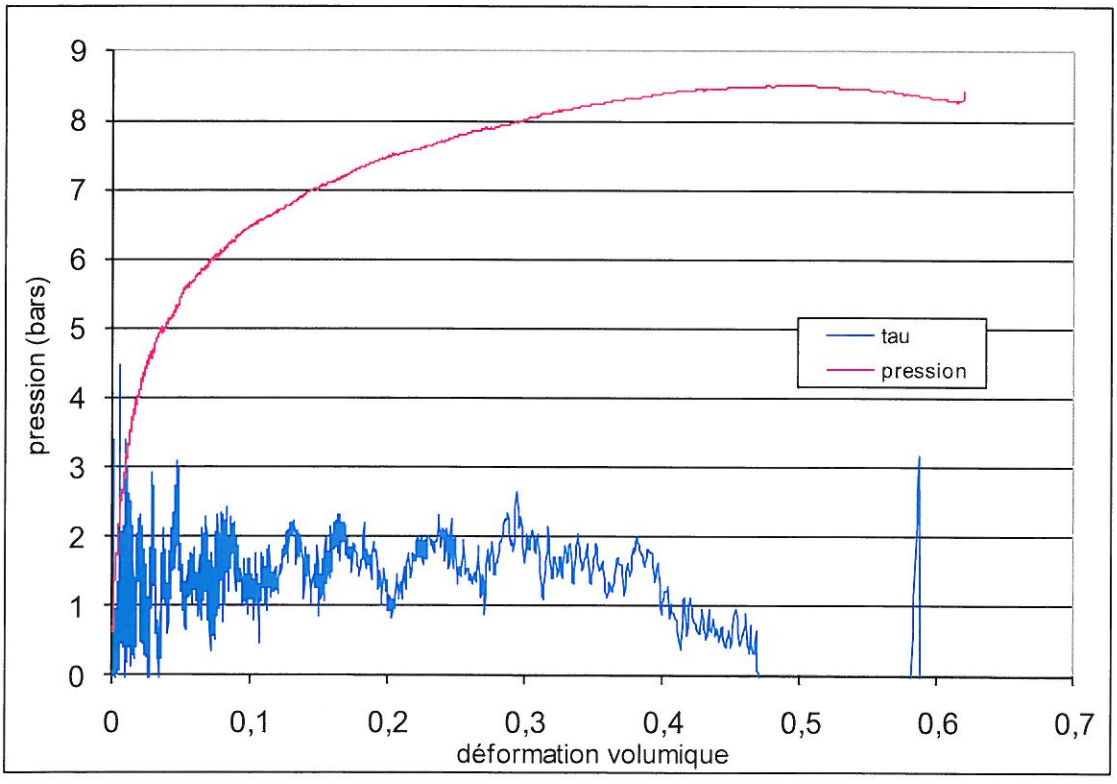


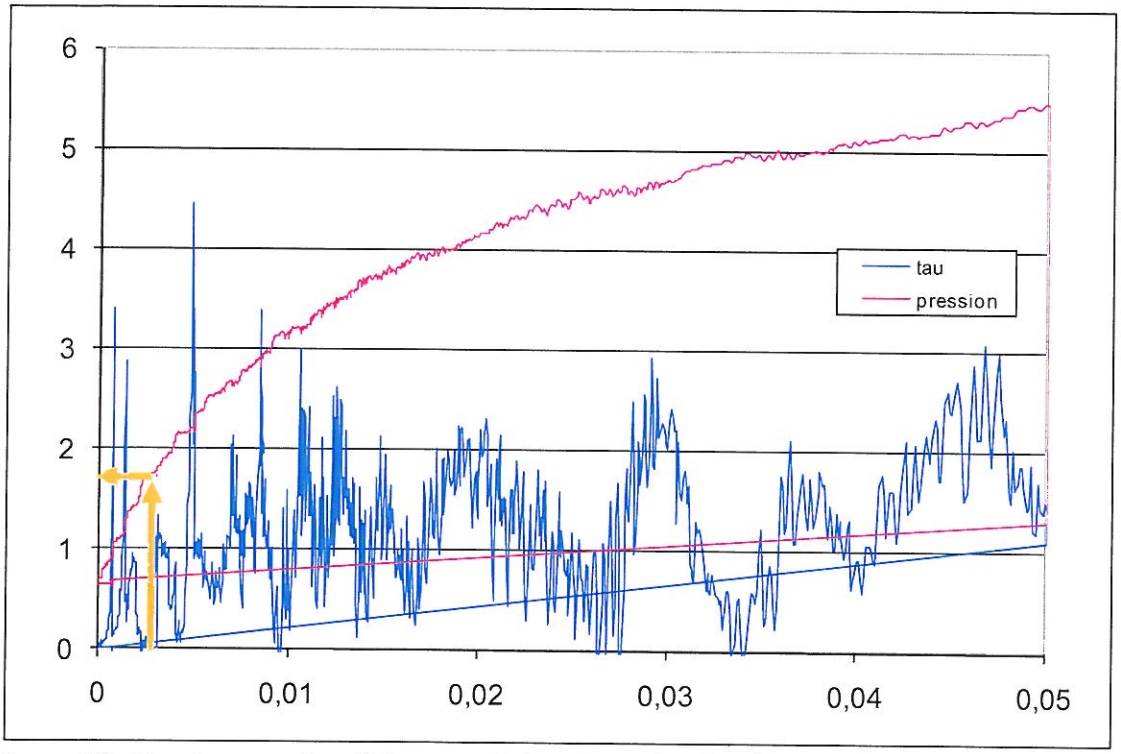
Figure 12. Essais monotones réalisés et essais Ménard aux mêmes profondeurs

2.2.1 *Essai monotone à 5 m*

Avant ce premier essai, une tentative de relaxation a été entreprise. Au démarrage de la relaxation, on observe une variation de volume, la sonde renvoie rapidement 8 ml et la pression monte à 0,3 bars. Du fait du principe du PREVO pilotant en pression, on est obligé de procéder de cette manière.
Cette phase devant être pilotée en volume la mesure se révèle impossible. Il faudrait placer un capteur de pression en parallèle sur le circuit d'eau. Ce montage sera utilisé plus tard dans la campagne.

a)





b)

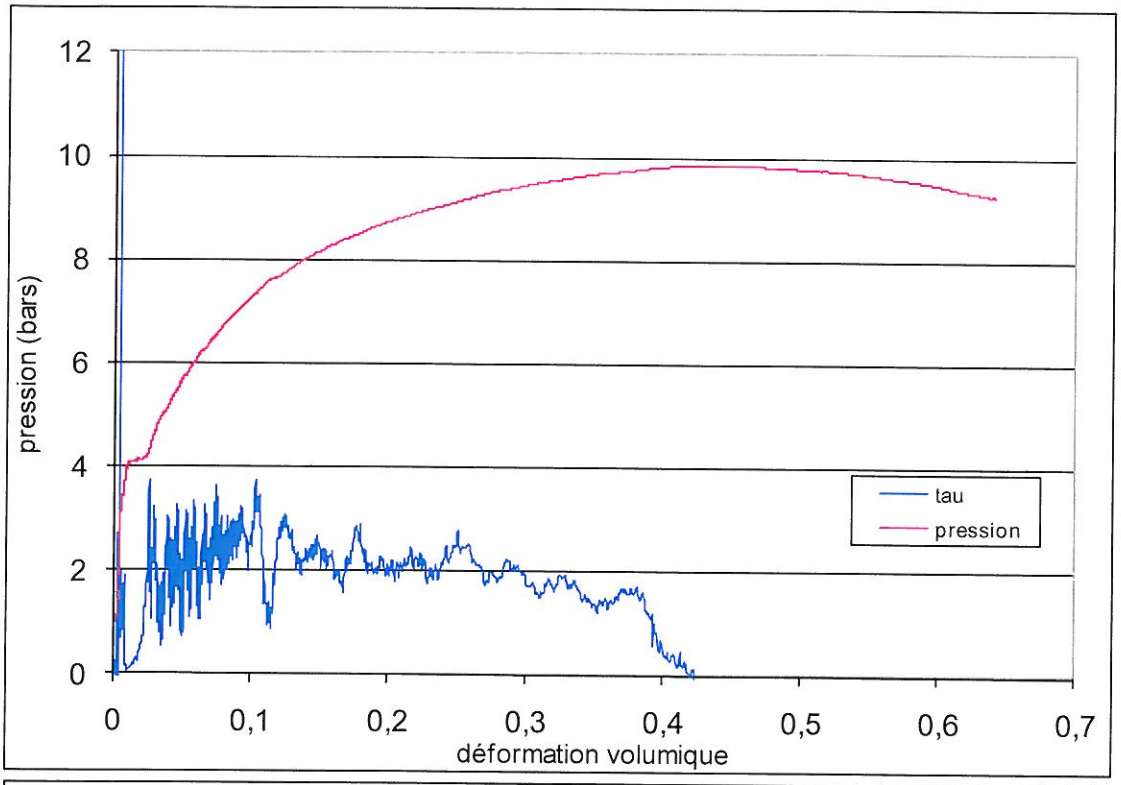
Figure 13. Courbe pressiométrique corrigée et courbe de cisaillement dérivée (a : courbe totale, b : zoom sur partie initiale)

Le premier essai monotone est réussi avec un arrêt à 900 cm^3 (la capacité maximale du CPV est de 970 cm^3) soit environ 50 % de variation volumique.
On note sur la courbe que pour le premier essai p_o est estimée à 1,53 bars et on obtient la pression à 0,3% (environ à 7cm^3) égale à 1,82 bars corrigé.

2.2.2 *Essai monotone à 7 m*

Pour cet essai, la qualité de la courbe est moins bonne, le début présentant un artefact.
On aurait à 0,3% une pression de 2 bars en pression corrigée.

a)



b)

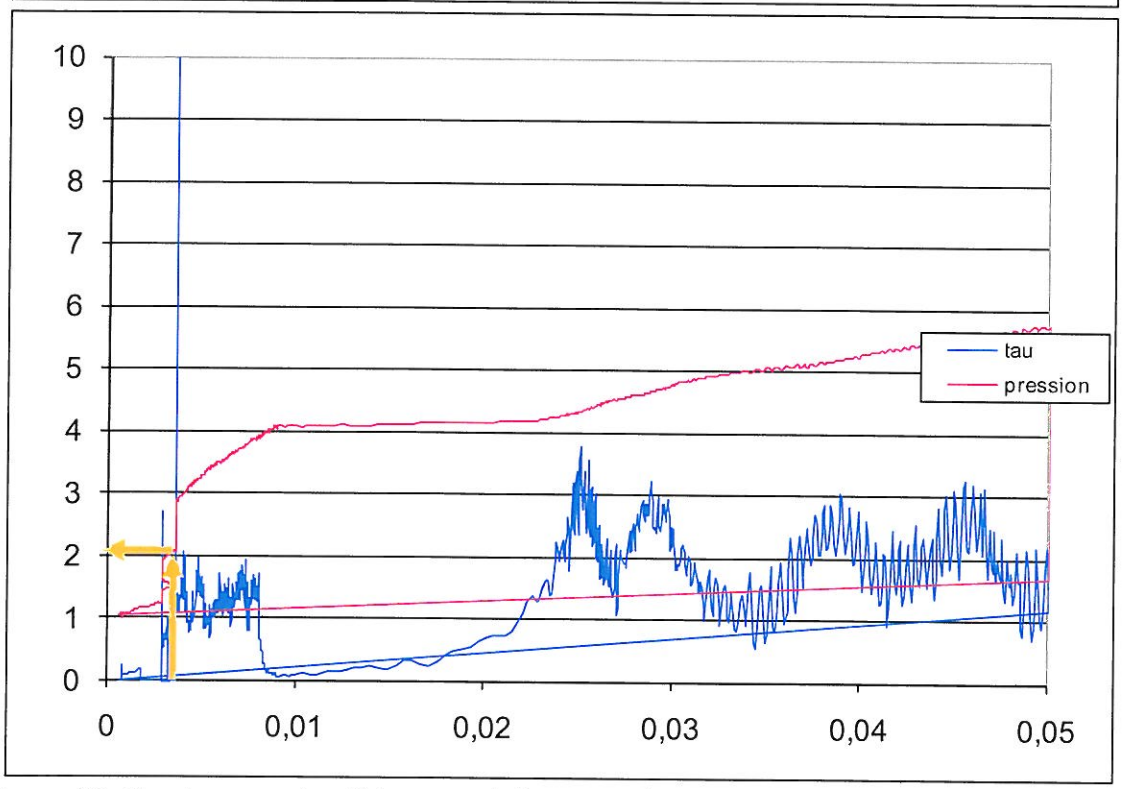
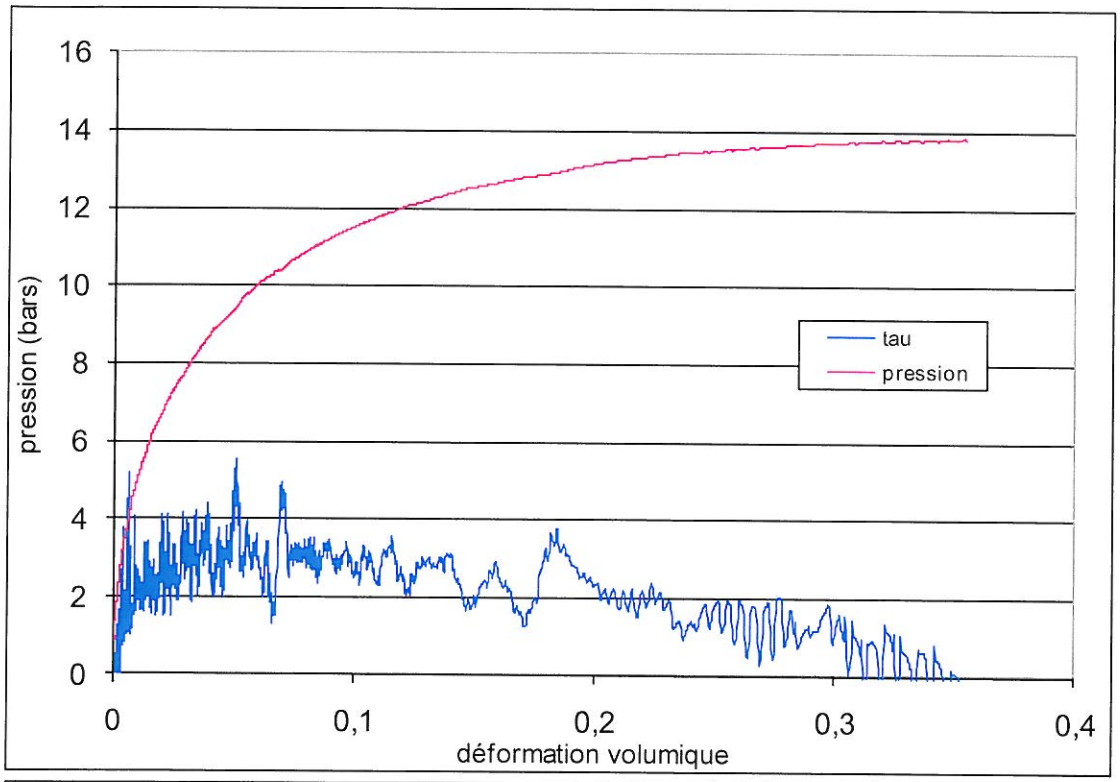


Figure 14. Courbe pressiométrique corrigée et courbe de cisaillement dérivée (a : courbe totale, b : zoom sur partie initiale)

2.2.3 *Essai monotone à 9 m*

L'essai à 9 m est très propre avec une stabilisation de la contrainte de cisaillement vers 0,01 de $\Delta V/Vo$ soit 1% de déformation volumique.
On aurait à 0,3% une pression non corrigée de 2,48 bars corrigé.

a)



b)

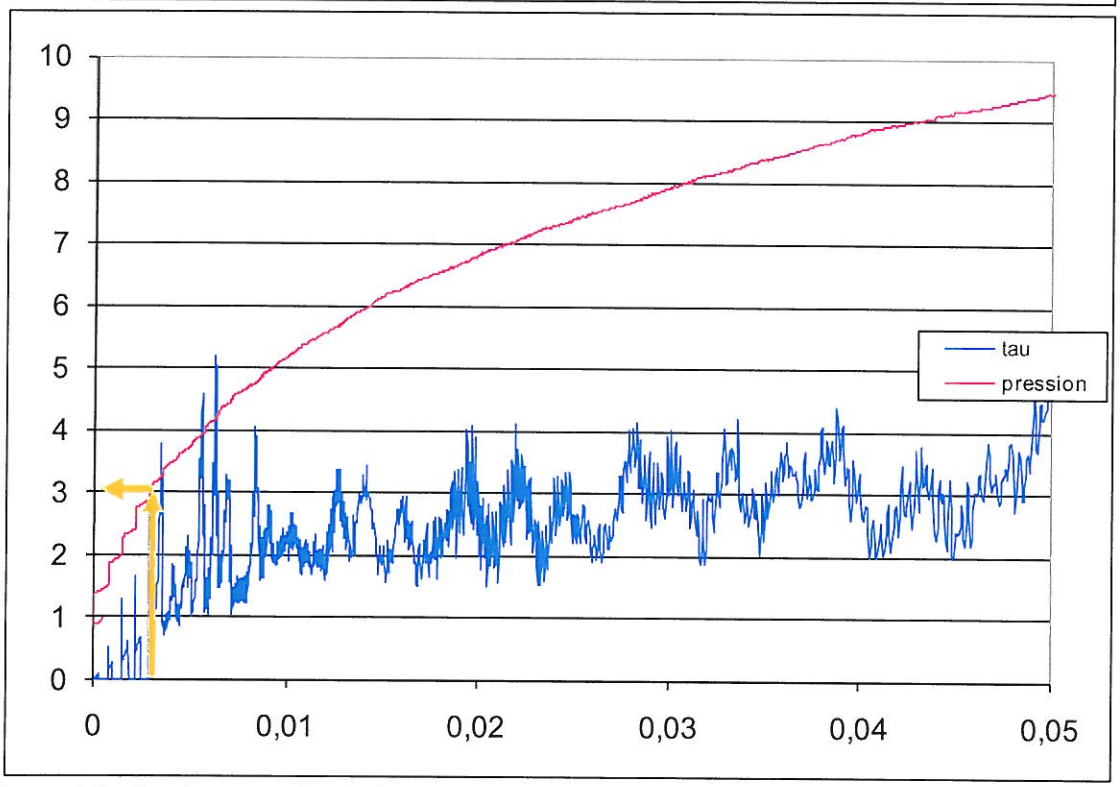
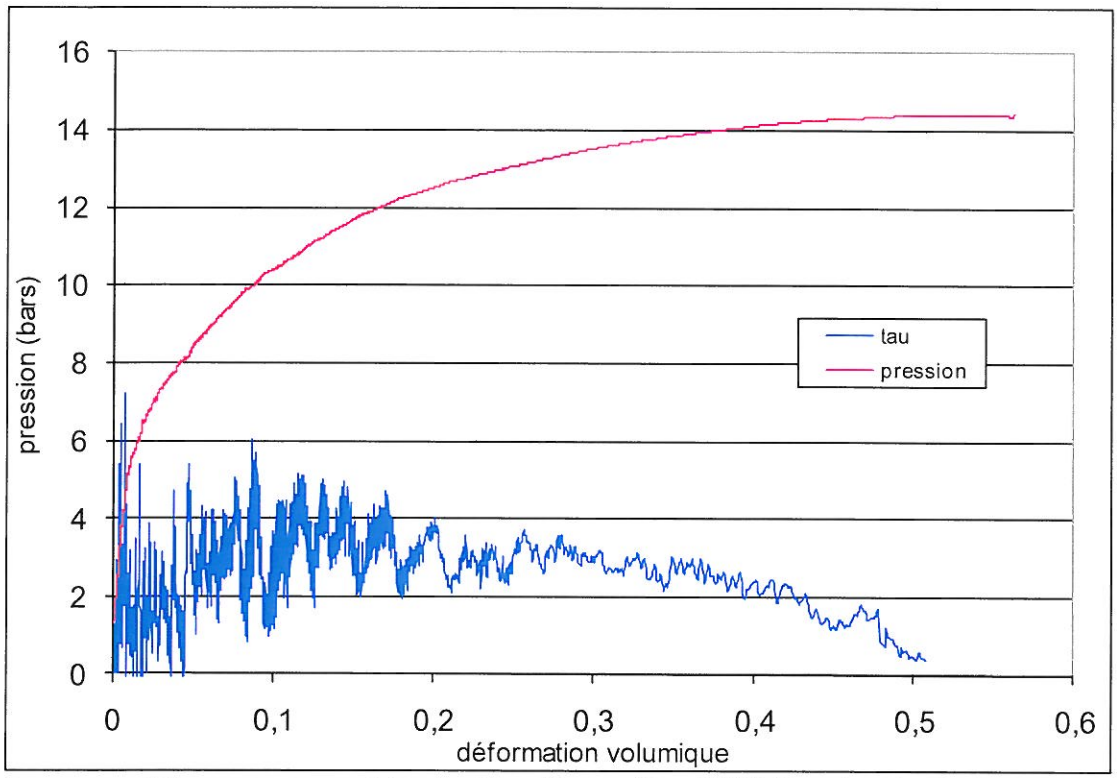


