

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**

N° de la Commande : LC/09/SOL/02

Libellé de l'action : PAF cyclique

Organisme : LCPC

Auteur : Philippe Reiffsteck

**Numéro du rapport :
R/09/SOL/01**

**Date de réalisation du rapport :
Septembre 2010**

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

Sommaire simplifié

INTRODUCTION	4
1 EXPRESSION DES BESOINS	6
2 BILAN DE L'EXISTANT	9
3 SPÉCIFICATIONS TECHNIQUES DES BESOINS	18
4 RÉALISATION DU MATÉRIEL	19
5 TEST DU MATÉRIEL	21
6 CONCLUSION	31
7 RÉFÉRENCES	32

Résumé français

Ce rapport retrace la conception et la mise au point d'un dispositif capable de solliciter cycliquement un essai d'expansion de cavité cylindrique mis en place par préforage ou autoforage.

Abstract

This report describes the design and development of a device able to apply cyclic loading during pre-bored or self-bored in situ cavity expansion test.

Mots-Clés : pressiomètre, essais d'expansion, Ménard, autoforage, cyclique

Keywords: pressuremeter, expansion tests, Ménard, self-boring, cyclic

Conclusion

La technique d'un contrôleur pression volume adapté aux essais d'expansion cyclique a été développée et validée. La première application avec le PAF n'a pu être menée à terme du fait de difficultés de forage sur le site test.

Références bibliographiques

- AFNOR (1991) Norme NF X 50-151, Analyse de la valeur, analyse fonctionnelle, Expression fonctionnelle du besoin et cahier des charges fonctionnel, 32 pages
- AFNOR (2000) Norme NF P 94-110-1 Essai pressiométrique Ménard – Partie 1 – Essai sans cycle
- AFNOR (1999) Norme NF P 94-110-2 Essai pressiométrique Ménard – Partie 2 – Essai avec cycle
- Combarieu O., Canépa Y. (2001) L'essai cyclique au pressiomètre, Bulletin des laboratoires des ponts et chaussées, n°233, pp. 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, Thèse de doctorat ENPC,
- Dupla J.-C. (2010) Programme d'essais pour le site de Gosier, communication personnelle,
- Foray P. (2009) Essais CPTu sur le site de Gosier, Document d projet ANR Belle Plaine
- 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
- Lutz (2009) documentation PREVO, 25 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

AUTEUR

Philippe Reiffsteck
LCPC - 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@lcpc.fr

PARTICIPANTS

Nom	Etablissement	Période
Alain LE KOUBY	MSRGI	2008 →
Alain PUECH	FUGRO	2008 →
Stanislas PO	FUGRO	2008 →
Jean-Claude DUPLA	CERMES	2008 →
Jean CANOU	CERMES	2008 →
Michel PIOLINE	LRPC Rouen	2008 →
Tomek LEWCZUK	LRPC Rouen	2008 →

SOMMAIRE

INTRODUCTION	4
1 EXPRESSION DES BESOINS	7
1.1 PROFIL D'UTILISATION DU DISPOSITIF	7
1.2 ENVIRONNEMENT D'UTILISATION	7
1.2.1 CONDITIONS EN SURFACE	8
1.2.2 CONDITIONS EN PROFONDEUR	8
1.3 PROPOSITION D'UNE FICHE DE DÉVELOPPEMENT	8
1.4 ÉVALUATION DE LA FICHE	9
1.5 COMPOSITION DE L'ÉQUIPE PROJET	9
2 BILAN DE L'EXISTANT	10
2.1 ESSAI AU PRESSIOMÈTRE MÉNARD	10
2.2 ESSAI MONO-CYCLE AU PRESSIOMÈTRE	12
2.3 ESSAI MULTI-CYCLE AU PRESSIOMÈTRE	12
2.3.1 ESSAIS TYPE LRPC SAINT BRIEUC	12
2.3.2 ESSAIS TYPE ENPC	13
3 SPÉCIFICATIONS TECHNIQUES DES BESOINS	18
4 RÉALISATION DU MATÉRIEL	19
4.1 CONSTRUCTION DU MATÉRIEL	19
4.2 ARCHITECTURE DU PROGRAMME DE PILOTAGE	19
5 TEST DU MATÉRIEL	22
5.1 ESSAIS USINE	22
5.2 ESSAI SUR SITE MODÈLE	22
5.3 ESSAIS EN CONDITIONS DE CHANTIER	23
5.3.1 SITE DE GOSIER	23
5.3.2 ÉTALONNAGE ET CALIBRAGE STATIQUE	24
5.3.3 ESSAIS PRESSIOMÉTRIQUES MÉNARD (PAR PALIERS)	25
5.3.4 ÉTALONNAGE CYCLIQUE	26
5.3.5 ESSAIS CYCLIQUES AVEC SONDE MÉNARD	27
5.3.6 ESSAIS CYCLIQUES AVEC SONDE AUTOFORÉE	30
6 CONCLUSION	31
7 RÉFÉRENCES	32

Ce document comporte un seul volume de 32 pages consacré à la sonde. Les documents tels que rapport de recherches, plans, photographies proviennent des archives du LCPC, certaines photographies ont été prises sur des sites Internet ou des plaquettes publicitaires, la plupart des dessins ont été faits par le premier auteur.

INTRODUCTION

L'objectif de cette action est de concevoir un dispositif capable de solliciter cycliquement un essai d'expansion de cavité cylindrique, ce qui est directement transposable aux méthodes de dimensionnement des fondations profondes soumis à des sollicitations cycliques axiales ou latérales.

L'objet de cette étude est de préciser les conditions techniques de développement d'un tel appareillage.

- ◆ La première partie détaille les besoins,
- ◆ La deuxième partie fait l'état de l'art des techniques actuelles,
- ◆ La troisième partie est consacrée à l'établissement du cahier des charges,
- ◆ La quatrième partie décrit le principe de l'appareil,
- ◆ La cinquième partie précise le cadre d'utilisation de l'appareil et
- ◆ Finalement, les trois dernières parties relatent le suivi de la fiche prototype.

1 EXPRESSION DES BESOINS

1.1 Profil d'utilisation du dispositif

Le besoin recensé est le développement d'une méthode d'essai pour évaluer l'évolution du frottement latéral des pieux sous charge cyclique ou sismique. Le matériel est destiné à être utilisé sur le marché concurrentiel des essais géotechniques. Il n'y a pas de matériel concurrent à la date de rédaction de cette Spécification Technique des Besoins.

Dans le cadre de l'opération 11P071 et du projet national SOLCYP, on se propose de développer un dispositif expérimental apte à réaliser un chargement cyclique d'une pointe de pénétromètre statique de type piézocone (CPT). Le piézocone est un appareil d'essai utilisé par de nombreuses compagnies d'investigation géotechnique et qui présente l'avantage de pouvoir accéder à la lithologie des massifs de sols et indirectement à une description (par abaques) et à certaines caractéristiques mécaniques.

La réalisation d'un chargement cyclique permettra de mesurer in situ l'évolution du frottement latéral sur le manchon de frottement, ce qui est directement transposable aux méthodes de dimensionnement des fondations profondes

NOTE : Le projet National SOLCYP (Comportement et calcul des fondations profondes sous sollicitations Cycliques) a pour objectif développer et valider des méthodes de calcul et de dimensionnement des pieux soumis à des sollicitations cycliques axiales ou latérales. Il répond à une forte demande de la profession du Génie Civil qui se trouve de plus en plus confrontée à des problèmes de pathologie liés à l'application de chargées répétées sur les ouvrages, doit régulièrement proposer des concepts innovants de fondations pour des ouvrages nouveaux (éoliennes par exemple) mais se trouve démunie sur le plan réglementaire tant au niveau national qu'europpéen.

L'objectif est de réaliser un module de sollicitation cyclique pour le CPT. Il est exprimé un besoin de :

- réaliser un essai cyclique,
- être capable d'atteindre une profondeur (profondeur objective) de quelques mètres à quelques dizaines de mètres, en tout cas au-delà de dix mètres,
- réaliser un dispositif capable d'appliquer des sollicitations de l'ordre du Hz durant 1000 cycles avec une amplitude de 5 mm sous une charge de 100 daN.

Le fait de disposer d'un module indépendant insérable dans le train de tige offre plusieurs avantages, cela :

- diminue l'encombrement,
- ne nécessite de dimensionner que l'actionneur et non le capteur.

Les principaux inconvénients sont :

- la proximité de la zone de sol refoulé par la pointe et
- le diamètre utile faible.

1.2 Environnement d'utilisation

L'environnement d'utilisation du module sera le suivant :

1.2.1 Conditions en surface

L'attraction de la pesanteur est de 1 g avec une pression atmosphérique moyenne au sol de 1013 millibars (pression atmosphérique terrestre). L'atmosphère selon les mesures effectuées contient 78% d'azote, 21% d'oxygène, et 1% d'un mélange d'Argon, gaz carbonique, Néon, Hélium, Méthane, Krypton, Hydrogène et 1% de vapeur d'eau. La sub-surface présente des gradients de température faible de 8 à 10 °C en moyenne.

1.2.2 Conditions en profondeur

En surface, les sols rencontrés dans les sites d'emploi du module sont très variés : sols alluvionnaires, sols sédimentaires, roches altérées...

L'environnement d'utilisation du module sera :

- sols naturels sous les structures ou ouvrages linéaires,
- sols urbains sous des bâtiments inaccessibles,
- sols pollués de centre de stockage de déchets de différentes natures.

Ces sols sont donc des sols de proche surface et seront probablement non-saturés.

Les caractéristiques de résistance moyenne visées sont un angle de frottement interne de $30^\circ \pm 5$ et une cohésion de 10 kPa ± 10 . Le poids volumique des sols est d'environ 20 kN/m³, ce qui engendre sur la sonde un effort horizontal que l'on peut estimer à $\sigma'_h = K_o \cdot \gamma \cdot h = 2 \cdot 20 \cdot h = 40 \cdot h$ kPa (on admet un coefficient de poussée des terres défavorable de 2 dans les dix premiers mètres et 1 au-delà). Auquel, peuvent se rajouter les surcharges liées à un ouvrage sous lequel on veut explorer transmises par les fondations (on admet un facteur d'influence défavorable de 1) soit $\sigma'_h = K_o \cdot \gamma \cdot h + \Delta\sigma = 2 \cdot 20 \cdot h + 200 = 40 \cdot h + 200$ kPa.

