

## Utilisation des essais d'expansion cyclique pour définir des modules élastiques en petites déformations

### Determining Small Strain Elastic Modulus Using Cyclic Expansion Tests

P. Reiffsteck, S. Fanelli & J.L. Tacita

Univ Paris Est, IFSTTAR GER, Paris, France

J.C. Dupla

Univ Paris Est, Navier Géotechnique, Marne-la-Vallée, France

G. Desanneaux

CETE de l'Ouest, LRPC Saint Brieuc, France

**RÉSUMÉ :** Depuis trente ans, la réalisation d'essais d'expansion cycliques réalisés en trous préforés ou forés à l'avancement sur différents sites expérimentaux a permis de disposer d'une base assez importante de cas. La qualité de ces résultats permet de dériver des paramètres de déformabilité à des taux de déformation faibles. Ces essais cycliques ont été réalisés au pressiomètre Ménard et au pressiomètre autoforeur. Un peu moins d'une dizaine de sites ont été étudiés permettant d'observer le comportement de matériaux sableux et argileux normalement consolidés et surconsolidés. Cette communication présente le matériel utilisé ainsi que les procédures suivies. Le programme d'essai composé de plusieurs phases de cycles d'amplitude variable a été proposé dans les années quatre-vingt. On observe une évolution du module en fonction du nombre de cycles, de la nature du matériau et du rapport de l'amplitude et de la position moyenne avec la contrainte horizontale en place. Une synthèse des résultats des essais obtenus sur ces sites est présentée.

**ABSTRACT :** For thirty years, realization of cyclic expansion tests carried out in borehole pockets drilled using a separate tool or integrate in the probe, on different experimental sites allowed to have a rich database. The quality of these results allows to derive stress-strain parameters at low strain level. These cyclic tests were carried out using Menard and self-boring pressuremeters. A little less than ten sites were studied covering the behavior of sandy and clayey materials normally consolidated or overconsolidated. This paper will present the equipment used and procedures applied. Usually, the test program, which was proposed in the eighties, consists of several phases of cycles of variable amplitude. One can observe a shift of the module depending on the number of cycles, the nature of the material and the ratio of the amplitude and the mean position compared to the at rest horizontal stress. A summary of test results obtained on these sites is presented.

**MOTS-CLES :** comportement cyclique, essais d'expansion de cavité, pressiomètre autoforeur, pressiomètre Ménard

**KEYWORDS :** cyclic behavior, cavity expansion test, Self-boring pressuremeter, Ménard pressuremeter.

## 1 INTRODUCTION

Avec le matériel d'essai pressiométrique Ménard, il est possible de réaliser des essais d'expansion par palier (norme NF P94-110-1) et des essais cycliques (norme NF P94-110-2) (AFNOR, 1999 et 2000). Ces derniers essais comportent un cycle réalisé par paliers, dans les mêmes conditions que l'essai pressiométrique Ménard objet de la norme NF P 94-110-1. L'essai d'expansion classique, dans les conditions de forages préconisées par la norme NF P 94-110-1 et avec le protocole de chargement proposé, ne donne pas de résultats utilisables directement dans une étude de la déformabilité des ouvrages notamment lorsque la connaissance des modules en petite déformation est nécessaire (Combarieu et Canépa, 2001).

Les essais avec boucle de déchargement-rechargement permettent de déterminer un module cyclique de déformation. Les valeurs obtenues sont intermédiaires entre les modules en petites déformations obtenus au laboratoire, ou avec des essais de propagation d'ondes in situ, et les modules Ménard usuels (Les pressiomètres Louis Menard, 1960, Borel et Reiffsteck, 2006). Toutefois, un seul cycle est insuffisant pour cerner l'évolution des caractéristiques du sol sous chargement cyclique (Dupla et Canou, 2003). L'étude présentée, réalisée dans le

cadre du projet national SOLCYP (projet de recherche sur le comportement des pieux soumis à des sollicitations cycliques, voir le site [www.pnsolcyp.org](http://www.pnsolcyp.org) pour plus d'information), comporte des essais multi-cycles réalisés avec la technique de la sonde mise en place dans un trou pré-foré ou foré à l'avancement.

## 2 DISPOSITIF EXPÉRIMENTAL

Le principe de l'essai consiste à mesurer l'évolution du volume injecté lors de l'application de cycles de pression.

### 2.1 Matériel

La mesure de la variation de volume en fonction des cycles se fait soit par mesure du volume d'eau injecté, soit par mesure du déplacement d'un palpeur (Figure 1a et b). L'idée étant de pouvoir réaliser des essais avec une sonde pressiométrique mise en œuvre par autoforage ou dans un pré-forage de type Ménard (AFNOR, 2000).