Figure 15. Courbe pressiométrique corrigée et courbe de cisaillement dérivée (a : courbe totale, b : zoom sur partie initiale)

2.2.4 *Essai monotone à 11 m*

L'essai à 11 m est plus fluctuant que l'essai à 9 m. On observe une stabilisation de la contrainte de cisaillement vers 0,01 de $\Delta V/Vo$ soit 1% de déformation volumique.
On aurait à 0,33% une pression non corrigée de 2,80 bars corrigé.

a)



b)

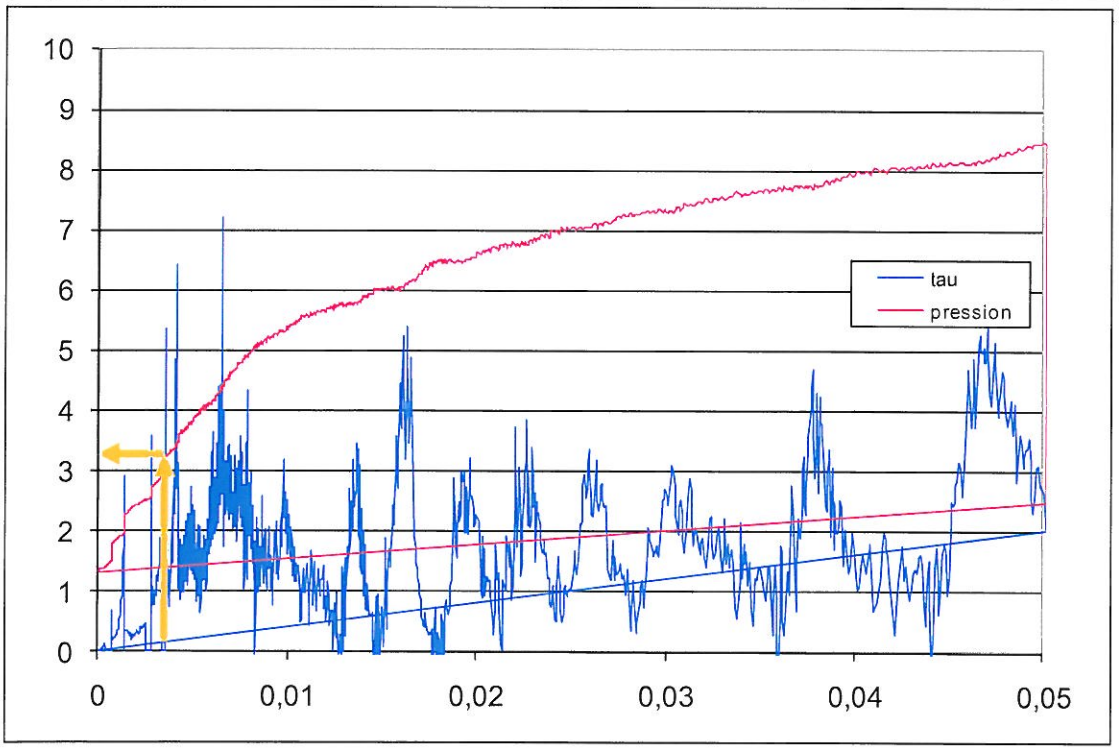


Figure 16. Courbe pressiométrique corrigée et courbe de cisaillement dérivée (a : courbe totale, b : zoom sur partie initiale)

2.3 *Résultats des essais PAF cycliques*

Intercalés avec les essais monotones, des essais cycliques comportant plusieurs phases de différentes amplitudes ont été réalisés. Le programme de la Figure 5 a été réalisé en 5 phases du fait des spécificités du système de pilotage :

phase 1 montée en pression monotone jusqu'à $p_{0,5}$ puis phase de cyclage,
phase 2 cyclage avec une demi-amplitude de 2/3 de $p_{0,5} - p_0$;
phase 3 cyclage avec une demi-amplitude de 3/3 de $p_{0,5} - p_0$;
phase 4 cyclage avec une demi-amplitude de 2/3 de $p_{0,5} - p_0$;
phase 5 montée en pression monotone jusqu'à atteinte le volume maximal du CPV puis phase de décharge.

Les trois premiers essais ont été réalisés avec la même amplitude basée sur les informations disponibles avant la campagne et détaillées au paragraphe 1.
Selon les travaux de Jean-Claude Dupla, le niveau de sollicitation doit être fonction de $\Delta p_{cycl}=0,8.p'_0=0,8.(p_0-u_0)=0,58$ bars (voir tableau 1 du §1).
Ces informations ont été complétées sur site par les pressions mesurées à 0,5% de déformation volumique de l'essai d'expansion monotone réalisé au niveau précédent (voir §2.2).
$p_{0,5} - p_0 = 1,82 - 1,33 = 0,5$ bars
Nous avons choisi 0,6 bars d'amplitude. Valeur qui a été conservée pour les trois premiers essais. Le dernier a été réalisé avec une amplitude basée sur l'essai monotone réalisé à 11 m.

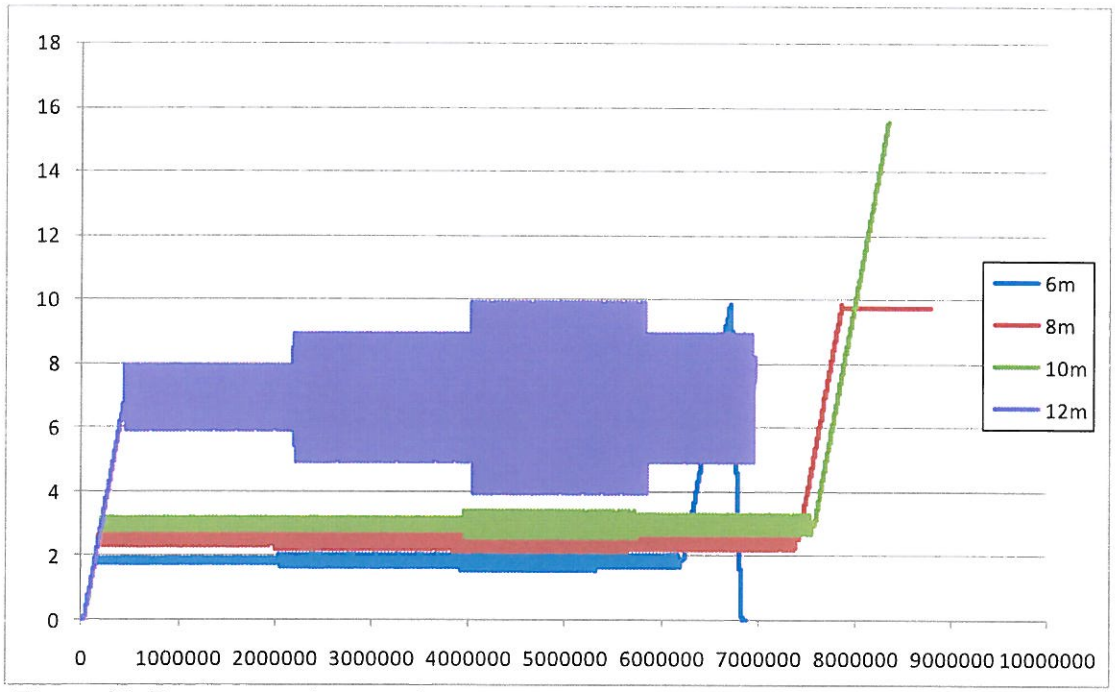


Figure 17. Programme des essais

La Figure 18 permet d'observer que la demi-amplitude de 0,3 bars utilisée était pertinente pour le premier essai à 6 m, mais a généré peu d'accumulation de volume pour les deux autres profondeurs (8 et 10 m).
Les phases de cyclage de l'essai à 12 m dont la demi-amplitude a été augmentée à 3 bars montrent une accumulation de déformation volumique pour les trois premières phases et la quasi-stabilisation pour la quatrième phase.

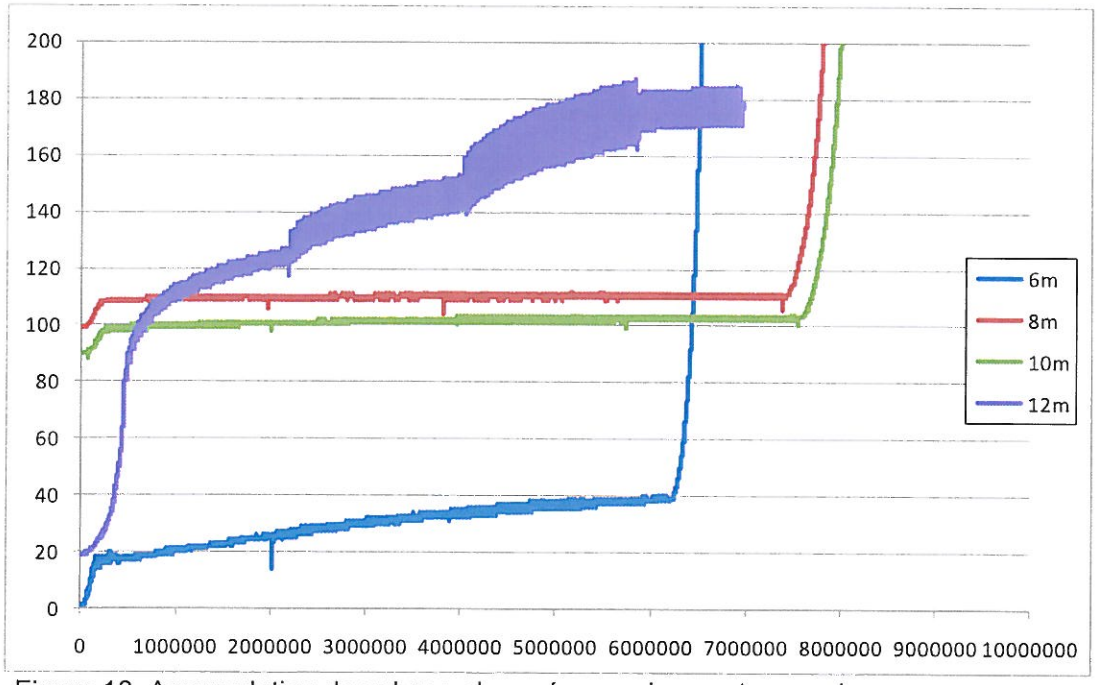


Figure 18. Accumulation de volume observée pour les quatre essais

La représentation de la Figure 19 de l'évolution de la pression en fonction du volume montre que les essais s'organisent logiquement au niveau de la pression limite atteinte en fonction de la profondeur. L'essai à 12 m a été arrêté plus tôt pour permettre d'observer le plateau. Une sorte de palier de fluage a été maintenu pour avoir un déchargement influencé au minimum par la phase d'expansion comme c'est le cas pour l'essai à 6 m.

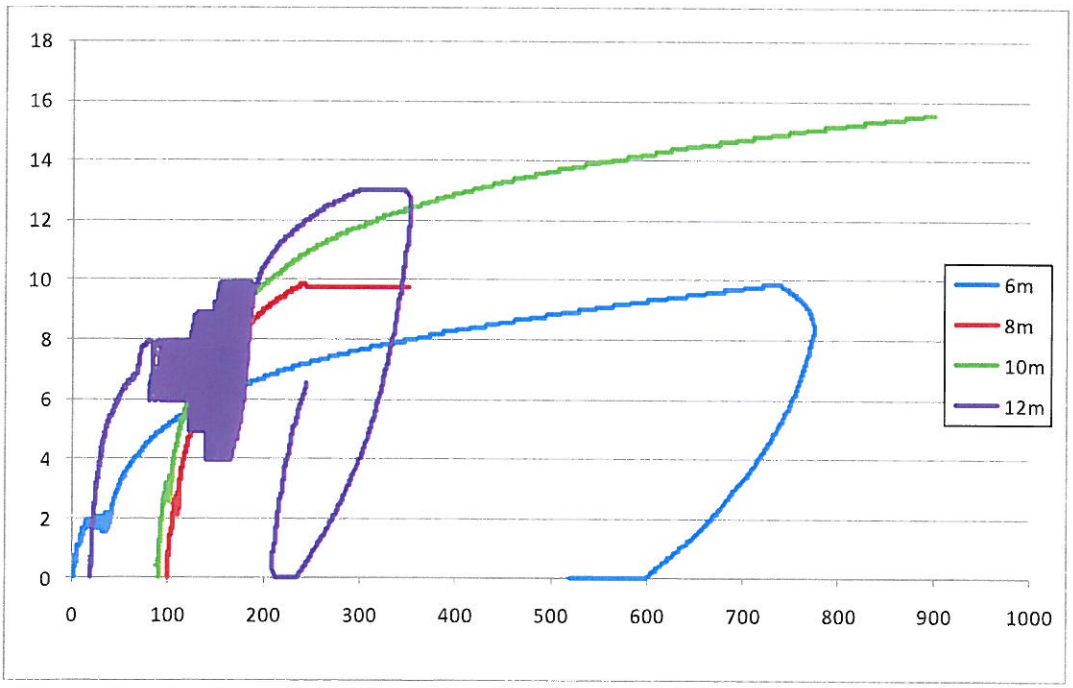


Figure 19. Représentation pression en fonction du volume

Les paragraphes ci-dessous détaillent les essais.

2.3.1 Essai cyclique à 6m

L'amplitude $p_{0,5} - p_0$ a été choisie selon les résultats des anciens essais à 0,3 bar soit des demi amplitudes de 0,1 ; 0,2 et 0,3 bar.

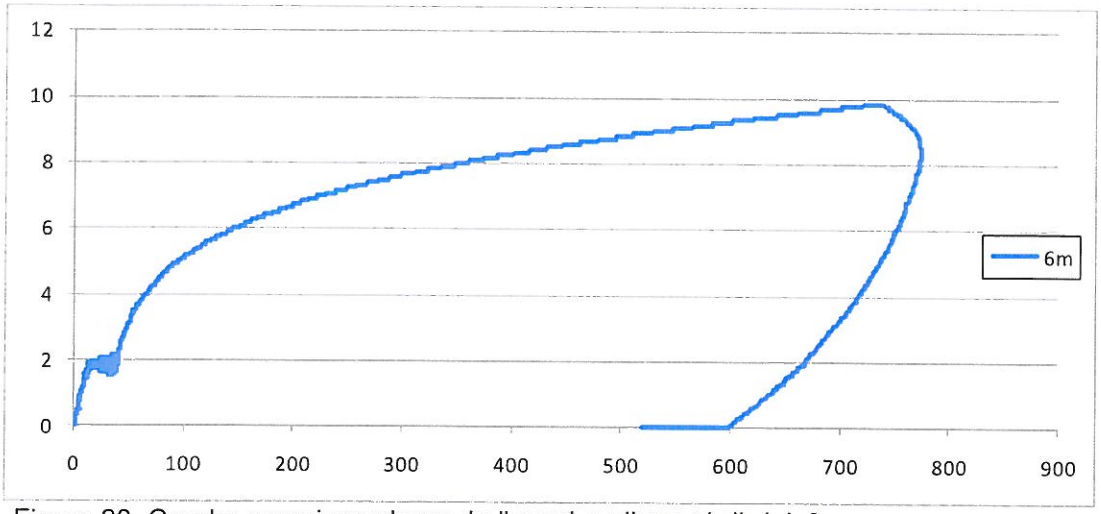


Figure 20. Courbe pression volume de l'essai cyclique réalisé à 6 m

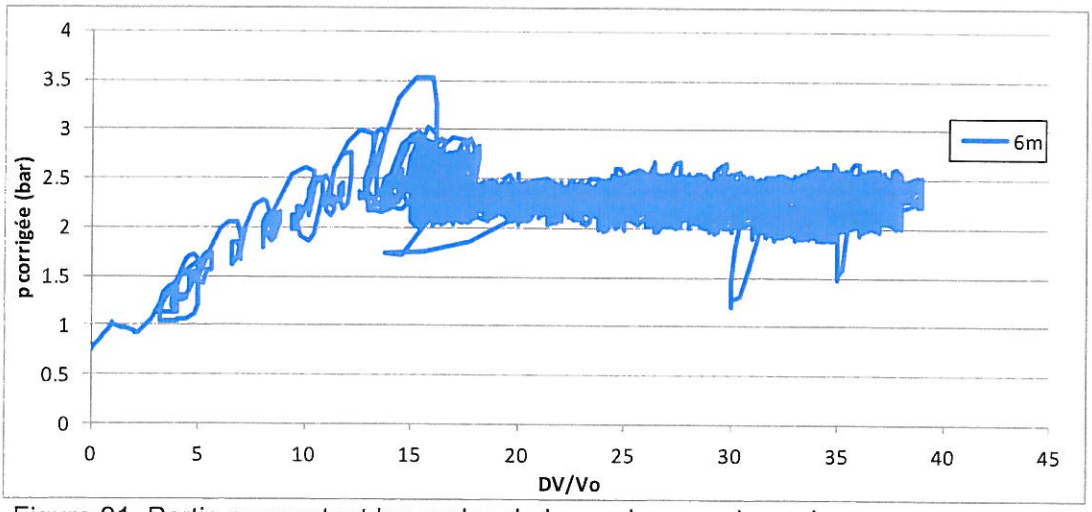


Figure 21. Partie comportant les cycles de la courbe pression volume

Ces asservissements sont à la limite du matériel et des électrovannes. La chambre tampon du PREVO étant un peu petite et la pression d'entrée de la bouteille un peu élevée (pression nécessaire à l'essai monotone au niveau supérieur), le début de l'essai est un peu perturbé.
La diminution de cette pression rétablit un suivi plus correct de la consigne de pression. Pour les phases suivantes, l'amplitude croissant, la précision s'améliore.

