



HAL
open science

Importance de l'amplitude des cycles sur la définition du module de rechargement au pressiomètre

Adrian Grasson, Philippe Reiffsteck, Alain Le Kouby, Jean-Louis Tacita,
Sonia Fanelli

► To cite this version:

Adrian Grasson, Philippe Reiffsteck, Alain Le Kouby, Jean-Louis Tacita, Sonia Fanelli. Importance de l'amplitude des cycles sur la définition du module de rechargement au pressiomètre. ISP7 - Symposium International pour le 60ème anniversaire du pressiomètre, May 2015, HAMMAMET, Tunisie. 8 p. hal-01589350

HAL Id: hal-01589350

<https://hal.science/hal-01589350>

Submitted on 2 Oct 2017

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

IMPORTANCE DE L'AMPLITUDE DES CYCLES SUR LA DÉFINITION DU MODULE DE RECHARGEMENT AU PRESSIOMÈTRE

IMPORTANCE OF CYCLE'S AMPLITUDE ON THE DEFINITION UNLOAD-RELOAD PRESSUREMETER MODULUS

Adrian GRASSON, Philippe REIFFSTECK, Alain LE KOUBY, Jean-Louis TACITA, Sonia FANELLI¹

¹Université Paris Est, IFSTTAR, Marne la Vallée, France

ABSTRACT - In underground structures or foundations projects, knowledge of unload-reload modulus is important to understand the dynamic or small strain behavior of soils whatsoever for deformation analysis using the finite element method or analytical methods. An experimental study was performed with automated equipment controlled by microcomputer. It consists in comparing NF P94 110-2 protocols and those used in the SOLCYP (SOLlicitations CYcliques sur les Pieux) project to determine the influence of the amplitude of the cycles on modulus values, the unload pressure of the cycle and the type of loading: stepwise or continuous. The tests were carried out in a silt layer located in Jossigny experimental site.

RÉSUMÉ - Dans le cadre de projets d'ouvrages souterrains ou de fondations, la connaissance d'un module de déchargement-rechargement est importante pour appréhender le comportement dynamique ou en petite déformation des sols que ce soit pour des calculs en déformation mettant en œuvre la méthode des éléments finis ou des méthodes analytiques. Une étude expérimentale a été réalisée avec des matériels automatisés contrôlés par micro-ordinateur. Elle a consisté à comparer les protocoles de la norme NF P 94 110-2 et ceux utilisés dans le cadre du projet SOLCYP (SOLlicitations CYcliques sur les Pieux) pour déterminer l'influence de l'amplitude des cycles sur la valeur des modules, de la pression de déchargement du cycle et de la nature du chargement : par paliers ou continu. Les essais ont été réalisés dans l'horizon des limons sur le site expérimental de Jossigny.

1. Introduction

La détermination d'un module en petite déformation présente un grand enjeu pour les calculs des ouvrages surtout lorsque des méthodes en déformations sont utilisées (Mestat et Reiffsteck, 2002 ; Reiffsteck, 2002 ; Borel et Reiffsteck, 2006 ; Combarieu, 2006) ou des calculs dynamiques nécessaires. Pour répondre aux attentes des praticiens, les documents normatifs proposent en première approche de prendre le module en petite déformation ou sous sollicitations dynamiques égal à 3 fois le module statique tel celui mesuré lors de l'essai pressiométrique Ménard (AFNOR, 2012 et 2009). Ce rapport a été observé lors de l'étude très complète menée par Combarieu, et Canépa (2001) sur des essais par paliers.

Cette communication présente une comparaison des différentes méthodologies permettant l'obtention d'un module en petite déformation en utilisant comme référence le protocole d'essais pressiométrique Ménard avec cycle défini dans la norme expérimentale XP P 94-110-2 et basé sur la phase de rechargement. La proposition de réduction de la phase de rechargement a été mise en pratique sur le site d'essais de fondations superficielles situé à Jossigny. Le programme d'expérimentation a testé quatre méthodes différentes. Dans les trois premières, différentes valeurs de la pression de début de rechargement ont été imposées et pour le quatrième, la réalisation de plusieurs cycles, pendant le même essai à une même profondeur, a été testée. Ce programme a été reproduit avec un chargement à vitesse de pression constante.