On notera qu'à 20 mètres de profondeur, si la contrainte mineure est de $\sigma_3 (\cong \sigma'_h) = 1 \cdot 20 \cdot 20 (+ 200) = 400$ à 600 kPa alors $\tau_{max} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} = 417$ à 617 avec $\sigma_1 = \frac{\sigma_3 \cdot (1 + \sin \varphi) + 2 \cdot c \cdot \cos \varphi}{1 - \sin \varphi}$ (critère

de rupture de Coulomb). La contrainte de cisaillement τ_{max} pourrait être assimilée à une cohésion non drainée bien que cela ne soit pas mécaniquement correct.

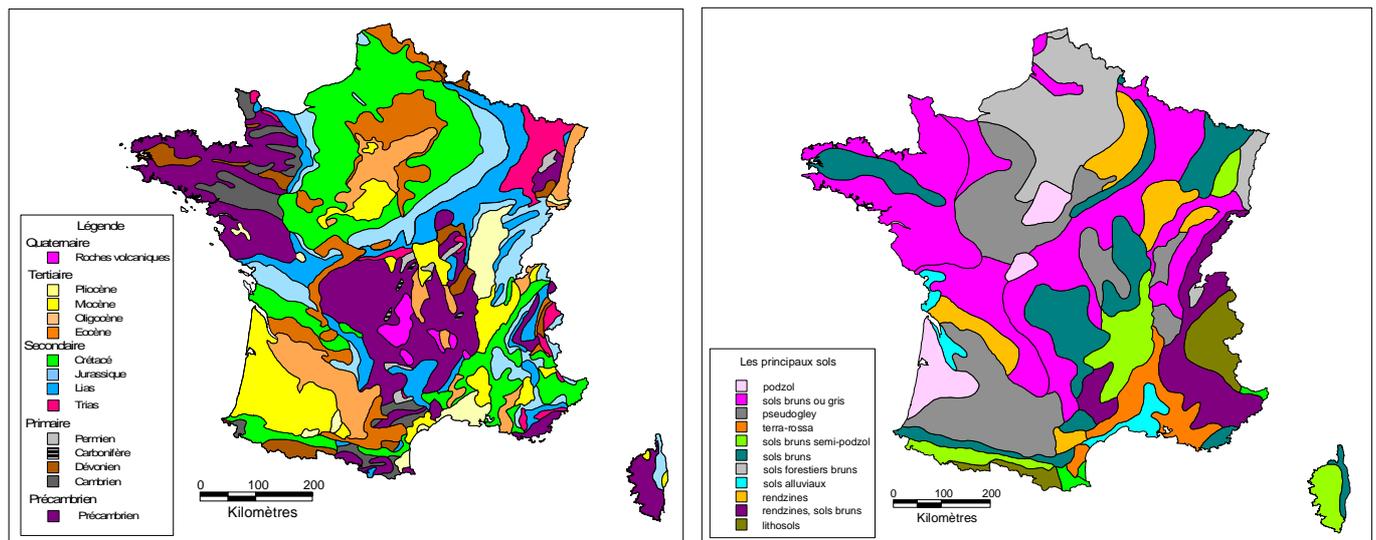


Figure 1 massifs géologiques de la France et carte pédologique

1.3 Proposition d'une fiche de développement

L'expression de ces besoins a abouti au dépôt en juillet 2008 par le LCPC d'une proposition d'un projet de développement intitulée « CPT-CYCL » par Ph. Reiffsteck dans le cadre de l'opération de recherche 11P071 « Fondams » pilotée par Alain Le Kouby.

1.4 Évaluation de la fiche

NA

1.5 Composition de l'équipe projet

Les participants pressentis sont :

Philippe Reiffsteck – LCPC MSRGI

A. Le Kouby – LCPC MSRGI

A. Puech – Fugro

S. Po – Fugro

J.-C. Dupla - CERMES

J. Canou - CERMES

M. Pioline - LRPC Rouen

T. Lewczuk - LRPC Rouen

2 BILAN DE L'EXISTANT

En complément de l'état de l'art dressé dans le PN, nous allons détailler les essais d'expansion cylindrique permettant d'accéder au comportement mécanique sous chargement statique ou cyclique, et en essayant de faire ressortir les innovations récentes.

2.1 Essai au pressiomètre Ménard

Le principe de l'essai pressiométrique Ménard consiste à introduire dans un trou de sondage à des profondeurs échelonnées, une cellule cylindrique déformable diamétralement, de diamètre correspondant à celui du trou de sondage et sans réaction élastique propre, que l'on gonfle à la demande et conformément à un programme « pression-temps » approprié, avec un fluide incompressible (NF P 94-110-1).

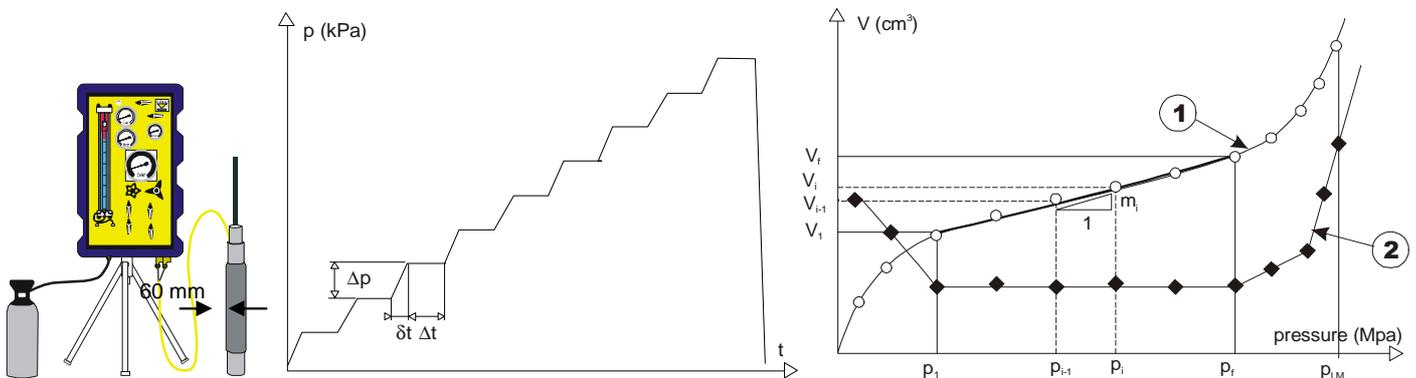


Figure 2 Pressiomètre Ménard, programme de chargement et courbe de résultat

Il s'agit ensuite de déterminer la relation entre la pression appliquée sur le sol et le déplacement de la paroi de la sonde (courbe 1 de la figure 5). Il permet d'obtenir le module pressiométrique E_M , la pression limite p_{LM} , la pression de fluage p_f et la pression de contact avec le terrain p_1 . La rupture de pente de la courbe de fluage donnant $V_{60}-V_{30}$ en fonction de p est utilisée pour définir p_f souvent assimilé à p_2 (courbe 2 de la figure 5). La pression maximale atteinte est appelée pression limite p_{LM} .

La pression p mesurée au CPV est augmentée progressivement par paliers de pression de pas constants Δp et voisins du dixième de la pression limite estimée. Il s'agit donc d'un essai piloté en pression.

Chaque pression est maintenue constante dans les cellules de mesure et de garde pendant $\Delta t=60$ secondes. A chaque palier, on visualise et on enregistre la pression appliquée et le volume injecté dans la sonde à 1, 15, 30 et 60 secondes.

L'essai peut être considéré comme terminé s'il comporte au moins huit paliers et si une des conditions suivantes est satisfaite :

- ◆ la pression p de 5 MPa est atteinte
- ◆ le volume de liquide injecté dans la cellule centrale est d'au moins 600 cm^3 pour les sondes standards (soit environ le doublement du volume V_s de la cavité initiale).

On veillera à ce qu'il y ait, pour les essais où la pression est $< 5 \text{ MPa}$,

- ◆ au moins trois paliers au-delà de la pression de fluage
- ◆ au moins quatre paliers avant cette pression de fluage.

Les résultats de mesure bruts sont corrigés de la résistance propre de la membrane, de la compressibilité du système et de la hauteur d'eau dans les tubulures. Pour faire ces trois corrections, on détermine :

- le volume initial V_s de la sonde

$$V_s = 0.25 \pi I_s d_i^2 - V_m$$

- V_m est l'ordonnée à l'origine de la tangente asymptotique,
- I_s est la longueur de la cellule centrale
- d_i est le diamètre intérieur du tube de calibrage

- Le coefficient a de compressibilité de l'appareillage - pente déduite de la courbe 1 de la figure 2-3

Finalement, la courbe corrigée est tracée à partir de :

$$p = p_r + p_h - p_e(V_r)$$

$$V = V_r - a.p_r$$

- p_r est la lecture sur le manomètre du CPV,
- p_h est la prise en compte de la hauteur de colonne d'eau,
- $p_e(V_r)$ est la relation obtenue lors de l'essai de résistance propre (courbe 2 de la figure 6).

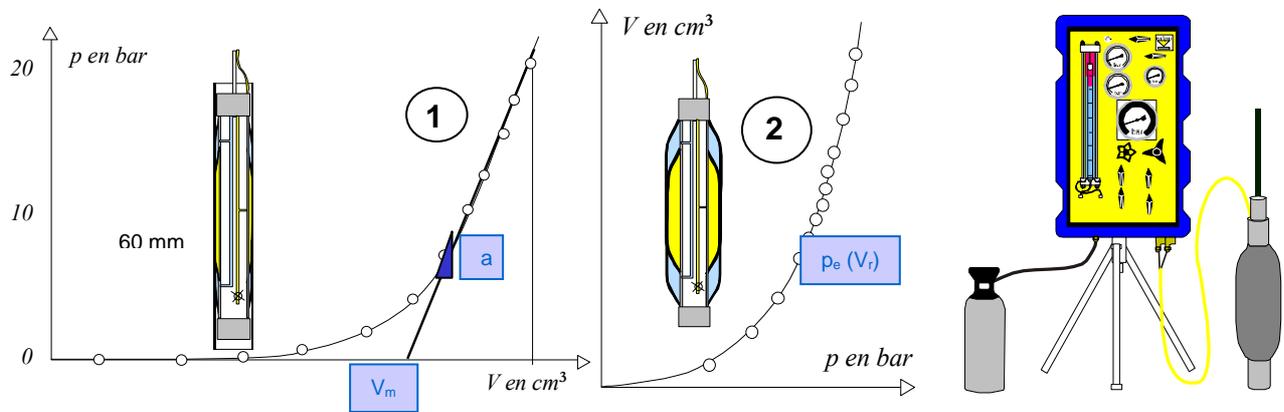


Figure 3 Essai de compressibilité du système dans un tube métallique et essai de résistance propre à l'air libre

Le module Ménard est calculé dans la plage pseudo-élastique par la formule suivante (courbe 1 de la figure 6) :

$$E_M = 2(1 + \nu) \left[V_s + \left(\frac{V_1 + V_2}{2} \right) \right] \frac{(p_2 - p_1)}{(V_2 - V_1)} \tag{1}$$

où ν est le coefficient de Poisson pris conventionnellement égal à 0,33 et V_s le volume initial de la sonde (V_s vaut environ 535 cm^3 pour une sonde de 60 mm). Il ne s'agit pas d'un module d'Young du sol. Le module Ménard E_M est donné en MPa.