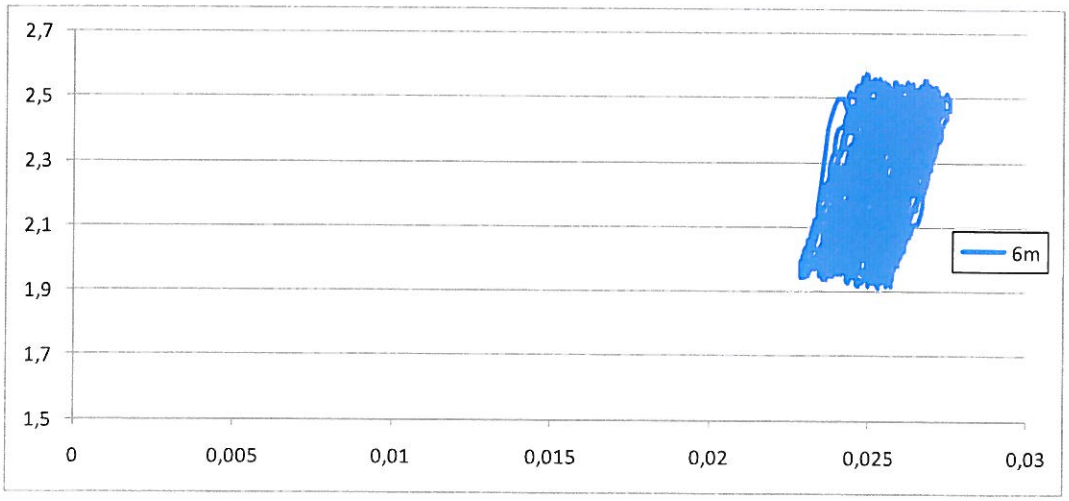


Figure 22. Phase 3 (3/3 de $p_{0,5} - p_0$)

La comparaison des Figure 22 et Figure 23 met en évidence l'évolution de l'accumulation de volume même à ces petites amplitudes de pression.

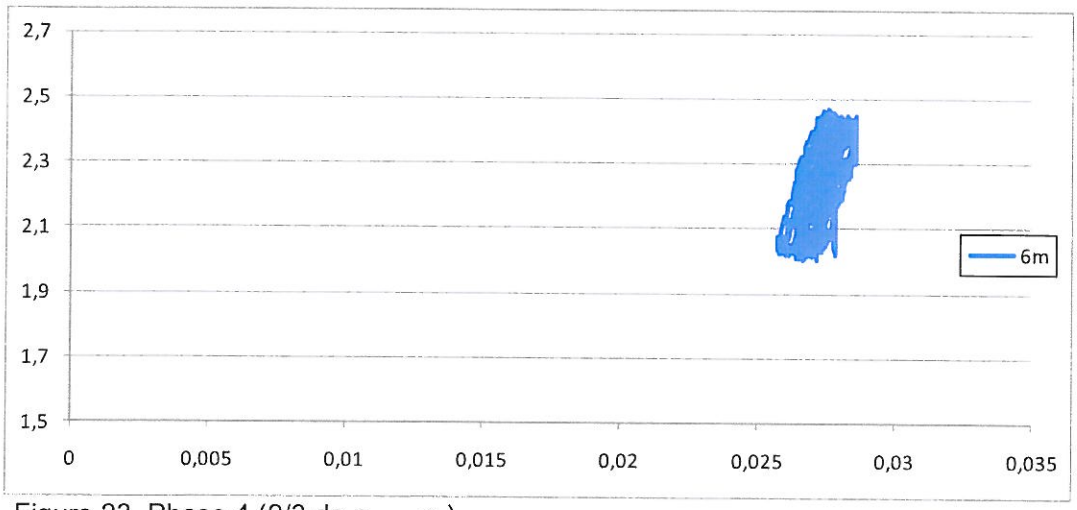


Figure 23. Phase 4 (2/3 de $p_{0,5} - p_0$)

2.3.2 *Essai cyclique à 8 m*

L'essai à 8 m est réalisé avec les mêmes amplitudes légèrement augmentée (0,2 ; 0,3 ; 0,4 bars) pour limiter les problèmes d'asservissement.

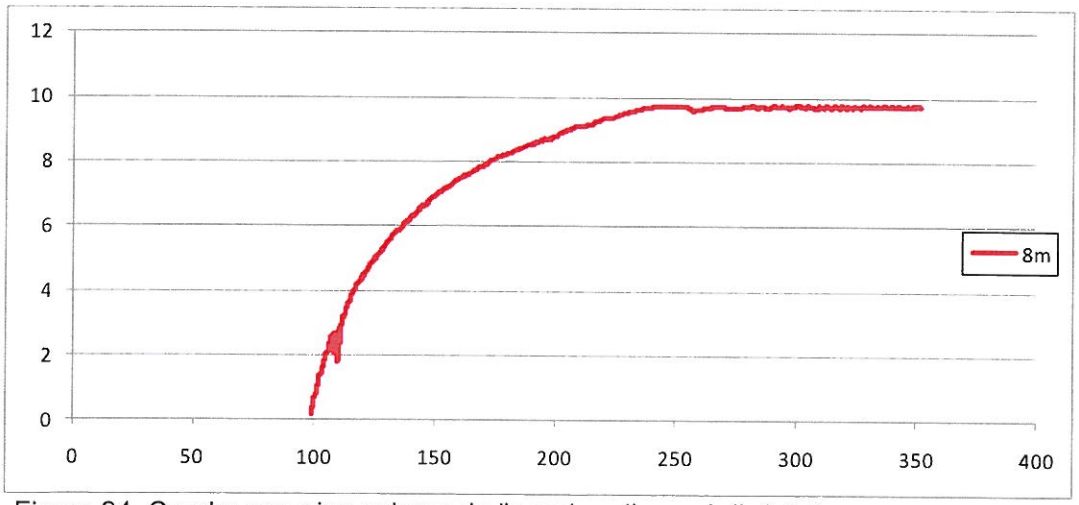


Figure 24. Courbe pression volume de l'essai cyclique réalisé à 8 m

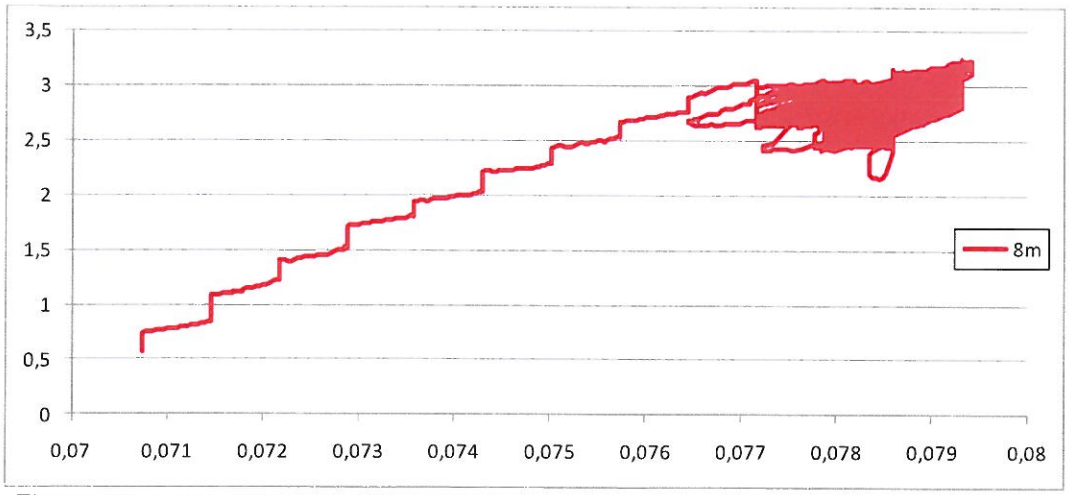


Figure 25. Partie comportant les cycles de la courbe pression volume

2.3.3 *Essai cyclique à 10 m*

Idem

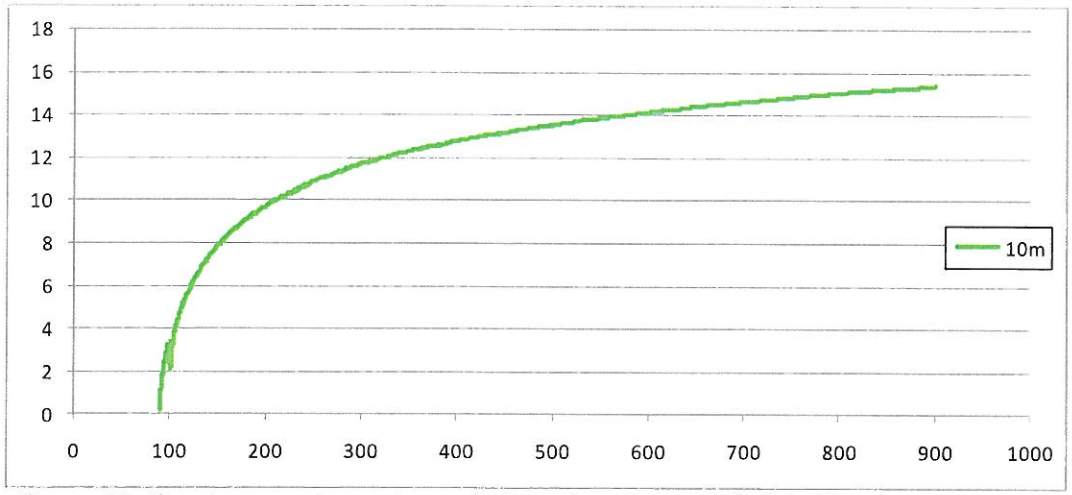


Figure 26. Courbe pression volume de l'essai cyclique réalisé à 10 m

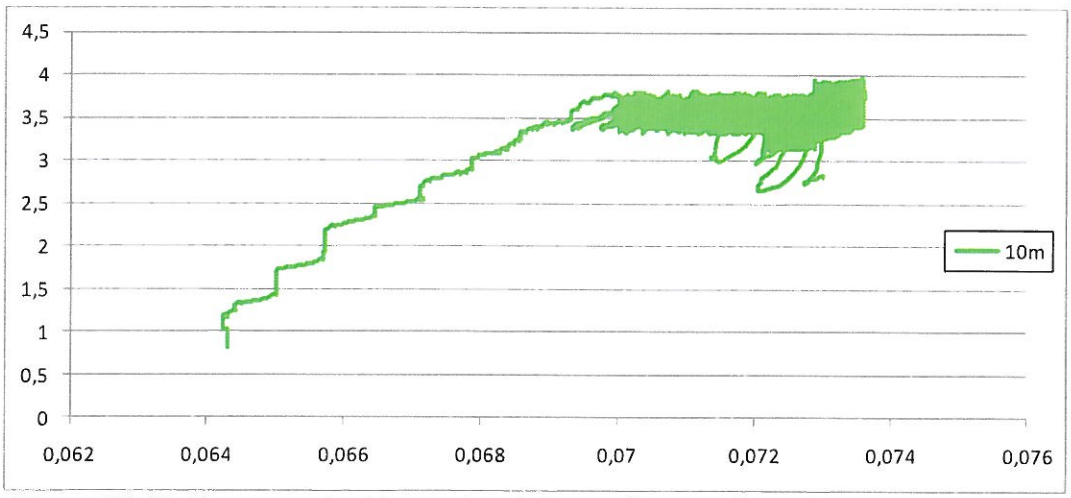


Figure 27. Partie comportant les cycles de la courbe pression volume

2.3.4 Essai cyclique à 12 m

Modification de l'amplitude qui semble être plus proche de 3 bars pour l'essai monotone. Les cycles auront donc pour demi-amplitude 1, 2 et 3 bars.

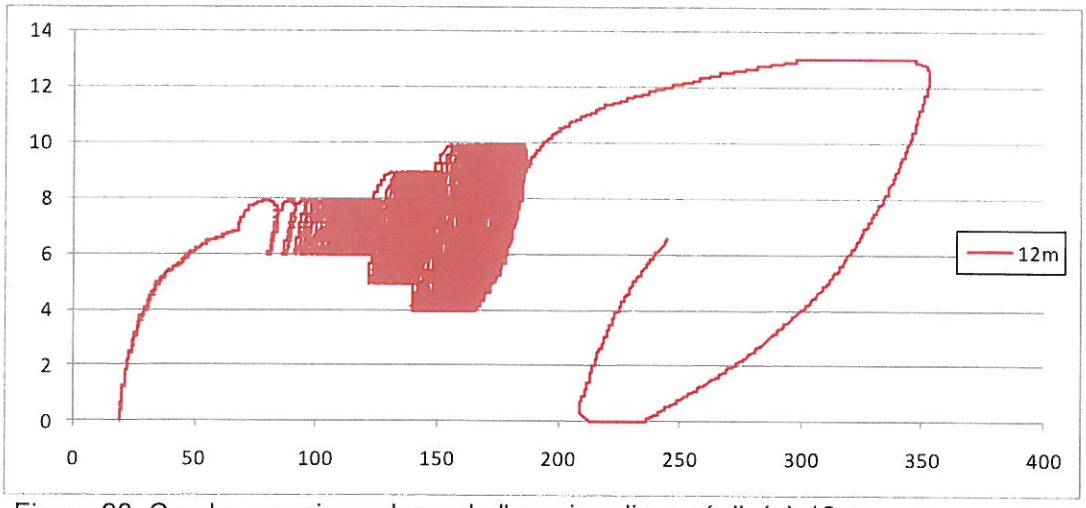


Figure 28. Courbe pression volume de l'essai cyclique réalisé à 12 m

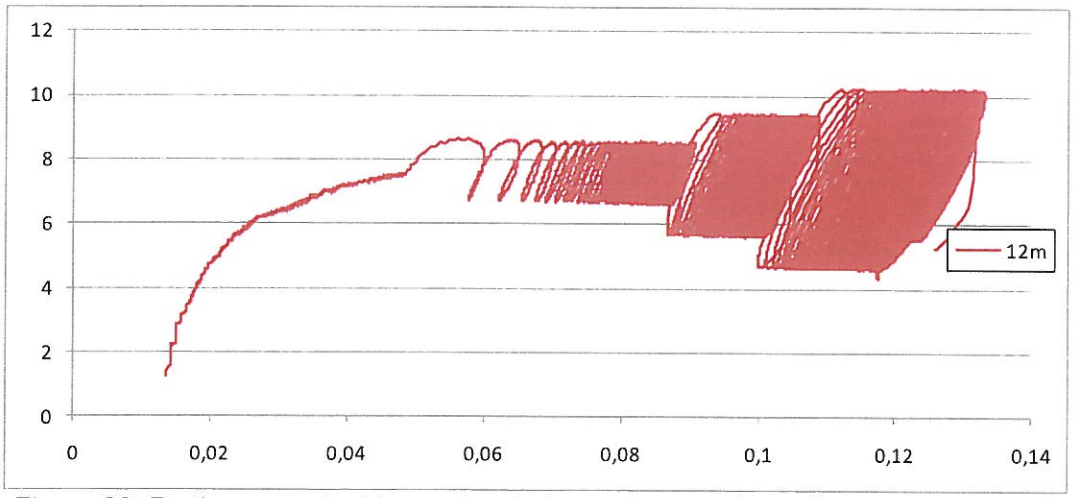


Figure 29. Partie comportant les cycles de la courbe pression volume

Les quatre figures qui suivent permettent de voir l'évolution des cycles lors des différentes phases.

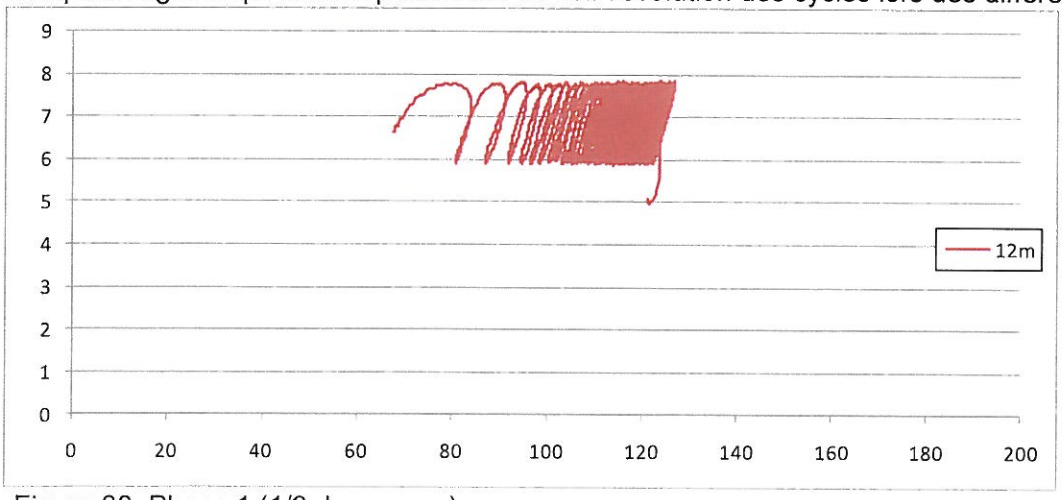


Figure 30. Phase 1 (1/3 de $p_{0.5} - p_0$)

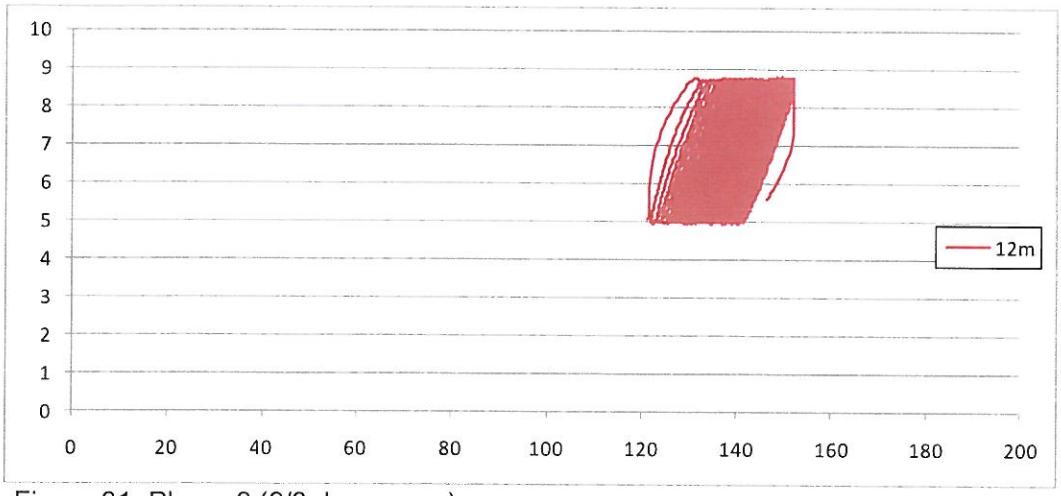


Figure 31. Phase 2 (2/3 de $p_{0,5} - p_0$)

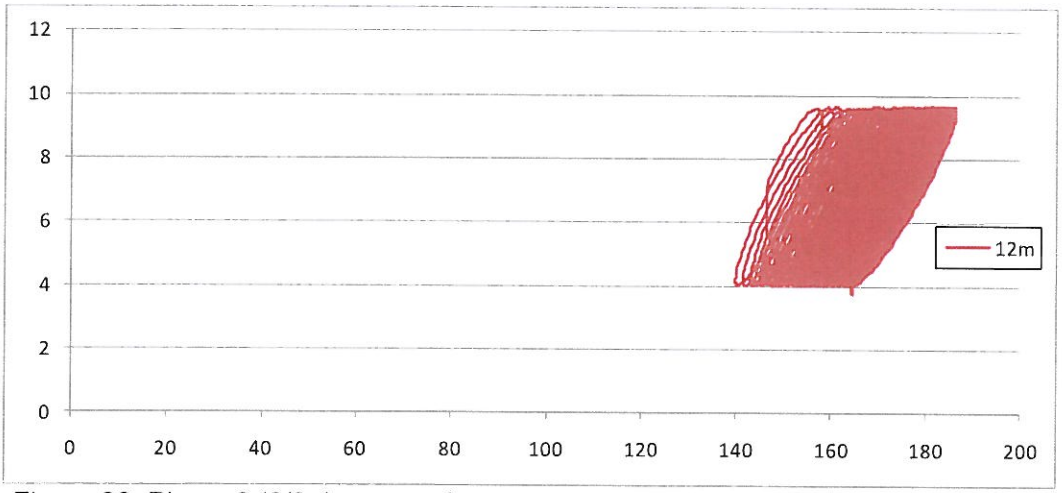


Figure 32. Phase 3 (3/3 de $p_{0,5} - p_0$)

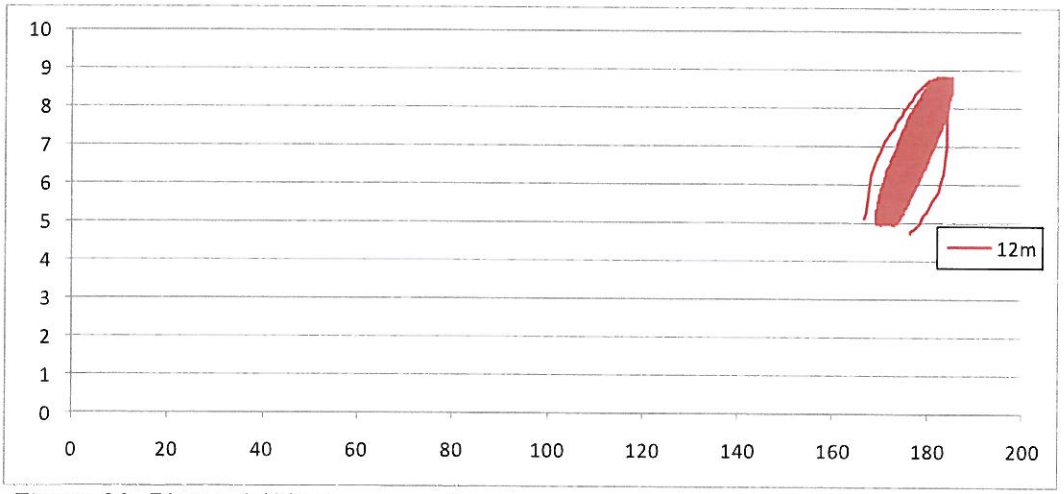


Figure 33. Phase 4 (2/3 de $p_{0,5} - p_0$)

La Figure 34 permet de voir la qualité des cycles réalisés avec cette amplitude.