L'influence de la réduction de l'amplitude du cycle, du mode de chargement et de la réalisation de plusieurs cycles ont ainsi pu être étudiés sur un site unique.

1.1. Essai pressiométrique Ménard avec cycle (XP P 94-110-2)

Un essai pressiométrique cyclique suit le même principe de chargement que celui de l'essai Ménard, si ce n'est l'insertion d'une phase de déchargement. L'essai est divisé en trois phases, la première est une phase de chargement par paliers de pression égaux jusqu'à une pression proche de la pression dite de fluage (p_{rD}), chaque palier est maintenu pendant 60s. Pendant la deuxième phase est réalisé un déchargement partiel direct, c'est-à-dire sans palier, jusqu'à la pression (p_{rE}) proche de la pression de contact de la sonde avec le terrain (p_{r3}). Combarieu et Canépa (2001) ont écrit qu'il est souhaitable que l'amplitude des déformations soit la plus grande possible, ce qui a été retenu dans la norme expérimentale XP P94-110-2. Puis, la troisième phase consiste en un rechargement avec des paliers de pression de même amplitude que ceux adoptés lors du chargement, jusqu'à la pression de fin de rechargement (p_{r4}) puis ensuite jusqu'à la pression limite ou jusqu'à la pression maximale possible. La Figure 1a présente le programme d'un essai cyclique. La courbe pressiométrique type d'un essai avec cycle est représenté dans la Figure 1b.

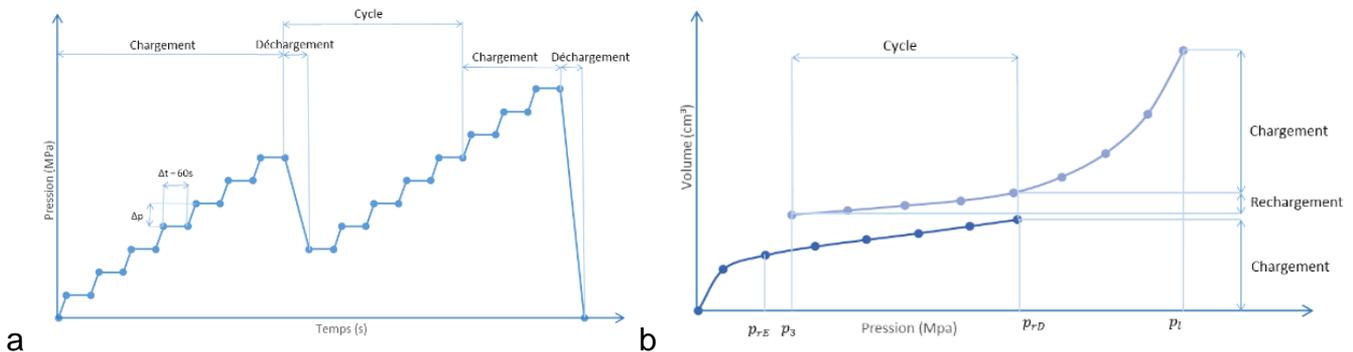


Figure 1. Déroulement de l'essai pressiométrique Ménard avec cycle et courbe résultat type

La plage de calcul du module pressiométrique Ménard de rechargement (E_R) est limitée par l'origine du premier segment notées par (p_3, V_3), et la fin du dernier segment (p_4, V_4). La valeur du module est calculée à partir de la formule (1) où le coefficient de Poisson (ν) pris conventionnellement égal à 0,33.

$$E_R = 2 \cdot (1 + \nu) \cdot \left(V_s + \left(\frac{V_3 + V_4}{2} \right) \right) \cdot \frac{(p_4 - p_3)}{(V_4 - V_3)} \quad (1)$$

1.2 Procédures alternatives testées

Les modifications apportées au protocole de la norme NF XP P94-110-2 sont :

- l'amplitude et le nombre des cycles ;
- l'expansion à vitesse de pression constante.

Dans la procédure proposée par Ménard et Rousseau (1962) et discutés par Combarieu et Canépa (2001) et actuellement en vigueur dans la norme française XP P 94-110-2, le déchargement lors du cycle est réalisé jusqu'à une pression (p_3) proche de la pression de contact entre la sonde et le terrain (p_1). La réduction de l'amplitude du cycle proposée a pour objectif de limiter la possible rupture en déchargement du sol due à la quasi-annulation de la contrainte radiale.