Le matériel utilisé développé par l'entreprise Jean Lutz SA est un contrôleur pression volume (CPV) (de type PREVO),

capable de piloter des électrovannes par un ordinateur de type PC via une application spécifique.

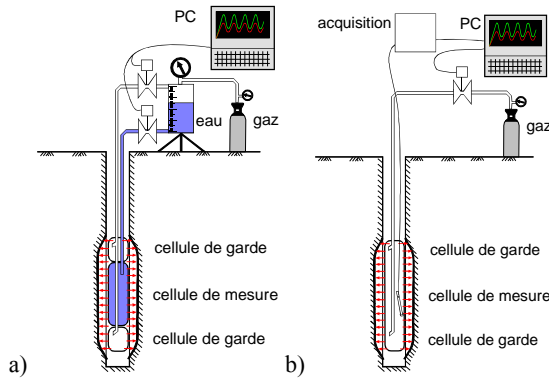


Figure 1. Architecture de l'essai cyclique (a) au pressiomètre Ménard, (b) au pressiomètre autoforeur

Le principe de fonctionnement est le suivant. Les différentes opérations manuelles sont réalisées, soit directement sur le CPV, soit par le programme. Le pilotage en cyclique est réalisé sur la base d'un fichier d'essai acceptant tout type de signal, harmonique ou multifréquence. Le suivi se fait en temps réel sur un onglet graphique ou sur le tableau de valeur.

## 2.2 Méthode d'essai

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 et le Méhauté, 1982 ; Puech et al., 1982). Trois types d'essais furent réalisés ; nous présentons les deux mis en œuvre dans la présente étude :

- essai de chargement cyclique entre deux bornes de pression  $p_M$  et  $p_m$  (Figure 2 a),
- essais de chargement entre deux bornes de pression variables, dont la moyenne est cependant constante, la borne inférieure restant supérieure à  $p_0$  la pression des terres au repos (Figure 2 b).

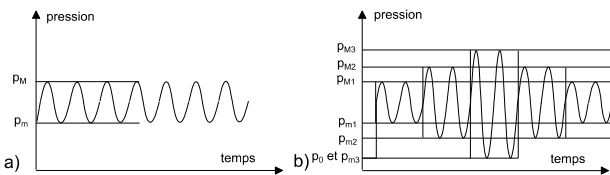


Figure 2. Différents types d'essais cycliques

Les paramètres retenus pour les essais cycliques découlent de la méthode proposée (cf. ci avant) : essai à pression contrôlée ; adaptation de la fréquence au type de sol pour tenter de rester drainé, niveau de sollicitation : 0,8 ( $R_c = \Delta p_{cyc} / p'_0$ ) ; fréquence : 0,01 à 0,05 Hz et nombre de cycles égal à 50.

La pression initiale  $p_m$  utilisée pour démarrer l'essai est définie comme la contrainte horizontale en place (pression des terres de repos) (effective de préférence) et la pression maximale  $p_M$  est égale à  $(1+0,8)p_m$  (Dupla et Canou, 2003). La pression  $p_m$ , qui a été prise égale à  $p_0$ , a été définie à partir des résultats d'essais d'expansion de pressiomètre Ménard antérieurs par la méthode proposée par Briaud (1992).

## 2.3 Définition des modules

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 3) :

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

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.

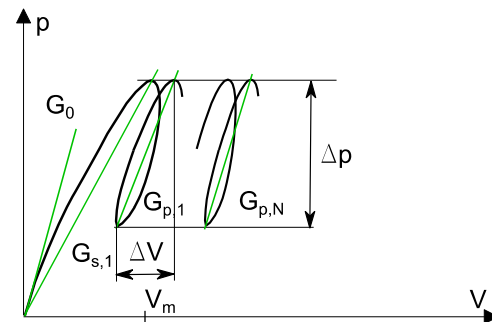


Figure 3. Calcul des modules des cycles

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 3).

## 3 ESSAIS CYCLIQUES

### 3.1 Essais du LRPC de Saint Brieuc

À la fin des années 70, le laboratoire des Ponts et Chaussées de Saint Brieuc a réalisé plusieurs campagnes d'essais d'expansion cyclique au pressiomètre autoforeur (modèle PAF76 de diamètre 132 mm). Ces essais comprenaient une centaine de cycles voire plusieurs milliers de cycles (durée de 24 à 72 heures). Ils ont été réalisés sur deux sites principaux Cran et Plancoët (Le Méhauté et Jézéquel, 1980).

#### 3.1.1 Site de Plancoët

Le site est constitué d'une parcelle plane en bordure de la rivière Arguenon. Le sol est constitué de sols fins très lâches : silts en surface (0 à 4 m), sables fins ensuite (surtout de 6 à 9 m) puis des argiles (de 10 à 12 m) avec quelques inclusions de graviers et de sables. Le substratum est à 15 m. La nappe fluctue en fonction des saisons entre 0,30 et 1,50 m.