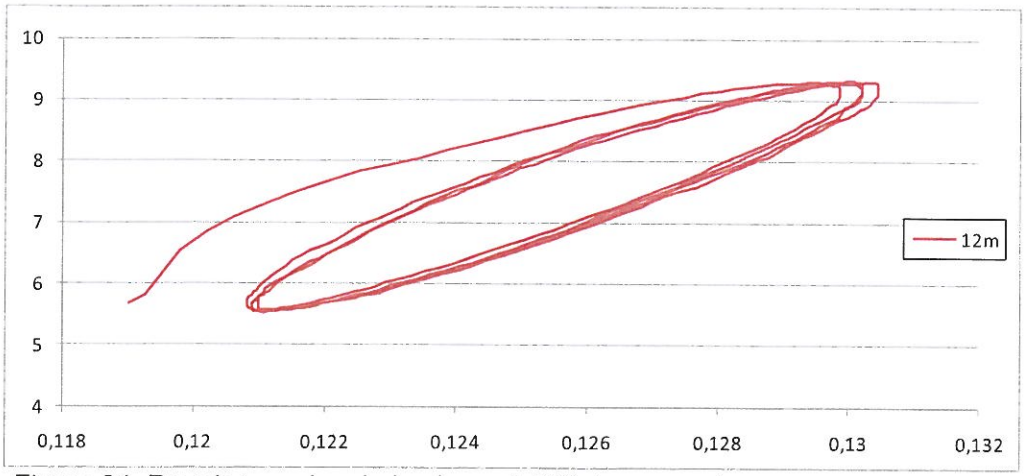


Figure 34. Premiers cycles de la phase 4 (2/3 de $p_{0,5} - p_0$)

2.4 Bilan intermédiaire

2.4.1 Bilan

Les demi amplitudes de 0,3 bar se sont révélées peu précises car d'une part la pression de la bouteille était réglée au niveau du manodétendeur à une pression trop forte et de ce fait l'électrovanne de la chambre tampon avaient du mal à réguler et d'autre part car cette valeur est faible et de l'ordre de grandeur de la précision de l'asservissement.

Cette première série d'essais a permis de mieux cerner le potentiel du matériel et d'obtenir des courbes d'évolution du module cyclique en fonction de la profondeur et de l'amplitude des cycles.

2.4.2 Préparation de la deuxième semaine d'essais

Afin de faire des essais cycliques avec les pressions $p_{0,5}$ réellement mesurées, on a représenté sur la Figure 35 l'évolution avec la profondeur des p_0 et $p_{0,5}$ mesurés. La valeur de $p_{0,5}$ obtenue avec l'essai cyclique est plus faible du fait de la vitesse de chargement qui est inférieure. On observe que la différence ($p_{0,5}$ - p_0) reste globalement égale à 0,7 bars. Cet écart est très faible. Il sera nécessaire d'adapter cette valeur à la profondeur.

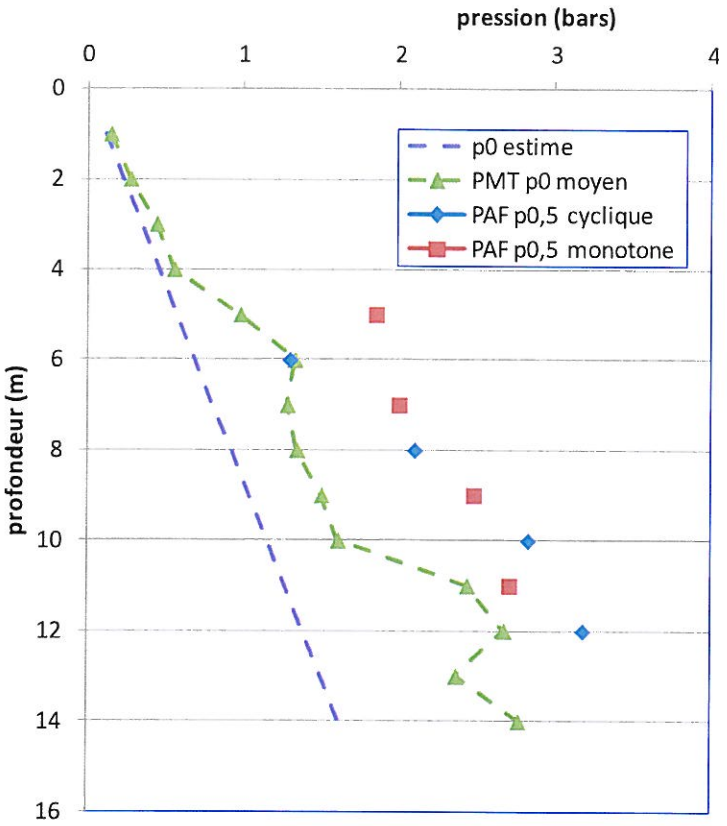


Figure 35. Évolution de p_0 et de $p_{0,5}$ pour les huit essais

Il était prévu si le planning le permettait un essai avec interversion des séquences (ordre 2 ; 3 ; 1 ; 4 par exemple) et un accélérogramme naturel.

3 DEUXIÈME SEMAINE D'ESSAIS

3.1 Minutes

3.1.1 Lundi 23 janvier 2012

Positionnement du camion sur le coté du plot expérimental. Tests de la sonde pressio autoforeur qui a été reconditionnée.
Préforage en diamètre 100 jusqu'à 4,5 m.

3.1.2 Mardi 24 janvier 2012

Démarrage de l'essai à 5 m après autoforage.
Le dispositif pour mesurer la relaxation (développé suite à la première campagne voir §2.2.1) ne donne pas de valeurs cohérentes laissant supposer un problème.
Lors de l'expansion fuite manifeste.
On passe à une solution de secours consistant à faire de pressiomètre Ménard avec préforage à la THC d'un mètre.
Réalisation de l'essai à 5 m.

3.1.3 Mercredi 25 janvier 2012

Réalisation de 2 essais cyclique 7 et 9 m.

3.1.4 Jeudi 26 janvier 2012

Réalisation de l'essai à 11 m.

Test de la sonde PAF réparée en urgence, autre fuite.
Mise en place du manchon cyclique. Lors d'une manipulation le câble du capteur est coupé. La réparation sur site s'avère impossible du fait du vent empêchant les soudures.
Test d'une méthode alternative par cyclage en déplacement contrôlé.

3.2 Résultats des essais PAF cycliques

La Figure 36 met en évidence la rupture de la soudure sous une pression d'environ 1,5 bar. Malheureusement, après soudure, la sonde n'avait été testée à l'air libre que sous une pression de 1 bar.

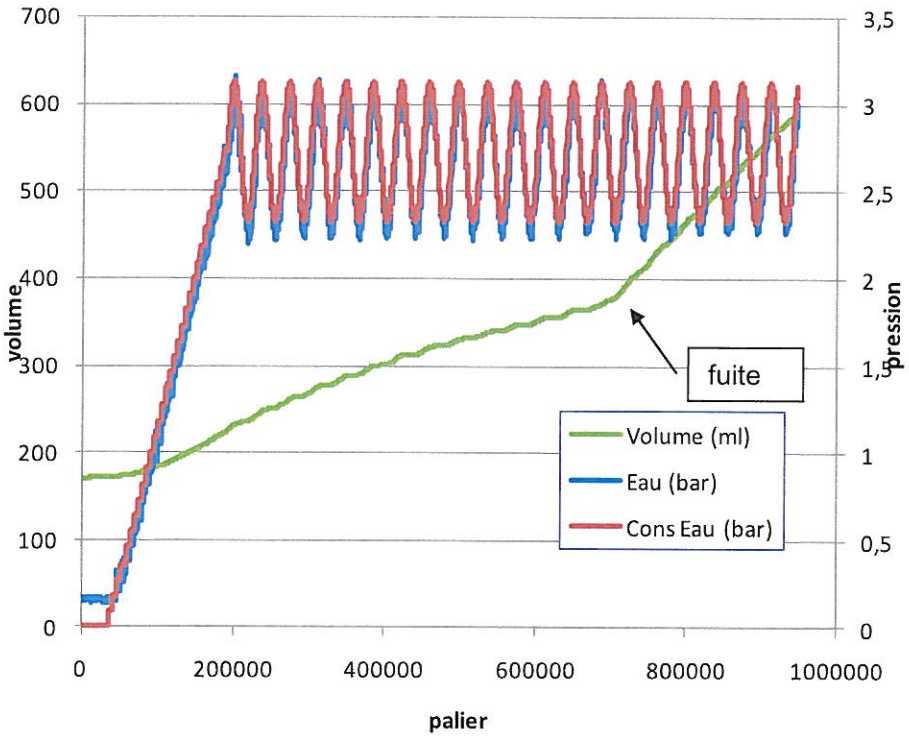


Figure 36. Accumulation de volume observée pour l'essai au PAF

3.3 Résultats des essais PMT cycliques

Les essais cycliques au PMT ont été réalisés à l'identique par rapport aux essais au PAF. Le programme de la Figure 37 a été réalisé en 5 phases du fait des spécificités du système de pilotage :

phase 1 montée en pression monotone jusqu'à $p_{0,5}$ puis phase de cyclage,
phase 2 cyclage avec une demi-amplitude de 2/3 de Δp;
phase 3 cyclage avec une demi-amplitude de Δp;
phase 4 cyclage avec une demi-amplitude de 2/3 de Δp;
phase 5 montée en pression monotone jusqu'à atteinte de p_l moins un bar puis phase de décharge. Ce dernier point est nécessaire pour ne pas atteindre la rupture et pouvoir conserver un pilotage continu jusqu'à la phase de décharge.

Les essais ont été réalisés avec une amplitude égale à $\Delta p = 0,8.p_o$.

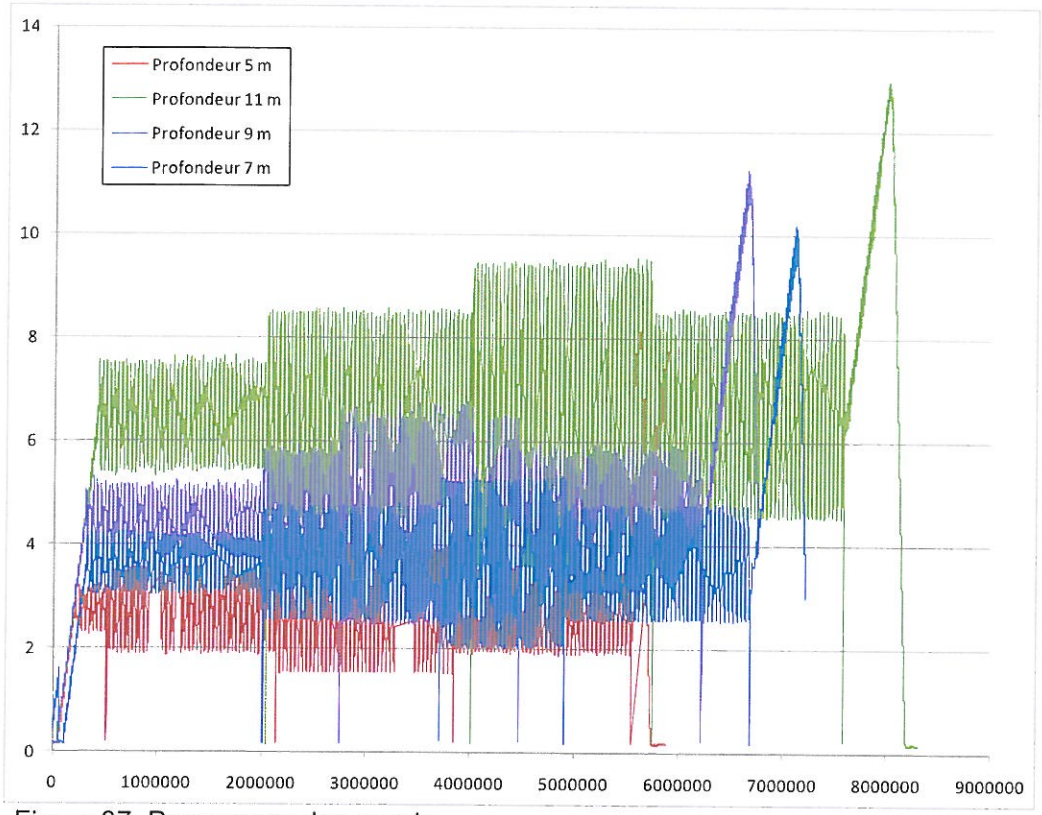


Figure 37. Programme des essais

La Figure 37 permet d'observer que la relation utilisée pour définir l'amplitude était pertinente. Les phases de cyclage montrent une accumulation de déformation volumique pour les trois premières phases et la quasi-stabilisation pour la quatrième phase (Figure 38).

On peut également observer sur la figure que pour toutes les profondeurs les phases n'ont pas un nombre de cycles identique et que des sauts de cycle sont apparus. Durant ces sauts les cycles ont été appliqués mais non enregistrés. Il semble que la modification des fichiers de commande avec l'éditeur de texte ait laissé des caractères de type tabulation ou espace qui ont gêné le bon fonctionnement du logiciel.

L'essai le plus propre est l'essai à 11 m.

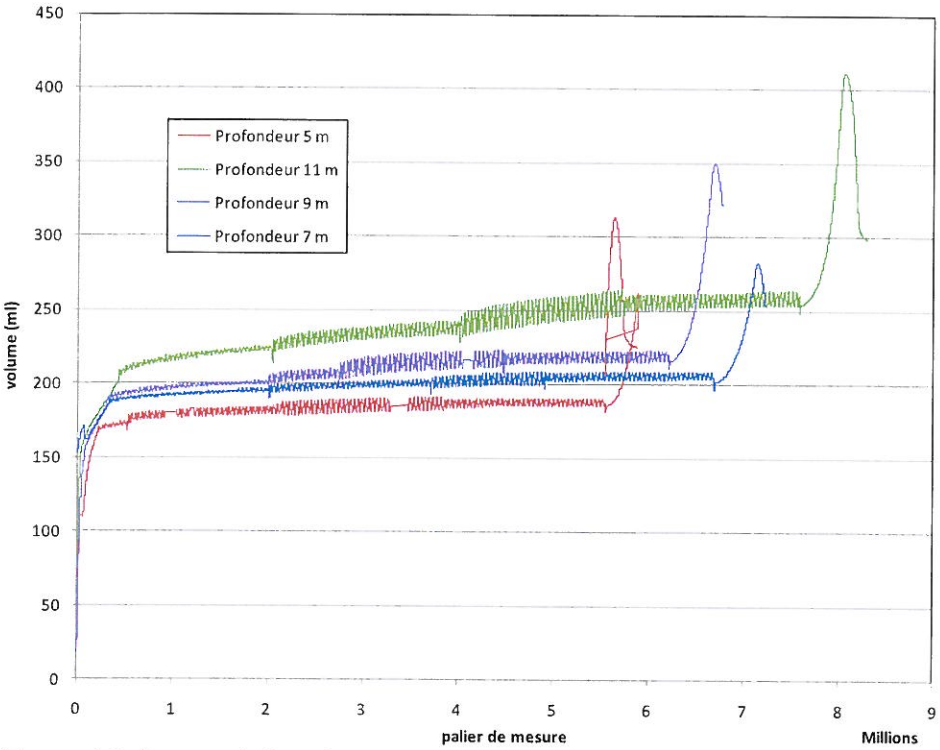


Figure 38. Accumulation de volume observée pour les quatre essais

On pourra représenter uniquement la phase cyclique pour voir si dans une couche homogène comme celle que nous étudions les courbes sont voisines et donc que l'accumulation est similaire.

(pm)

À l'instar du PAF, la représentation de la Figure 39 de l'évolution de la pression en fonction du volume montre que les essais s'organisent logiquement au niveau de la pression limite atteinte en fonction de la profondeur.

À noter que la référence du volume est le volume initial de la burette du PREVO et non le volume calibré de la sonde.

Comme on peut s'y attendre avec des essais préforés, la partie initiale de la courbe comporte un collage de la sonde aux parois du forage. Un cycle réalisé dans la partie initiale de l'essai à 7 m a permis de valider que le collage est effectif à une quinzaine de ml.

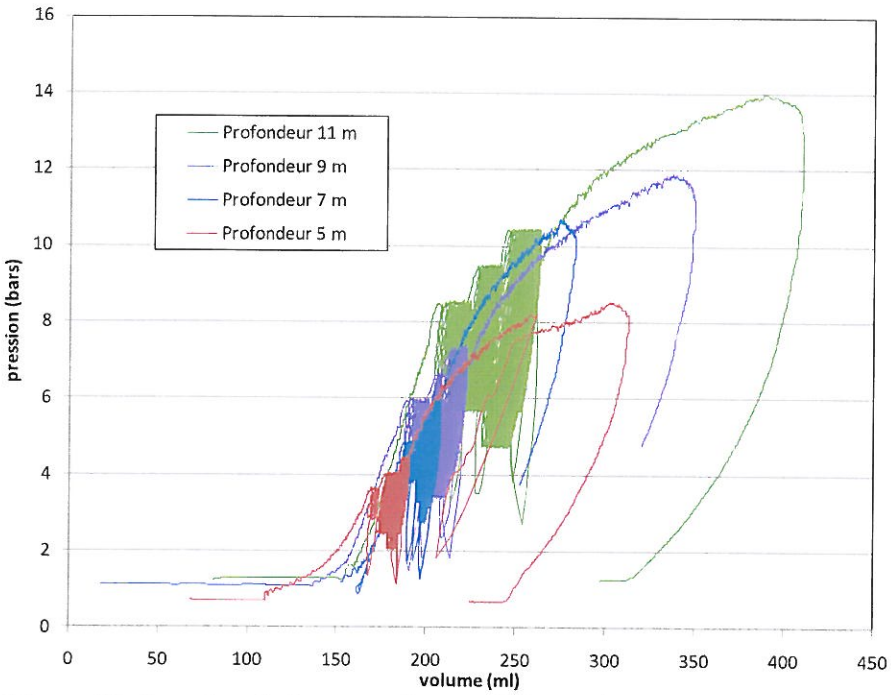


Figure 39. Représentation pression corrigée en fonction du volume

3.3.1 *Essai cyclique à 5 m*

On observe un cycle dans la partie finale qui correspond à un plantage du programme dû à un caractère ASCII impropre dans le fichier de pilotage.

