

Mesure de module de déformation des sols par essai de rechargement cyclique au pénétromètre

Soil deformation modulus measurement by cyclic reloading penetrometer test

Sébastien H.E. VOLCY¹, Christophe DANO¹, Luc SIBILLE^{1*}, Bruno CHAREYRE¹,
Hamid HOSSEINI-SADRABADI²

1 Univ. Grenoble Alpes, CNRS, Grenoble INP, 3SR, 38000 Grenoble, France

2 Equaterre : Geotechnical Design Office, 6 Rue de l'Euro, Annecy, 74960 Meythet, France

**luc.sibille@3sr-grenoble.fr*

RESUME : Cette communication présente une méthodologie originale pour la mesure de module de déformation des sols sur la base d'un essai pénétrométrique. Cette méthode s'appuie sur l'utilisation d'une pointe mécanique qui est actionnée une fois atteinte la profondeur d'investigation souhaitée. Grâce à un module de chargement spécifique, la pointe du pénétromètre est tout d'abord déchargée à cette profondeur, puis rechargée progressivement, par cycles successifs de déchargement/rechargement d'amplitude croissante en force. L'analyse des courbes « force sur la pointe – déplacement de la pointe », lors de cette phase de rechargement, permet d'une part d'identifier deux régimes distincts de réponse du sol (un régime pseudo élastique suivi d'un régime plastique), et d'autre part de remonter à des valeurs de module de déformation du sol.

Après une campagne d'essais dans des conditions contrôlées en chambre de calibration sur du sable de Fontainebleau GA39, le dispositif et la méthodologie ont été portés pour une première fois sur le terrain, en conditions « réelles ». Le site choisi présente un horizon de sable homogène et relativement propre au-delà de 5 m de profondeur. Les essais ont été réalisés dans cet horizon sableux, de nature similaire, au matériau utilisé en chambre de calibration. Cette communication présente la réalisation de ces essais sur le terrain et leur interprétation en termes de module de déformation et seuil du domaine pseudo-élastique, à la lumière de l'expérience acquise avec les essais en chambre de calibration.

ABSTRACT: This paper presents an original methodology for measuring soil deformation modulus based on a cone penetrometer test. This method involves a mechanical tip which is activated once the desired investigation depth has been reached. Using a specific loading device, the penetrometer tip is first unloaded at this depth, then gradually reloaded through successive cycles of unloading/reloading with increasing force amplitude. Analysis of the “tip force – tip displacement” curves during this reloading phase results, firstly, in identifying two distinct soil response regimes (a pseudo-elastic regime followed by a plastic regime) and, secondly, in determining the soil deformation modulus values.

After a series of tests conducted under controlled conditions in a calibration chamber using Fontainebleau GA39 sand, the device and methodology were used for the first time in the field, under real conditions. The considered site has a homogeneous and relatively clean sand horizon beyond a depth of 5 m. The tests were carried out in this sandy horizon, which is similar in nature to the material used in the calibration chamber. This paper presents the results of these field tests and their interpretation in terms of deformation modulus and pseudo-elastic domain threshold, in light of the experience gained from the calibration chamber tests.

Mots-clés: CPT ; mechanical tip ; deformation modulus ; pseudo-elastic regime.

1 INTRODUCTION

Le pénétromètre statique (CPT) est particulièrement bien adapté à la mesure des paramètres de résistance du sol, ce qui se fait généralement dans la pratique à l'aide de mesures de la résistance de pointe q_c , du frottement latéral f_s et de la pression interstitielle u dans le cas d'un CPTu. En tant que tel, il s'agit d'un test parfaitement viable pour les calculs de conception géotechnique à l'état limite ultime (ELU).

Néanmoins, des travaux ont été entrepris pour dériver un module de déformation du sol à partir des données CPT, soit par des corrélations empiriques ou semi-empiriques, soit par des essais spécifiques basés sur le CPT. Ces derniers comprennent en particulier le test de chargement au cône (CLT) proposé par Faugeras et al. (1983) et développé successivement par Zhou (1997), Arbaoui et al. (2006) et Reiffsteck et al. (2009). Cet article présente la modélisation physique en laboratoire, et la mise en œuvre sur le terrain d'un

essai non standard basé sur le CPT : l'essai de pénétration à rechargement cyclique (CRPT pour « Cyclic Reloading Penetration Test »). Comme pour le CLT, mais de conception différente, l'objectif de cet essai est d'accéder, au moyen d'un pénétromètre, à des propriétés de déformation du sol, et non seulement à des propriétés de rupture, utiles pour la conception des ouvrages géotechniques à l'état limite de service (ELS)

La réalisation de l'essai CRPT requiert une pointe mécanique mobile contrôlée par un dispositif de chargement spécifique développé par la société EQUATERRE (Riegel, 2017). L'essai commence par une phase de pénétration monotone, selon la norme NF EN ISO 22476-12 (Durand, 2010). Une fois la profondeur cible atteinte, la pointe est déchargée à une petite fraction de q_c suffisante pour maintenir la compression du sol sous celle-ci. Ensuite, des cycles à amplitude croissante contrôlés en force sont appliqués à la pointe seule. Cette méthodologie permet d'étudier la réponse du sol sous différents niveaux de contrainte sous la pointe.

