

# ESSAIS D'EXPANSION PRESSIOMÉTRIQUES AVEC MESURE DE PRESSION INTERSTITIELLE – APPLICATION SUR LE SITE DU LARIVOT

## **PRESSUREMETER EXPANSION TESTS WITH PORE PRESSURE MEASUREMENT - APPLICATION ON THE LARIVOT SITE**

Philippe Reiffsteck<sup>1</sup>, Vincent Savatier<sup>2</sup>, Panagiotis Georgios Karagianopoulos<sup>3</sup>, Michael Peronne<sup>3</sup>, Fabien Szymkiewicz<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Université Gustave Eiffel-IFSTTAR, GERS-SRO, Champs sur Marne, France

<sup>2</sup> EGIS géotechnique, Toulouse, France

<sup>3</sup> Jean Lutz SA, Jurançon, France

**RÉSUMÉ** – Cette communication présente la démarche et les résultats d'une campagne d'essais pressiométriques cycliques avec mesure de pression interstitielle incluant une phase de dissipation de la pression interstitielle à volume constant. Cette campagne d'essais a été réalisée à proximité de la culée Sud (ou rive droite) du futur nouveau pont du Larivot à Cayenne, en Guyane.

**ABSTRACT** – This paper presents the approach and results of a cyclic pressuremeter tests campaign with pore pressure measurement including a constant volume pore pressure dissipation phase. This test campaign was carried out near the South abutment (or right bank) of the future new Larivot bridge in Cayenne, Guyana.

### **1. Introduction**

Cette communication présente le déroulement des essais de dissipation réalisés avec les prototypes de sondes pressiométriques développés par Jean Lutz SA au niveau de la culée du nouveau pont du Larivot en rive droite et présente une interprétation préliminaire des résultats. Ces travaux se sont inspirés des prescriptions de la norme XP P94-110-2 de façon que les essais soient comparables aux essais réalisés jusqu'à présent par la profession que l'on interprétait sans l'apport nouveau d'une mesure de la pression interstitielle pendant l'essai. On aura ainsi la possibilité :

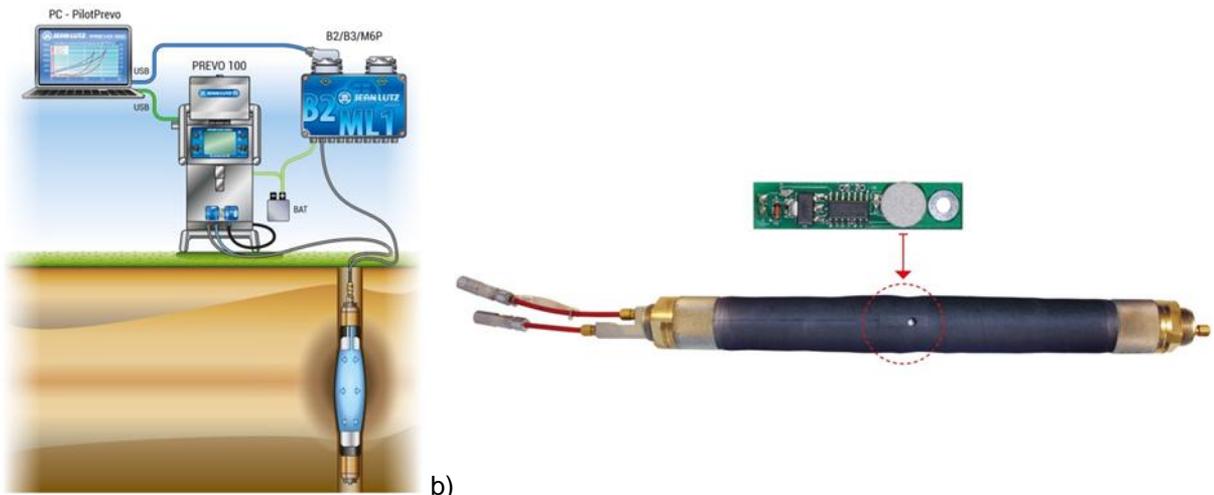
- d'en tirer des enseignements sur les essais de ce type ayant été utilisés par le passé pour la construction d'ouvrages existants.
- de pouvoir à l'avenir promouvoir la mesure de la pression interstitielle lors des essais pressiométriques par les acteurs économiques en les appliquant à un essai qu'ils connaissent et dont ils savent évaluer le coût.

### **2. Matériel**

Le forage en rotation réalisé avec un tricône à bouton de 63 mm a permis de mettre en place les sondes développées par Jean Lutz SA (Karagiannopoulos et al., 2019; Karagiannopoulos, 2020). La Figure 1a présente l'architecture du matériel utilisé et sa mise en œuvre sur le terrain. Un boîtier B2-ML1 contenant le module de conversion analogique numérique acquiert les signaux du capteur de pression interstitielle positionné sur la sonde et les signaux des capteurs de pression placés en amont des électrovannes du pressiomètre automatique Prevo pour mesurer lorsque celles-ci sont fermées. Il contient également le module d'alimentation. Les signaux sont transmis au PC via un port USB. Le logiciel PilotPrevo enregistre ces mesures et envoie les consignes au Prevo. La mesure de la pression interstitielle se fait à mi-hauteur de la sonde par un capteur et son

circuit électronique embarqué qui sont fixés sur la gaine de la sonde souple ou les lamelles du tube fendu (Figure 1b).

