

Short-term degradation of soil shear moduli during earthquakes or structural failures: application of an innovative pressuremeter

Dégradation des modules de cisaillement des sols à court terme lors des séismes ou des ruptures d'ouvrages : application d'un pressiomètre innovant

Soufyane AISSAOUI ^{1#}, Philippe REIFFSTECK ² and Abdeldjalil ZADJAOUI ³

¹Department of Civil Engineering and Publics Works, Faculty of Sciences and Technology, University of Ain Temouchent, BP 284, 46000 Ain Temouchent, Algeria.

²Soils, Rocks, and Geotechnical Structures Laboratory, GERS, Gustave Eiffel University, 16 boulevard Newton, F-77447 Marne la Vallée cedex 2, Paris, France.

³Department of Civil Engineering, Faculty of Technology, University Aboubekr BELKAID, Tlemcen, Algeria.

[#]Corresponding author: soufyane.aissaoui@univ-temouchent.edu.dz

ABSTRACT

Geotechnical engineers today face significant challenges in designing critical infrastructure subjected to small-strain conditions. While finite element analysis provides a robust framework for addressing these issues, its practical implementation is often hindered by the lack of reliability in determining soil parameters, particularly the shear moduli (G), from the small-strain domain up to failure.

This paper aims to establish the degradation curves of shear moduli (G) across various strain ranges using an innovative pressuremeter and specific testing procedures. This advanced pressuremeter enables in-situ soil testing under controlled conditions, with the primary objective of providing more accurate and detailed data in the small-strain domain. A validation program for its measurement capabilities has been implemented, combining laboratory and in-situ tests.

The paper presents the initial in-situ tests conducted on sands and silts. The results obtained are compared with those from conventional Ménard pressuremeter tests as well as with more sophisticated laboratory tests carried out on the same types of soil. A detailed discussion of the results is provided, highlighting the advantages of this new pressuremeter, particularly its ability to deliver precise data in the small-strain range.

RESUME

Les ingénieurs géotechniciens sont aujourd'hui confrontés à des défis majeurs dans le dimensionnement d'ouvrages de grande importance soumis à des sollicitations en petites déformations. Le calcul aux éléments finis permet d'aborder ces problèmes, mais sa mise en œuvre pratique reste freinée par le manque de fiabilité dans la détermination des paramètres de sol notamment les modules de cisaillement G depuis le domaine des petites déformations jusqu'à la rupture.

Cet article vise à établir les courbes de dégradation des modules de cisaillement (G) pour différentes plages de déformation à l'aide d'un pressiomètre innovant et selon des procédures d'essai spécifiques. Ce pressiomètre permet de réaliser sur des sols en place des essais dans des conditions contrôlées avec comme objectif premier de fournir une information plus riche au niveau des petites déformations. Un programme de validation de ses capacités de mesure a été mis en place, reposant sur des essais de laboratoire et in situ. Cet article présente les premiers essais réalisés in situ sur des sables et des limons. Les résultats obtenus sont comparés à ceux issus de campagnes d'essais au pressiomètre Ménard classique, ainsi qu'à des essais de laboratoire plus sophistiqués réalisés sur les mêmes types de sols. Une discussion détaillée des résultats est proposée, mettant en lumière les avantages et les limites de ce nouveau pressiomètre.

Keywords: Pressuremeter; Degradation curve; Small strains; shear modulus.

1. Introduction

L'ingénieur géotechnicien est aujourd'hui confronté à des problèmes difficiles dans le dimensionnement de certains ouvrages de génie civil de grande importance sollicités en petites déformations (centrales nucléaires, ouvrages en site urbain, barrages, tunnels, plates-

formes,...). Il s'agit notamment des déformations dues à des sollicitations cycliques d'origine environnementale (houles, séismes) ou industrielle (routiers, ferroviaires, vibrations dues à des machines tournantes.).

Une partie de ces ouvrages repose sur des fondations, lesquelles doivent reprendre les composantes des efforts cycliques. Cela entraîne, en général, une dégradation des caractéristiques mécaniques des sols, phénomène qui doit

être pris en compte dans le dimensionnement. Bien que le calcul aux éléments finis permette d'aborder ces problèmes, mais sa mise en œuvre pratique reste freinée par le manque de fiabilité dans l'obtention des paramètres du sol significatifs pour le dimensionnement de ce type d'ouvrage, notamment les modules de cisaillement (G) à faibles taux de déformations.

Actuellement, les méthodes de dimensionnement s'appuient principalement sur les résultats des essais pressiométriques Ménard et ne concernent que les sollicitations monotones. Ces essais permettent d'obtenir un module pressiométrique Ménard (E_M) correspondant à un niveau de déformation en cisaillement d'environ 10^{-2} , bien inférieur au module d'élasticité réel du sol aux très faibles déformations. Cependant, le comportement de ces ouvrages géotechniques en service est principalement influencé par la rigidité du sol à des déformations de cisaillement plus faibles, comprises entre 10^{-4} et 10^{-2} , un scénario insuffisamment pris en compte par les méthodes de conception pressiométriques traditionnelles. Malheureusement, les équipements et procédures d'essai Ménard standard ne permettent pas de mesurer les paramètres de rigidité dans cette plage de faibles déformations. En revanche, les méthodes existantes permettant le dimensionnement sous charges cycliques, sont basées sur des paramètres de sol obtenus par essais de laboratoire.