La modélisation physique a été réalisée en chambre de calibration sur du sable de Fontainebleau GA39 dont l'état de densité initial est contrôlé. Les essais in-situ ont été effectués sur une couche naturelle de sable graveleux propre. Dans une première partie de cet article sont détaillés le principe de l'essai CRPT et les variables, représentatives du sol, déduites de cet essai. Les caractéristiques des essais en chambre de calibration sont données dans une seconde partie. Le contexte géologique et le mode de réalisation des essais in-situ sont présentés dans une partie suivante. La discussion des résultats, incluant une comparaison entre les essais en chambre de calibration et in-situ, est menée dans une quatrième partie. Dans une dernière partie, les modules de déformation issus de l'essai CRPT sont comparés à ceux obtenus via un sondage pressiométrique.

2 PRINCIPE DE L'ESSAI CRPT

2.1 Matériel

Le dispositif d'essai au CRPT comprend :

- Un pénétromètre muni d'une pointe conique formant un angle de 60° (Figure 1a), selon la norme NF EN ISO 22476-12 (Durand, 2010), avec une section droite de 4 cm^2 (rayon $r_p = 11,3 \text{ mm}$) pour les essais en chambre de calibration, et 10 cm^2 ($r_p = 17,8 \text{ mm}$) pour les essais in-situ. La pointe mécanique est reliée à des tiges internes coulissant à l'intérieur de tubes externes, ce qui lui

permet de se translater indépendamment du corps du pénétromètre.

- Un système de chargement (Figure 1b) comprenant deux vérins : un vérin global pour une pénétration monotone standard via les tubes externes, et un vérin local pour le chargement cyclique de la pointe en déplaçant les tiges internes indépendamment des tubes externes. Cette configuration isole le chargement de la pointe du reste du corps du pénétromètre et élimine les effets, sur les mesures, du frottement entre les tubes et le sol.

Des capteurs de force et de déplacement sont situés au niveau de chaque vérin et connectés à un système d'acquisition de données. Les capteurs au niveau du vérin global permettent de mesurer la force appliquée sur la pointe et le train de tubes externes et de connaître la profondeur de la pointe. Les capteurs placés au niveau du vérin local mesurent la force appliquée sur la pointe uniquement et la position de la pointe par rapport au train de tubes externes.

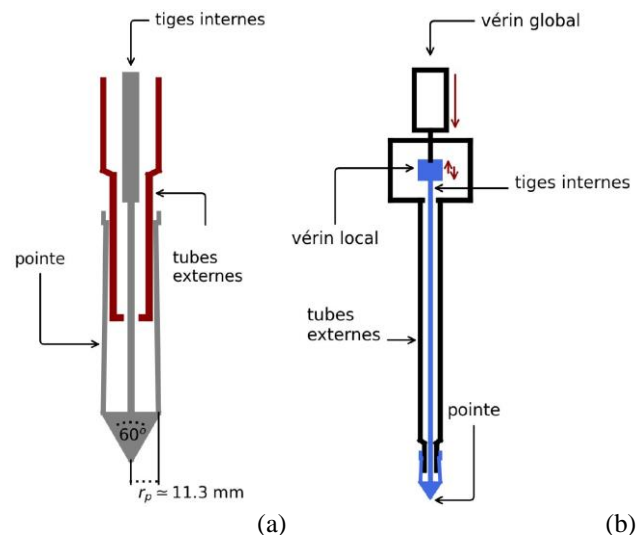


Figure 1. (a) Pointe mécanique actionnée par un train de tiges internes coulissantes dans un train de tubes externes ; (b) système de chargement pour la réalisation de l'essai CRPT muni d'un vérin global agissant sur le train de tubes et d'un vérin local agissant sur le train de tiges internes

2.2 Méthodologie de l'essai

La réalisation de l'essai à une profondeur donnée comporte trois étapes :

1. Le pénétromètre est enfoncé dans le sol jusqu'à une profondeur cible en poussant sur le train de tubes externes avec le vérin global. La résistance de pointe q_c est enregistrée à ce stade. Ensuite, le vérin global, initialement engagé pour la pénétration, est immobilisé.
2. La pointe est déchargée via le vérin local jusqu'à une petite fraction de q_c , suffisante pour maintenir

le sol sous la pointe en compression. Cette fraction est ici arbitrairement fixée à 5 %.

- Le sol est rechargé de manière cyclique, toujours à l'aide du vérin local. Les tiges internes étant directement reliées à la pointe, seule cette dernière est mobilisée. Des cycles de rechargement à amplitude croissante et à force contrôlée sont appliqués. Pour deux cycles quelconques, le rapport entre leurs périodes est égal au rapport entre leurs amplitudes, ce qui garantit un taux de contrainte constant sur la pointe, que ce soit en chargement ou en déchargement.