Pour ce faire, l'amplitude du déchargement a été diminuée d'un pas de pression de 0,5 bar, donc le rechargement à partir de p_3 se produit un palier avant celui des essais suivants la

norme. Le programme d'expérimentation pour la deuxième variante suit la même logique en diminuant encore d'un palier l'amplitude du déchargement.

Dans une autre variante, il a été décidé de réaliser trois cycles de chargement répartis sur la plage p_1 - p_2 et séparés au moins d'un palier.

Pour les essais par paliers modifiés, il n'a pas été possible de réaliser des cycles à différents niveaux de pression pour étudier l'influence de la position du cycle entre la pression de contact et la pression de fluage. À défaut, les phases de déchargement et rechargement ont été répétées encore trois fois entre les bornes de pression p_3 et p_4 .

Les essais de chargement continu ont été réalisés comme proposé par Briaud (1992) ainsi que par le projet de norme européenne de l'essai au pressiomètre autoforeur (CEN, 2012). Les méthodes utilisées dans le projet national SOLCYP ont été décrites par Reiffsteck et al. (2013). L'objectif est d'analyser le gain en précision sur le module par l'acquisition d'un nombre de points plus important. Le chargement a été fait avec une vitesse de pression calée sur les essais pressiométriques par paliers. La phase de déchargement est réalisée à la même vitesse que le chargement. Les modulations d'amplitude sont identiques aux essais par paliers et les essais multicycles réalisés à différents niveaux de pression.

2 Programme d'essais

2.1 Méthodologie

Le programme d'essai mis en œuvre pour étudier les effets de la modification de la procédure et pour savoir quelle est la bonne amplitude du cycle a d'abord nécessité de déterminer les pressions p_1 et p_2 dans un premier forage (SP 1) avec des essais pressiométriques réalisés selon la norme NF P94-110-1 (figure 3). Ensuite, dans le deuxième forage un essai cyclique comme décrit dans norme expérimentale XP P94-110-2 puis dans les forages trois et quatre ont été testés la réduction de taille du cycle (tableau 1). Et enfin, dans le cinquième forage, un essai avec trois cycles de même amplitude dans la même plage. Les essais à vitesse de chargement constante ont été organisés de manière identique. Les forages ont tous été réalisés à la tarière à main à sec par un temps variable sur une période inférieure à un mois à des distances de l'ordre d'un mètre cinquante. Une sonde de 60 mm avec gaine toilée à tubulure jumelée a été utilisée. Tous les essais ont été corrigés à partir des résultats des étalonnages et calibrages réalisés.

2.2 Caractérisation du lieu d'essai

Le site de Jossigny (figure 2) a été déjà utilisé pour d'autres travaux de recherche, notamment sur les fondations superficielles, et ses propriétés sont bien connues (Amar et al., 1994 ; Combarieu et Canépa, 2001). Le sols à Jossigny est constitué de limon des plateaux de Brie (Stampien) sur les premiers mètres. La pression limite généralement obtenue est de l'ordre de 0,6 MPa et il a été choisi de définir le « pas de pression » à 0,05 MPa.

De ce fait, les programmes de chargement des essais selon la norme P94-110-2 comportent un rechargement de 3 paliers, la première variante, un rechargement de 2 paliers et la troisième de 1 palier.