L'essai pressiométrique Ménard peut être réalisé dans tous les types de sols saturés ou non, y compris dans les roches tendres (avec plus d'incertitude) et les remblais. La pression économique des années 80 a entraîné une certaine dérive dans la pratique de l'essai. C'est pourquoi, les principales évolutions apportées à cet essai sont la sauvegarde des essais sous format numérique et l'automatisation de l'essai.

2.2 Essai mono-cycle au pressiomètre

Avec le matériel d'essai pressiométrique Ménard il est possible de réaliser deux types d'essais cycliques :

- un cycle réalisé selon la norme NF P94-110-2, dans les mêmes conditions que l'essai pressiométrique Ménard objet de la norme NF P 94-110-1. Cet essai dans les conditions de forages préconisées par la 94-110-1 et avec le protocole de chargement proposé ne donne pas de résultats utilisables directement dans une étude comme des modules en petite déformation (Combarieu et Canépa, 2001),

Les essais pressiométriques avec boucle de déchargement-rechargement permettent de déterminer un module cyclique de déformation avec le matériel classique de l'essai pressiométrique Ménard. Les valeurs obtenues sont intermédiaires entre les modules en petites déformations et les modules Ménard traditionnels. Elles sont souvent utilisées pour calculer la déformation des ouvrages en adoptant un comportement élastique linéaire pour modéliser le sol.

Un article publié dans le Bulletin des laboratoires des Ponts et Chaussées (Combarieu et Canépa, 2001) présente les principaux résultats obtenus par les LPC pour mettre au point le mode opératoire ainsi que pour tester la répétitivité des mesures de modules cycliques avec le matériel d'essai traditionnel. Les influences du mode de forage et de la procédure de réalisation du cycle sur les résultats obtenus ont ainsi été examinées. La répétitivité des mesures a été étudiée dans différentes formations (sable, argile, limon, craie) et les dispersions et les rapports caractéristiques obtenus dans ces terrains sont donnés dans cet article.

La justification des modules cycliques ainsi mesurés a enfin été étudiée en confrontant les pressions limites pressiométriques obtenues sur un sol purement frottant et différentes argiles, avec les pressions limites théoriques d'expansion de cavité calculées en utilisant comme module d'Young ce module cyclique.

On retiendra en conclusion que la procédure d'essai préconisée avec le matériel d'essais traditionnel permet d'obtenir des modules cycliques fiables complétant la panoplie des paramètres géotechniques susceptibles d'être directement utilisés pour le calcul en déplacement de certaines structures géotechniques.

2.3 Essai multi-cycle au pressiomètre

2.3.1 Essais type LRPC Saint Brieuc

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).

La technologie était basée sur un contrôleur pression volume à déformation contrôlée mettant en œuvre un moteur à courant continu et une vis à billes.

Trois types d'essais furent réalisés :

- des essais de chargement cyclique entre deux bornes de pression p_M et p_m (Figure 4a),
- des essais de chargement entre deux bornes de pression p_{M1} et p_{M2} , supérieure à la pression naturelle des terre au repos et estimée à partir de la pression de rupture (40 et 60 % par exemple) (Figure 4c),

- des essais de chargement entre deux bornes de pression variables, dont la moyenne est cependant constante (ces essais sont dits de type tempête) (Figure 4d).
 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.

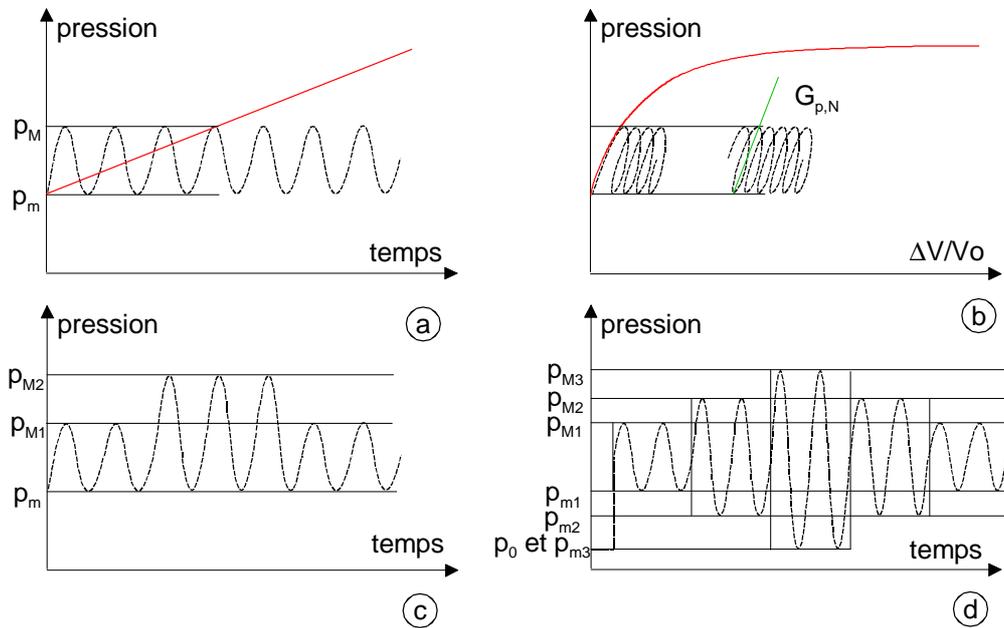


Figure 4 Différents types d'essais cycliques

Le mode d'interprétation était plus basé sur l'évolution de l'aire caractéristique des boucles de chargement déchargement ainsi que du module sécant des boucles d'hystérésis (Figure 4b).

Voir acte du Symposium de 1982 et archives de l'Association pour la Recherche en Géotechnique Marine et biblio PN pour compléter

2.3.2 Essais type ENPC

Les différents éléments de ce paragraphe sont tirés de la thèse de Dupla (1995), dont l'objectif était de proposer une nouvelle méthode d'évaluation du risque de liquéfaction d'un massif sableux à partir de la sollicitation pressiométrique cyclique.

La méthode proposée est basée sur des corrélations entre les résultats obtenus lors d'un essai pressiométrique cyclique et ceux obtenus lors d'un essai triaxial non drainé cyclique. La méthode a été validée uniquement sur des essais de laboratoire (cylindre épais et mini pressiomètre en chambre d'étalonnage). La validation in situ nécessite des développements/modifications de dispositifs classiques (pressiomètre Ménard) ou récents (PAF 2000). Ce document a pour objectif de mettre en avant les points délicats qu'il sera important de respecter pour atteindre l'objectif.

2.3.2.a Définition des paramètres de l'essai pressiométrique cyclique

On définit avant tout les paramètres de base du problème :

Rapport de sollicitation cyclique ($R_c = \frac{\Delta p_{cyc}}{p_{cav,i}}$; voir Figure 5)

Caractère alterné ou non des cycles (Figure 5).

Fréquence du signal (F).

Les paramètres de la sollicitation cyclique sont définis sur la Figure 5.

La Figure 6 présente un résultat typique. Dans ce cas particulier, la sollicitation est non alternée. On observe une accumulation rapide de la déformation volumique de cavité qui tend à se stabiliser avec le nombre de cycles. Il se produit le phénomène inverse en termes de déformation volumique de l'éprouvette. Les deux courbes ont des allures semblables. Par contre, l'ordre de grandeur entre les deux déformations est dans un rapport de 100, ce qui correspond au rapport initial entre les volumes respectifs de l'éprouvette et de la cavité. Cette observation indique que l'accumulation de la déformation volumique de la cavité est une bonne approximation de la déformation volumique irréversible du sol autour de la cavité.

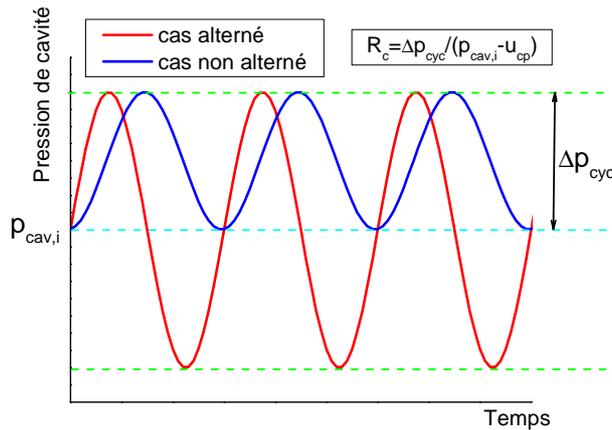


Figure 5 Définition des paramètres de la sollicitation cyclique

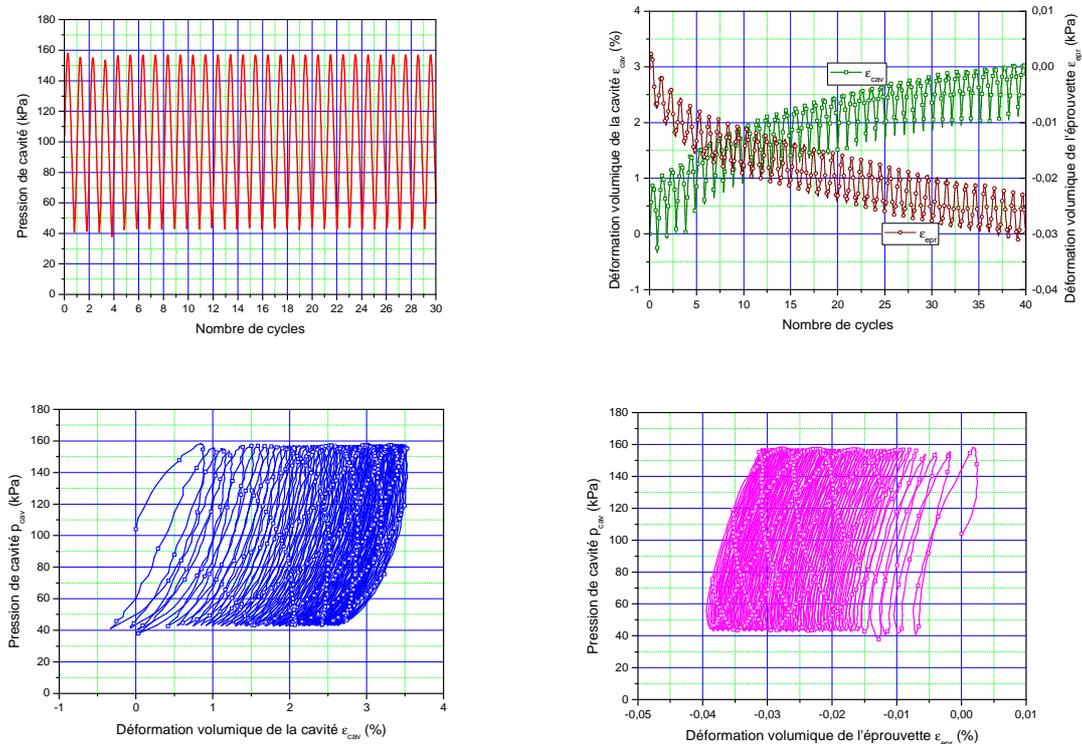


Figure 6 Résultat typique d'un essai cyclique drainé

Une méthode plus simple pour représenter les résultats d'un essai cyclique drainé au cylindre épais est de tracer uniquement les courbes d'accumulation, en prenant en compte les états résiduels à chaque fin de cycle (Figure 7). Les courbes ainsi obtenues rendent compte de l'accumulation de la déformation irréversible au cours de l'essai. Dorénavant, toutes les courbes d'évolution de la déformation volumique seront représentées de cette manière.