Les cycles sont effectués suffisamment lentement, avec un temps d'exécution de 60 secondes pour le premier cycle, afin de garantir un régime quasi statique et des conditions de drainage complet dans le cas de sols saturés grossiers, tels que des sables (les conditions de drainage dans les sols fins sont encore à étudier en détail). Ainsi, la vitesse mesurée de la pointe lors du rechargement cyclique est de l'ordre de 10^{-4} m/s à 10^{-3} m/s. De plus, il en résulte des cycles de rechargement triangulaires en termes de force sur la pointe en fonction du temps, comme le montre la Figure 2a pour un essai typique. Sur cette figure, la contrainte sur la pointe q est normalisée par la résistance de pointe q_c mesurée préalablement à la phase de rechargement cyclique ; ou de manière équivalente la force F sur la pointe normalisée par F_c , la force associée à q_c .

2.3 Réponse mesurée type et définition des variables d'interprétation

La Figure 2b montre le déplacement w typique de la pointe normalisé par son rayon r_p en fonction du temps t . Ce déplacement est globalement croissant (la pointe s'enfonce dans le sol) avec des parties faiblement décroissantes lors des phases de décharge de la pointe (la pointe remonte légèrement). La force appliquée sur la pointe peut être tracée en fonction de son déplacement telle que présenté sur la Figure 3 via les variables normalisées F/F_c et w/r_p . En général, les premiers cycles force-déplacement présentent une réponse quasi réversible, alors que, au-delà d'un seuil en force, les cycles force-déplacement sont ouverts, témoignant d'une dissipation plastique importante.

La Figure 4 présente un cycle type extrait de la réponse du sol lors d'un rechargement cyclique (tel que sur la Figure 3 qui comprend vingt cycles). Les parties AB et BC du cycle correspondent respectivement aux phases de chargement et de déchargement. Le déplacement irréversible de la pointe sur un cycle est représenté par le segment AC et est désigné par δ_i dans la suite. Le module de rechargement, qui est abordé

dans la partie suivante, est lié à la pente S_c de la ligne AB, appelée rigidité sécante du sol.

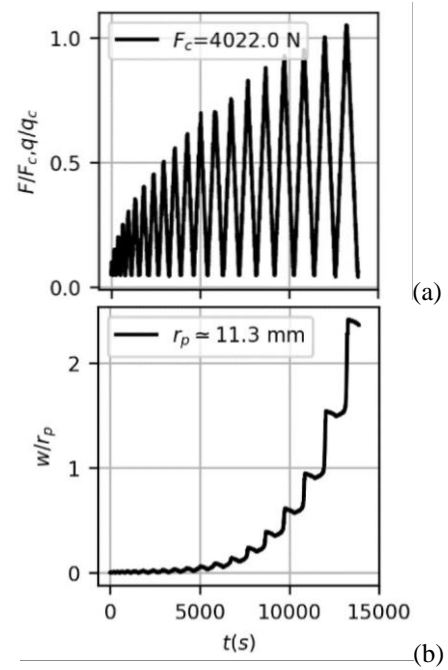


Figure 2. (a) Rechargement cyclique de la pointe contrôlé en force par application de cycles d'amplitude croissante (ici 20 cycles) et (b) réponse du sol mesurées en termes de déplacement de la pointe au fil des cycles.

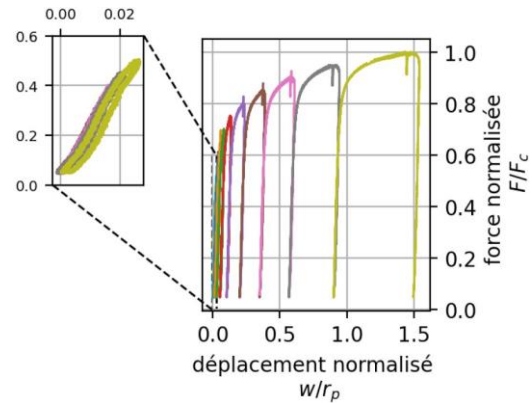


Figure 3. Résultat brut typique d'un essai CRPT représenté en termes de force appliquée sur la pointe en fonction du déplacement de cette dernière.

2.4 Module pénétrométrique

Un module de déformation, noté E_{pn} et appelé module pénétrométrique selon Reiffsteck et al. (2009), peut être dérivé de S_c selon la relation suivante :

$$E_{pn} = \frac{S_c}{r_p} \cdot \frac{(3 - 4\nu)(1 + \nu)}{4\pi(1 - \nu)} \quad (1)$$

où ν est le coefficient de Poisson du sol pris égal à 0,33.

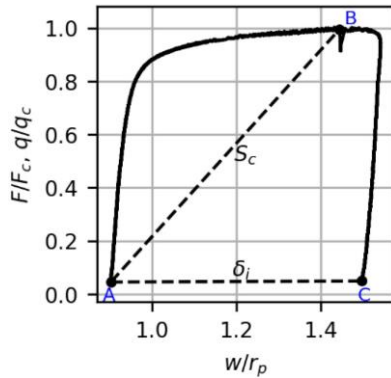


Figure 4. Définition de la raideur sécante S_c et du déplacement irréversible δ_i sur un cycle extrait de l'ensemble des cycles d'un essai CRPT.