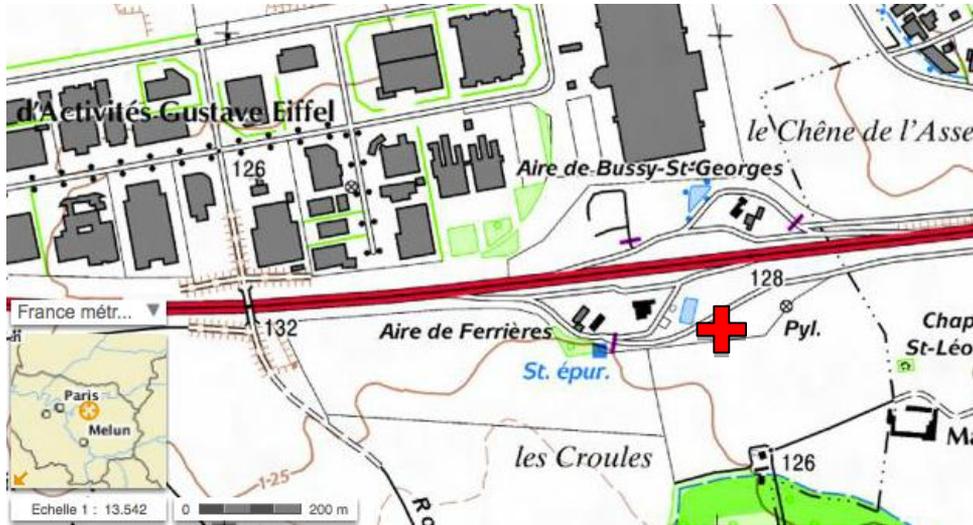


Figure 2. Lieu de réalisations d'essais pressiométriques à Jossigny (source Geoportail/IGN)

3 Résultats

3.1 Essais à chargement par palier

Le traitement des données brutes des essais de calibration, d'étalonnage et par paliers a été réalisé par tableur. À partir des courbes pressiométriques corrigées, les valeurs de pression de fluage et de pression limite ont été déterminées par les méthodes d'extrapolation disponibles. Ici, les essais ayant été poursuivis au-delà du doublement du volume de la cavité, la valeur mesurée corrigée est utilisée. Le logiciel calcule les modules pressiométrique Ménard pour l'essai sans et avec cycle en suivant les normes françaises déjà citées.

La Figure 3 expose les courbes corrigées pour les essais réalisés aux différentes profondeurs.

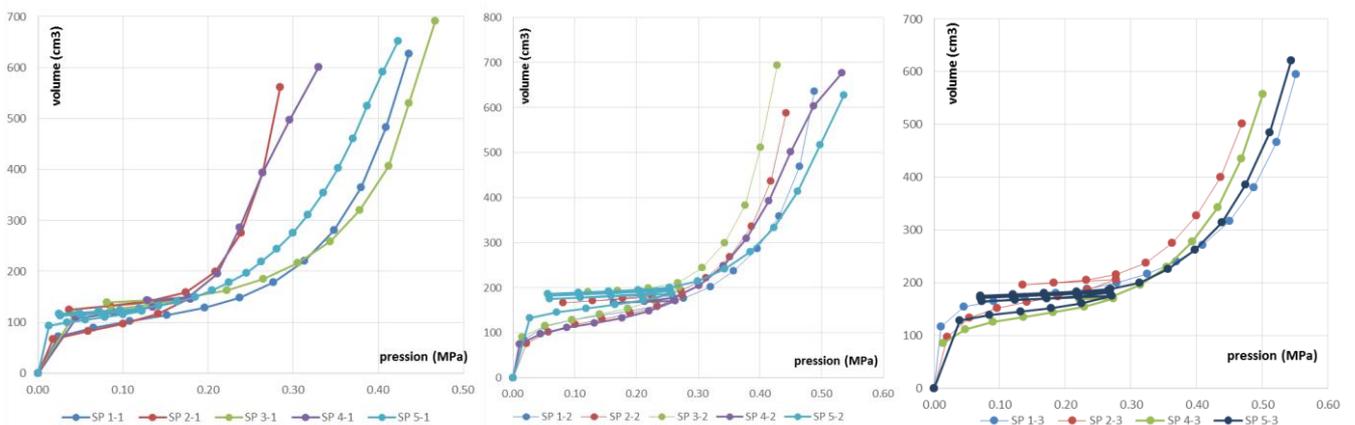


Figure 3. Courbes corrigées des essais réalisés aux profondeurs 0,80 ; 1,80 et 2,80 m

Le tableau 1 ci-dessous présente les valeurs de p_1 et p_2 obtenues à partir des courbes des essais pressiométriques sans cycle. Le pas de pression étant égal à 0,05 MPa la diminution de l'amplitude du cycle a été liée aux paliers de pression utilisés dans l'essai monotone. Ainsi les valeurs de p_3 et p_4 utilisés pour les essais cycliques sont celles données dans le Tableau I.