Dans ce contexte, cet article propose l'utilisation d'un pressiomètre innovant équipé d'un palpeur de mesure, capable de mesurer des modules de cisaillement (G) des sols dans des plages de petites déformations. Cette avancée comble une lacune majeure des méthodes existantes, en offrant une caractérisation directe de la non-linéarité du sol et de sa dégradation. Les résultats in situ, comparés aux essais cycliques traditionnels en laboratoire, confirment le potentiel de cette méthode d'essai in situ. Ce pressiomètre offre un cadre complet pour l'évaluation des paramètres géotechniques clés, essentiels pour une meilleure compréhension du comportement non linéaire des sols soumis à des charges dynamiques ou sismiques.

2. Matériels et méthodes

2.1. Méthode de mesure de la déformation - Modèle de conception développé

Le pressiomètre utilisé dans cette étude diffère du pressiomètre Ménard conventionnel, comme illustré dans la Fig. 1. Il s'agit d'un prototype récemment développé et fabriqué à l'Université de Tlemcen (Algérie) en collaboration avec le Laboratoire des Sols, Roches et Ouvrages Géotechniques (SRO) de l'Université Gustave Eiffel (France). Contrairement aux pressiomètres classiques, ce nouvel appareillage pressiométrique utilise un système pneumatique plutôt qu'un système hydraulique. En d'autres termes, la pression cellulaire est appliquée au moyen d'une membrane remplie d'air et la déformation radiale du sol est mesurée directement à l'aide d'un palpeur de mesure au lieu de déduire les déplacements à partir des variations de volume d'un fluide, comme c'est le cas avec les pressiomètres Ménard classiques (Aissaoui et al., 2020 ; 2021).

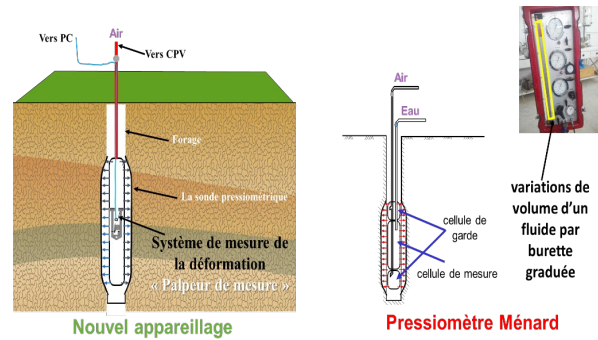


Figure 1. Principe de systèmes de mesure de la déformation des sols.

Lors d'un essai pressiométrique, les mesures de pression et de déformation sont enregistrées électroniquement à la surface du sol. La sonde est reliée à une unité de contrôle par des câbles électriques, qui transmettent les données à un convertisseur analogique-numérique. La déformation du sol est alors exprimée sous la forme d'une déformation radiale ε_r , égale à la variation du rayon de la membrane (ΔR) divisée par son rayon initial (R_0).

$$\varepsilon_R = \frac{\Delta R}{R_0} \quad (1)$$

2.2. Présentation du site d'essais

La partie expérimentale, dans le cadre des travaux de recherche, comporte plusieurs séries d'essais en vraie grandeur réalisés sur un seul site expérimental. Ce site est situé au campus de l'université Abou Bekr Belkaid, faculté de technologie, commune de Chetouane, wilaya de Tlemcen. La Fig. 2 montre la localisation géographique de la zone d'étude.

Les sols de ce site est constitué de sable argileux et des limons sur les premiers mètres.

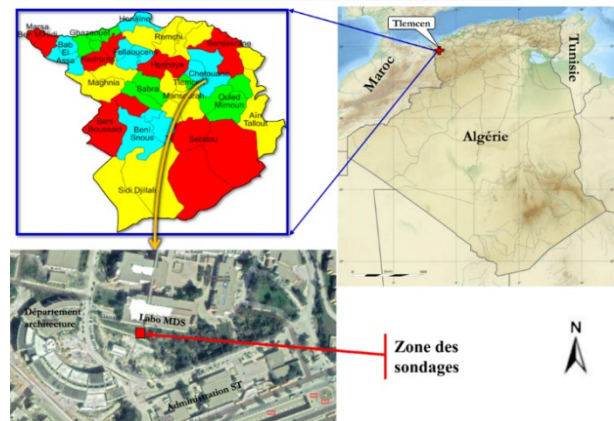


Figure 2. Lieu de réalisations d'essais pressiométriques.

2.3. Planning experimental

2.3.1. Essais au pressiomètre Ménard classique – MPMT

Dans un premier temps des essais pressiométriques type Ménard classique ont été réalisés en conformité de la norme Européenne en vigueur NF EN ISO 22476-4 (AFNOR, 2021). L'objectif principal de la réalisation de ces essais est de comparer les résultats obtenus en termes de l'évaluation du module de cisaillement sous des

domaines de petites déformations avec ceux réalisés avec l'appareillage développé. Le programme de chargement doit être du type de celui représenté sur la Fig. 3, c'est-à-dire que la pression doit être augmentée par des pas de pression identique et que chaque pression doit être maintenue constante pendant une durée Δt fixée.

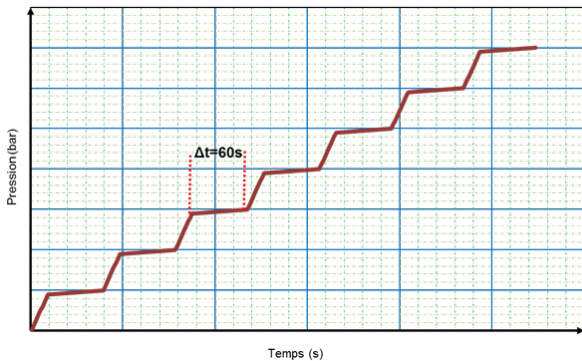


Figure 3. Programme de chargement selon la norme NF EN ISO 22476-4.