Comme indiqué, entre autres, par Faugerat et al. (1983), cette relation trouve son origine dans une interprétation de l'essai selon le problème théorique de Kelvin considérant une charge concentrée appliquée en un point intérieur à un milieu élastique semi-infini (Mindlin, 1936). L'interprétation conduisant à l'Equation (1) consiste à assimiler la pointe à une plaque circulaire rigide, infiniment encastrée dans un volume de sol, supposé isotrope, homogène, élastique linéaire.

3 ESSAIS EN CHAMBRE DE CALIBRATION SUR DU SABLE DE FONTAINEBLEAU GA39

3.1 Chambre de calibration

La chambre de calibration utilisée pour le modèle physique présente une hauteur de 1,28 m pour un diamètre interne de 58,8 cm. La chambre est considérée comme parfaitement rigide, empêchant tout déplacement du sol normal à sa paroi cylindrique. En revanche, la face supérieure de l'échantillon de sol est laissée libre, sans application de contrainte, pour les essais présentés ici.

3.2 Sol testé

Les essais sont réalisés sur du sable de Fontainebleau de type GA39 (fourni par la société Sibelco). Il s'agit d'un sable fin subarrondi à arrondi dont le diamètre médian des grains d_{50} est de 113 μm , et dont le coefficient d'uniformité C_u est de 1,2.

Les échantillons de sol sont préparés en déposant le sable à l'aide de seaux pour remplir progressivement la chambre de calibration. Une faible hauteur de chute de quelques centimètres permet d'obtenir un échantillon lâche. Pour obtenir un échantillon dense, chaque couche de sable d'environ 5 cm d'épaisseur,

obtenue par le mode de dépôt précédent, est compactée manuellement à l'aide de 30 coups d'une dame carrée de maçon de 5,6 kg. Cette méthode de préparation a été adoptée après de nombreuses tentatives infructueuses de pluviation du sable. En effet, la finesse des grains de sable conduisait systématiquement à la formation de tourbillons dans l'écoulement granulaire formé par le pluviateur.

La densité relative initiale $D_{r,0}$ d'un échantillon de sable, estimée avant tout chargement, est supposée uniforme dans toute la chambre de calibration. Elle est déterminée à partir de la masse totale de sable utilisée pour remplir cette dernière.

3.3 Essais considérés

Les résultats discutés dans cet article, issus des essais en chambre de calibration, correspondent à deux échantillons de sols décrits dans le Tableau 1. La densité relative est calculée avec $e_{min} = 0,56$ et $e_{max} = 1,03$. Le premier échantillon, Cc_GA39_L est typiquement lâche alors que le deuxième, Cc_GA39_D, est initialement dans un état dense.

Tableau 1. Caractéristiques des essais réalisés en chambre de calibration

Essai	$D_{r,0}$	Compacité	q_c (MPa)
Cc_GA39_L	0,02	Très lâche	0,27
Cc_GA39_D	0,70	Dense	6,75

4 ESSAIS IN-SITU

4.1 Contexte géologique du site d'essais

Les essais CRPT in-situ ont été réalisés sur le site du Bourget-du-Lac en région Auvergne-Rhône-Alpes. Préalablement, des essais CPT conventionnels ont été réalisés à plusieurs endroits de ce site et montre une stratigraphie homogène (en plan) du sous-sol. La Figure 5 présente les résultats en termes de résistance de pointe q_c et de rapport de frottement R_f d'un essai CPT réalisé au droit des essais CRPT discutés plus loin et représentatif de l'ensemble du site. A l'aide de sondages complémentaires à la pelle, la coupe géologique suivante peut-être dressée :

- de 0 à 1,0 m de profondeur : remblai constitué de sable gravelo-limoneux,
- de 1,0 m à 4,8 m : argile grise,
- de 4,8 m à 10,5 m : sable propre avec lentilles de sable graveleux,
- de 10,5 à 15,0 m : argile potentiellement sableuse.

La nappe d'eau a été repérée à environ 1,8 m de profondeur.

Le choix a été fait de réaliser des essais CRPT dans la couche sableuse propre afin de se situer dans un

matériau relativement proche de celui utilisé dans la chambre de calibration. Dans cette couche, q_c oscille entre 2 et 6 MPa ce qui correspond à un sable dans un état relativement lâche. Ce sable est considéré comme propre avec un R_f quasi nul, du moins jusqu'à 8 m de profondeur. Toutefois, contrairement aux essais en chambre de calibration réalisés sur du sable sec, les essais CRPT ont ici été réalisés sur du sable saturé.