Les modules Ménard observés sont supérieurs à ceux obtenus par Combarieu et Canépa (2001) ($\overline{E_M}=4,4$ MPa) mais plus en accord avec ceux d'Amar et al. (1994) ($\overline{E_M}=6,5$ MPa) (tableau 2). Le choix de palier ainsi que la méthode de forage peuvent partiellement expliquer ce constat.

Tableau I .Valeurs de début et fin de la plage pseudo-élastique et de cycle (en MPa)

SP1-1		SP2-1		SP3-1	SP4-1	SP5-1
P1	0,10	P3	0,10	0,15	0,20	0,10
P2	0,25	P4	0,25	0,25	0,25	0,20
SP1-2		SP2-2		SP3-2	SP4-2	SP5-2
P1	0,15	P3	0,15	0,20	0,25	0,15
P2	0,35	P4	0,35	0,35	0,35	0,35
SP1-3		SP2-3		SP3-3	SP4-3	SP5-3
P1	0,20	P3	0,20	0,25	0,30	0,15
P2	0,35	P4	0,35	0,35	0,35	0,35

Le Tableau II donne les valeurs de pression limite et de module Ménard pour les essais réalisés. On observe que la pression limite du sol ne varie pas, même avec la présence d'un cycle, par contre, les valeurs du Module Ménard sont influencées par la taille du cycle, c'est-à-dire du nombre de paliers de rechargement.

Tableau II .Valeurs des pressions limites et modules Ménard et de rechargement en MPa

profondeur		1 m			2 m			3 m		
sondage	protocole	pl	Module		pl	Module		pl	Module	
			E _M	E _R		E _M	E _R		E _M	E _R
SP 1	94-110-1	0,44	6,4		0,49	8,9		0,56	10,8	
SP 2	94-110-2	0,29	3,5	7,5	0,45	5,3	14,5	0,50	6,5	15,9
SP 3	réduit 0,05 MPa	0,47	8,1	16,3	0,43	4,9	15,1			
SP 4	réduit 0,1 MPa	0,34	6,1	13,4	0,52	5,8	16,3	0,52	7,9	17,7
SP 5-1	multicycle 1		7,4	14,7		9,4	22,7		9,5	25,0
SP 5-2	multicycle 2			16,2			26,5			28,9
SP 5-3	multicycle 3	0,42		17,1	0,53		28,7	0,54		31,9

3.2 Essais d'expansion a vitesse de chargement constante

Le Tableau III donne les valeurs de pression limite et de module Ecc pour les essais à chargement continu. Ces dernières sont déterminées pour les mêmes segments que pour les essais par paliers. La figure 4 présente les résultats des essais superposés aux essais réalisés par palier. Les pressions de contact, les courbures et les points caractéristiques sont très similaires à ceux obtenus lors des essais par paliers.

Tableau III - Valeurs de pression limite et modules des essais à chargement continu en MPa

profondeur		1 m			2 m			3 m		
sondage	protocole	p _l	Module		p _l	Module		p _l	Module	
			Mon.	Cyc.		Mon.	Cyc.		Mon.	Cyc.
SP 1	Ecc p1-p2			17,3						
SP 2	Ecc p1-p2	0,45	5,5	20,2	0,56	9,9	31,7	0,56	10,6	26,6
SP 3	Ecc p1-p2 réduit	0,44	7,1	24,4	0,47	9,2	50,5			
SP 4-1	Ecc multicycle 1		6,5	26,9		10,2	24,1			
SP 4-2	Ecc multicycle 2			37,1			43,3			
SP 4-3	Ecc multicycle 3	0,44		26,9	0,57		46,5			

La pression de contact est observée avec une bonne précision ouvrant des perspectives intéressantes pour la détermination de la contrainte horizontale en place au repos (Briaud, 1992).

Les courbes d'essais à chargement continu présentent une courbure moins importante pour les pressions les plus élevées. Le pilotage en vitesse de pression semble avoir ralenti l'apparition de la plasticité à vitesse moyenne équivalente. Les pressions limites des essais à chargement continu sont donc une borne supérieure.

Lors des essais multi-cycles, il apparaît que le premier cycle dont la pression minimale est proche de la pression de contact a une pente moyenne inférieure à celle des deux autres cycles.