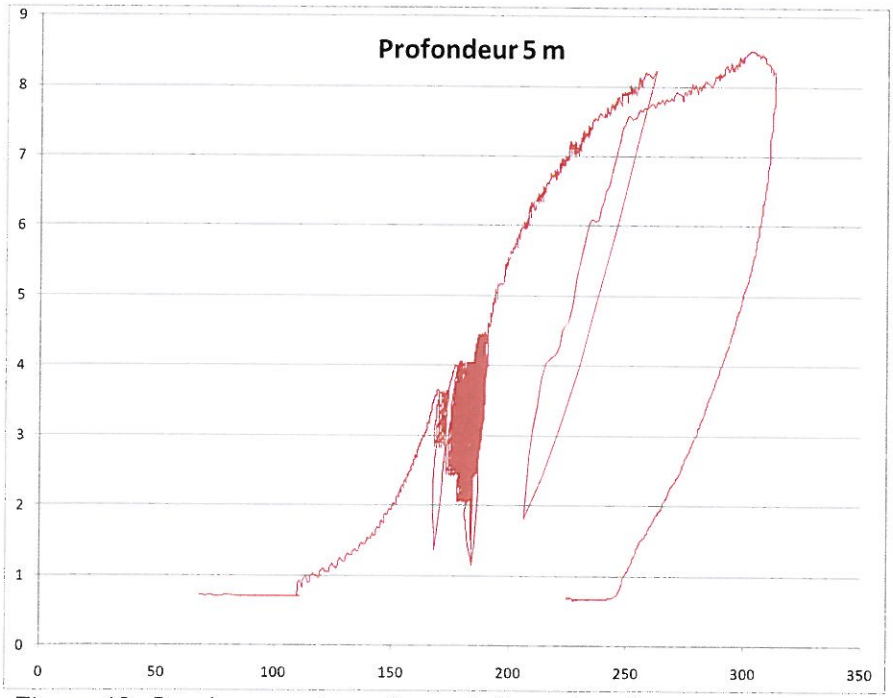


Figure 40. Courbe pression volume de l'essai cyclique

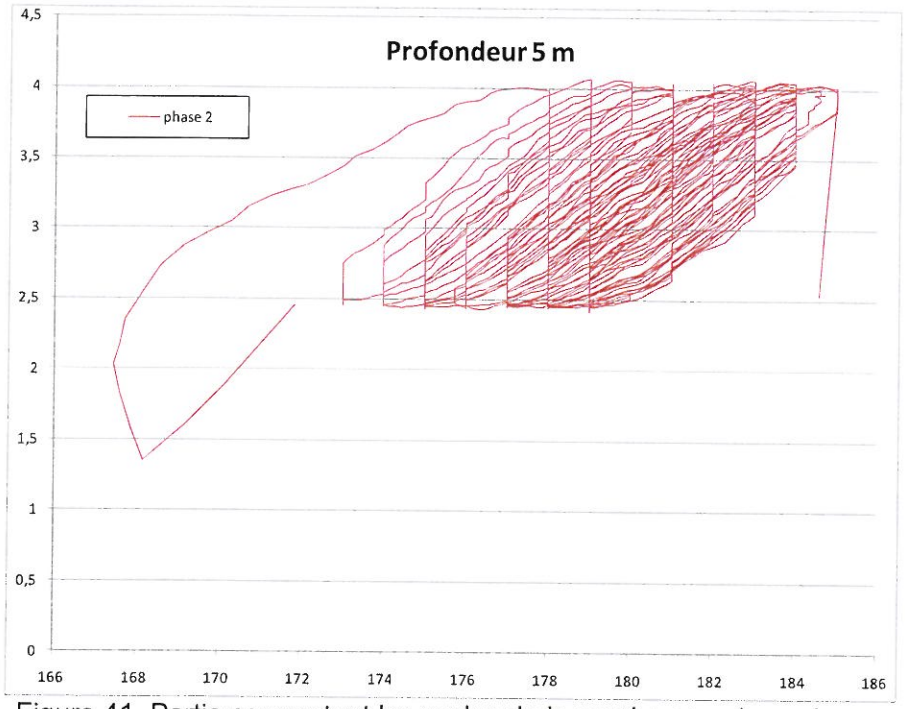


Figure 41. Partie comportant les cycles de la courbe pression volume

3.3.2 *Essai cyclique à 7 m*

Un cycle réalisé dans la partie initiale de l'essai à 7 m a permis de valider que le collage est effectif à une quinzaine de ml. Si l'on estime comme le propose J.-L. Briaud la pression de collage comme étant un indicateur de la contrainte horizontale au repos on obtient environ 1,9 bars.

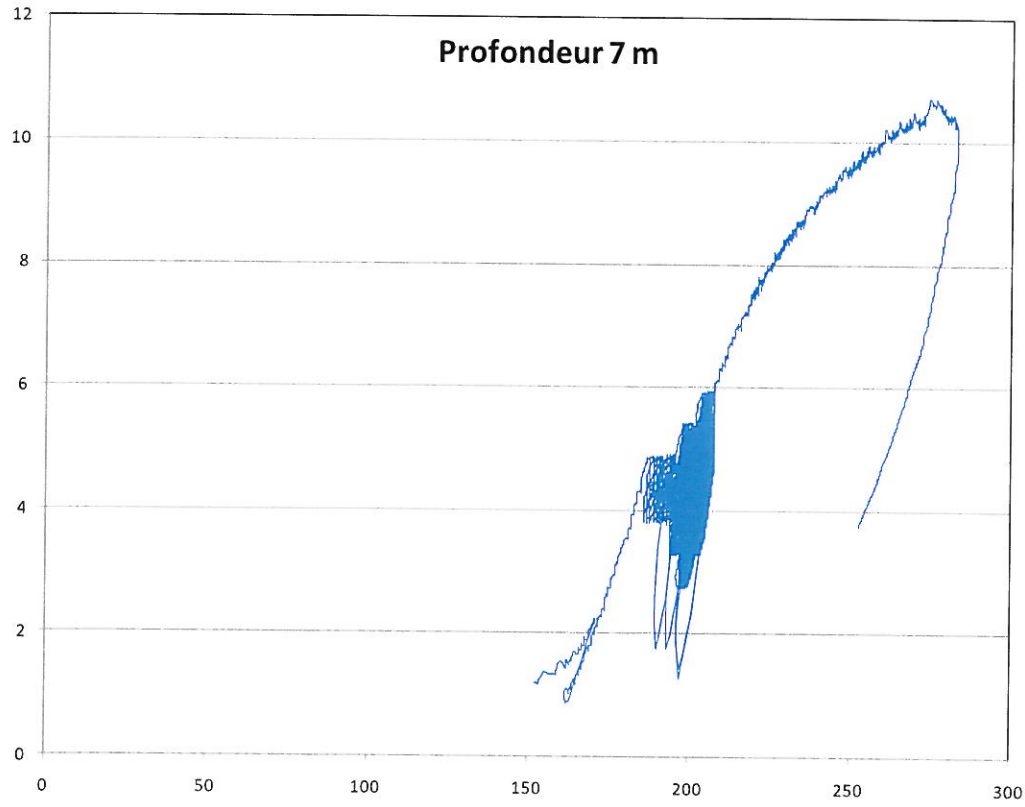


Figure 42. Courbe pression volume de l'essai cyclique

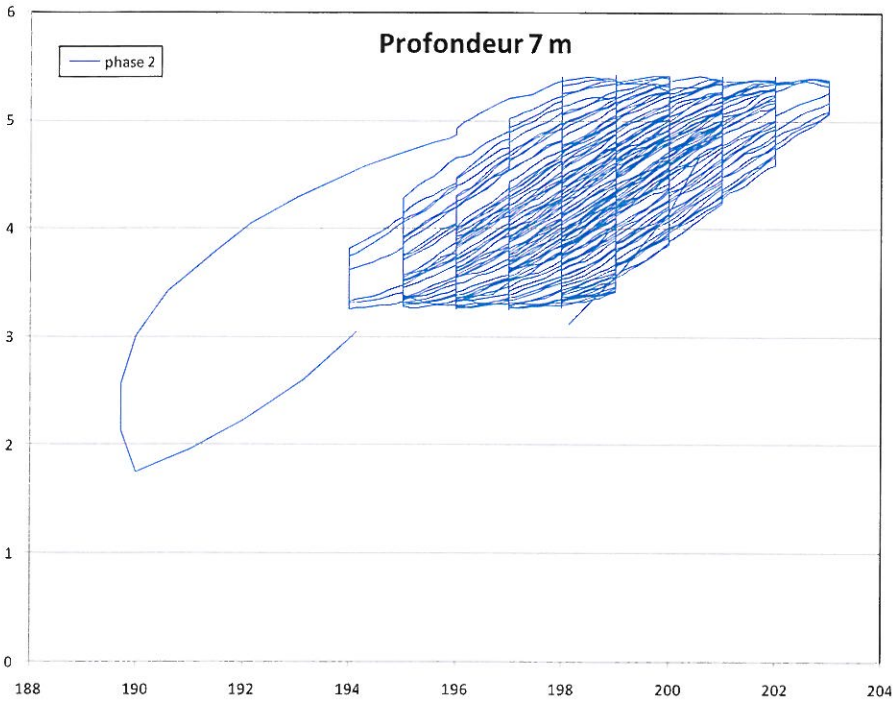


Figure 43. Partie comportant les cycles de la courbe pression volume

3.3.3 *Essai cyclique à 9 m*

Idem

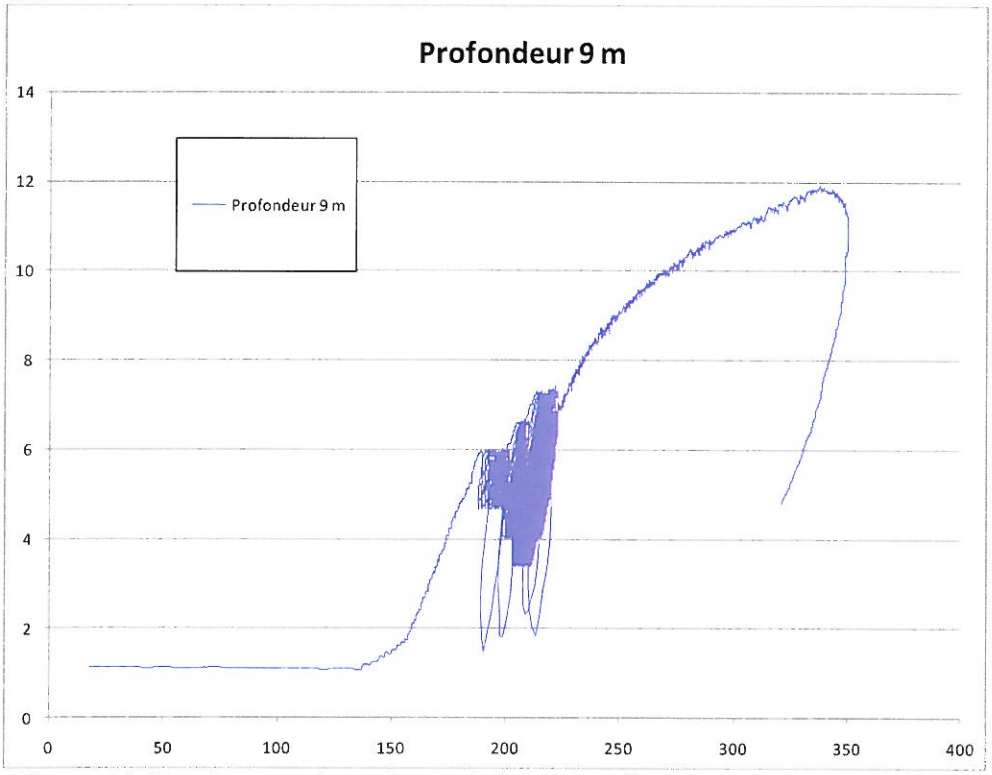


Figure 44. Courbe pression volume de l'essai cyclique

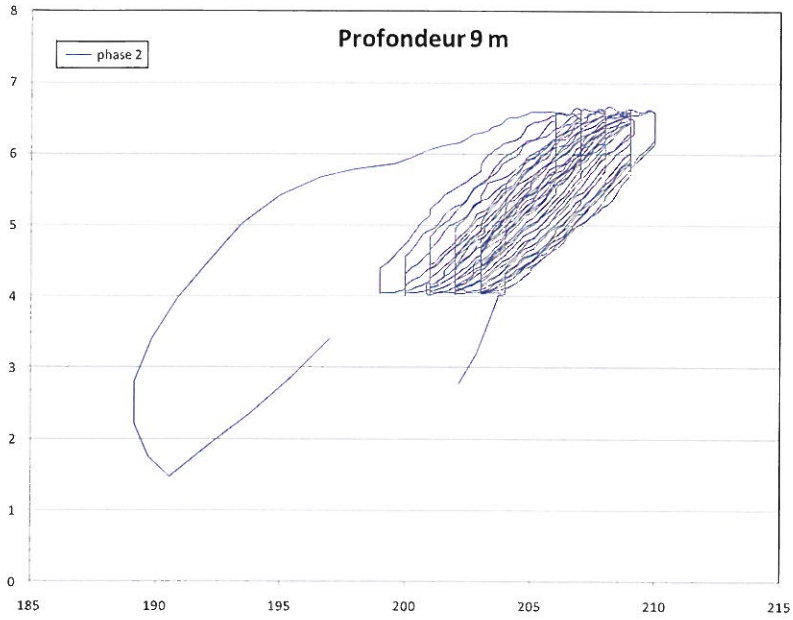


Figure 45. Partie comportant les cycles de la courbe pression volume

3.3.4 *Essai cyclique à 11 m*

Idem

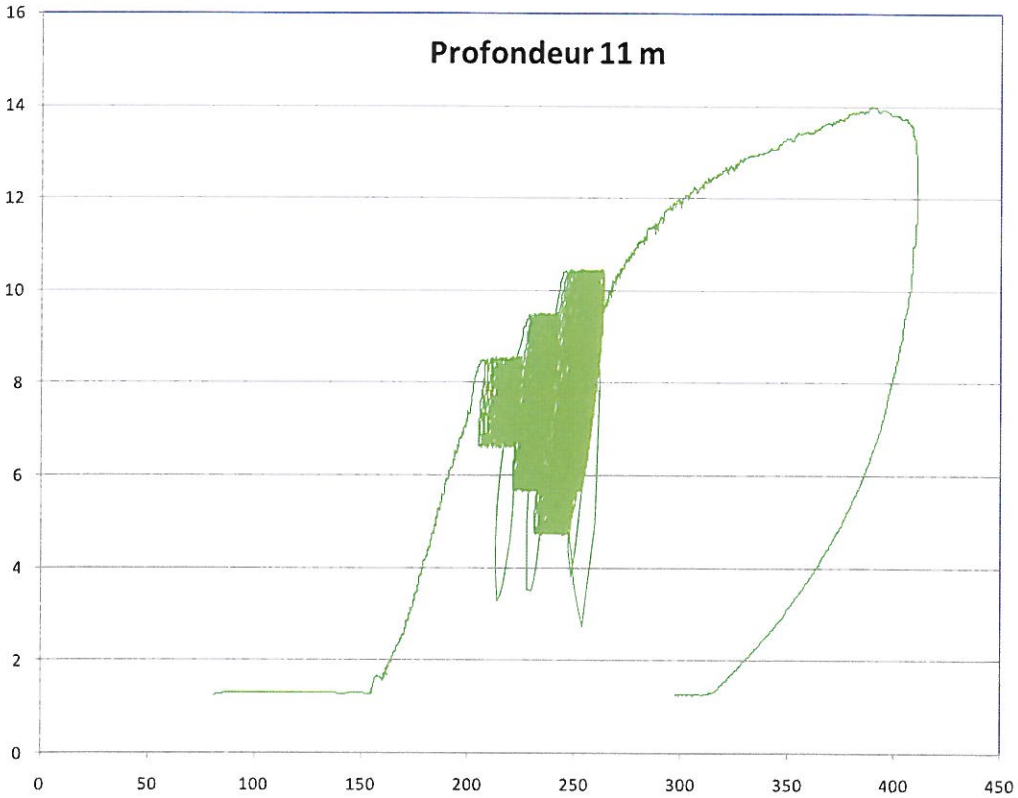


Figure 46. Courbe pression volume de l'essai cyclique

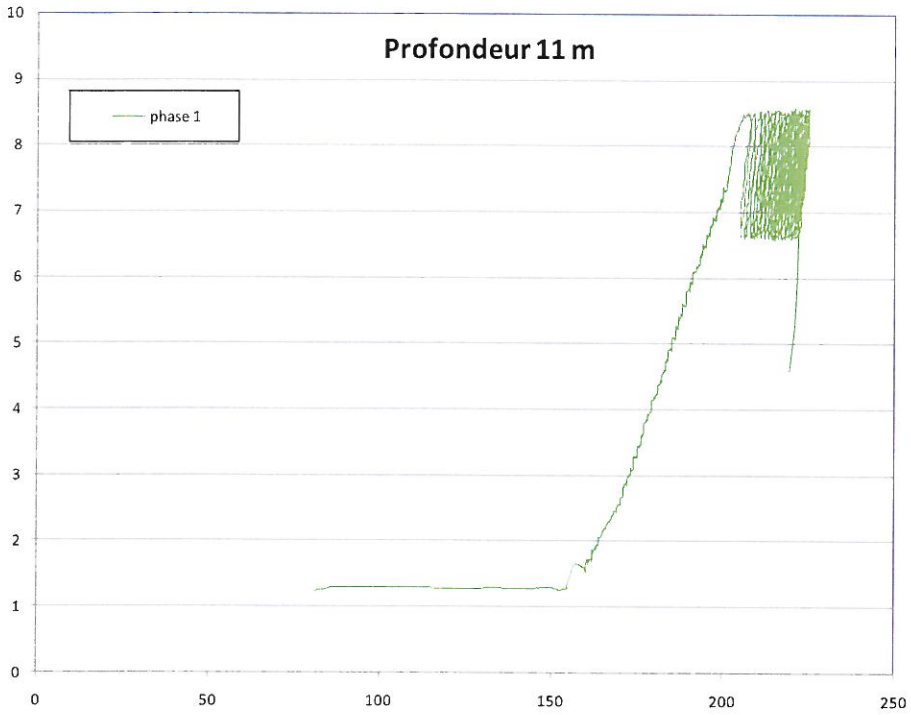


Figure 47. Partie comportant les cycles de la courbe pression volume

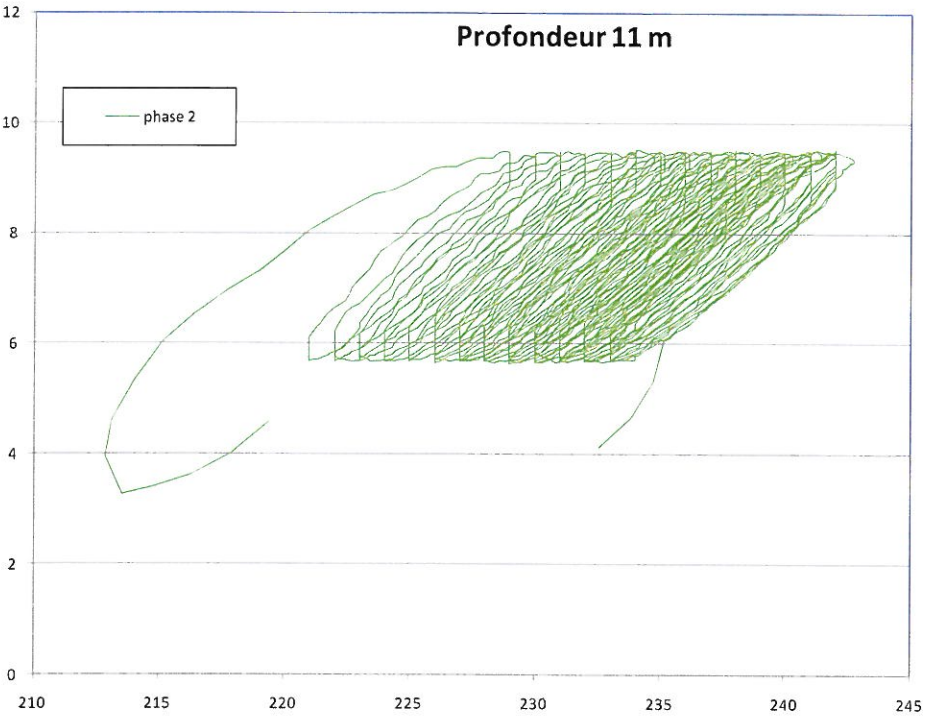


Figure 48. Partie comportant les cycles de la courbe pression volume

Durant la phase 3 qui a une amplitude comparable à l'essai au PAF à 12 m la qualité des cycles est bonne et proche des résultats obtenus au PAF.