2.3.2. Essais d'expansion à vitesse de chargement constante – pressiomètre développé NPMT

Des 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). Ces essais sont effectués avec des chargements de 2 kPa sous une pression constante et un intervalle de temps constant pour déterminer les petites déformations. L'objectif est d'analyser le gain en précision sur le module de cisaillement par l'acquisition d'un nombre de points plus important. La Fig. 4 présente le programme de chargement d'un essai pressiométrique à vitesse de chargement constante.

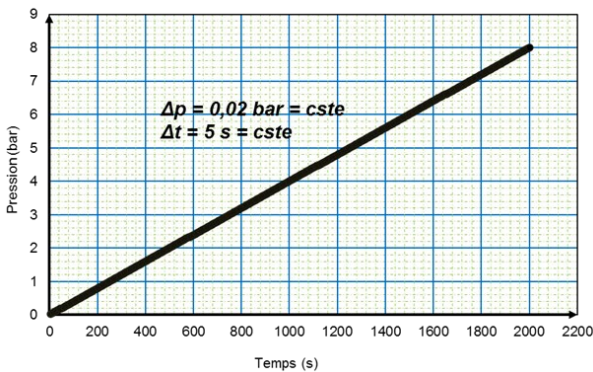


Figure 4. Procédure d'essais d'expansion à vitesse de chargement constante.

2.3.3. Essais avec boucle de déchargement-rechargement - pressiomètre développé NPMT

Le développement des essais pressiométriques avec boucle de déchargement-rechargement (essais monocycle) réside surtout dans le fait que cette procédure permettrait de mesurer in-situ un module de cisaillement plus représentatif du comportement du sol en petite déformation que l'essai traditionnelle. Dans le cadre de projets d'ouvrages souterrains ou de fondations, la connaissance de ce module est importante pour appréhender le comportement dynamique des sols que ce soit pour des calculs en déformation mettant en œuvre la méthode des éléments finis ou des méthodes analytiques.

La Fig. 5 illustre les notions adoptées et la procédure de chargement suivie.

Un essai pressiométrique avec boucle de déchargement-rechargement suit le même principe de chargement que celui de l'essai standard, 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 monotone sans palier jusqu'à une pression P_c proche de la pression de fluage ($P_c \cong P_f$). Pendant la deuxième phase est réalisé un déchargement partiel direct, c'est-à-dire sans palier, jusqu'à la pression (P_d) donnée par l'inégalité de l'éq. (2) avec P_0 c'est la pression de contact de la sonde avec la paroi du forage. Combarieu et Canépa (2001) ont écrit qu'il est souhaitable que l'amplitude des déformations soit la plus grande possible, c'est 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 limite P_l ou jusqu'à la pression maximale possible à atteindre.

$$P_0 < P_d < \frac{P_c}{2} \quad (2)$$

Selon les mêmes auteurs, l'amplitude du cycle ($P_c - P_d$) pour les sols purement cohérent ne doit pas être supérieure à deux fois la résistance au cisaillement non drainée ($2x C_u$). Par contre dans le cas d'un sol purement frottant (sable) on utilise l'expression suivante :

$$P_c - P_d \approx P_c * \frac{2 \cdot \sin(\phi')}{1 + \sin(\phi')} \quad (3)$$

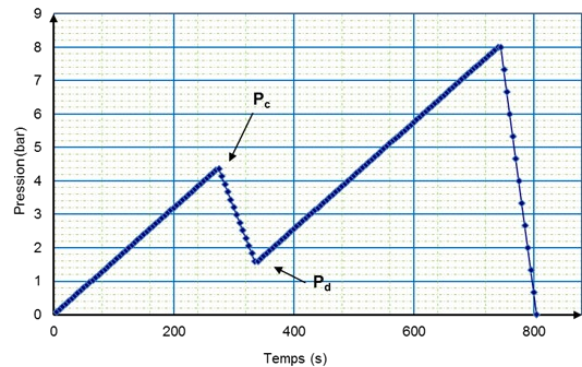


Figure 5. Procédure d'essai pressiométrique avec boucle de déchargement-rechargement.

3. Analyses et interprétations des résultats

3.1. Essais au pressiomètre Ménard classique – MPMT

Deux sondages pressiométriques Ménard classique ont été réalisés dans notre site SP1 et SP2. Pendant la réalisation de l'essai en augmentant la pression par paliers de pression égaux, les données de volume et de pression correspondant de la cellule de mesure sont notées pour construire la courbe pressiométrique ou courbe d'expansion (Fig. 6). En abscisse est indiquée la pression et en ordonnée la variation de volume.

On présente ci-après (Fig. 6) un exemple de résultat d'essai pressiométrique Ménard classique (courbe corrigée), on observe une phase initiale de mise en contact de la sonde avec la paroi du forage, La pression

mesurée, d'environ 176 kPa, correspond directement à la valeur de la pression horizontale en place (σ_{h0}).

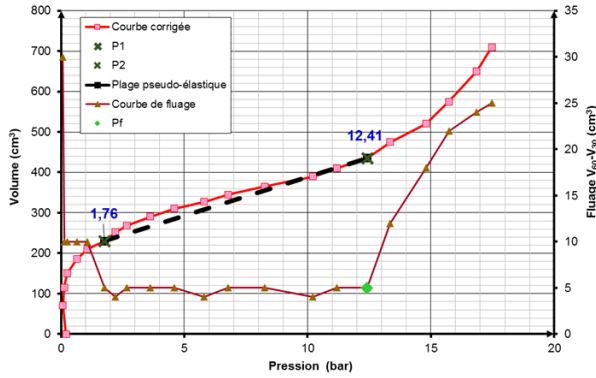


Figure 6. Exemple d'un résultat d'essai pressiométrique Ménard classique.