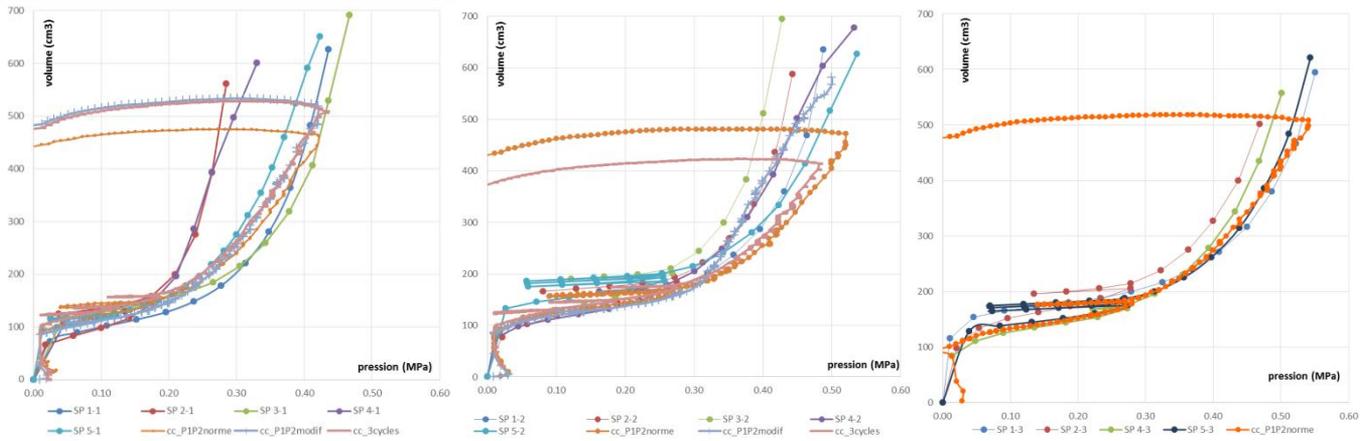


Figure 4 – Courbes d'expansion des essais à chargement continu

4 Analyse

4.1 Évolution de la Pression Limite

La Figure 20 permet d'observer une augmentation de la pression limite avec la profondeur assez importante entre 0,8 et 1,8 m et plus faible entre 1,8 et 2,8m que ce soit pour les essais de chargement par palier ou continu.

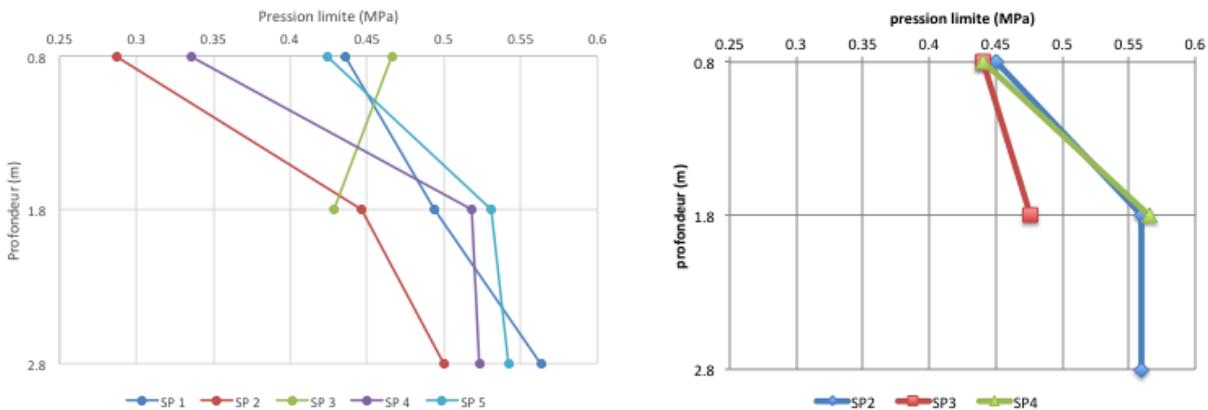


Figure 5 - Évolution de la pression limite en fonction de la profondeur

Les pressions limites obtenues lors de ces essais sont équivalentes avec celles déterminées lors des précédents travaux de recherche menés sur le site de Jossigny (Amar et al., 1995 ; Combarieu et Canépa, 2001).