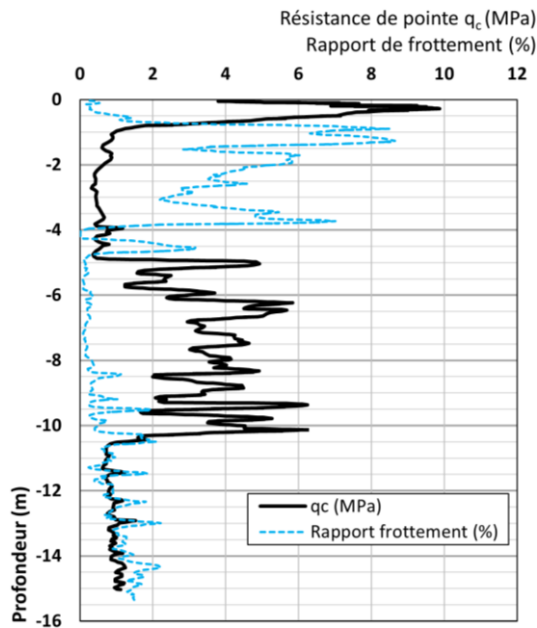


Figure 5. Essai CPT conventionnel réalisé à la position des essais CRPT sur le site du Bourget-du-Lac.

4.2 Caractéristiques des essais CRPT réalisés

Deux essais CRPT ont été réalisés à 6,0 m de profondeur, pour l'essai « InSitu_1 », et 6,2 m pour l'essai « InSitu_2 », avec le dispositif de fonçage présenté sur la Figure 6. Ce dernier, constitué d'un vérin global et d'un vérin local (suivant le principe présenté sur la Figure 1b), est monté ici sur une mini pelle mécanique qui permet d'accéder à tout type de terrain.

Le déchargement de la pointe précédant la réalisation des cycles de rechargement a été effectué jusqu'à 5% de q_c (comme en chambre de calibration). Toutefois, le choix a été fait d'augmenter les incréments d'amplitudes des cycles lors du rechargement à 10% de la résistance de pointe (au lieu des 5% adoptés en chambre de calibration). La durée totale d'un essai CRPT s'en trouve alors considérablement réduite, passant de typiquement 3h en chambre de calibration à 1h in-situ.

La Figure 7 présente pour l'essai InSitu_1 la réponse du sol à l'essai CRPT en termes de force normalisée sur la pointe F/F_c en fonction de son déplacement normalisé w/r_p . Dans un premier temps,

l'allure générale des réponses typiques observées en chambre de calibration (voir Figure 3) est retrouvée : sur les premiers cycles, de plus faible amplitude en force, les déplacements mesurés de la pointe restent faibles alors que ceux-ci s'amplifient notablement avec des cycles force-déplacement clairement ouverts à partir du 8^e ou 9^e cycle.



Figure 6. Système de chargement utilisé pour la réalisation des essais CRPT in-situ monté sur une mini pelle mécanique.

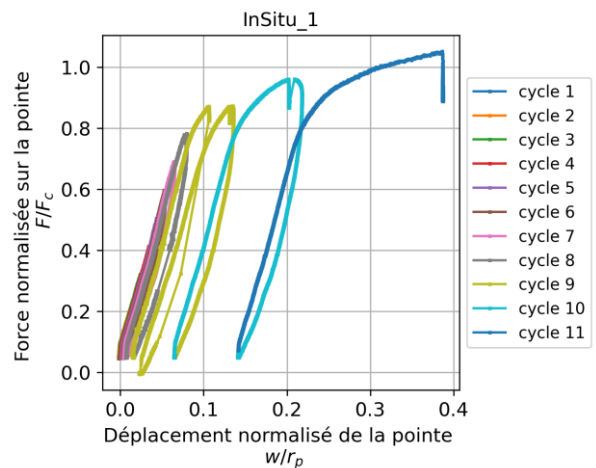


Figure 7. Courbe brute force-déplacement de l'essai CRPT « InSitu_1 »

5 INTERPRETATION DES ESSAIS CRPT

Que ce soit à partir des CRPT réalisés en chambre de calibration ou bien de ceux réalisés sur le terrain, l'interprétation des CRPT repose sur l'examen du déplacement irréversible de la pointe au fil des cycles (tel que défini dans la partie 2.3) ainsi que sur le module pénétrométrique (défini dans la partie 2.4).

5.1 Domaine pseudo-élastique

La Figure 8 présente le déplacement irréversible incrémental δ_i (i.e. pour chaque cycle) normalisé par le rayon de la pointe r_p , en fonction de l'amplitude de contrainte sur les cycles $(\Delta q)_{\max}$, normalisée par q_c . Sur cette même figure sont comparés les résultats sur le sable de Fontainebleau GA39, lâche et dense, et les deux essais réalisés in-situ dans la couche sableuse.