Le module de cisaillement G du sol est mesuré directement par l'expression suivante :

$$G = \frac{\Delta p}{\frac{\Delta V}{V_0}} \quad (4)$$

Où

Δp est la variation de la pression appliquée au bord de la cavité ; ΔV est la variation du volume de la cavité correspondant à Δp ; V_0 est le volume initial de la cavité. Cette relation suppose un comportement élastique linéaire isotrope du sol dans lequel l'essai est réalisé. Ce n'est bien sûr pas le cas. Ce type de relation est néanmoins encore appliqué pour l'exploitation courante des essais pressiométriques.

3.2. Essais au pressiomètre développé – NPMT

Les études expérimentales menées in situ à Tlemcen et sur le site de Chetouane sont des essais de validation en conditions réelles du pressiomètre développé. Ces études expérimentales ont eu pour objectif de valider la mise au point du pressiomètre proposé en vérifiant le fonctionnement du système des capteurs, d'acquisition et de pilotage de l'essai. Nous représentons sur la Fig. 7, le montage réalisé pour créer le poste de travail. Il s'agit du diagramme fonctionnel des réseaux pneumatique et électrique permettant la réalisation des différentes étapes d'exécution de l'essai pressiométrique.

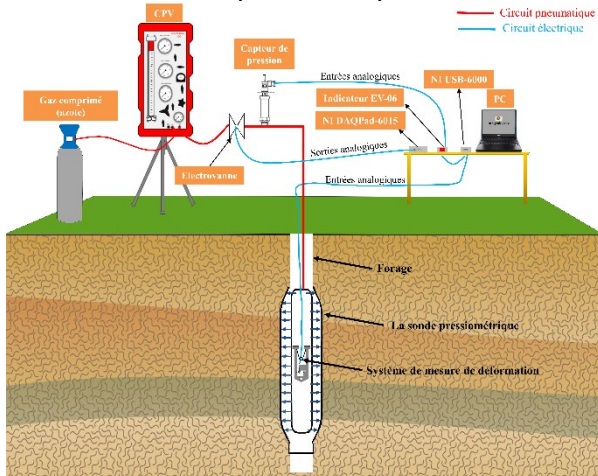


Figure 7. Architecture d'assemblage de l'appareillage.

3.2.1. Correction de la rigidité de la membrane

Selon le type de pressiomètre, le type de membrane et le sol à tester, les pertes de charge dues à la rigidité de la membrane doivent être correctement prises en compte pour obtenir des mesures précises de la variation de la contrainte pression-déformation. La correction de la perte de charge tient compte de l'augmentation de la résistance due à la rigidité de la membrane lors de la dilatation (ASTM, 2020 ; ISO, 2004). Cette correction est obtenue en dilatant la membrane à l'air libre.

La correction de la rigidité de la membrane est généralement effectuée sur la courbe d'essai pression-déformation après la fin de l'essai, dans le cadre de l'analyse des mesures du pressiomètre. Cependant, pour les essais pressiométriques cycliques, il est essentiel de corriger la rigidité de la membrane lors des cycles de chargement et de déchargement. Le programme de chargement cyclique permet de définir tout type de signal de chargement (par exemple, harmonique ou fréquences multiples) et de tenir compte de la rigidité de la membrane tout au long de l'essai.

La Fig. 8 représente la courbe de résistance propre de la membrane à $t = 1$ s et à $t = 60$ s, y figure aussi la courbe double hyperbolique qui schématise l'allure de la forme de la courbe d'étalonnage.

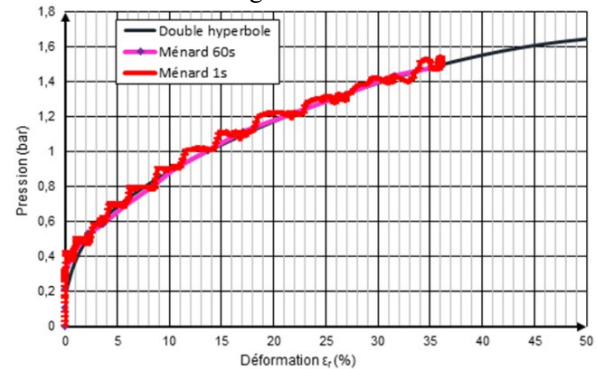


Figure 8. La courbe d'inertie de la membrane.

3.2.2. Essais d'expansion à vitesse de chargement constante

Une fois la sonde pressiométrique descendue à la profondeur voulue, les étapes de l'essai s'inspirent du protocole de chargement cité dans le paragraphe 2.3.2. La déformation radiale du sol est représentée par la déformation de la cavité ϵ_r , et la pression est la pression cellulaire appliquée au moyen d'une membrane remplie d'air, mesurée par un capteur de pression. Les données ont été enregistrées toutes les 1 seconde pour observer de plus près l'expansion de la cavité.

On peut voir sur la Fig. 9, que la pression mesurée est très proche du signal de consigne, ce qui confirme que le protocole d'asservissement développé fonctionne très bien. Si on fait un zoom sur la première phase du graphique de la Figure 9, on observe que l'asservissement répond très bien à la commande, ce qui montre clairement l'importance et la réussite de l'automatisation de la procédure d'essai pressiométrique.