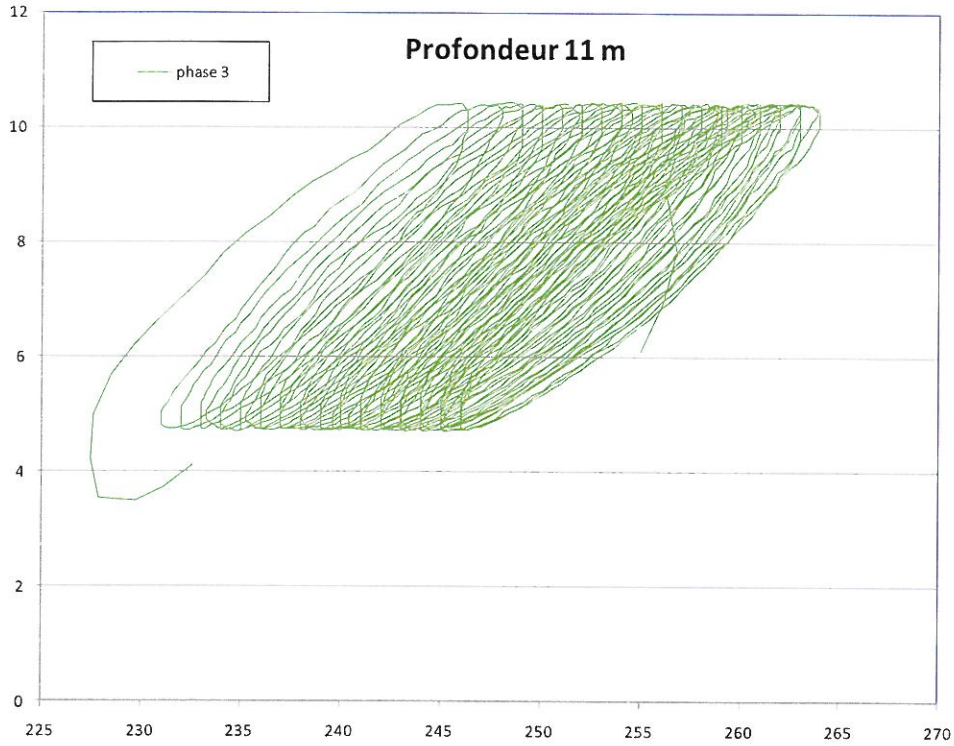


Figure 49. Partie comportant les cycles de la courbe pression volume

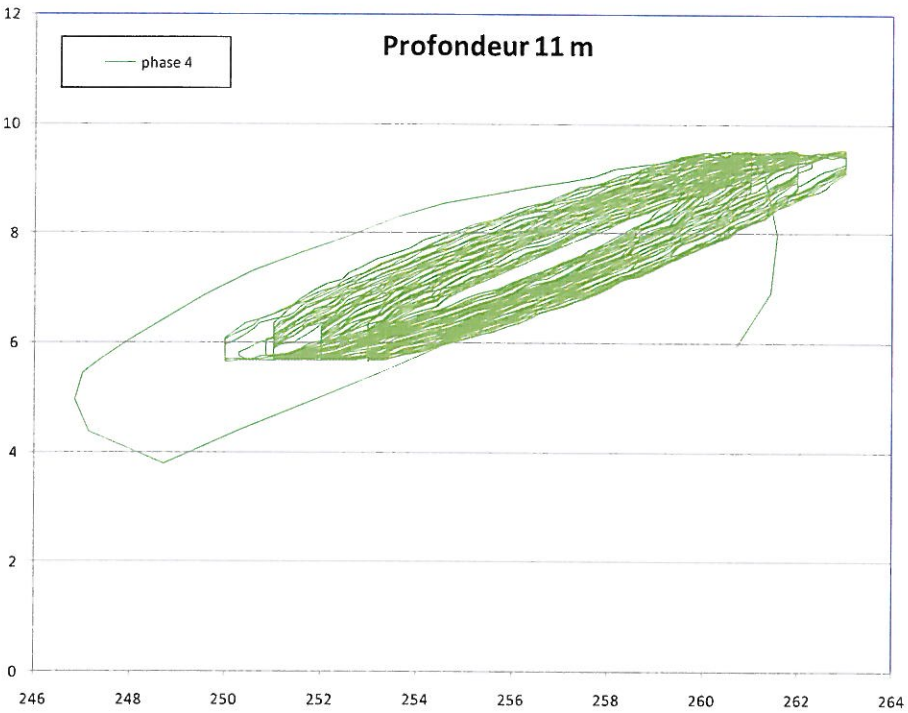


Figure 50. Partie comportant les cycles de la courbe pression volume

4 DÉTERMINATION DE MODULES CYCLIQUES

L'intérêt de réaliser des cycles avec le pressiomètre pour obtenir des modules en petites déformations est apparu très tôt (Les pressiomètres Louis Menard, 1960). Dès l'origine, plusieurs modules ont été définis à partir des courbes expérimentales.

Dans la première zone désignée comme « élastique », le module atteint une valeur quasi indépendante du niveau de déformation. Il est appelé module « initial » G_0.

Les courbes en partie monotone sont décrites par un module « sécant » ($G_{s,1}$) défini par la pente de la droite reliant l'origine au point actuel et en partie cyclique, un autre module sécant ($G_{p,N}$) déterminé par la pente de la droite reliant les deux points d'inversion du cycle N. Les modules maxima des cycles sont calculés avec la relation avec les notations de la Figure 51 :

$$G_{p,N} = \frac{\Delta p}{\Delta V / V_m}$$

La boucle parcourue dans ces séquences de déchargement/remise en charge est de forme ellipsoïdale. Elle représente l'énergie dissipée en déformation plastique. L'évolution de l'inclinaison des cycles ou module au cours des cycles permettra d'évaluer le comportement du sol. On peut évaluer le durcissement ou l'adoucissement cyclique et l'accumulation de déformation, la stabilisation ou la relaxation ou l'effet rochet.

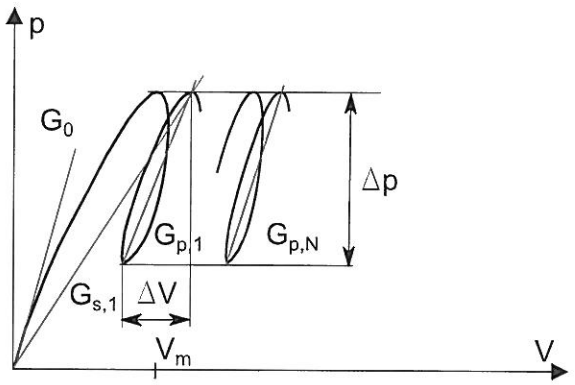


Figure 51. Calcul des modules des cycles

Le mode d'interprétation est basé sur l'évolution de l'aire caractéristique des boucles de chargement déchargement ainsi que du module sécant des boucles d'hystérésis (Figure 51).

4.1 Synthèse des essais mono-amplitude

Même si les différences de protocole dues à la mise au point de ces matériels et essais ne permettent pas une comparaison détaillée, les accumulations volumiques constatées sont du même ordre de grandeur avec les différents modes de mise en œuvre. La qualité du pré-forage est essentielle pour permettre un essai avec un volume injecté initialement minimal. Sur deux sites (Gosier et Cran) indépendamment du mode de mise en œuvre, l'accumulation importante de déformation à certains niveaux a permis de localiser les couches susceptibles d'une chute de caractéristiques importante lors de l'application de sollicitations cycliques (figures 4 et 5).

Tableau 1. Caractéristiques des essais

Site	Forage	Sol	z (m)	$G_{p,1}$ (bars)	a_{M0} (%)	$G_{p,50}/G_{p,1}$
Plancoët	8-3	silt	2	5,19	0,5	1,6
	16-1		3	3,46	1	1,8
	7-3		2	1,08	5	3
	8-3	sable	7	9,98	0,5	2,2
	16-1		7	6,49	1	2
	7-3		7	2,69	5	3,3
	8-3	argile	11	8,58	0,5	1,43
	16-1		11	6,47	1	1,9
	7-3		11	3,75	5	2,1

Cran 1	C1	argile	moy	29,9	1,67	1,15
	C2	argile	moy	20	0,99	1,09
Gosier	C2-PMT	sable	7	51,6	0,5	1,60
			9	13,9	3,5	1,41
Cran 2	A0-PAF	argile	1	60,8	10	2,71
			2	25,6	12	1,59
Merville	PAF	argile	6	426	0,8	2,01
			12	294	3,5	1,93
Merville	PMT	argile	5	145	0,6	1,37
			11	255	0,9	1,21

Lors de tous les essais, une stabilisation des déformations moyennes des cycles en fonction du nombre de cycle a pu être observée. Selon le type de sol, les cycles tendent à se redresser plus ou moins fortement, comme cela semble être le cas pour les sables de Plancoët et l'argile de Merville.

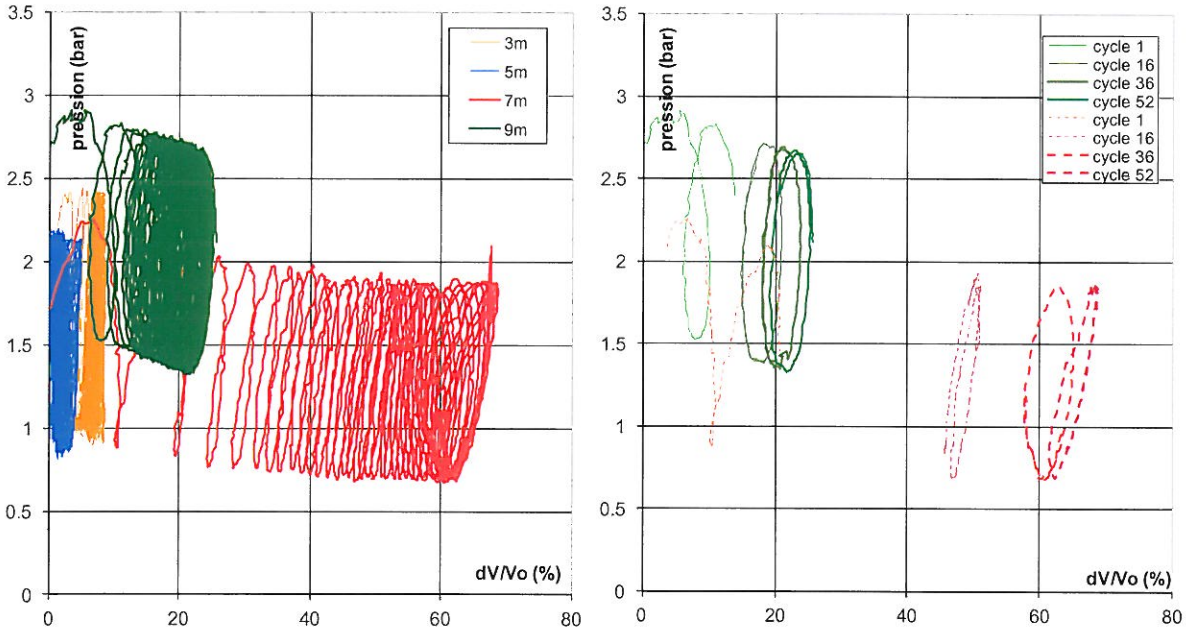


Figure 52. Essais d'expansion cycliques pré-forés site de Gosier

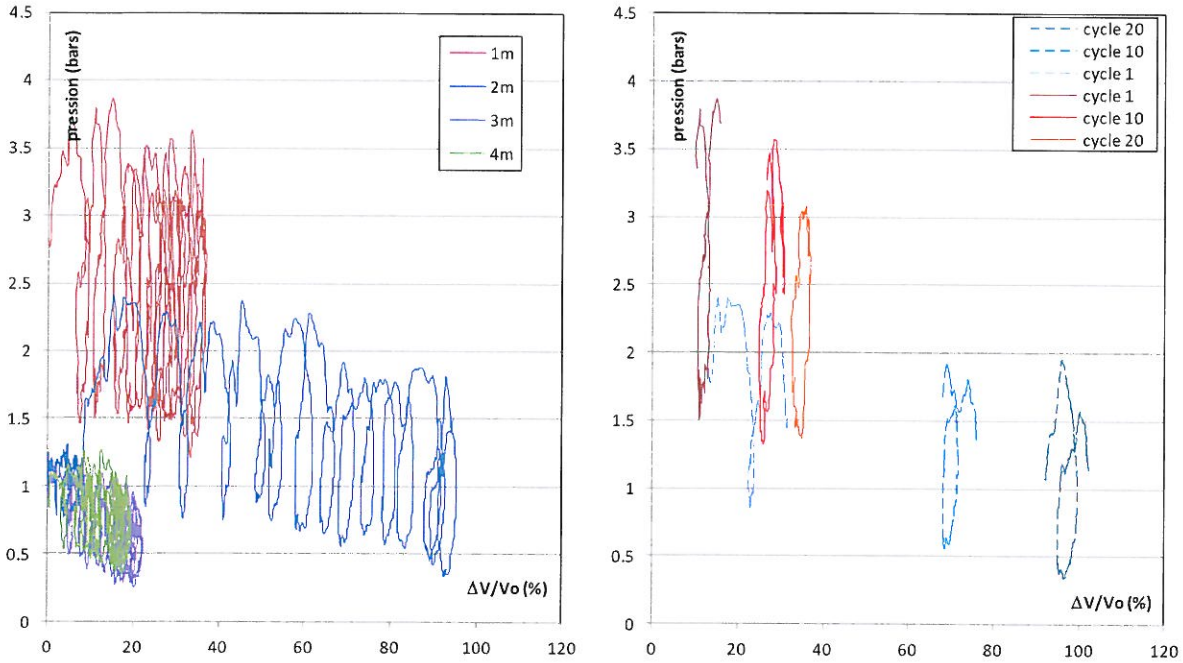


Figure 53. Essais d'expansion cycliques autoforés site de Cran

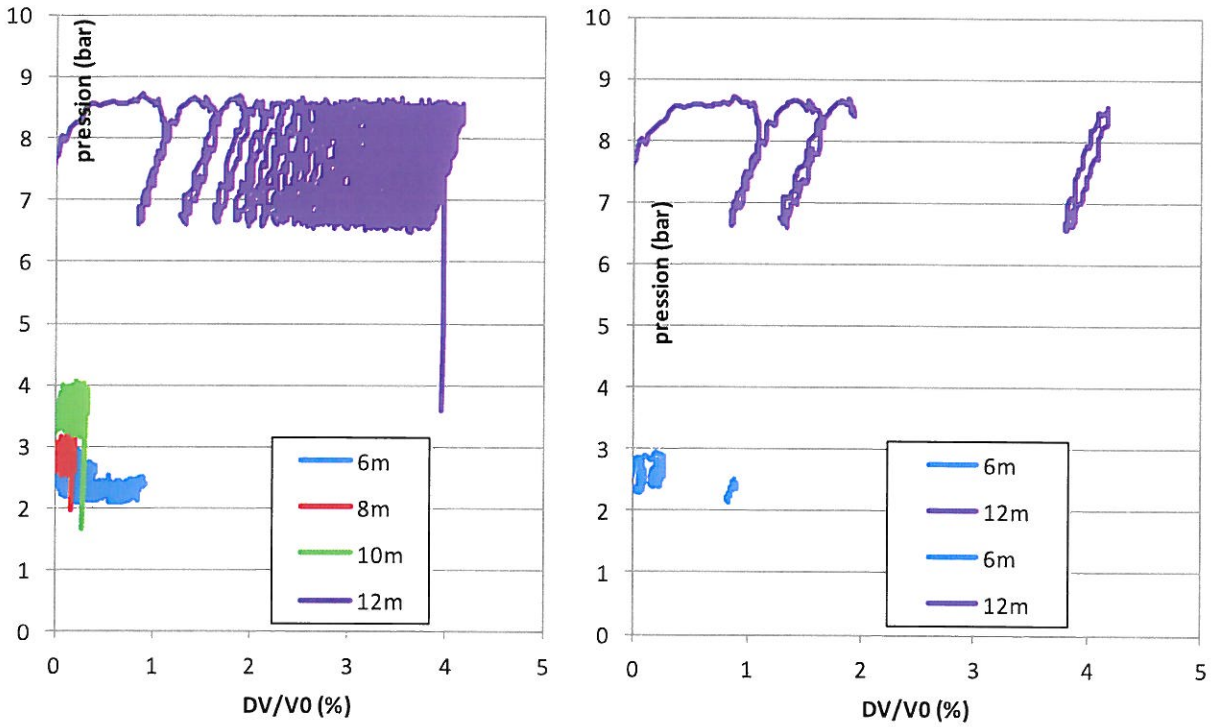


Figure 54. Essais d'expansion cycliques autoforés site de Merville

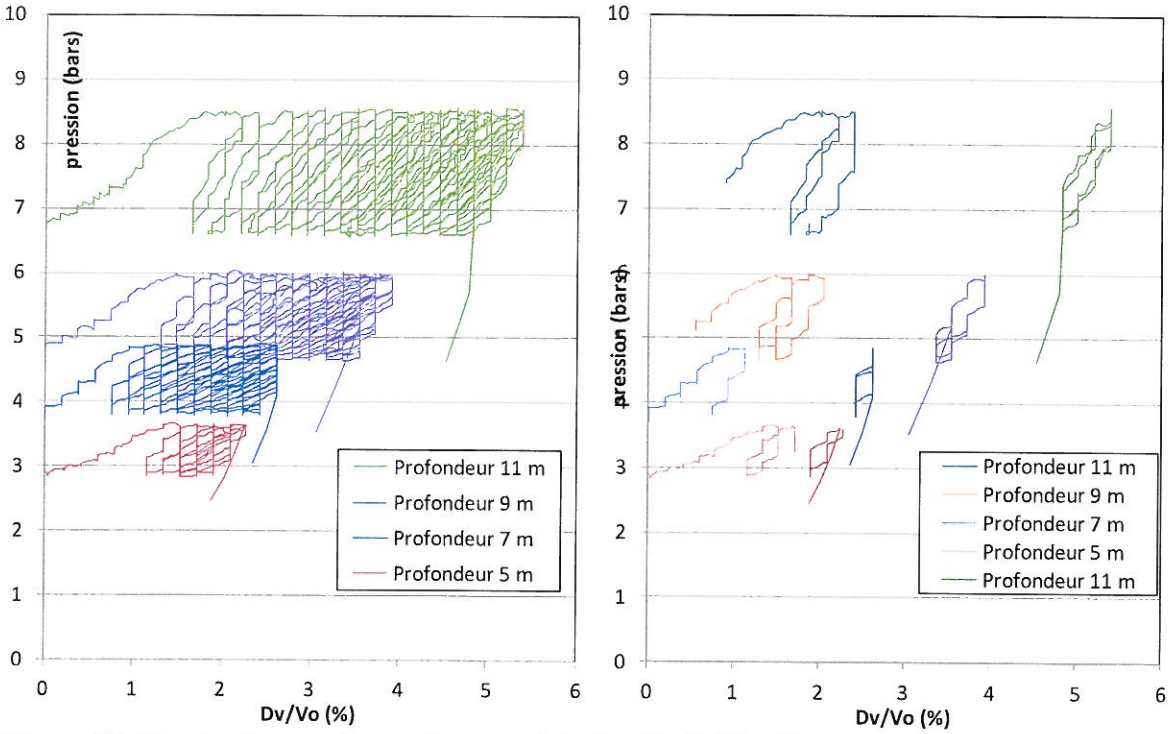


Figure 55. Essais d'expansion cycliques pré-forés site de Merville

Les différentes expérimentations ont montré qu'il faut réaliser un minimum de 50 cycles pour obtenir une évolution claire du module sécant et qu'il n'est pas possible de se limiter à quelques cycles – 3 à 10 par exemple – pour obtenir des résultats représentatifs. A noter que l'évolution du module sécant de 50 à 500 cycles est de 10% en moyenne et de 500 à 5000 de 3%.