### 3.1.2 Site de Cran

La plaine alluviale de la Vilaine en aval de Redon est une vallée sédimentaire de près de 2 km de large. On y rencontre un dépôt d'argile sur une épaisseur de 10 à 20 m, reposant sur une couche de sable et de galets qui recouvre le substratum rocheux. À Cran, la rive droite est constituée par un dépôt d'argile molle marine de 17 m d'épaisseur reposant sur un substratum rocheux (schiste et phanites).

### 3.2 Essais du projet Solcyp

Des tests de validation ont été effectués sur trois sites : Gosier, Cran et Merville. Les deux derniers sites ont fait l'objet de nombreuses études dans le cadre de recherches programmées par les Laboratoires des Ponts et Chaussées. Les caractéristiques qui ont présidé au choix ont été une relative homogénéité d'ensemble sur une profondeur minimale de 5 à 10 m.

#### 3.2.1 Site de Gosier

Les premiers essais avec le nouveau matériel ont été entrepris sur le site de Gosier en Guadeloupe situé dans une zone potentiellement liquéfiable, instrumentée et étudiée dans le cadre du projet ANR Belle Plaine. Des essais pressiométriques Ménard (par paliers) ont été réalisés pour compléter les profils obtenus au pénétromètre statique à pointe électrique et définir les pressions  $p_0$  à utiliser puis deux sondages pressiométriques cycliques ont été réalisés.

La figure 4a présente les courbes de la pression imposée corrigée en fonction de la variation volumique obtenue pour 4 essais de la série MC2. Après une première partie qui correspond à la montée à la charge moyenne en monotone, la phase cyclique entre  $p_M$  et  $p_m$  montre la tendance à la stabilisation de quasiment tous les essais, même si celle-ci n'a jamais été atteinte. Apparemment, l'essai à la profondeur 7 m montre une accumulation importante de déformation volumique (couche d'argile molle).

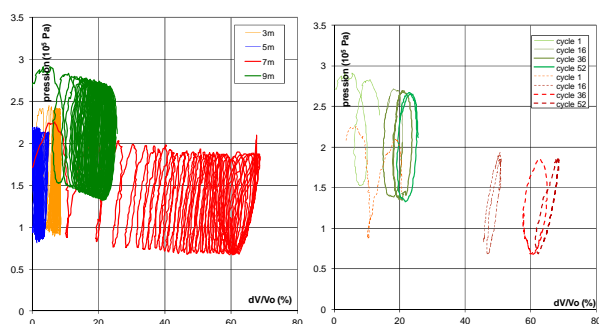


Figure 4. a et b Essais d'expansion cycliques pré-forés site de Gosier

#### 3.2.2 Site de Cran

Les essais réalisés en 2011 ont été placés à proximité des séries réalisées en 1979.

À la profondeur 2 m, la courbe d'essai présentée sur la Figure 5a montre une accumulation de volume élevée (de l'ordre de 900 cm<sup>3</sup>) conduisant à la conclusion que le test a été effectué dans la couche molle et que la pression initiale déduite des études précédentes a été surestimée. Le signal obtenu représenté sur la Figure 5a est assez bruité car l'amplitude de la plage de pression est faible, et une interaction entre l'asservissement de l'eau et l'air n'a pu être corrigée à temps dans le pilotage.

#### 3.2.3 Site de Merville

Sur le site expérimental de Merville (Nord), on rencontre à 1,5 m environ de la surface, une couverture de limons peu plastiques, affectée par le battement de la nappe et de 1,5 à 42 m

de profondeur, l'argile (surconsolidée) des Flandres de l'Yprésien.

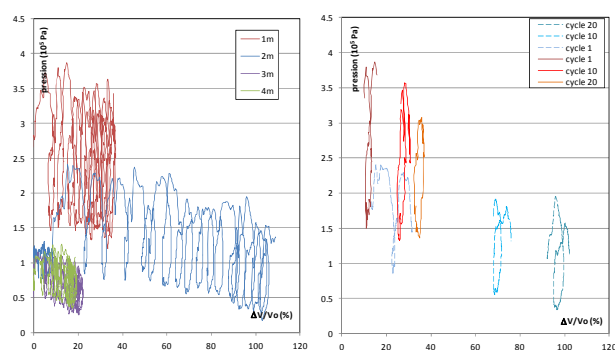


Figure 5. a et b Essais d'expansion cycliques autoforés site de Cran

Un sondage au pressiomètre autoforeur avec des essais cycliques à 6, 8 et 12 m, en alternance avec des essais d'expansion monotone croissante à 5, 7 et 11 m, a été réalisé (Figure 6 et Figure 7a). Les trois premiers essais cycliques ont été réalisés avec la même amplitude fixée à partir des essais d'expansion monotones. Le dernier essai a été réalisé avec une amplitude basée sur l'essai à 11 m.