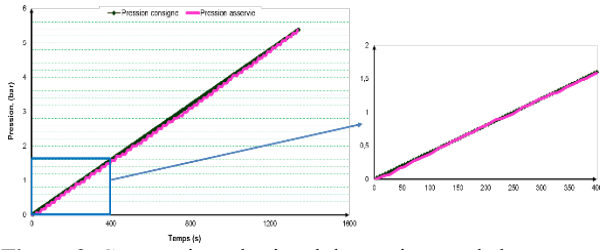


Figure 9. Comparaison du signal de consigne et de la mesure pour le cas de chargement continu à vitesse constante.

Contrairement à l'appareillage Ménard classique, le pressiomètre développé utilise un système pneumatique plutôt qu'un système hydraulique. C'est-à-dire que la pression est appliquée au moyen d'une membrane remplie d'air et les déplacements sont mesurés directement à l'aide d'un palpeur de mesure, plutôt que de déduire les déplacements à partir des changements de volume mesurés. A cet effet, il n'y a pas de correction due à la charge hydraulique, ni de correction due à l'expansion propre de l'appareillage. La contrainte exercée par la membrane sur le sol est la pression mesurée par le capteur de pression après correction en tenant en compte seulement de la rigidité de la membrane. Cette correction est réalisée suivant l'éq. (5).

$$p_c = p_r - p_e \quad (5)$$

Avec : p_c : pression corrigée, p_r : pression au niveau du contrôleur ; p_e : Pression due à la résistance de la membrane

Les courbes des essais d'expansion du sondage SP4, corrigées de la raideur de la membrane sont présentées sur la Fig. 10. On remarque que la correction est moins importante, elle dépend du type de la membrane utilisée. Chaque courbe de la figure 10 ci-dessous se réfère à un essai effectué à une profondeur donnée.

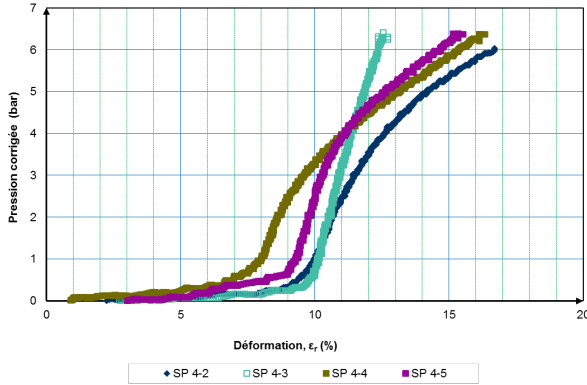


Figure 10. Courbes pressiométriques corrigées obtenues au droit du sondage SP4.

L'allure générale des courbes pressiométriques obtenues est remarquablement proche des courbes pressiométriques habituelles avec l'apparition de trois parties distinctes: une première partie) correspondant à la mise en contact de la membrane sur la paroi du forage et la recompactions du sol, 2) la deuxième phase approximativement linéaire traduit un comportement pseudo-élastique du sol, et 3) une troisième partie caractérisant le passage à la plasticité où le sol se rapproche de la rupture.

L'étude de la variation de la rigidité du sol a été réalisée par la détermination des modules de cisaillement

G à partir des courbes pressiométriques obtenus. Le module de cisaillement G est directement calculé à partir de la courbe pressiométrique, à différents niveaux de déformation avec l'éq. (6).

$$G = \frac{1\Delta p}{2\varepsilon_r} \quad \text{et} \quad \varepsilon_r = \frac{\Delta R}{R_0} \quad (6)$$

La Fig. 11 présente la variation des modules de cisaillement en fonction de la déformation et de la profondeur testée, pour les essais du sondage SP4.

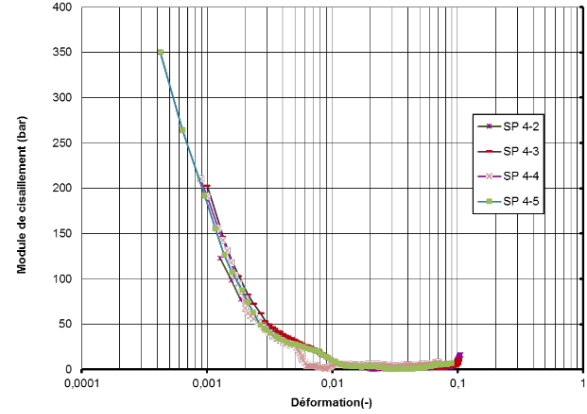


Figure 11. Courbes de dégradation des modules de cisaillement en fonction de la déformation, sondage SP4.

Nous remarquons que les essais avec l'appareillage que nous avons développé, ont permis de déterminer des modules de cisaillement dans la zone de petites déformations correspondant à un intervalle de déformation compris entre 10^{-2} à 10^{-4} où G varie fortement avec la déformation. Au-delà de 4 m de profondeur, les modules de cisaillement sont de l'ordre de 35 à 40 MPa. Nous observons aussi que le module de cisaillement diminue avec la déformation, avec une pente plus grande en petites déformations et moins grande en grandes déformations pour atteindre son asymptote. La richesse de ces courbes de dégradation se manifeste par la grande quantité d'informations qu'on peut obtenir pour chaque essai dans l'intervalle de petites déformations de 10^{-2} à 10^{-4} . Les essais présentent des courbes de résultats qui ressemblent sensiblement à ce que nous espérons obtenir.