4.2 Synthèse des essais multi amplitude

Les séries d'essais multi-amplitude permettent d'obtenir des courbes d'évolution du module cyclique en fonction de la profondeur et de l'amplitude des cycles pour différentes natures de sol (Figure 56 et tableau 2).

Tableau 2. Évolution du module sur plusieurs amplitudes

Site	Outil	z (m)	$G_{p,50}$ / $G_{p,1}$ de la phase			
			1	2	3	4
Plancoët	PAF	1	1.83	1.08	0.8	1.27
Merville	PAF	12	1,93	0,99	0,87	0,98
	PMT	11	1,21	0,94	1,42	1,06

On observe une évolution très similaire sur le site de sols lâches de Plancoët et sur le site d'argile raide de Merville : une évolution importante pour la première amplitude, puis une quasi-stabilisation pour les autres amplitudes

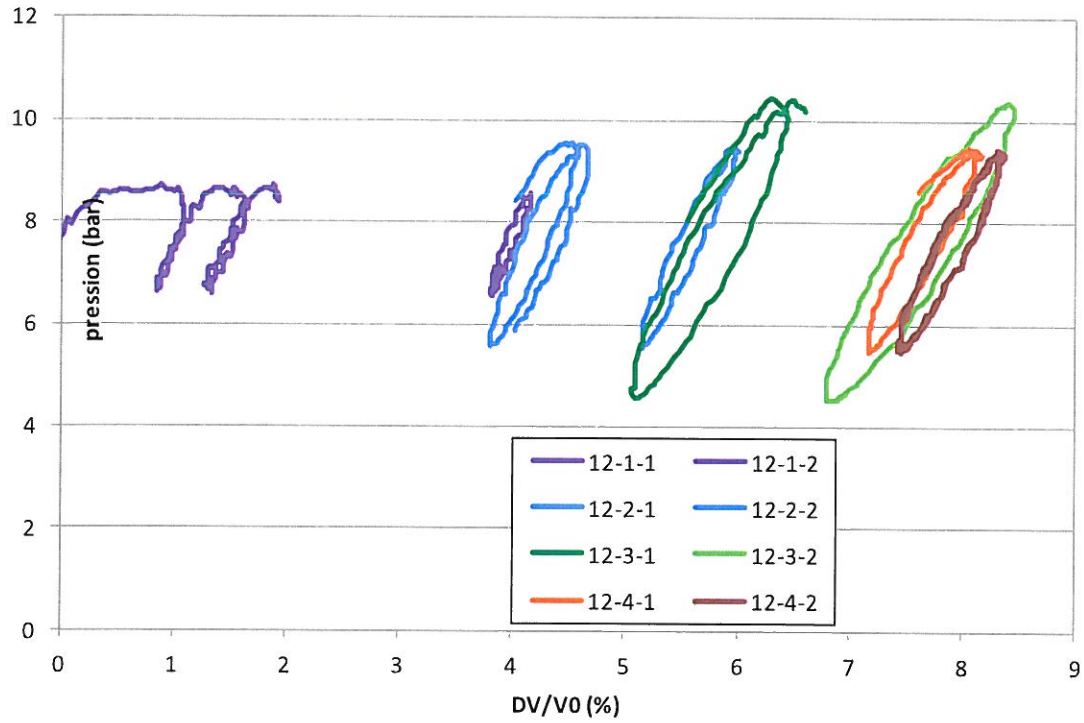


Figure 56. Essais d'expansion cycliques autoforés site de Merville (profondeur 12 m)

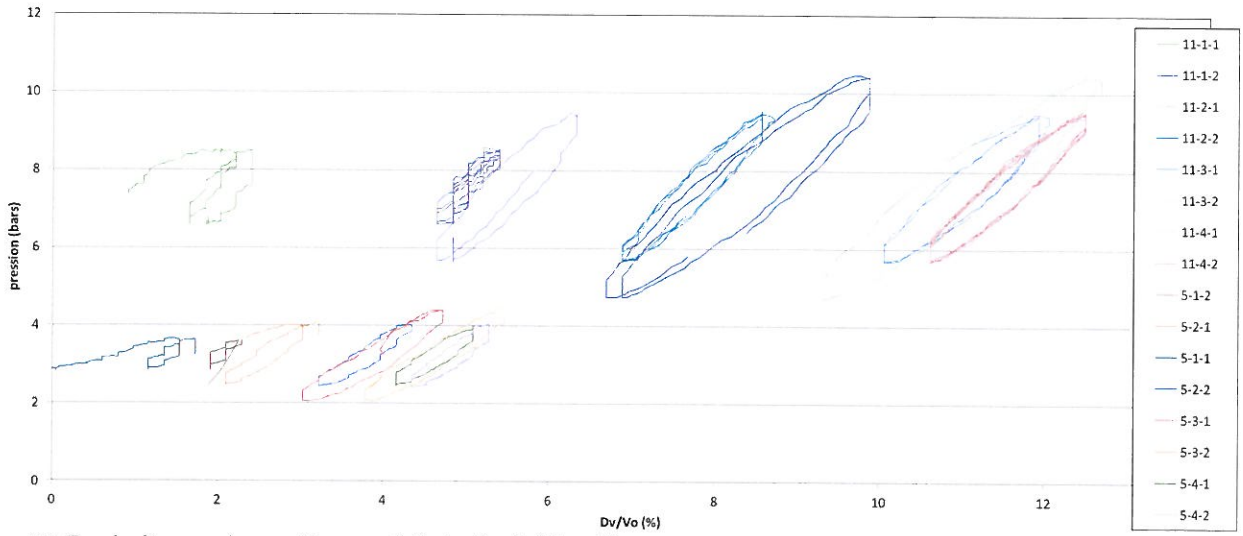


Figure 57. Essais d'expansion cycliques pré-forés site de Merville

Nous présentons ci-dessous des courbes très approximatives de l'évolution du module déterminée sous tableur.

On observe que ceux-ci ont évolué presque continument sans réelle phase de stabilisation.

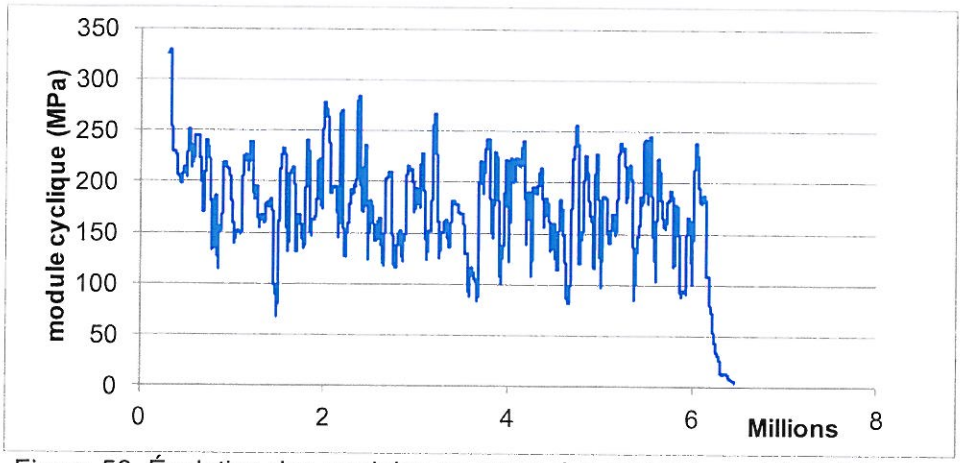


Figure 58. Évolution des modules au cours des cycles (essai PAF à 6 m)

Sur la Figure 59, on observe que les modules ont changé lors des phases d'amplitudes différentes mais qu'au sein de la même phase ils sont restés très stables.

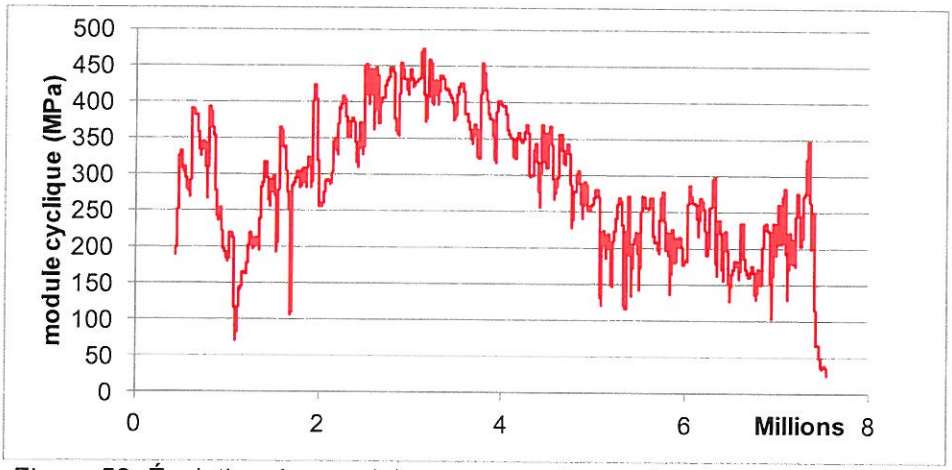


Figure 59. Évolution des modules au cours des cycles (essai PAF à 8 m)

Comme pour l'essai à 8 m, on observe, sur la Figure 60, que les modules ont changé lors des phases d'amplitudes différentes mais qu'au sein de la même phase ils sont restés très stables.

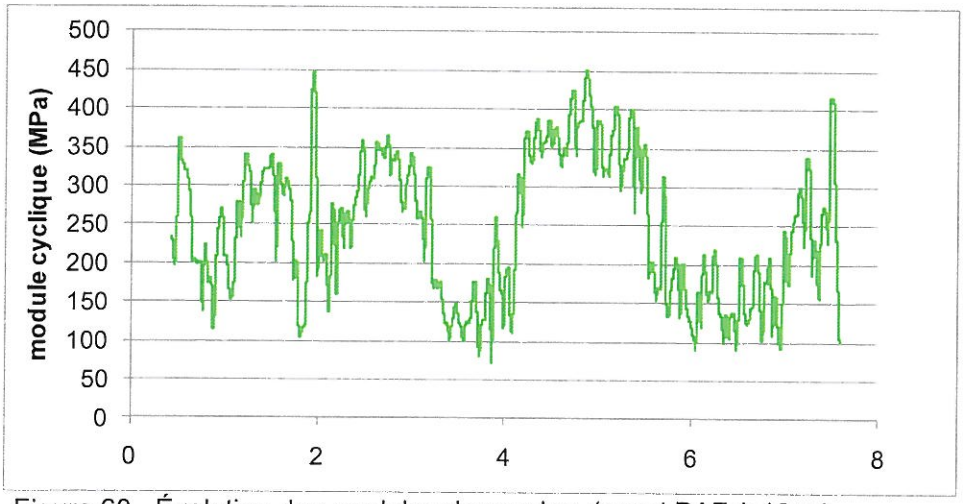


Figure 60. Évolution des modules des cycles (essai PAF à 10 m)

A la différence des essais précédents, on observe, sur la Figure 61, que les modules ont changé lors des phases d'amplitudes différentes et qu'au sein de la même phase ils ont évolué vers une stabilisation relative.

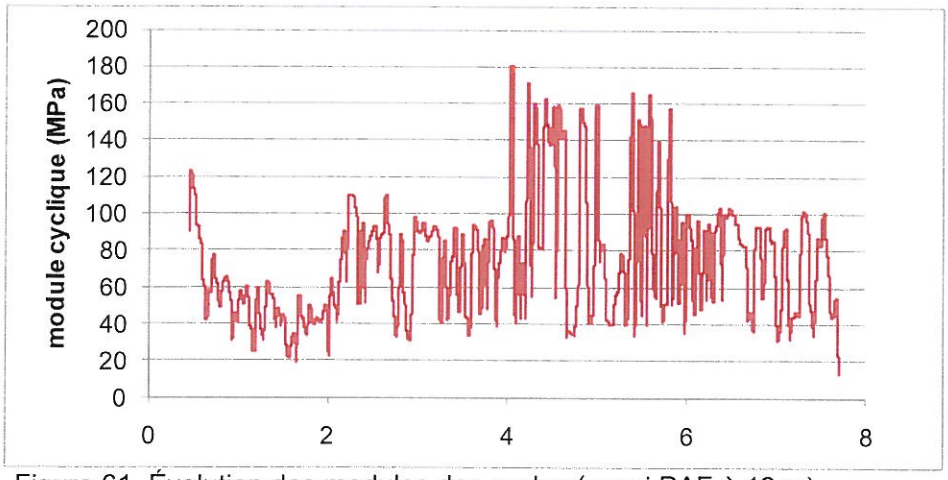


Figure 61. Évolution des modules des cycles (essai PAF à 12 m)

Les figures suivantes concernent les essais au pressiomètre préforé avec sonde G.

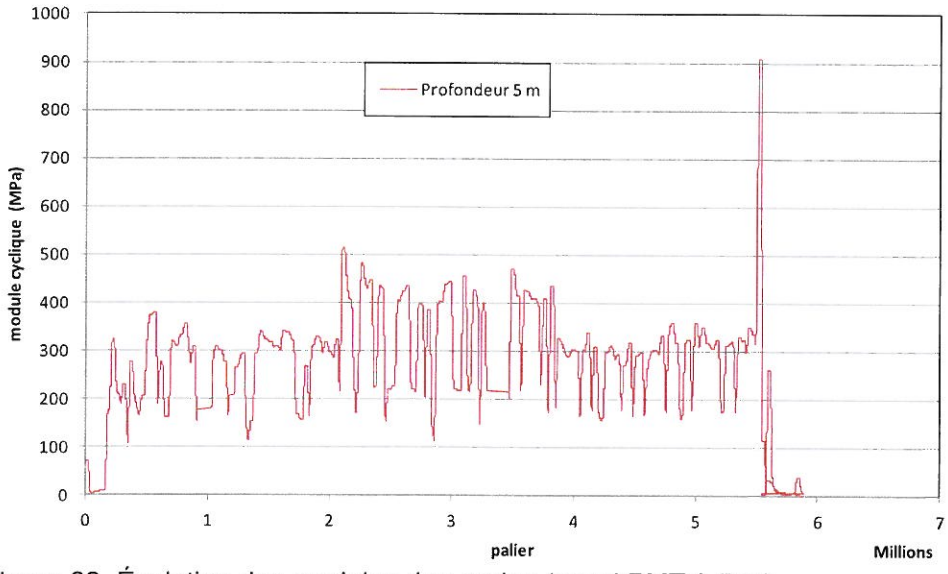


Figure 62. Évolution des modules des cycles (essai PMT à 5 m)

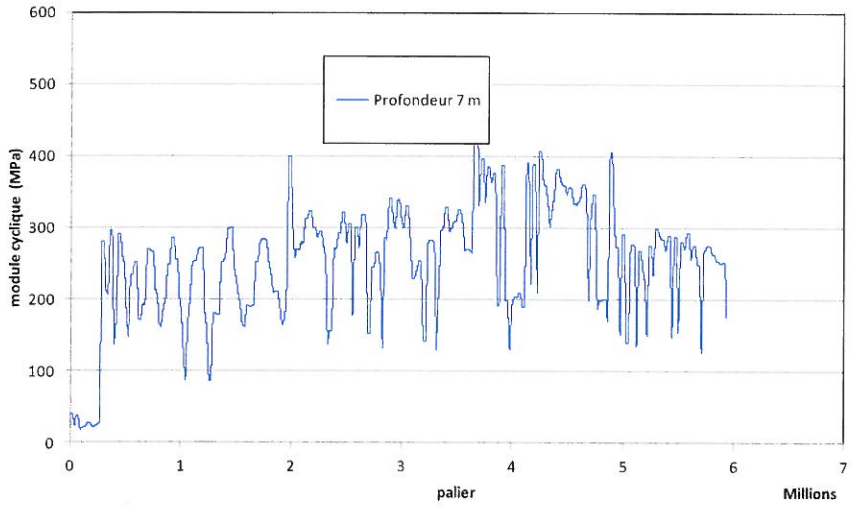


Figure 63. Évolution des modules des cycles (essai PMT à 7 m)

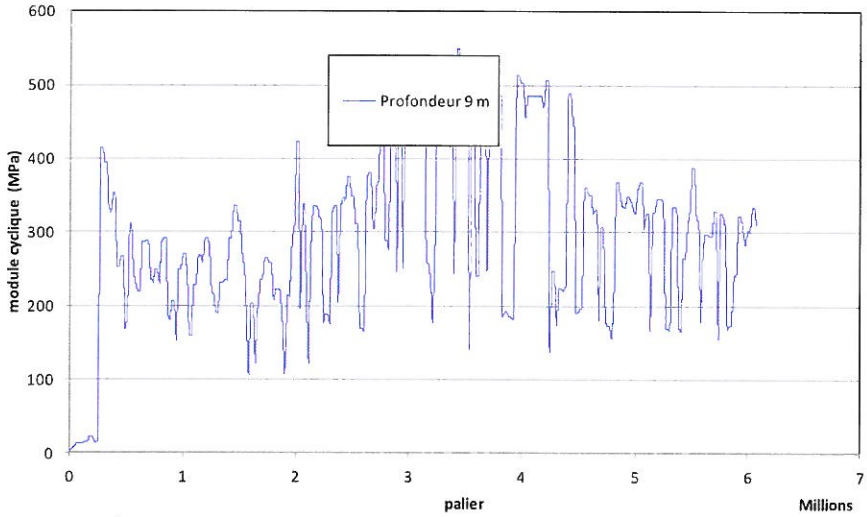


Figure 64. Évolution des modules des cycles (essai PMT à 9 m)

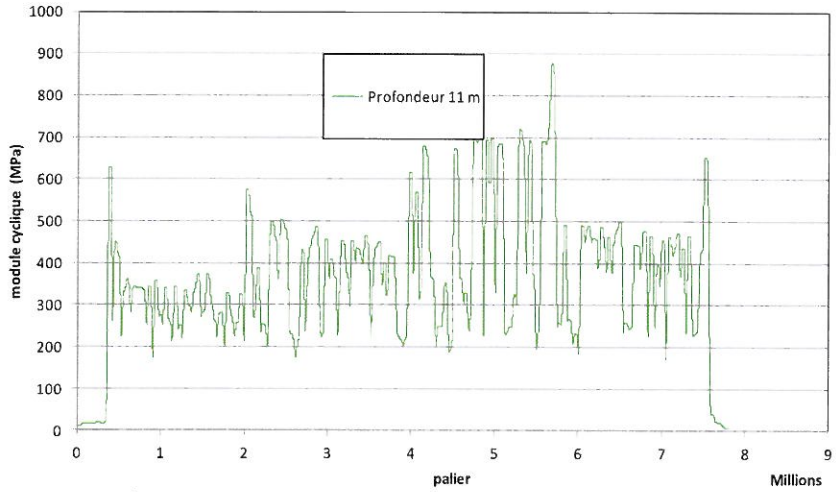


Figure 65. Évolution des modules des cycles (essai PMT à 11 m)

4.3 Bilan intermédiaire

Un premier constat est que le signal obtenu représenté sur les Figure 52 à 57 est plus bruité que celui donné dans les articles de Jézéquel et Le Méhauté (1982) car l'asservissement par contrôleur pression volume à vis à bille en vitesse de volume (2%/mn) est plus stable qu'un asservissement en pression par électrovanne.
On peut également observer que les cycles obtenus présentent des points singuliers à méplats et non de rebroussement. Toutefois on ne peut attribuer ce phénomène au mode de pilotage, les résultats bruts des essais réalisés par le LR de Saint Brieuc dans les années 78-81 n'ayant pas été enregistrés (seulement les paramètres calculés comme le module et la déformation des cycles).