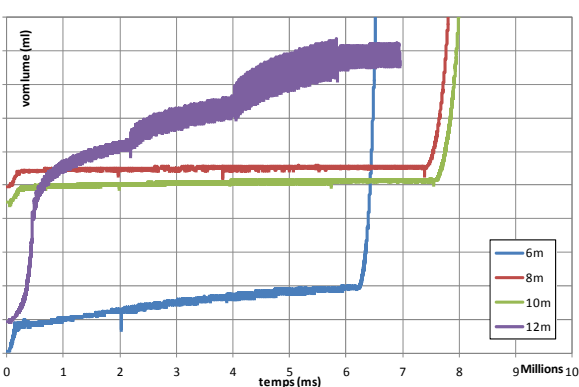


Figure 6. Essais d'expansion cycliques autoforés multi-amplitude site de Merville

Les amplitudes de 60 kPa ont abouti à des résultats peu précis car d'une part la source de pression était réglée à une pression trop forte et de ce fait l'électrovanne de la chambre tampon avait du mal à réguler et d'autre part cette valeur est faible et de l'ordre de grandeur de la précision de l'asservissement. Il est donc nécessaire d'adapter les amplitudes aux profondeurs et de réévaluer la méthode de détermination de celle-ci.

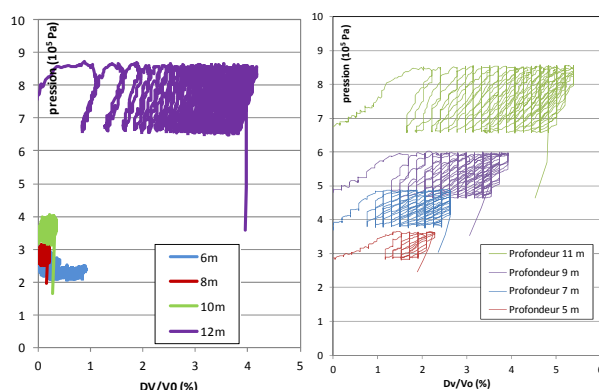


Figure 7. a et b Essais d'expansion cycliques (a) autoforés et (b) pré-forés site de Merville

À proximité immédiate un sondage au pressiomètre Ménard avec un perforage d'un mètre à la tarière hélicoïdale avec des essais cycliques à 5, 7 et 11 m permet de disposer de résultats comparables (figure 7).

#### 4 DISCUSSIONS

Un premier constat est que le signal obtenu représenté sur les Figure 4 à 7 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. Les cycles obtenus présentent des points singuliers à méplats et non de rebroussement.

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%.

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 <sub>p,1</sub> (10 <sup>5</sup> Pa)	a <sub>M0</sub> (%)	G <sub>p,50</sub> /G <sub>p,1</sub>	
Plancoët	8-3	silt	2	5,19	0,5	1,6	
			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.

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 6 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

#### 5 CONCLUSION

Les différentes campagnes de sondages avec essais cycliques mono ou multi amplitudes ont montré l'intérêt de cet essai pour cerner l'évolution du module de cisaillement en fonction du nombre de cycle et le potentiel de l'essai à localiser les horizons susceptibles de liquéfaction.

Il reste à mieux préciser les conditions d'essais pour avoir des jeux de données comparables et si possible disposer de la mesure de la pression interstitielle au niveau de la membrane pour estimer les accumulations potentielles de pression ou adapter la vitesse d'essais afin de rester drainé.

#### 6 REMERCIEMENT

Les auteurs désirent remercier le projet national SOLCYP ainsi que le ministère de l'Environnement de l'Énergie, du Développement Durable et de la Mer pour le financement de cette action de recherche ainsi que leurs collègues O. Malassingne et A. le Kouby.

#### 7 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.
- Borel S., Reiffsteck Ph., (2006) Caractérisation de la déformabilité des sols au moyen d'essais en place. LCPC Paris, pp. 132.
- Briaud, J.L., (1992). The Pressuremeter, A. A. Balkema, Rotterdam, Netherlands.
- Combarieu O., Canépa Y. (2001) L'essai cyclique au pressiomètre, BLPC, 233, 37-65.
- Dupla, J.C., Canou J. (2003). Cyclic pressuremeter loading and liquefaction properties of sands, Soils and Foundations, Vol. 43(2), 17-31.
- Jézéquel J.F., Le Méhauté A. (1982) Essais cycliques au pressiomètre autoforeur, Symposium sur la pressiométrie et ses applications en mer, Paris, Éditions Technip, 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, 373-388.