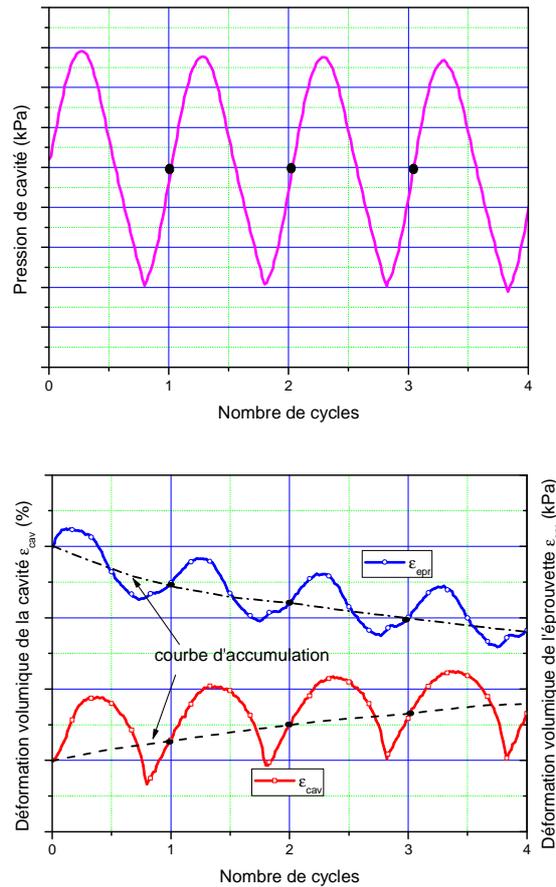


Figure 7 Courbes d'accumulation des déformations volumiques de la cavité et de l'éprouvette

On s'intéresse dans la suite uniquement à la déformation volumique de la cavité, car c'est celle qui est effectivement mesurable lors d'un essai pressiométrique in situ. Un exemple de courbes est présenté sur la Figure 8.

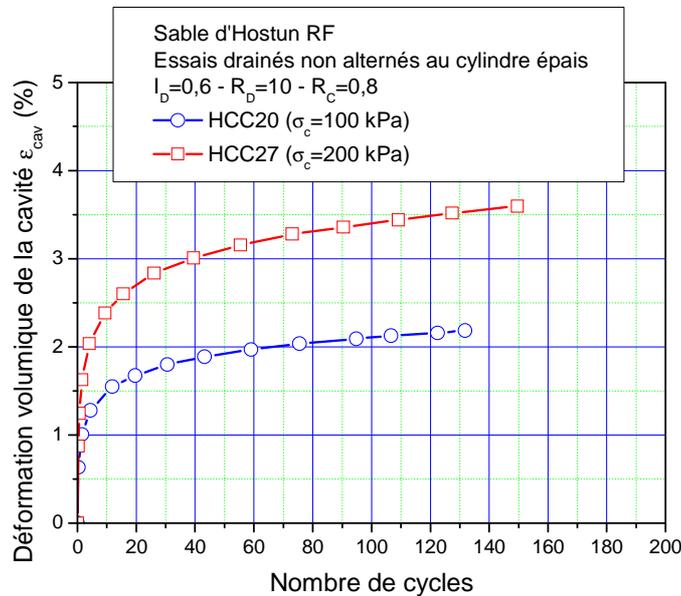


Figure 8 Influence du niveau de consolidation sur l'accroissement du volume de la cavité

2.3.2.b La méthode proposée

La méthode proposée est basée sur les fortes analogies existant entre l'accumulation des déformations volumiques dans l'essai d'expansion de cavité drainé et l'accumulation des surpressions interstitielles dans l'essai triaxial non drainé, avec des influences similaires de

paramètres de base tels que l'indice de densité, le niveau de consolidation et l'amplitude de la sollicitation. L'idée est donc de corrélérer un paramètre représentatif mesuré lors de l'essai d'expansion à un paramètre typique mesuré dans l'essai triaxial de liquéfaction.

En ce qui concerne l'essai d'expansion, on se fixe un essai type, qui soit représentatif et exploitable quelles que soient les conditions initiales du matériau. A partir d'un état initial caractérisé par un niveau de consolidation p'_0 , on choisit un rapport de chargement cyclique p_{cav}/p'_0 de 0,80, représentatif quelle que soit la densité initiale du sable. On réalise des cycles non alternés, qui sont plus faciles à mettre en œuvre dans la pratique que des cycles alternés et on choisit un nombre représentatif de cycles, soit 50 cycles, qui permettent d'obtenir une partie importante des déformations de la cavité. On détermine alors la déformation volumique cumulée de la cavité au bout des 50 cycles. Cette déformation doit être normalisée par rapport à p'_0 . On corrèle ensuite cette grandeur avec un paramètre caractéristique de l'essai triaxial cyclique non drainé, en l'occurrence le nombre de cycles nécessaire pour atteindre la liquéfaction pour un taux de cisaillement cyclique τ_{cyc}/σ'_c donné.

La méthode proposée repose sur l'hypothèse d'une relation raisonnablement unique entre la grandeur pressiométrique et la grandeur triaxiale correspondante pour une gamme importante de sables (par exemple, les sables siliceux). Pour une autre gamme de sables, une autre relation pourra prévaloir. La Figure 9 illustre le type de corrélation obtenue entre la grandeur pressiométrique et la grandeur triaxiale, ceci pour trois valeurs représentatives du taux de cisaillement cyclique utilisées dans l'essai triaxial.

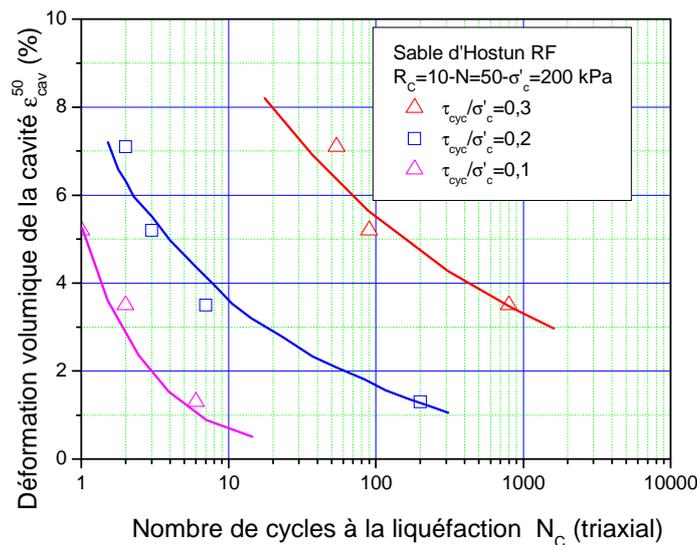


Figure 9 Évaluation du nombre de cycles

2.3.2.c Le cahier des charges de l'essai pressiométrique cyclique in situ

Les paramètres retenus pour les essais découlent de la méthode proposée (cf. ci avant) :

- Essai cyclique
- Essai à pression contrôlé
- Essai drainé (adaptation de la fréquence au type de sol)
- Essai non alterné
- Niveau de sollicitation : 0,8 ($R_c = \frac{\Delta p_{cyc}}{p_{cav,i}}$)
- Fréquence : 0,01 à 0,05 Hz
- Nombre de cycles : 50

Il faut respecter trois points :

Le premier concerne la précision de la mesure de la variation de volume de la sonde. Comme on peut le voir sur la Figure 9, le niveau de déformation volumique de la cavité (=sonde) varie entre 1 et 8 % après 50 cycles. En simplifiant, sur un cycle on a environ 1/50 de la déformation totale (ce n'est pas vrai, car l'évolution est parabolique). Mais il faut également être capable de mesurer l'évolution sur un cycle, ce qu'on peut estimer à 1/10 de la déformation sur un cycle. Si on prend le cas le plus défavorable (1%), on obtient sur un cycle :

$$\Delta V_{cav} = 1/10 \times 1/50 \times 1/100 V_{cav,0}$$

Dans le cas d'un pressiomètre Ménard, le volume initial de la sonde est de l'ordre de 535 cm³, ce qui implique qu'on doit être capable de mesurer environ 0,01 cm³. Cette valeur est un optimum, à défaut 0,1 cm³ serait la valeur minimale de la précision à atteindre sur la mesure de la variation de volume de la sonde.

En ce qui concerne le pilotage de la pression de la sonde, on doit être capable d'atteindre une précision de l'ordre du kPa. En effet, si on considère une plage de variation de $p_{cav, i}$ entre 50 et 500 kPa, on obtient une amplitude de sollicitation ΔP_{cav} variant de 40 à 400 kPa ($R_c=0,8$). En considérant, comme pour la variation de volume de la sonde, qu'un rapport de 1/10 entre l'amplitude du cycle et la précision de la mesure est nécessaire, on obtient 4 kPa.

Finalement, il faut également un système d'acquisition pouvant mesurer et stocker les données (pression et volume) en temps réel à une fréquence correspondant à 30 fois celle de la sollicitation ($30 \times 0,05 = 1,5$ Hz) .