Nous pouvons donc dire au vu des résultats que le mode opératoire de chargement continu à vitesse constante, comme proposé par Briaud (1992) ainsi que par le projet de norme européenne de l'essai au pressiomètre autoforeur (CEN, 2012) est assez fiable. Ceci se traduit par le gain en précision sur le module par l'acquisition d'un nombre de point plus important. Les résultats ont démontré que l'appareillage pressiométrique proposé donne des courbes de dégradation des modules de cisaillement des sols, qui couvrent le domaine allant des petites jusqu'aux grandes déformations sous un chargement continu.

Des essais avec boucle de déchargement-rechargement sont présentés dans le paragraphe suivant. Un des objectifs de ces essais est de tester notre appareillage à réaliser des essais cycliques dans des conditions réelles.

3.2.3. Essais avec boucle de déchargement-rechargement

Il a paru nécessaire pour valider l'utilité pratique de notre appareillage de tester in situ différents mode opératoires. Pour cela, le sondage SP5-2 a fait l'objet d'essais cycliques à l'aide de l'appareillage développé, dont le principe n'est pas une nouveauté. En effet, dès 1966, Louis Ménard a introduit cette procédure, en indiquant que le module pressiométrique mesuré sur un cycle, est pratiquement identique au module élastique ou de microdéformation. Il suggère d'utiliser ce module pour étudier le comportement des sols sous machines vibrantes (Ménard et Lambert, 1966).

Le mode opératoire de l'essai se déroule en respectant les phases successives mentionnées dans le paragraphe 2.3.3. La Fig. 12 montre un exemple de résultat obtenu lors d'un essai pressiométrique avec boucle de déchargement-rechargement.

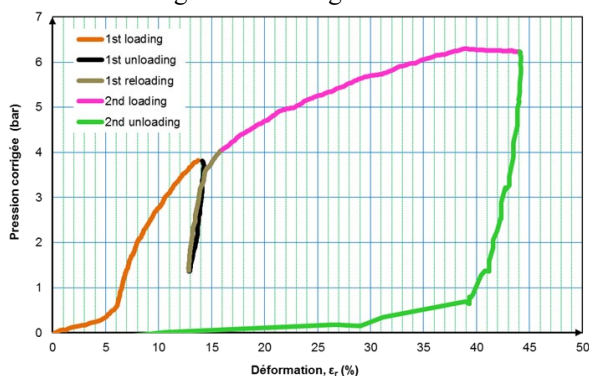


Figure 12. Courbe pressiométrique corrigée avec boucle de déchargement-rechargement obtenues a le su droit du sondage SP 5-2.

La détermination du module de cisaillement (rigidité du sol) est la tâche la plus importante dans les essais pressiométriques. Ce module (G) est un paramètre très important dans les conceptions géotechniques. Pour la détermination du module G , les petites boucles de décharge-recharge peuvent être effectuées dans la plage élastique comme le propose Wroth (1982). Différents types de modules sont déterminés à partir d'un essai pressiométrique avec boucle de déchargement-rechargement.

Un module de cisaillement G_{ur} est calculé à partir de la pente de la ligne joignant les sommets de la boucle. La pente de la ligne est égale à 2 fois le G_{ur} (Bellotti et al., 1989 ; Clarke, 1995). Le sommet supérieur de la boucle (point A) indique les valeurs maximales de pression et de déformation pour la détermination d'un module sécant de décharge G_u (unload) et le sommet inférieur de la boucle (point B) indique les valeurs minimales de pression et de déformation pour le calcul d'un module sécant de rechargement G_r (reload). Les modules sécants G_u et G_r ont été déterminés à partir des portions de déchargement ($p_A - p_B$) et de rechargement ($p_B - p_C$) de la boucle dont la méthode est présentée à la Fig. 13.

Le module Ménard classique mesuré à 2 m de profondeur du sondage SP1, est de l'ordre de 1219 Kpa. Cependant, les modules G_{ur} , G_u et G_r de la boucle de décharge-recharge sont 6 à 8 fois supérieurs aux modules pressiométriques Ménard classique G_M , et ont des valeurs de l'ordre de 6930 à 9673 Kpa. Ces résultats sont en

accord avec les constats de Ménard et Lambert (1966) et Combarieu et Canépa (2001).

Si le module Ménard classique G_M est acceptable pour certains calculs (par exemple, l'estimation du tassement des petites fondations sous leur charge de service), il ne peut être appliqué sans réflexion à n'importe quel problème. Notamment, il est clair que lorsqu'on s'intéresse aux déplacements associés à de petites déformations du sol (typiquement inférieures à 10^{-2}), le module pressiométrique Ménard G_M ne peut être considéré comme représentatif du comportement du sol.

D'après Hughes (1982); Wroth (1982); Powell et Ugrow (1985); Houlsby et Withers (1988); Lacasse et al. (1990), lorsqu'une mauvaise méthode de forage entraine un remaniement important du sol, les modules de cisaillement cycliques G_{ur} , G_u et G_r semblent moins sensibles à ce remaniement que les modules pressiométriques traditionnels.

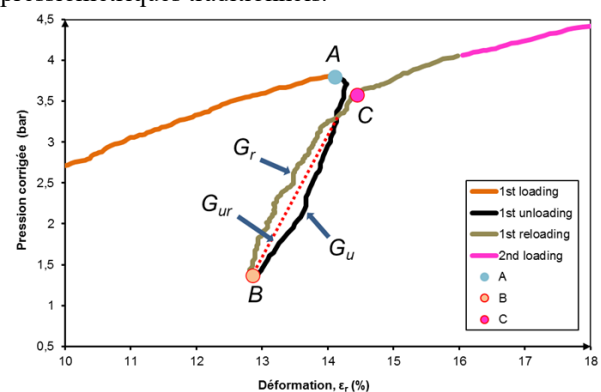


Figure 13. Boucle de déchargement-rechargement montrant les lignes pour calculer le G_u , G_r et G_{ur} .