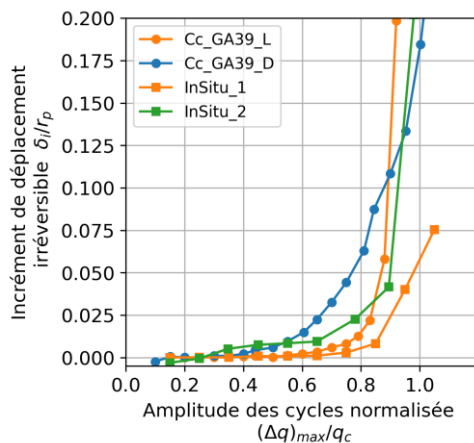


Figure 8. Déplacements irréversibles mesurés lors des essais en chambre de calibration sur le sable de Fontainebleau et lors des essais in-situ dans la couche sableuse

Comme on peut le constater, pour tous les essais, deux domaines distincts peuvent être identifiés. Dans le premier, déterminé par des cycles à faible amplitude normalisée, la pointe revient presque à sa position initiale à la fin d'un cycle courant (déplacements de l'ordre de $r_p/100$ ou moins). Cependant, au-delà d'un certain seuil en contrainte, les déplacements irréversibles de la pointe augmentent nettement à chaque cycle. Pour le sable de Fontainebleau dense (Cc_GA39_D) ce seuil se situe autour de $(\Delta q)_{\max}/q_c = 0,5$. Il est à environ $(\Delta q)_{\max}/q_c = 0,7$ pour l'état initial lâche (Cc_GA39_L). Ce seuil est plus élevé, en relatif, pour le sable lâche. Toutefois, en valeur absolue de pression sous la pointe, ce seuil se situe évidemment plus haut pour l'état dense ($q \approx 3,7$ MPa) que lâche ($q \approx 0,2$ MPa). Pour les deux essais in-situ ce seuil est relativement répétable, autour de $(\Delta q)_{\max}/q_c = 0,7$. La couche sableuse investiguée étant dans un état lâche, ce résultat est en accord avec le seuil identifié en chambre de calibration pour le sable de Fontainebleau lâche.

Ces seuils marquent le début du deuxième domaine, où des déformations de plus en plus importantes se produisent dans le sol, conduisant finalement à la rupture. Le premier domaine, caractérisé par une absence de déformation plastique significative à l'échelle macroscopique, définit un

domaine pseudo-élastique, qui est pertinent à considérer pour le dimensionnement des ouvrages à l'ELS.

5.2 Module pénétrométrique

Pour un essai CRPT, le module pénétrométrique est calculé pour chaque cycle, puisque pour chaque cycle est défini une raideur sécante S_c (Figure 4). Ainsi, il est tiré d'un essai CRPT une évolution du module pénétrométrique en fonction du niveau de sollicitation en contrainte correspondant à l'amplitude des cycles. Autrement dit, un essai CRPT conduit à une courbe de dégradation du module pénétrométrique. La Figure 9 présente ces courbes de dégradation pour les essais sur le sable de Fontainebleau et les essais in-situ. Le module pénétrométrique E_{pn} est tracé en fonction de l'amplitude de contrainte normalisée des cycles $(\Delta q)_{\max}/q_c$.

Concernant les essais en chambre de calibration sur le sable de Fontainebleau, on observe un effet notable, et attendu, de la densité initiale. La courbe de dégradation de E_{pn} pour l'échantillon dense est au-dessus de celle pour l'échantillon lâche, avec des valeurs de module environ 3 fois plus importantes dans l'état dense. Un autre trait caractéristique des résultats sur le sable de Fontainebleau est la décroissance de E_{pn} plus marquée au-delà d'un seuil de sollicitation en contrainte correspondant à $(\Delta q)_{\max}/q_c = 0,45$, pour atteindre des valeurs beaucoup plus faibles, voire nulles lorsque $(\Delta q)_{\max}/q_c$ s'approche de 1. C'est-à-dire lorsque la contrainte imposée sous la pointe s'approche de la résistance de pointe q_c mesurée préalablement à l'essai CRPT. Pour l'échantillon dense, E_{pn} ne s'annule pas totalement lorsque $(\Delta q)_{\max}/q_c = 1$, correspondant au fait que la contrainte de rupture sous la pointe suite à l'essai CRPT est supérieure à q_c mesuré avant l'essai.

Concernant les essais réalisés in-situ, on remarque tout d'abord une assez bonne répétabilité des mesures de E_{pn} entre les deux essais réalisés à 20 cm de distance. Les valeurs du module pénétrométrique, aux environs de 10 MPa, sont en cohérence avec celles mesurées sur le sable de Fontainebleau dans le sens où elles sont voisines des valeurs de E_{pn} obtenues sur l'état initialement lâche du sable de Fontainebleau ; la couche sableuse testée sur le terrain étant elle-même lâche en regard des résultats du CPT réalisé au même endroit (Figure 5).

Une différence notable avec les essais en chambre de calibration porte sur la dégradation du module avec l'amplitude des cycles, qui reste relativement limitée pour les essais in-situ. Ce n'est qu'après $(\Delta q)_{\max}/q_c = 0,8$ que cette dégradation semble se confirmer. Le retardement de cette dégradation

pourrait être due à une densification du sol en place, initialement lâche, induite par le rechargement cyclique. Par ailleurs, il a été constaté en chambre de calibration, sur des essais non présentés ici, un effet apparent de la contrainte verticale sur la dégradation de E_{pn} . Or, le sol testé in-situ, à environ 6 m de profondeur, est soumis à une contrainte géostatique bien supérieure à celle présente en chambre de calibration, où la surface de l'échantillon de sable a été laissée libre. Ce point reste actuellement à être étudié plus en détail.