Voir Thèse Dupla et biblio PN pour compléter

3 SPÉCIFICATIONS TECHNIQUES DES BESOINS

Cette partie du développement a été réalisée en interne chez le fournisseur à partir des critères imposés par la méthodologie proposée par Jean-Claude Dupla du CERMES (Dupla, 2009) :

- Mesure de la pression au kPa
- Mesure du volume à $0,01 \text{ cm}^3$
- Asservissement cyclique à pression contrôlée (sinus)
- Fréquence de sollicitation 0,01 à 0,05 Hz
- Fréquence d'acquisition maximale 1,5 Hz

La mesure de la variation de volume en fonction des cycles se faisant soit par mesure du volume d'eau injecté soit par mesure du déplacement d'un palpeur (Figure 10).

L'idée étant de pouvoir réaliser des essais avec une sonde pressiométrique mise en œuvre par autoforage ou dans un préforage de type Ménard.

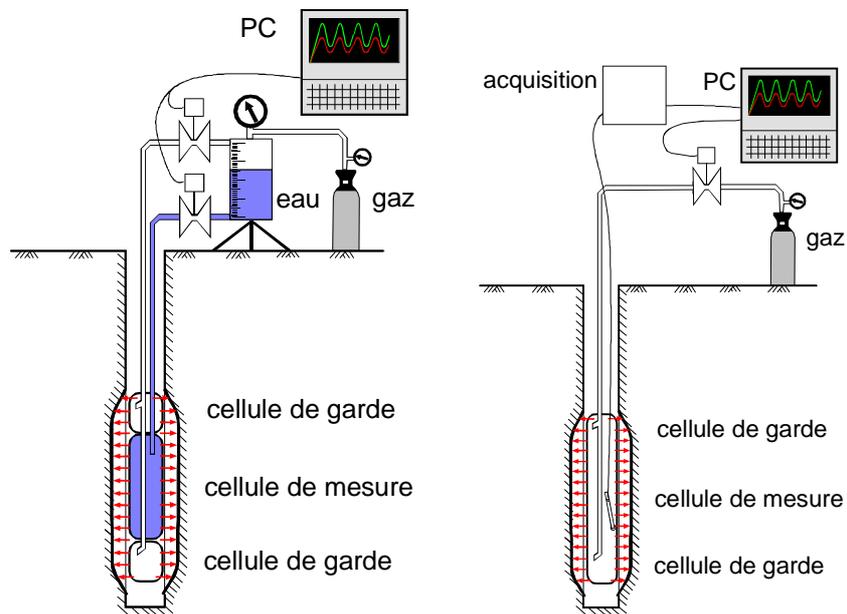


Figure 10 Architectures envisagées

4 RÉALISATION DU MATÉRIEL

4.1 Construction du matériel

Lors de la mise au point du cahier des charges dans le cadre du PN Solcyp il fut décidé de demander à différents fournisseurs de matériels des propositions pour un CPV cyclique. Quatre fournisseurs furent sollicités et la proposition par l'entreprise Jean Lutz SA d'un CPV capable par commande des électrovannes, par un PC fut retenue.

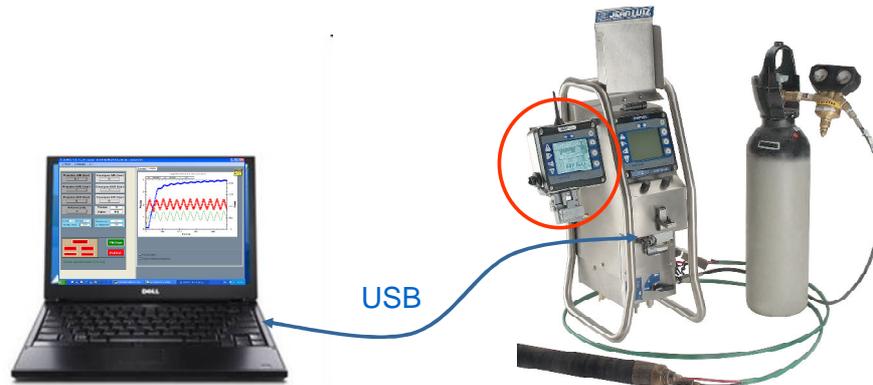


Figure 11 Architecture retenue

Le fournisseur avait réalisé des essais en usine avec une sonde placée dans un obturateur de forage.

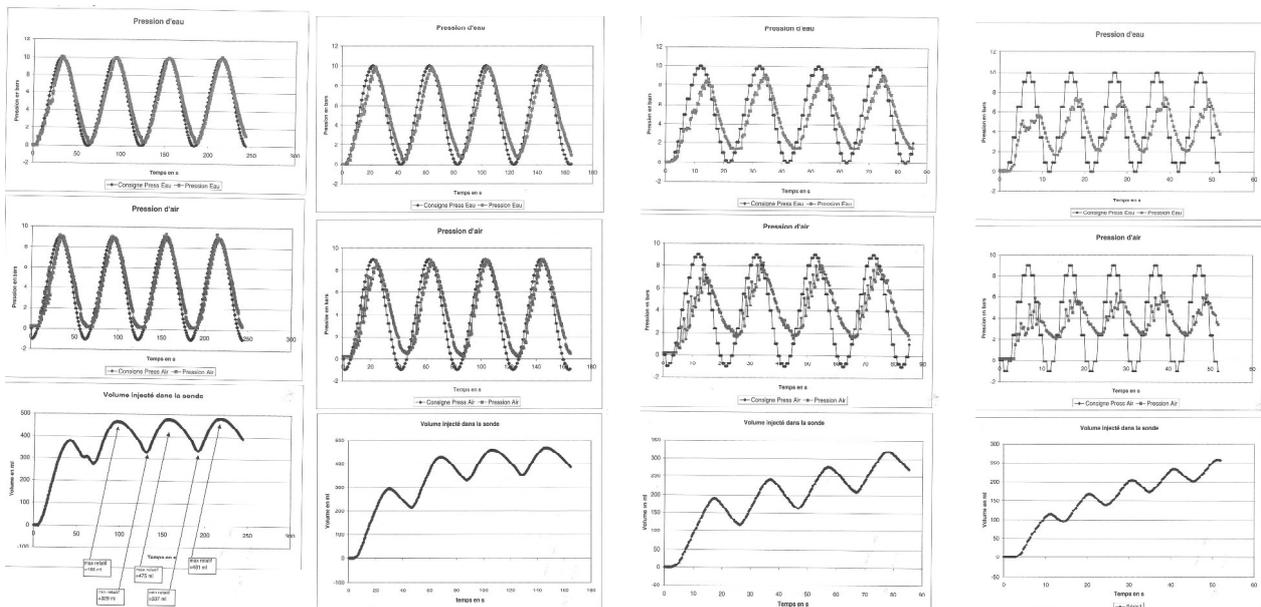


Figure 12 Résultats des essais usines réalisés par Jean Lutz SA

L'asservissement ayant été jugé de bonne qualité, la commande de l'appareil a été passée.

4.2 Architecture du programme de pilotage

Le programme fourni par le fabricant est dérivé du programme de test et d'étalonnage du PREVO.

Le programme comporte 4 écrans :

- STOP permettant de piloter le CPV en un mode quasi manuel

- PREVO : réalisant le pilotage par palier selon un mode opératoire Ménard du CPV
- Etalonnage : permettant de faire les mises à l'échelle
- Pilotage : permettant le pilotage à partir d'un fichier de consigne

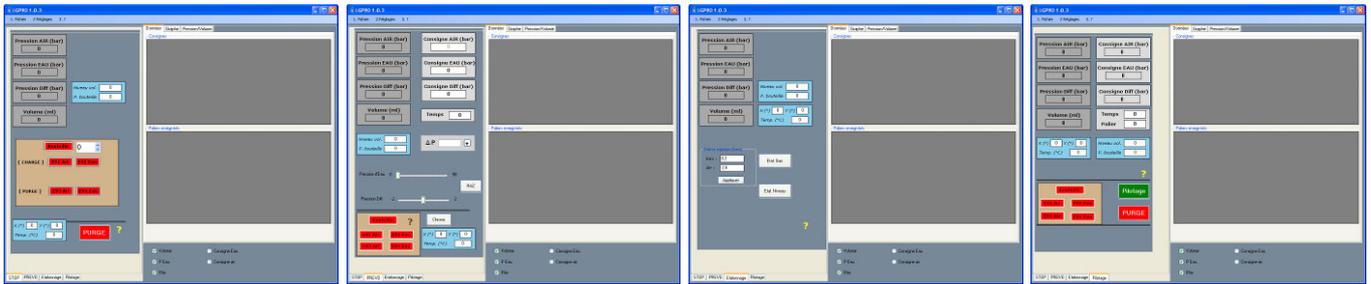


Figure 13 Capture des écrans du programme de pilotage

Après les différentes opérations manuelles réalisées soit directement sur le CPV soit à l'aide des premiers écrans, on peut passer au mode pilotage. On ouvre à l'aide du programme le fichier d'essai puis les robinets ouverts correctement, on peut lancer l'essai. Le suivi se fait sur l'onglet graphique.

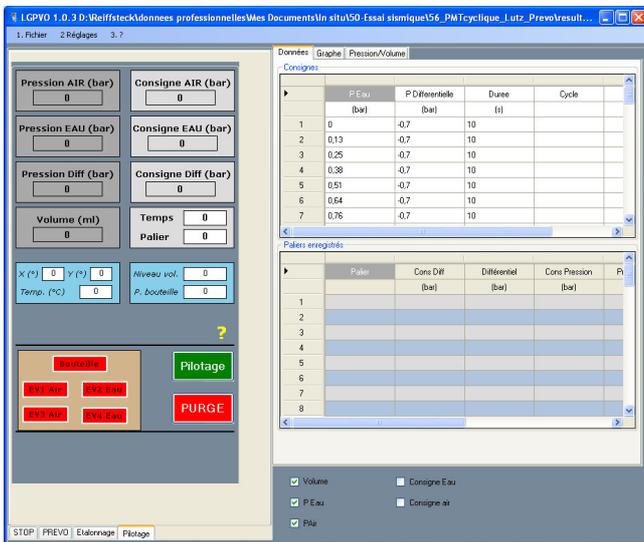


Figure 14 Influence du niveau de consolidation sur l'accroissement du volume de la cavité

La structure du fichier de consigne est la suivante : après des lignes d'entête suivent 3 colonnes donnant les consignes de pression d'eau, de pression différentielle et de durée palier. Dans une quatrième colonne, on place le chiffre 1 afin de démarrer les cycles.

«
Essais d'etalonnage
Site de Gosier
Suivent 3 colonnes : Peau, Pdifférentielle et durée palier

P Eau (bar)	P Différentielle (bar)	Duree	Cycle (s)
0	-1		1
0,005043826	-1		1
0,02002205	-1		1
0,044479566	-1		1
0,077673245	-1		1
0,118594514	-1		1
0,166	-1		1
0,218449312	-1		1
0,274348805	-1		1
0,332	-1		1
....