4.2 Évolution du module Ménard et cyclique

La Figure 6 expose l'évolution du module en fonction de la déformation observée (plage V_1 - V_2 pour les essais Ménard et V_3 - V_4 pour les essais par paliers ou chargement continu). On constate qu'entre les essais sans cycle et les essais avec cycle selon la norme, le module a augmenté dans un rapport d'environ 2. Ces résultats sont en accord avec les constats de Ménard et Lambert (1966) et Combarieu et Canépa (2001).

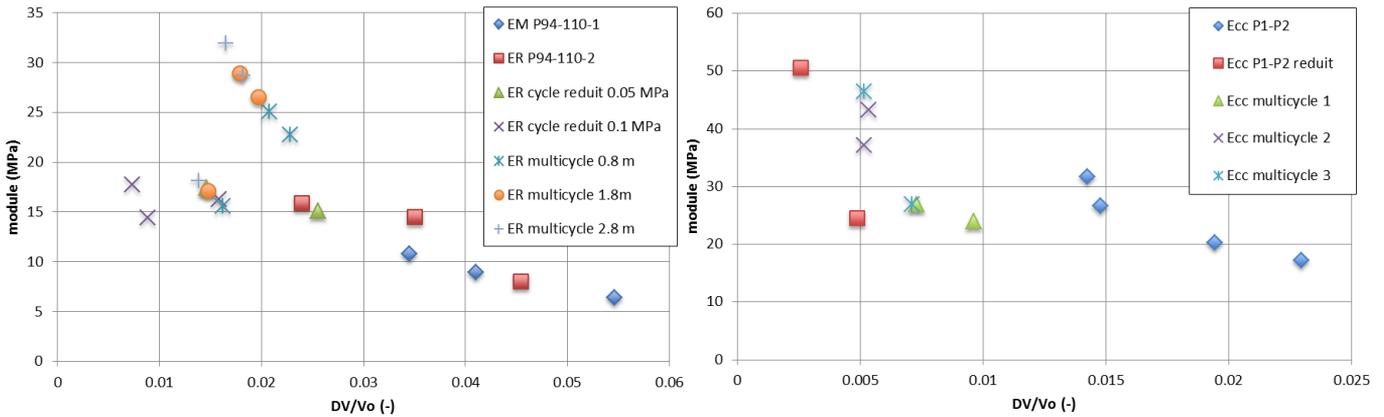


Figure 6 - Évolution des modules avec la déformation volumique

Quand l'amplitude du cycle est réduite (2 paliers) le module augmente assez significativement. Le rapport moyen s'approche de 2,5. La deuxième réduction d'amplitude ne comportant plus qu'un seul palier renverse cette tendance avec des modules qui sont plafonnés. La figure 7 montre que les modules cycliques obtenus par chargement continu sont supérieurs à ceux déterminés par chargement par paliers.

Dans les essais multicycles, les modules sont plus élevés avec un rapport s'approchant de 3. Les modules du premier cycle sont systématiquement inférieurs aux deuxièmes, eux-mêmes inférieurs au troisième. Pour les essais à chargement continu, la proximité lors de la décharge de l'annulation de la pression de contact pour l'un et du fluage au point déchargement pour l'autre, peut expliquer partiellement cette évolution des modules.

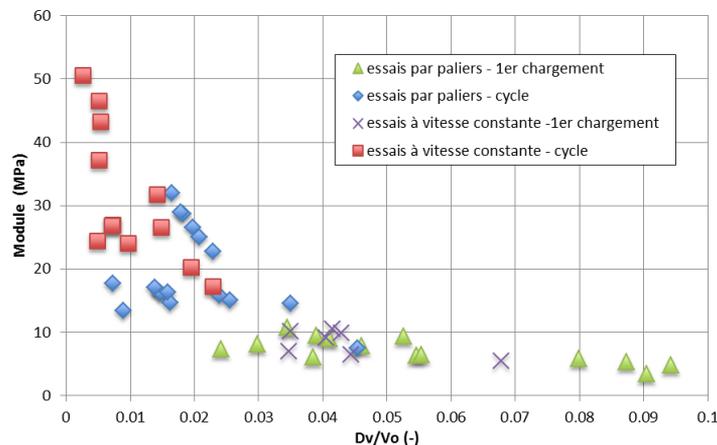


Figure 7 - Évolution des différents modules (E_M , E_R , E_{cc}) avec la déformation volumique

5. Conclusions et perspectives

La communication présentée a eu pour but d'étudier une alternative à la procédure de réalisation d'essais pressiométrique Ménard avec cycle, tel que codifiée par la norme XP P 94-110-2.