On retiendra en conclusion que la procédure d'essai préconisée avec le matériel pressiométrique développé, permet d'obtenir des modules pressiométriques fiables complétant la panoplie des paramètres géotechniques. Ces derniers sont susceptibles d'être directement utilisés pour le calcul en déplacement de certains ouvrages géotechniques. On peut noter aussi que l'acquisition automatique des mesures de pression et de déformation est un facteur important de la qualité des essais pressiométriques avec cycle.

4. Essais de validation au laboratoire

Des travaux de validation du nouvel appareillage pressiométrique ont été réalisés avec des essais géotechniques de laboratoire plus sophistiqués tels que l'essai à la colonne résonnante et l'essai triaxial cyclique. Le comportement des sols prélevés sur le site de Tlemcen entre les faibles, moyennes à grandes déformations en conditions de laboratoire a été étudié.

4.1. Essais triaxiaux cycliques (TX-cyc)

L'objectif de ces essais est de fournir une courbe de dégradation des modules de cisaillement en fonction du taux de déformation et de comparer la valeur de ce module avec les résultats obtenus à partir des essais in-situ avec notre appareillage pressiométrique sur le même site. Les essais sont réalisés conformément au protocole adapté de la norme ASTM D 3999-91.



Figure 14. Dispositif de l'appareil triaxial cyclique utilisé.

4.2. Essais à la colonne résonante (CR)

Les essais de colonne résonante ont eu comme objectif de caractériser le comportement des sols dans le domaine des très petites déformations (entre 10^{-4} et 10^{-6}) (Fig. 15). Les mêmes contraintes de confinement appliquées aux éprouvettes testées à l'appareil triaxial cyclique ont été appliquées pour les essais à la colonne résonante. L'excitation est appliquée en tête de l'éprouvette par un système de bobines électromagnétiques. La fréquence d'excitation est augmentée jusqu'à obtenir la mise en résonance suivant le mode fondamental de vibration.



Figure 15. Appareillage de la colonne résonante utilisé.

5. Synthèse des résultats d'essais au laboratoire et in situ

Les courbes d'évolution des modules de cisaillement G en fonction de la déformation, obtenues à partir des essais de la colonne résonante, des essais triaxiaux cycliques, et des essais à l'appareillage pressiométrique développé, sont représentés sur la Fig. 16. L'allure irrégulière des courbes est due à des déformations non homogènes. Elles sont compatibles avec les travaux antérieurs proposés par Darendeli (2001), Vucetic et Dobry (1991), et Seed et Idriss (1970) pour des indices de plasticité de même ordre de grandeur que ceux des échantillons testés.

Nous avons pu conclure à la cohérence de l'ensemble des tests avec la littérature du point de vue de dégradation de module de cisaillement. Sur la base des essais de colonne résonante, plus fiables que les essais triaxiaux cycliques. La courbe de Seed et Idriss (1970) serait représentative de l'ensemble des sols testés. Les études menées en laboratoire et in situ montrent que la variation du module de cisaillement G en fonction de la déformation est non linéaire et qu'il existe un domaine de très petites déformations pour lequel le module G peut être considéré comme constant.

Les résultats expérimentaux obtenus par l'appareillage pressiométrique développé sont également en bon accord avec les résultats d'essais en utilisant le triaxial cyclique. Nous avons vérifié que les courbes expérimentales obtenues valident la faisabilité, la reproductibilité et la précision de l'appareil. Une estimation satisfaisante et pertinente du module de cisaillement est obtenue pour des niveaux de déformations faibles. Il nous apparaît que le nouveau pressiomètre permet la caractérisation des sols et la détermination de la dégradation du module de cisaillement allant des faibles taux de déformations à des moyens voire des grandes déformations.

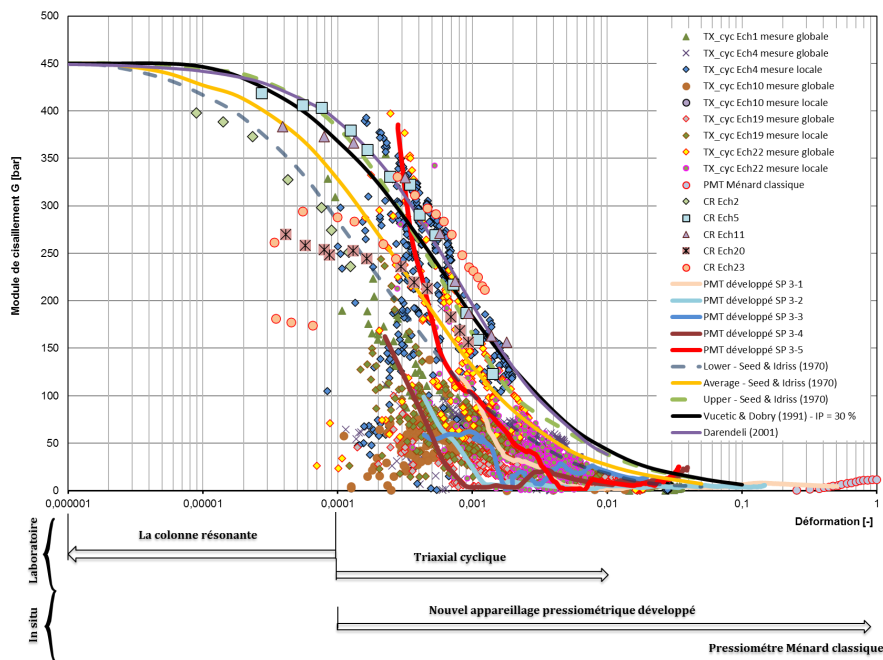


Figure 16. Dégradation des modules de cisaillement G en fonction de la déformation pour le site de Tlemcen.