La structure du fichier résultat est la suivante : après des lignes d'entête

«

EXPRS 1.21

C:\datapr\GOSIER1PMT.xprs

Sondage	Chantier	Contrat	Profondeur
1	N	GOSIER1PMT	1,50

IDEssai	TypeEssai	Chantier	Contrat	Profondeur	Date début	Date fin
4198_150	Etalonnage	GOSIER1PMT		1,00	15/02/2010 17:18:06	15/02/2010 17:31:07
Sonde	Di	Is	CPV	Enregistreur	VersionEnrg	
GS	58	210	BAP.	BP6	EPF428FR	
Palier	Heure	Marque	PAir	PEau	PDiff	VL
1	17:18:01	1	0,01	0	0,01	5,00
1	17:18:01	15	0,01	0	0,01	5,00
1	17:18:01	30	0,01	0	0,01	5,00
1	17:18:01	60	0,01	0	0,01	5,00
2	17:19:29	1	0,01	0,01	0	5,00
2	17:19:29	15	0,01	0	0,01	6,00
....	

»

5 TEST DU MATÉRIEL

5.1 Essais usine

Après réception du matériel, quelques essais ont été réalisés au LCPC pour l'adapter au programme d'essais envisagé.

Quelques petites difficultés ont été constatées à n'asservir que l'air, du fait de :

- l'interaction avec le circuit d'eau,
- problème de gain à la purge,

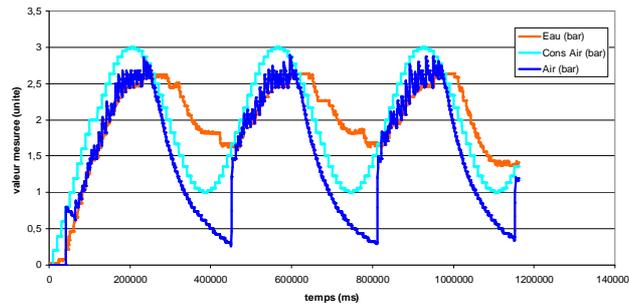


Figure 15 Suivi des consignes de pression d'air sans sonde

Ceci a été résolu en jouant que les paramètres pilotant la fermeture des électrovannes.

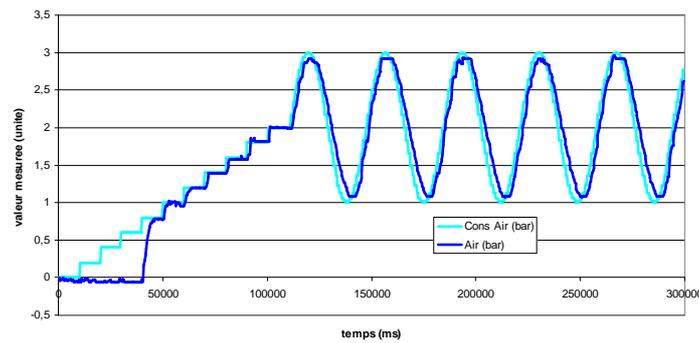
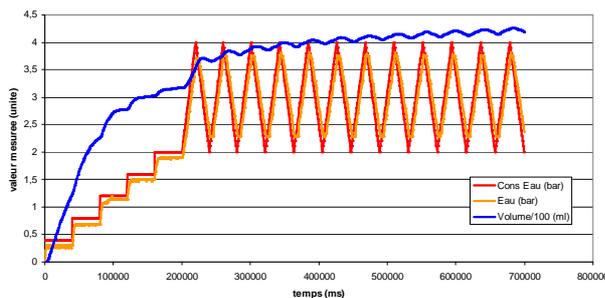


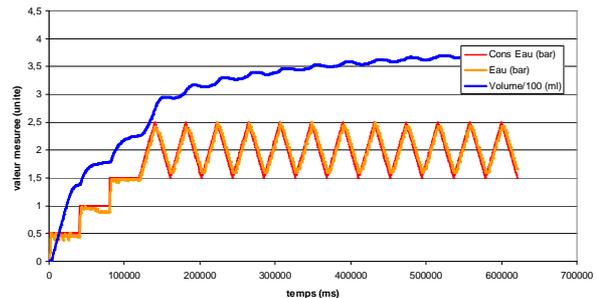
Figure 16 Suivi des consignes de pression d'air sans sonde

5.2 Essai sur site modèle

Une expérimentation a été effectuée avec la présence du fournisseur sur un remblai expérimental de Rouen pour tester en conditions réelles le matériel (Figure 17 a pour le sable et b pour le limon).



a)



b)

Figure 17 Essais préliminaires : programme de chargement

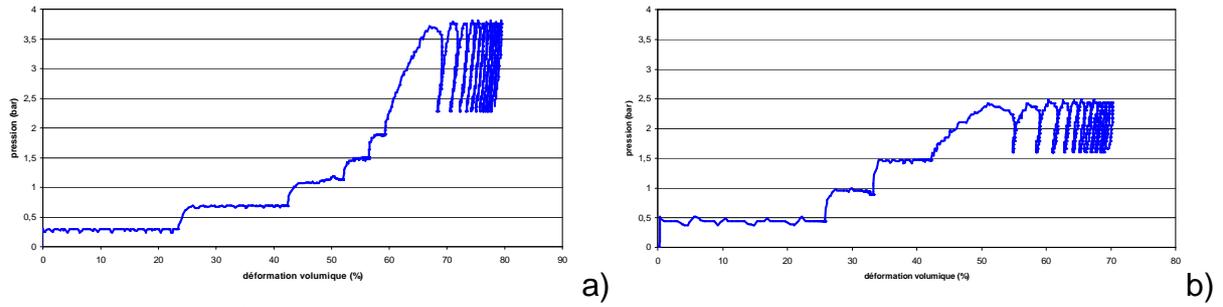


Figure 18 Essais préliminaires : accumulation de déformation volumique

Les essais ont été faits avec les réglages suivants :

- Essais 1 Gain double 2 Gain simple 2 Gain vidage 2,2
- Essai 2 Gain double 4 Gain simple 4 Gain vidage 4

On a conclu, suite à cette expérimentation, que le dispositif d’asservissement était opérationnel.

5.3 Essais en conditions de chantier

L’opportunité de tester le matériel sur un site fortement instrumenté et bien documenté s’est présentée dans le cadre du projet ANR Belle Plaine. Ce projet a utilisé le site de Gosier en Guadeloupe pour installer un ensemble d’instrumentation sur une zone potentiellement liquéfiable.

5.3.1 Site de Gosier

Le site est situé dans l’emprise d’une station d’épuration localisée dans la commune de Gosier.



Figure 19 Localisation du site



Figure 20 Implantation du site expérimental

Une campagne préliminaire d'essais au piézocône a été menée par l'université Joseph Fourier.

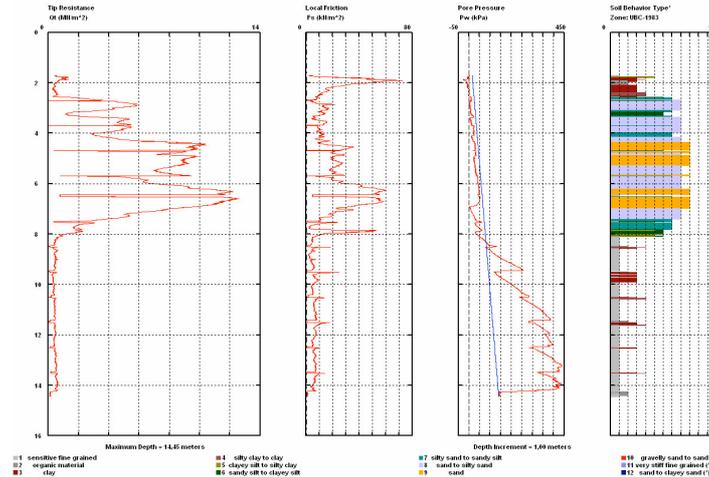


Figure 21 Profil piézocône réalisé par l'université de Grenoble

L'implantation des essais réalisés est à proximité immédiate de cette instrumentation.



Figure 22 Implantation du chantier avec les instrumentations du projet Belle Plaine en premier plan

Le déroulement de la campagne a été le suivant (M pour protocole Ménard et C pour cyclique) :

Date	Sonde	M/C	Type gaine	Profondeur (m)	Nappe (m)	Remarque
15/02/10	M	MM0	Souple	1,5	1	Essais préliminaires
16/02/10	M	MM1	Souple puis renforcé puis avec lamelles	1,5 à 12,5 (tous les m)	1	Percement des membranes souples et souples renforcées
17/02/10	M	MC1	Souple avec lamelles	4,5 à 10,5 (tous les m)	1	Problème de pilotage de l'essai
18/02/10	M	MC2	Souple avec lamelles	4,5 à 10,5 (tous les m)	1	
19/02/10	A	AC1	-	3,5	1	Impossible d'introduire la sonde
19/02/10	M	MC3	Souple avec lamelles	7,5 - 8,5 et 9,5 m	1	Poursuite dans le même forage

5.3.2 Étalonnage et calibrage statique

Les matériels ont fait l'objet d'étalonnage et calibrage sur site avant et après essais.