Les résultats trouvés montrent que l'utilisation d'une nouvelle procédure pour la phase de déchargement, est intéressante. L'intérêt de l'imposition d'une limite minimum de réduction du cycle de rechargement apparaît évident, toutefois il ne peut y avoir un seul palier dans la phase de déchargement sous peine d'une dispersion importante. L'influence du type de chargement sur la détermination de la pression limite et module Ménard, pour peu que la vitesse lors d'un essai de chargement continu soit proche de celle de l'essai par palier, n'est pas manifeste.

Les résultats obtenus avec des cycles d'amplitude relativement importante montrent que le rapport de 3 proposé dans les documents normatifs pour évaluer la rigidité latérale des pieux est une valeur minimale. Ces conclusions sont en accord avec celles émises par Combarieu et Canépa (2001) d'utiliser p2/2 comme amplitude et confirment que le mode opératoire proposé dans la norme XP P94-110-2 n'est pas adapté aux besoins des praticiens dans leur utilisation des codes de calculs aux éléments finis.

Il apparaît nécessaire de tester cette procédure dans d'autres types de sols pour comparer avec les résultats obtenus sur le limon des plateaux.

6. Bibliographie

- AFNOR(2000a) Essai pressiométrique Menard, partie 1 : Essai sans cycle, (NF P 94-110-1)
- AFNOR (2000b) Essai pressiométrique Menard, partie 2 : Essai avec cycle, (XP P 94-110-2)
- AFNOR (2012) Justification des ouvrages géotechniques - Normes d'application nationale de l'Eurocode 7 - Fondations profondes, XP P 94-262
- AFNOR (2009) Calcul géotechnique - Ouvrages de soutènement – Écrans, XP P 94-282
- Amar S., Baguelin F., Canépa Y., Frank R. (1994) Étude expérimentale du tassement des fondations superficielles *Comptes rendus 13ème Cong. Int. Méca. Sols et Tr. Fond*, (2)623-626
- Borel S., Reiffsteck Ph. (2006) Caractérisation de la déformabilité des sols au moyen d'essais en place. *LCPC Paris*,) 132 pages.
- Briaud, J.L. (1992) *The Pressuremeter*, A. A. Balkema, Rotterdam, Netherlands, 322 pages.
- CEN (2012) Reconnaissance et essais géotechniques — Essais en place — Partie 6 : Essai pressiométrique autoforé, projet, EN ISO 22476-6
- Combarieu O. (2006) L'usage des modules de déformation en géotechnique. *Revue Française de Géotechnique* (114)3-32.
- Combarieu O., Canépa Y. (2001) L'essai cyclique au pressiomètre. *Bull. des Lab. des Ponts et Ch.*, (233)37-65.
- Ménard L., Lambert Ph. (1966) Étude expérimentale d'un massif de fondation soumis à des vibrations , *Sols Soils* (17)9-30.
- Ménard L., Rousseau J. (1962) L'évaluation des tassements, Tendances nouvelles, *Sols Soils*, (1)13-28.
- Mestat Ph., Reiffsteck Ph. (2002) Détermination des paramètres des lois de comportement élastoplastique, *Symp. Int. PARAM2002, Paris, Presses de l'ENPC*, 393-400.
- Reiffsteck Ph. (2002) Nouvelles Technologies d'essai en mécanique des sols-Etat de l'art, *Symp. Int. PARAM2002, Paris, Presses de l'ENPC*, 201-242.
- Reiffsteck P., Fanelli S., Tacita J.L., Dupla J.C., Desanneaux G. (2013) Utilisation des essais d'expansion cyclique pour définir des modules élastiques en petites déformations, *Proceedings of the 18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Paris, Presses de l'ENPC*, (3)2383-2386