6. Conclusion

L'objectif défini pour ce travail de recherche est de relancer la pratique du pressiomètre en développant une nouvelle génération d'appareil adapté à la mesure des petites déformations. La définition de cet objectif résulte d'un manque de fiabilité et des difficultés de l'essai pressiométrique standard dans la détermination des paramètres des sols sous faibles taux de déformations.

La validation du nouvel appareillage pressiométrique a consisté à réaliser des essais in situ dans des conditions opérationnelles réelles sur site. Des travaux de validation ont été réalisés avec des essais géotechniques de laboratoire plus sophistiqués tels que l'essai à la colonne résonnante et l'essai triaxial cyclique. Nous avons présenté l'évolution du module de cisaillement avec la déformation des sols de Tlemcen avec différentes techniques d'essai en laboratoire et d'essai en place. La comparaison des modules obtenus avec différentes techniques montre l'apport du nouvel appareillage pressiométrique dans l'identification des sols et la caractérisation de leur comportement en petites déformations dans le cadre d'une sollicitation sismique.

L'application in situ de la procédure décrite précédemment a permis d'obtenir des modules de cisaillement qui se sont avérés conformes aux propriétés élémentaires des sols déterminées à l'aide d'autres essais de laboratoire bien connus. Cela démontre la faisabilité d'évaluer une dépendance élémentaire équivalente contrainte-déformation du module de cisaillement des sols à partir d'essais pressiométriques correctement conçus. Dans nos travaux, la procédure a été validée dans une gamme de déformations compatible avec les exigences de conception des ouvrages géotechniques sous chargement cyclique.

7. References

AFNOR, 1999. Norme NF P 94-110-2 Essai pressiométrique Ménard – Partie 2 – Essai avec cycle.

AFNOR, 2021. NF EN ISO 22476-4 Reconnaissance et essais géotechniques — Essais en place — Partie 4 : essai pressiométrique dans un forage préalable selon la procédure Ménard.

Aissaoui, S., Zadjoui, A., Reiffsteck, Ph. 2021. A new protocol for measuring small strains with a pressuremeter probe: Development, design, and initial testing. *Measurement*, 169, 108507. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2020.108507>

Aissaoui, S., Zadjoui, A., Reiffsteck, Ph. 2020. Contribution of modification of a pressuremeter for an effective prediction of soil deformability. *Geomechanics and Engineering*, Vol.23, N°4, pp. 381–392. <http://dx.doi.org/10.12989/gae.2020.23.4.381>

ASTM, D3999-91 1996. Standard test methods for the determination of the modulus and damping properties of soil using the cyclic triaxial apparatus.

ASTM, 2020. Standard Test Methods for Prebored Pressuremeter Testing in Soils ASTM D4719. 13.

Bellotti, R., Ghionna, V., Jamiolkowski, M., Robertson, P.K., Peterson, R.W. 1989. Interpretation of moduli from self-boring pressuremeter tests in sand. *Géotechnique*, vol.39, No.2, 269-292.

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.

Clarke, B.G. 1995. *Pressuremeters in geotechnical design*. Blackie Academic and Professional, London, 364 pages.

Combarieu, O., Canépa, Y. 2001. L'essai cyclique au pressiomètre. *Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, N°233, pp. 37-65.

Darendeli, M. 2001. Development of a new family of normalized modulus reduction and material damping curves. PhD thesis. University of Texas.

Houlsby, G.T., Withers, N.J. 1988. Analysis of the cone pressuremeter test in clay. *Géotechnique*, Vol.38, N°4, pp. 575-587. <https://doi.org/10.1680/geot.1988.38.4.575>

Hughes, J.M.O., 1982. Interpretation of pressuremeter tests for the determination of elastic shear modulus. *Proc. Engng Fdn Conf. Updating Subsurface Sampling of Soils and Rocks and their In Situ Testing*. Santa Barbara, pp. 279-289.

Lacasse, S., D'Orazio, T.B., Bandis, C. 1990. Interpretation of self-boring and push-in pressuremeter tests. *Proc. 3rd Int. Symp. Pressuremeters*, Oxford, pp. 273-286

Ménard, L., Lambert, Ph. 1966. Étude expérimentale d'un massif de fondation soumis à des vibrations, *Sols Soils* (17)9-30.

Powell, J.J.M., Uglow, I.M. 1985. A comparison of Ménard self-boring pressuremeter and push-in pressuremeter tests in a stiff clay till. *Proc. Conf. Advances in Underwater Technology and Offshore Engineering*, London, No. 3, pp. 201-217.

Reiffsteck, P., Lossy, D., & Benoît, J. 2012. Forages, sondages et essais in situ géotechniques: Les outils pour la reconnaissance des sols et des roches. Paris: Presses des Ponts.

Seed, H.B., Idriss, I.M. 1970. Soil moduli and damping factors for dynamic response analyses. Report UCB/ EERC 70-10. Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, California

Vucetic, M., Dobry, R. 1991. Effect of soil plasticity on cyclic response. *ASCE Journal of the Geotechnical Engineering Division*, Vol.117, GT1, pp. 89-107. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9410\(1991\)117:1\(89\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9410(1991)117:1(89))

Wroth, C. P. 1982. British Experience with the Self-boring Pressuremeter. *Proc. Int. Symp. Pressuremeter and its Marine Appl.* Paris, pp. 143-164.