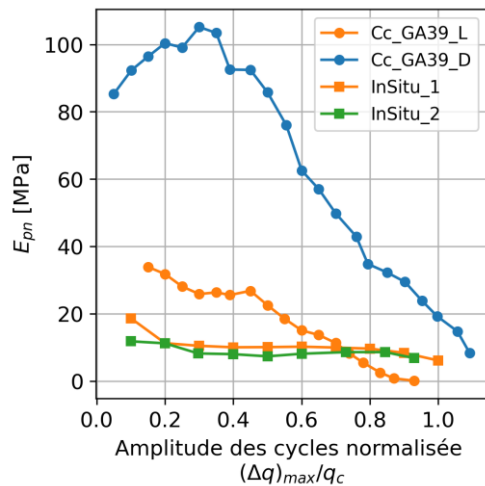


Figure 9. Modules pénétrométriques déduits des essais CRPT en chambre de calibration sur le sable de Fontainebleau et des essais in-situ dans la couche sableuse.

6 COMPARAISON DES MODULES PENETROMETRIQUES ET PRESSIOMETRIQUES

Un sondage pressiométrique a été réalisé au point de réalisation des essais CRPT. Dans la couche de sable, le forage a été réalisé avec un trépan tricône sous flux d'eau. Les essais réalisés sont des essais pressiométriques avec un cycle de rechargement conformément à la norme XP P 94-110-2 (Parez, 1999). Trois essais ont été réalisés dans la couche de sable à 5 m, 6,5 m et 8 m de profondeur respectivement, en utilisant un tube fendu.

A titre d'exemple, la courbe pressiométrique corrigée obtenue à 6,5 m est présentée sur la Figure 10. On observe, sur cette figure, le chargement initial jusqu'à une pression $p = 0,4$ MPa, le déchargement, puis le rechargement à partir de $p = 0,05$ MPa environ. La courbe pression-volume présente dans la phase de chargement initiale, ainsi que dans la phase de rechargement (avant d'entrer dans le domaine dit de « fluage »), une pente quasi constante qui permet de définir clairement le module pressiométrique Ménard E_M dans la phase de chargement initial, et le module

pressiométrique Ménard de rechargement E_R dans la phase de rechargement. Les essais réalisés à 5 et 8 m de profondeur sont tout à fait similaires à celui présenté sur la Figure 10.

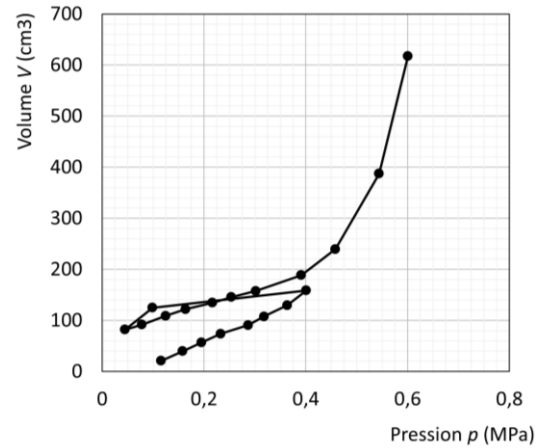


Figure 10. Courbe pressiométrique corrigée avec cycle de rechargement de l'essai réalisé à 6,5 m de profondeur.

Les modules pressiométriques E_M et E_R obtenus sont tracés sur la Figure 11. Il y a une légère croissance des modules avec la profondeur (ce qui peut s'expliquer par l'accroissement de la contrainte géostatique) de 2,3 à 5,3 MPa pour E_M et de 4,3 et 9,6 MPa pour E_R . Ces valeurs sont en accord avec la nature sableuse et lâche de la couche testée. Sont également reportés sur la Figure 11 les valeurs du module pénétrométrique mesurées à 6 et 6,2 m de profondeur et respectivement pour des amplitudes de cycle $(\Delta q)_{max}/q_c = 0,1$ et $0,5$. Les valeurs de E_{pn} pour $(\Delta q)_{max}/q_c = 0,1$ (1^{er} cycle de rechargement) sont bien supérieures à celle des modules pressiométriques, ce qui est cohérent avec le fait que la réponse du sol lors de ce 1^{er} cycle est proche d'une réponse élastique. Le module E_{pn} pour $(\Delta q)_{max}/q_c = 0,5$ s'approche des valeurs de E_M et E_R , tout en restant supérieur d'un facteur 2 environ. Les modules mesurés au pressiomètre et au CRPT apparaissent donc en cohérence sachant que les différences entre les deux essais n'ont pas lieu de conduire à des valeurs identiques :

- le CRPT sollicite le sol dans la direction verticale alors que le pressiomètre le sollicite dans la direction horizontale. Le sol n'étant a priori pas isotrope, la mesure du module doit effectivement dépendre de la direction de sollicitation.
- Le volume de sol sollicité au pressiomètre est sans doute plus important que celui sollicité lors du CRPT, sachant que la longueur de la cellule centrale du pressiomètre est de 210 mm. On peut donc s'attendre à une résolution spatiale un peu plus élevée avec le CRPT, ce qui peut conduire,

dans ce sable lenticulaire, à une plus grande hétérogénéité des modules mesurés. Cela reste à confirmer en multipliant les mesures de E_{pn} à différentes profondeurs dans cette couche de sol.