Cette deuxième série d'essais a permis d'obtenir des courbes d'évolution du module cyclique en fonction de la profondeur et de l'amplitude des cycles.

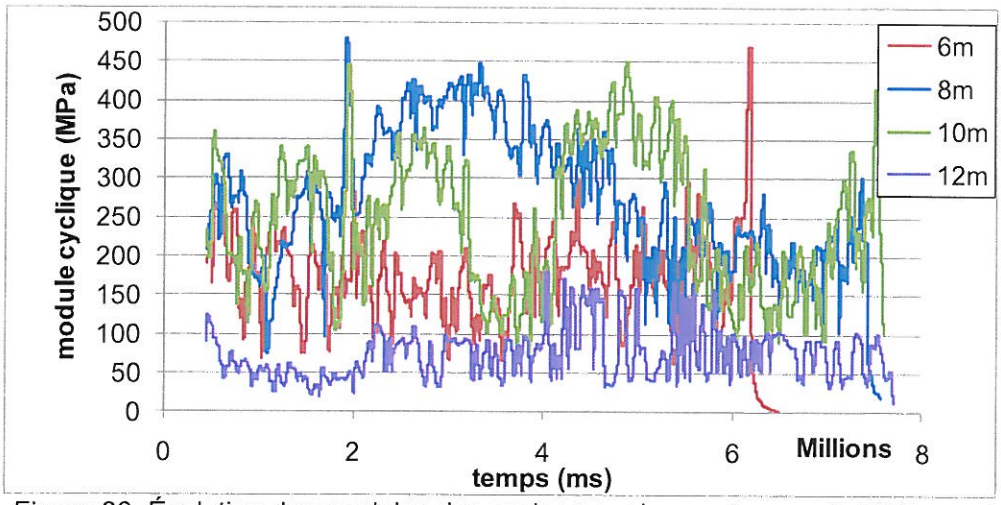


Figure 66. Évolution des modules des cycles pour les quatre essais PAF semaine 1

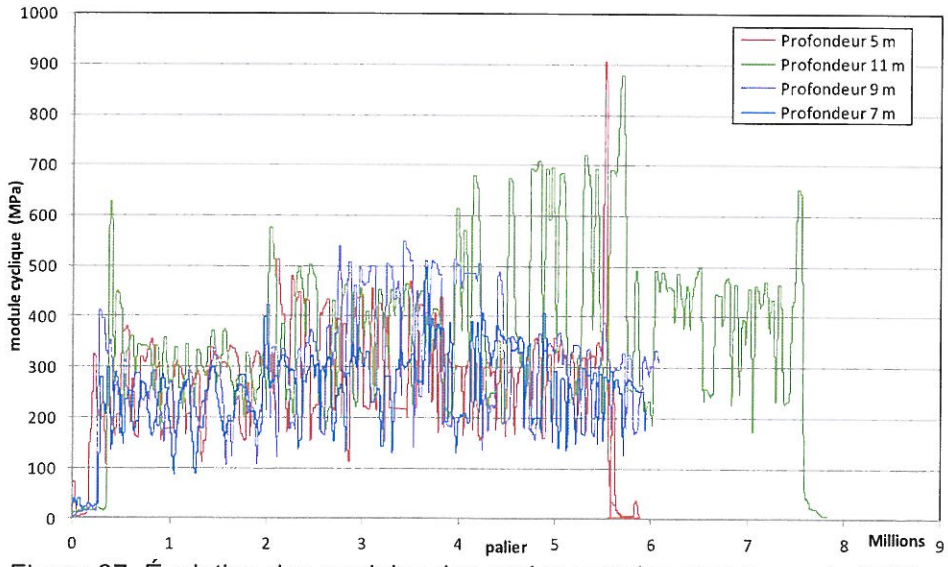


Figure 67. Évolution des modules des cycles pour les quatre essais PMT semaine 2

La comparaison des modules cycliques (approximatifs avec cette fonction du tableur) des essais des semaines 1 et 2 (Figure 66 et Figure 67) montre un facteur proche de 1 entre les essais aux pressiomètres préforé et autoforé.

Les valeurs obtenues peuvent être comparée aux valeurs dérivées des essais monotones préforés c-à-d pressiométrique Ménard. Celles-ci sont de 14 MPa à 5m à 30 MPa à 9 m au contact. La gamme est donc très inférieure.

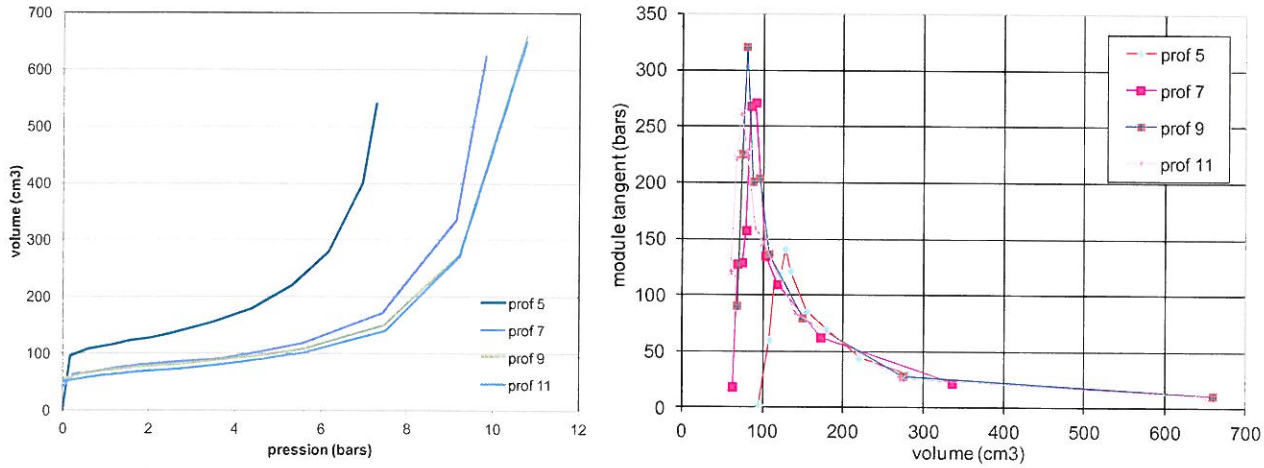


Figure 68. Évolution des modules des essais avec protocole Ménard

Si l'on compare aux modules tangents obtenus lors des expansions des essais autoforés, on retombe sur les fourchettes obtenues avec les essais cycliques : 250 à 350 MPa.

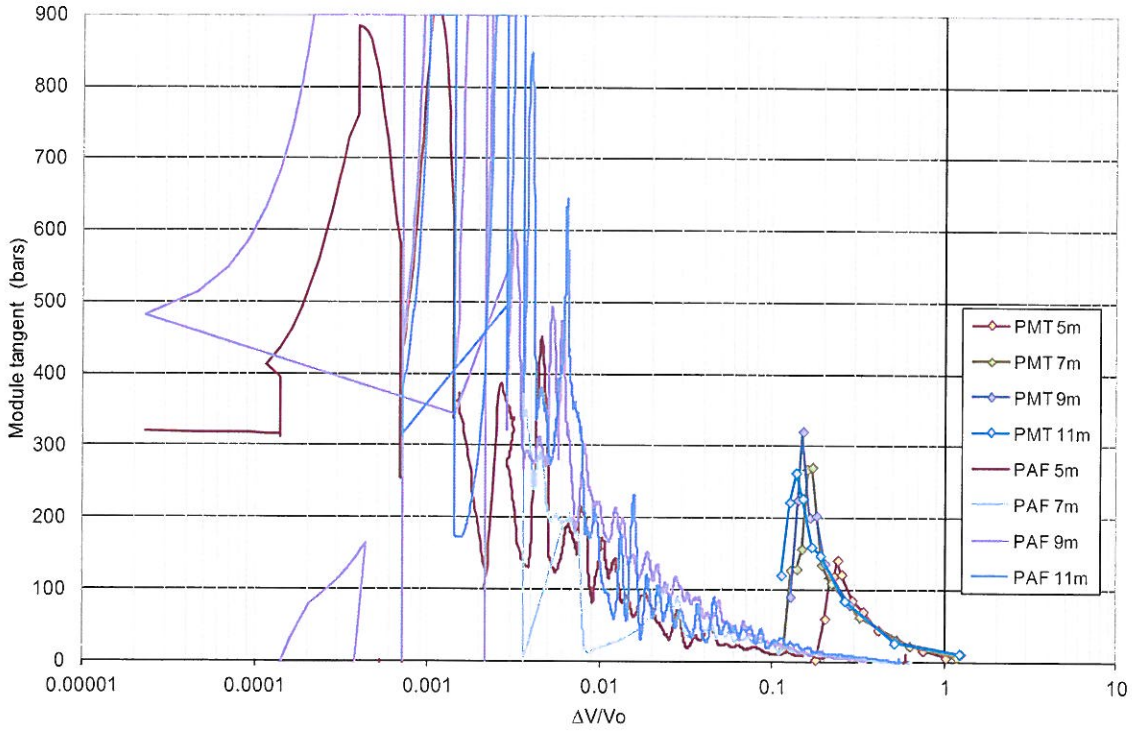


Figure 69. Évolution des modules des cycles pour les quatre essais Ménard et PAF

5 PROGRAMME DES ESSAIS DE LOON-PLAGE

Le site de Loon-Plage a été le lieu de la deuxième campagne d'essais de pieux sous chargement cycliques du projet national SOLCYP.
L'examen de la carte géologique de la France à l'échelle 1/50 000, feuille 3-4 de Dunkerque-Handschoote, montre que la succession stratigraphique des terrains peut être schématisée ainsi :

- Formations Quaternaires, dépôts marins constitués par des sables grossiers jaunâtres très coquilliers, passant vers le bas à des sables verdâtres coquilliers, L'ensemble étant surmonté par un limon brunâtre.
- Tertiaire, l'Yprésien représenté par une argile plastique ou finement sableuse, grise à gris verdâtre ou gris bleuté (Argile des Flandres).

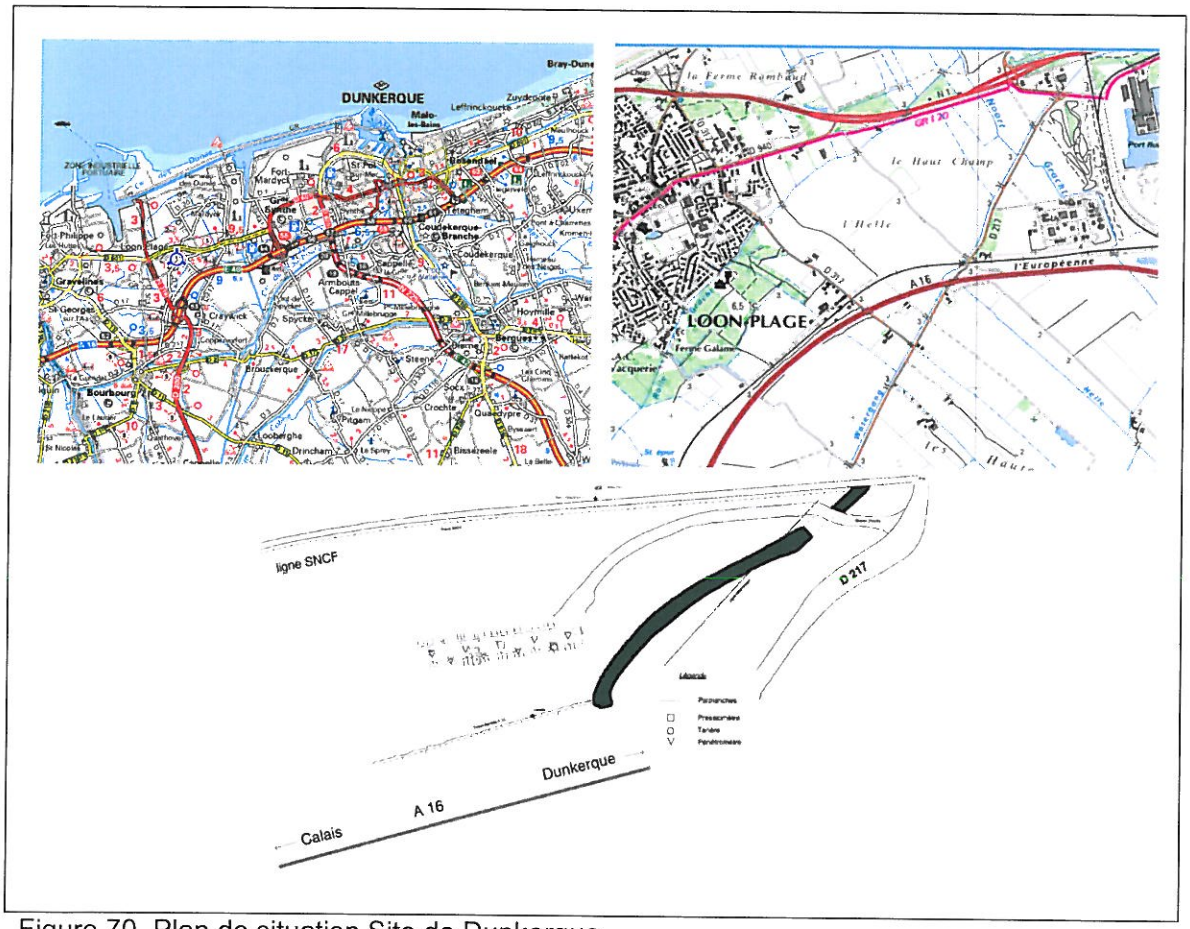
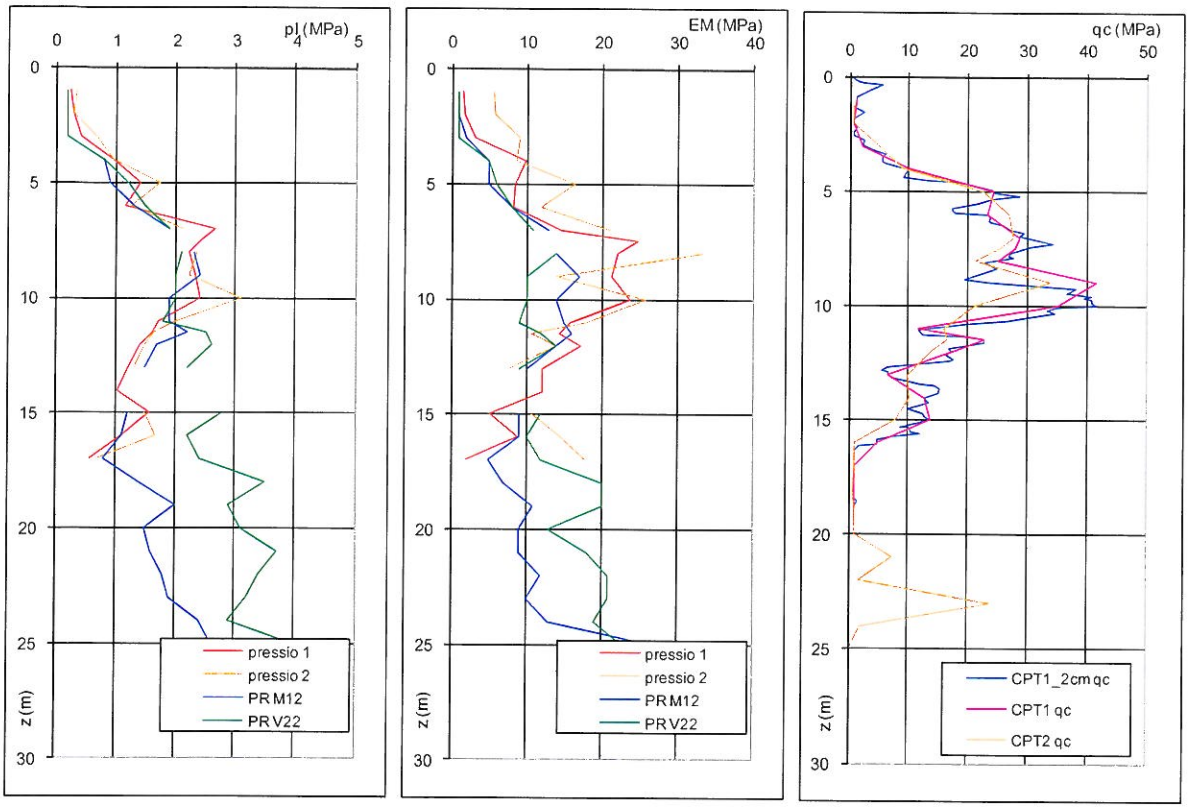


Figure 70. Plan de situation Site de Dunkerque

Les travaux sur le terrain ont consisté en la réalisation de 12 sondages se décomposent comme suit :
- 9 sondages pénétrométriques à 25 mètres de profondeur environ dont un à 29 mètres
- 1 sondage à la tarière hélicoïdale continue à âme pleine notée STPM12, profonde de 30 mètres
- 2 sondages pressiométriques avec essais tous les mètres, profonds de 25,50 mètres, notés PRV22 ct PRMI2


pl (MPa)
0 1 2 3 4 5
0 5 10 15 20 25 30
z (m)
pressio 1
pressio 2
PRM12
PRV22
EM (MPa)
0 10 20 30 40
0 5 10 15 20 25 30
z (m)
pressio 1
pressio 2
PRM12
PRV22
qc (MPa)
0 10 20 30 40 50
0 5 10 15 20 25 30
z (m)
CPT1_2cm qc
CPT1 qc
CPT2 qc

6 RÉFÉRENCES

AFNOR (1999) Essai pressiométrique Ménard – partie 2 Essai avec cycle, NF P94-110-2, Reconnaissance et essais, pp. 43.

AFNOR (2000) Essai pressiométrique Ménard – partie 1 Essai sans cycle, NF P94-110-1, Reconnaissance et essais, pp. 43.

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

Borel S., Reiffsteck Ph., (2006) Caractérisation de la déformabilité des sols au moyen d'essais en place. LCPC Paris, 132 p.

Briaud, J.L., (1992). The Pressuremeter, A. A. Balkema, Rotterdam, Netherlands.

CEN/ISO (2010) Geotechnical investigation and testing – field testing- Part 6 : Self boring pressuremeter test, EN/ISO 22476-6, 22 p

Combarieu O., Canépa Y. (2001) L'essai cyclique au pressiomètre, BLPC, 233, 37-65.

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

Le Méhauté A. Jézéquel J.F., (1980) Essais cycliques au pressiomètre autoforeur, Rapports des LPC, FAER 1-05-09-22, 29 pages

Les Pressiomètres Louis Ménard (1960) Phase de déchargement des essais pressiométriques, Etude théorique et applications, Circulaire 3 pages

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

Reiffsteck P., (2011) Essais PAF et CPT cyclique, rapport R/09/SOL/03 du PN Solcyp, 34 pages

Peralta P .and Achmus M . (2010) An experimental investigation of piles in sand subjected to lateral cyclic loads,Proceedings of the 7th International Conference on Physical Modelling in Geotechnics (ICPMG 2010), 985–990

Wichtmann, T., Niemunis, A. & Triantafyllidis, Th. 2004b. Strain accumulation in sand due to drained uniaxial cyclic loading In International Conference on Cyclic Behaviour of Soils and Liquefaction Phenomena,