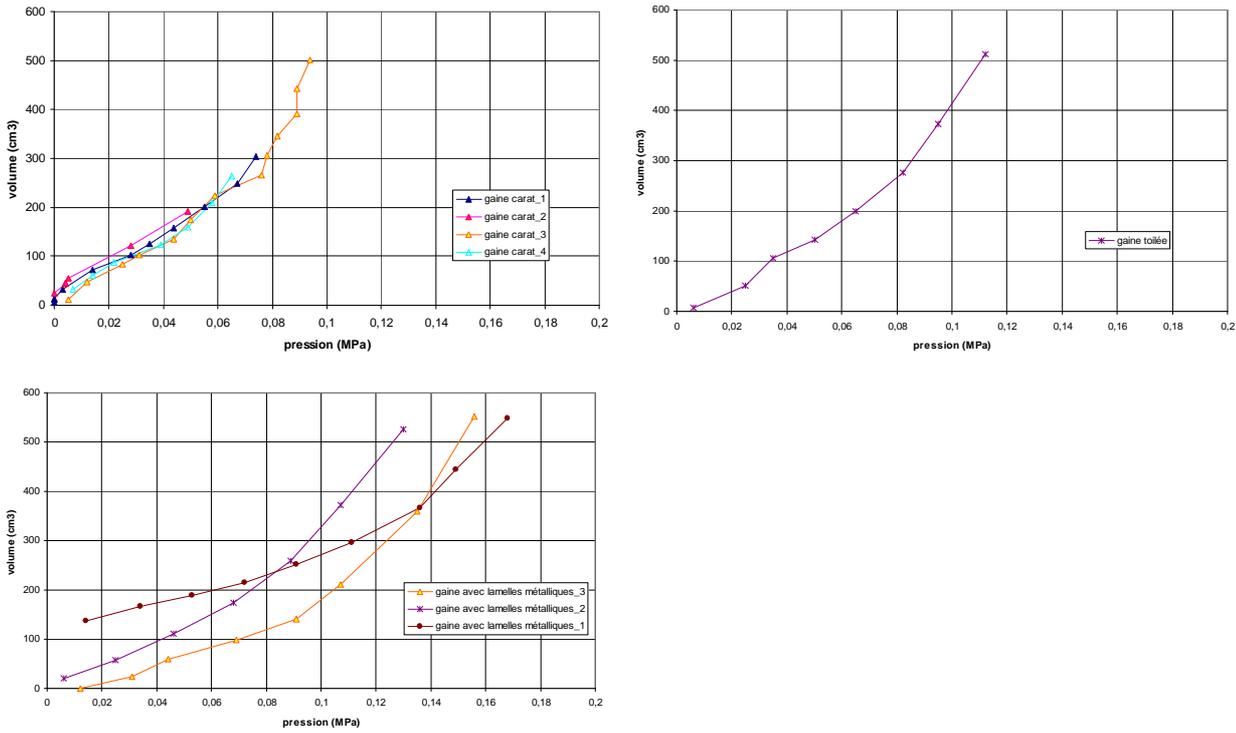


Figure 23 Inertie de la sonde (gaine carat, toilée et lamelles métalliques)

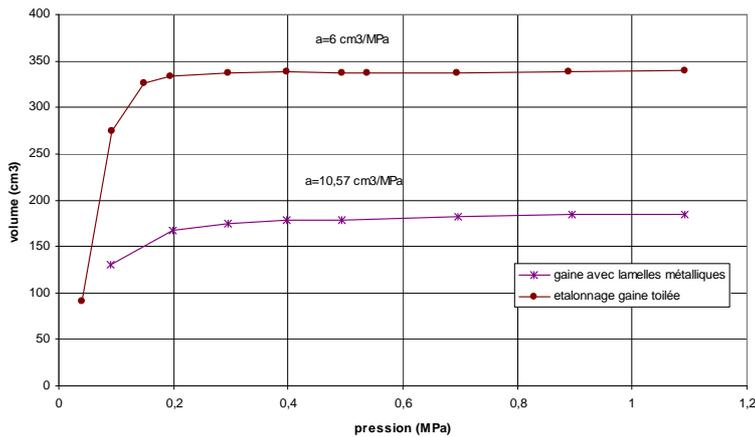


Figure 24 Inertie de la sonde

5.3.3 Essais pressiométriques Ménard (par paliers)

Pour ces essais, les forages ont été réalisés à la tarière à main avec pompe à bentonite sur toute hauteur.

On a été confronté à un percement des membranes très fines (dites carat) par les coquillages. Les gaines toilées utilisées en remplacement ont également été percées. Finalement, une gaine avec lamelle métallique a été utilisée.



Figure 25 type de gaine carat, souple toilée, lamelles métalliques

Le profil suivant a pu être dressé et a servi de base à la construction du programme d’essais cycliques.

z (m)	pl	Remarque
1,5	1,5	Tourbe (mangrove enfouie sous le remblai)
2,5	> 5,6	percement membrane – gaine carat
3,5	> 4,7	Percement membrane – gaine toilée
4,5	8,0	
5,5	8,6	
6,5	> 9,0	Problème bouteille NO ₂
7,5	3,7	Couche plus molle
8,5	3,7	
9,5	3,4	
10,5	3,9	
11,5	4,0	
12,5	4,1	

5.3.4 Étalonnage cyclique

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.

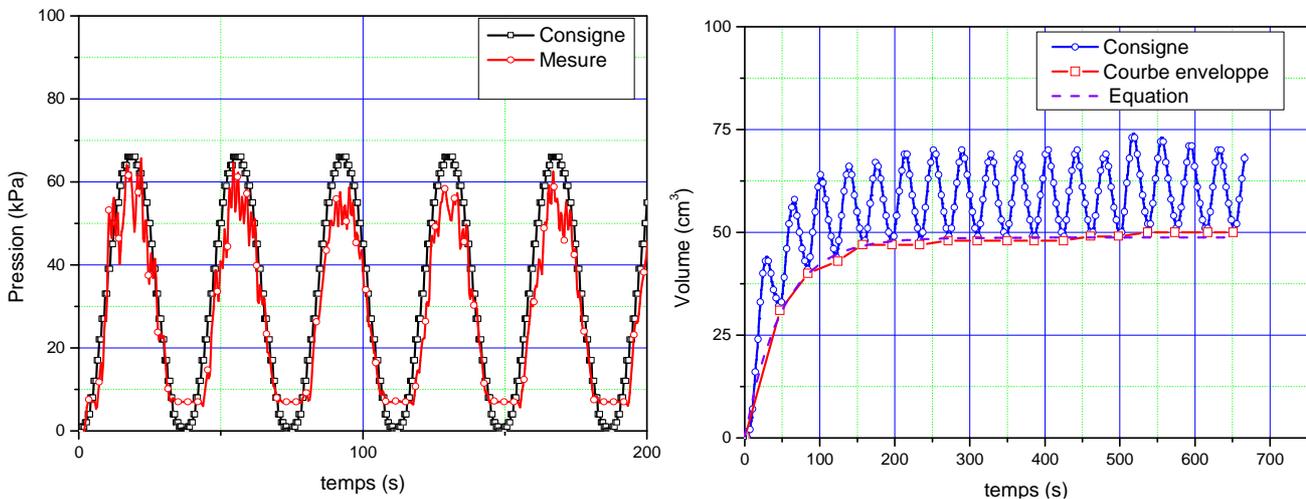


Figure 26 Inertie de la sonde

On observe une stabilisation vers 50 cm³. Comme visible sur la Figure 26a l'asservissement est réalisé à une fréquence de l'ordre de 100 Hz.

5.3.5 Essais cycliques avec sonde Ménard

Le forage des trous pour la réalisation des essais d'expansion par palier de type Ménard s'étant déroulé sans encombre, les forages pour la réalisation des essais cycliques ont été réalisés à la tarière à main avec pompe à bentonite sur toute hauteur.

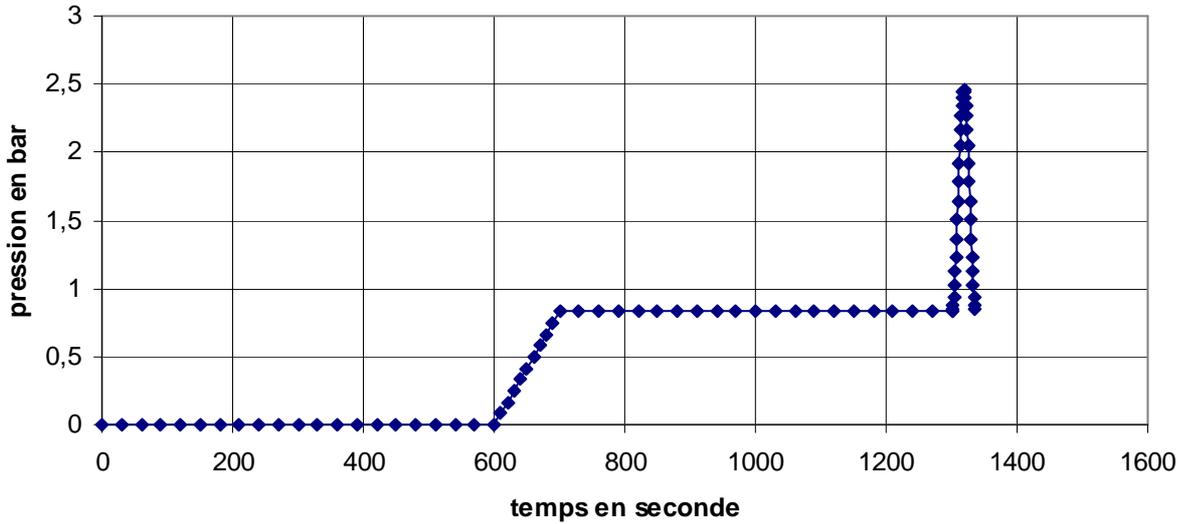


Figure 27 Programme de chargement

Les programmes d'essai étaient les suivants :

série	profondeur	Temps relaxation	p _{dif}	p _m =p ₀	Temps de montée en 10 paliers	Temps d'attente	p _M =p ₀ +0,6 p ₀
MC1	4	0	-0,7	1,27	100 s	2	3,302
MC1	5	0	-0,6	0,83	100 s	2	2,158
MC1	6	0	-0,5	0,83	100 s	2	2,158
MC1	7	0	-0,4	0,83	100 s	2	2,158
MC1	8	0	-0,3	0,83	100 s	2	2,158
MC1	9	0	-0,2	0,83	100 s	2	2,158
MC1	10	0	-0,1	0,83	100 s	2	2,158
MC1	11	0	0	0,83	100 s	2	2,158
MC2	4	0	-0,65	1,27	100 s	2	2,686
MC2	5	0	-0,55	0,83	100 s	2	1,974
MC2	6	10	-0,45	0,83	100 s	5	2,054
MC2	7	10	-0,35	0,83	100 s	10	2,134
MC2	8	10	-0,25	0,83	100 s	10	2,214
MC2	9	10	-0,15	0,83	100 s	10	2,294
MC2	10	10	-0,05	0,83	100 s	10	2,374
MC3	7,5	10	-0,35	0,83	100 s	10	2,134
MC3	8,5	10	-0,25	0,83	100 s	10	2,214

Dans les essais MC2, la valeur de p_M a été corrigée pour prendre en compte la présence de la nappe.