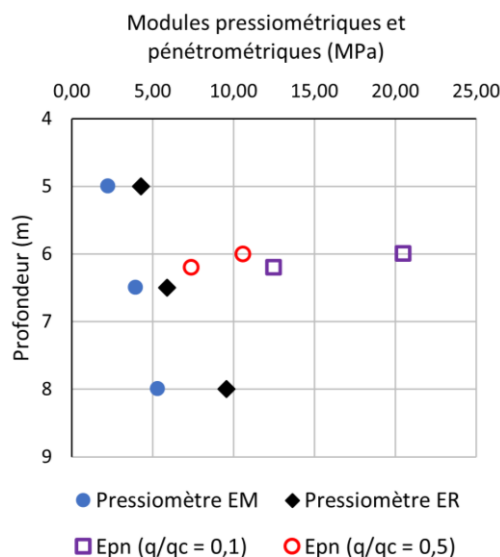


Figure 11. Comparaison des modules pressiométriques et pénétrométriques obtenus dans la couche sableuse

7 CONCLUSION

Un nouvel essai de pénétration à rechargement cyclique (CRPT), basé sur l'essai pénétrométrique, a été présenté. Cet essai a été appliqué en chambre de calibration sur du sable de Fontainebleau GA39 dans des états initialement denses et lâches. Cet essai a également été mis en œuvre sur le terrain dans une couche de sable propre.

Les résultats de ces essais montrent tout d'abord qu'il est possible d'identifier une transition entre une réponse pseudo-élastique du sol et une réponse plastique en fonction du niveau de sollicitation en contrainte. L'identification de ce seuil pourrait constituer une aide pour la détermination, en ingénierie, du niveau de contrainte admissible à l'ELS.

De plus, l'essai CRPT conduit à la détermination d'un module pénétrométrique E_{pn} et à sa dégradation en fonction du niveau de sollicitation en contrainte. Les essais en chambre de calibration montrent une dépendance claire de E_{pn} à l'état de densité du sable. Les mesures de E_{pn} in-situ sont également cohérentes, d'une part avec les essais en chambre de calibration et d'autre part avec des mesures de modules pressiométriques également effectuées sur le terrain. CRPT et pressiomètre correspondent toutefois à deux technologies différentes qui n'ont a priori pas lieu de conduire à des valeurs de module identiques.

Les essais présentés ici ont été réalisés sur du sable propre. Il reste important de multiplier les essais CRPT sur différentes natures de sols, et différentes conditions (de saturation par exemple), et de poursuivre la confrontation avec des essais de référence, pour évaluer la pertinence de la solution proposée et ses limites.

REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient le bureau d'ingénierie Equaterre et sa filiale Equatech.R&D pour leur soutien financier à cette étude.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Arbaoui, H., Gourvès, R., Bressolette, P., Bodé, L. (2006). Mesure de la déformabilité des sols in situ à l'aide d'un essai de chargement statique d'une pointe pénétrométrique. *Canadian geotechnical journal* 43:355-369. <https://doi.org/10.1139/t06-01>
- Durand (2010). NF EN ISO 22476-12, Reconnaissance et essais géotechniques, Essais en place, Partie 12 : Essai de pénétration statique au cône à pointe mécanique. AFNOR, La Plaine St-Denis.
- Faugeras, J.C., Fortuna, G., Gourvès, R. (1983). Mesure de la compressibilité des sols à l'aide du pénétromètre statique. *In Reconnaissance des Sols et des Roches par Essais en place*, Paris, France, 269–274.
- Mindlin, R.D. (1936). Force at a point in the interior of a semi-infinite solid. *Physics*, 7(5) :195-202. <https://doi.org/10.1063/1.1745385>
- Parez (1999). XP P 94-110-2 Sols: reconnaissance et essais, Essai pressiométrique Ménard, Partie2 : Essai avec cycle. AFNOR, Paris la Défense.
- Reiffsteck, P. H., Thorel, L., Bacconnet, C., Gourves, R., Van De Graaf, H. C. (2009). Measurements of soil deformation by means of cone penetrometer. *Soils and foundations*, 49(3):397-408. <https://doi.org/10.3208/sandf.49.397>
- Riegel, P. (2017). Pénétromètre statique pour l'évaluation du caractère liquéfiable d'un sol et procédés associés. Dépôt de brevet FA841687 18.
- Zhou S. (1997). *Caractérisation des sols de surface à l'aide du pénétromètre dynamique léger à énergie variable type "Panda"*. PhD thesis, Clermont-Ferrand 2, France.