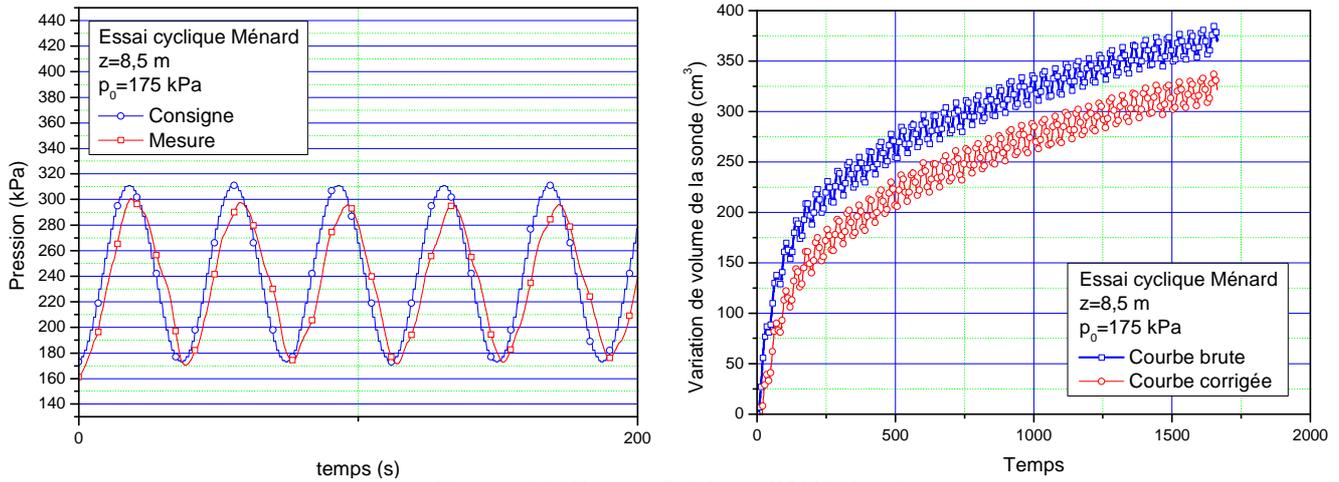


Figure 28 Essais à 8,5 m dV/V0 de 56 %

La figure 24 montre, pour un exemple sur 4 essais de la série MC2, la tendance à la stabilisation de quasiment tous les essais, même si celle-ci n'a jamais été atteinte.

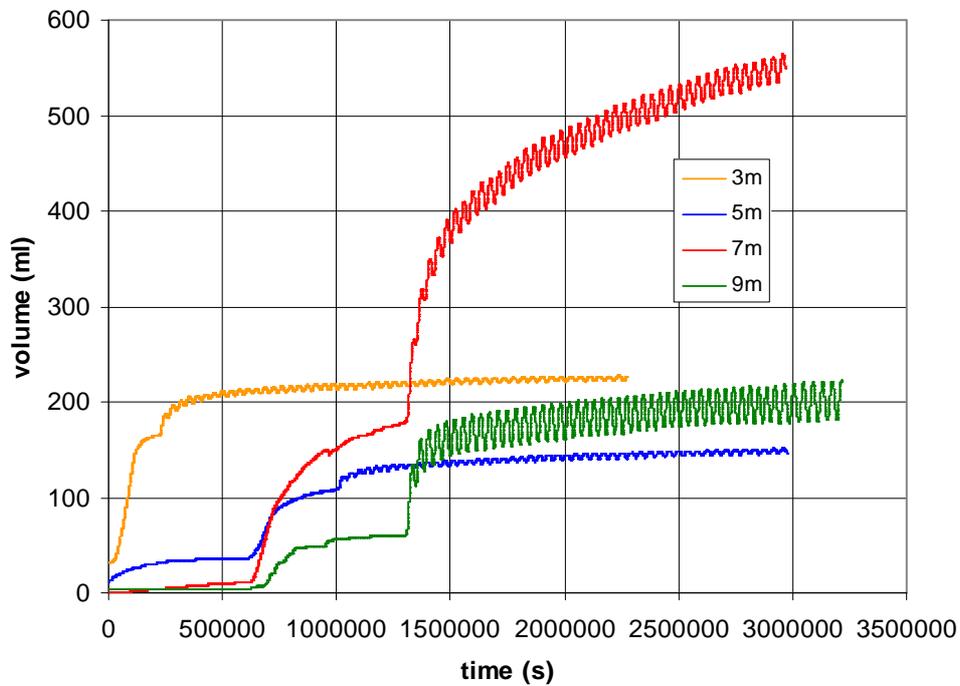


Figure 29 Influence du niveau de consolidation sur l'accroissement du volume de la cavité

La Figure 30 présente un graphique plus classique représentant en abscisse la déformation volumique obtenue et en ordonnée la pression imposée.

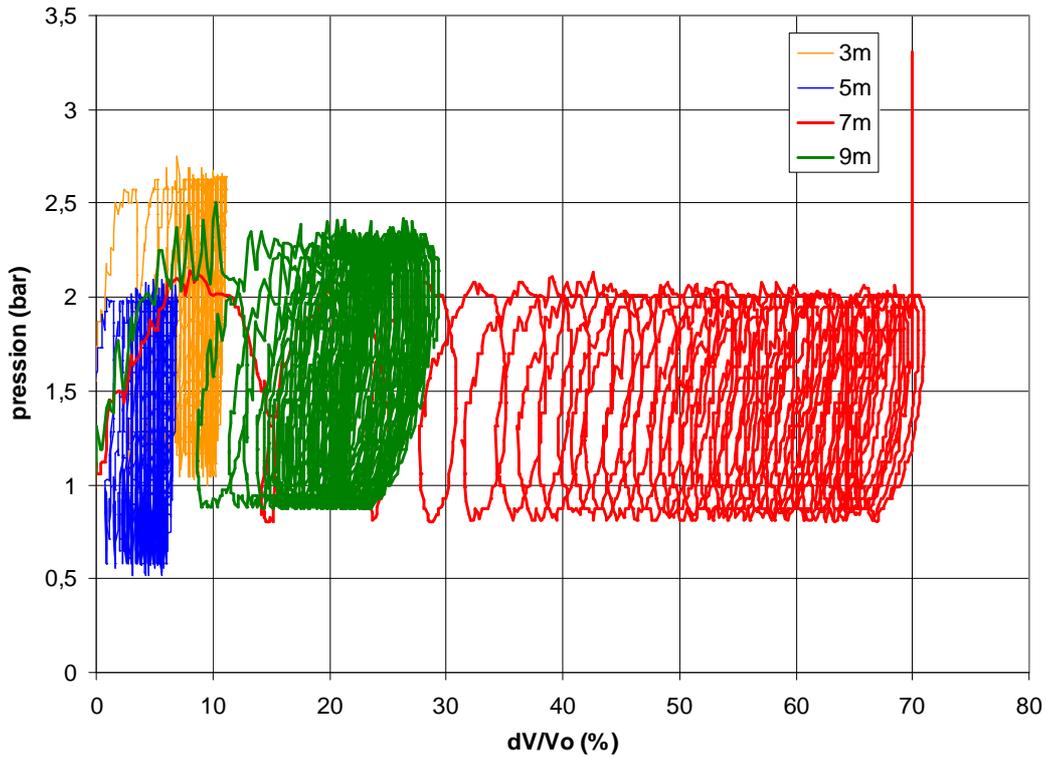


Figure 30 Forme des boucles de chargement

Le signal obtenu représenté sur la Figure 30 est plus bruité que celui donné dans les articles de Jézéquel et Le Méhauté (1982) car :

- les courbes étaient tracées par un dessinateur et tous les points n'étaient pas représentés,
- l'asservissement par contrôleur pression volume à vis à bille était sans doute beaucoup plus lent.

Apparemment, l'essai à la profondeur 7,5 m (essai à 8,5 m recalé car la tête de forage est environ 1 m sous le niveau du sol pris pour référence lors des essais au piézocône) montre une accumulation importante de déformation volumique.

z (m)	Dv/V0 (%)
4,5	3
5,5	1
6,5	1
7,5	5
8,5	56
9,5	23

Les résultats semblent « valider » la méthode (couche à 8,5 m).

Suite à l'échec de l'autoforage, des essais de répétabilité notés MC3 ont été effectués dans le même forage.

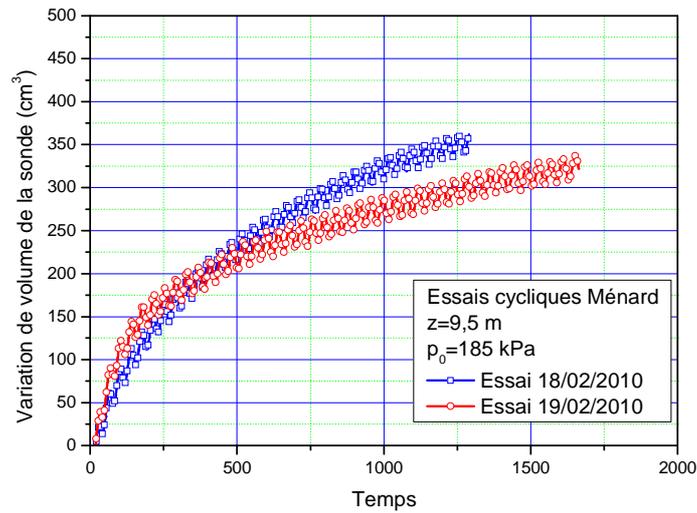


Figure 31 Répétabilité

L'assez bonne répétabilité de l'essai permet de conclure à la validation de la méthode d'essai et du matériel pour le pressiomètre Ménard.

5.3.6 Essais cycliques avec sonde autoforée

Bien que :

- Préforage à la tarière hélicoïdale continue et tubage jusqu'à la cote d'essai à l'aide d'un tube PVC de 100 mm de diamètre ;
 - bénéficiant pour le circuit de désagrégation du nettoyeur haute pression ad hoc prêté par le gestionnaire de la station d'épuration et de la pompe de la sondeuse pour l'alimentation du circuit basse pression,
- il fut impossible de foncer le PAF du fait de coquillages bouchant la sonde.



Figure 32 vue de l'outil de désagrégation bouché

6 CONCLUSION

La technique d'un contrôleur pression volume adapté aux essais d'expansion cyclique a été développée et validée. La première application avec le PAF n'a pu être menée à terme du fait de difficultés de forage sur le site test.

7 RÉFÉRENCES

- Afnor (1991) Analyse de la valeur, analyse fonctionnelle, Expression fonctionnelle du besoin et cahier des charges fonctionnel, NF X 50-151, 32 pages
- AFNOR (2000) Norme NF P 94-110-1 Essai pressiométrique Ménard – Partie 1 – Essai sans cycle
- AFNOR (1999) Norme NF P 94-110-2 Essai pressiométrique Ménard – Partie 2 – Essai avec cycle
- Combarieu O., Canépa Y. (2001) L'essai cyclique au pressiomètre, Bulletin des laboratoires des ponts et chaussées, n°233, pp. 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, Thèse de doctorat ENPC,
- Dupla J.-C. (2010) Programme d'essais pour le site de Gosier, communication personnelle,
- Foray P. (2009) Essais CPTu sur le site de Gosier, Document d projet ANR Belle Plaine
- 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
- Lutz (2009) documentation PREVO, 25 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