La Figure 2 présente le matériel mis en œuvre sur le chantier. Une sonde à gaine souple pour l'horizon argileux et un tube fendu pour les matériaux sous-jacents.



a) b)  
Figure 1 Principe du système de mesure Jean Lutz SA (a) Schéma de l'appareillage complet (b) vue de la carte électronique et localisation sur la gaine d'une sonde nue (source Jean Lutz SA)



a) b)  
Figure 2 (a) Matériel pressiométrique (sonde nue et tube fendu) et (b) Poste de travail de l'essai pressiométrique mis en œuvre sur le chantier

### 3. Protocole d'essais

La Figure 3 résume le principe général d'un essai composé d'une première phase de chargement par paliers respectant la norme XP P 94-110-2 (phase de contact notée 1, phase pseudo-élastique notée 2, phase de décharge recharge notée 3 et phase de rechargement notée 4) puis d'une phase de dissipation à volume constant, initiée à une pression initiale proche de  $1,2 \cdot p_f$ . L'essai se termine par une phase de déchargement en cinq paliers. Les notations utilisées sur cette figure sont :

$p_{r1}$  : la pression de début de phase pseudo élastique (la XP P 94-110-2 renvoie à la NF P 94-110-1 mais définition absente dans celle-ci, sans doute  $p_1$  du §D.2.1) ;

$p_f$  : la pression de fluage selon la NF EN ISO 22476-4 (définition proche de celle de la pression  $p_{rD}$  qui est le palier qui suit la pression  $p_{r2}$ )

$p_{r2}$  : la pression correspondant à l'extrémité de la plage pressiométrique de la XP P 94-110-2 §5.1.a

$p_{r3}$  : la pression de début de phase de rechargement

$p_E$  : la pression de l'origine du segment de pente  $m_E$  selon NF EN ISO 22476-4 §D.5.1

$E_M$  : module Ménard selon NF EN ISO 22476-4 §D.5.2

$E_R$  : module de rechargement selon la XP P 94-110-2 §6.b

$u_{ini}$  : pression interstitielle mesurée à la fermeture du robinet

$u_0$  : pression interstitielle hydrostatique mesurée ou estimée

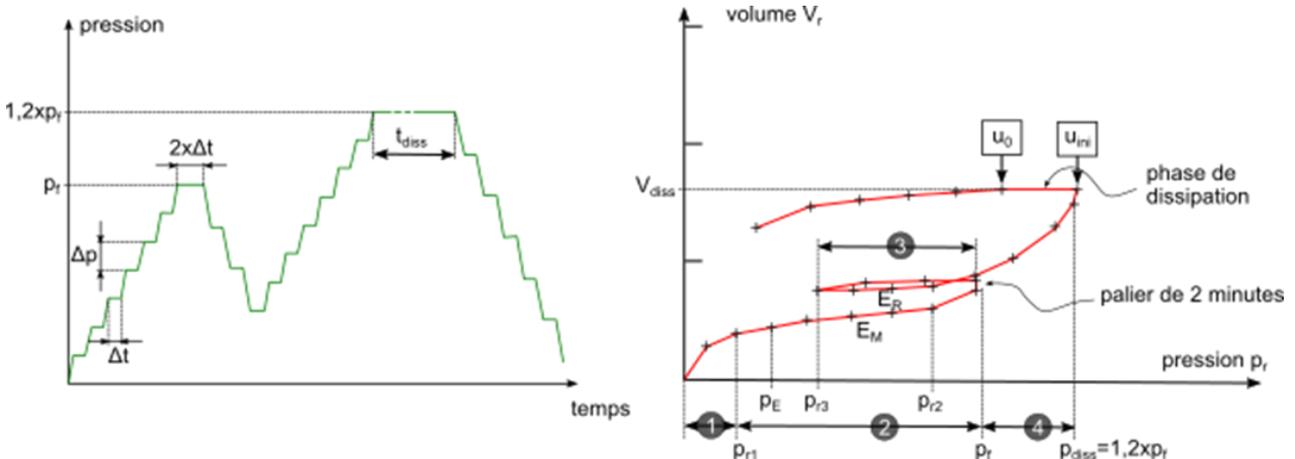


Figure 3 Protocole d'essais mis en œuvre

La boucle de décharge-recharge (notée 3) est légèrement différente de celle proposée par la norme. Celle-ci a en effet été jugée très défavorable à l'essai car comportant un risque avéré de rupture en traction du sol en déchargeant trop les parois du forage. Nous avons donc pris :

$$p_{r3} = p_f - \frac{3}{4} \cdot (p_{r2} - p_{r1}) \quad (1)$$

à la place d'une définition d'une pression entraînant un déchargement total :

$$p_{r3} = p_E \quad (2)$$

#### 4. Résultats de la campagne au Larivot

Les 8 premiers mètres ont été directement tubés en 104/113 mm avec de l'eau pour fluide de forage. Des passes de 2 m ont été privilégiées dans l'horizon argileux puis de 5 m dans l'horizon suivant. En fin de chaque passe de forage, un fluide bentonitique a été circulé pour une centaine de litres pour stabiliser la cavité.

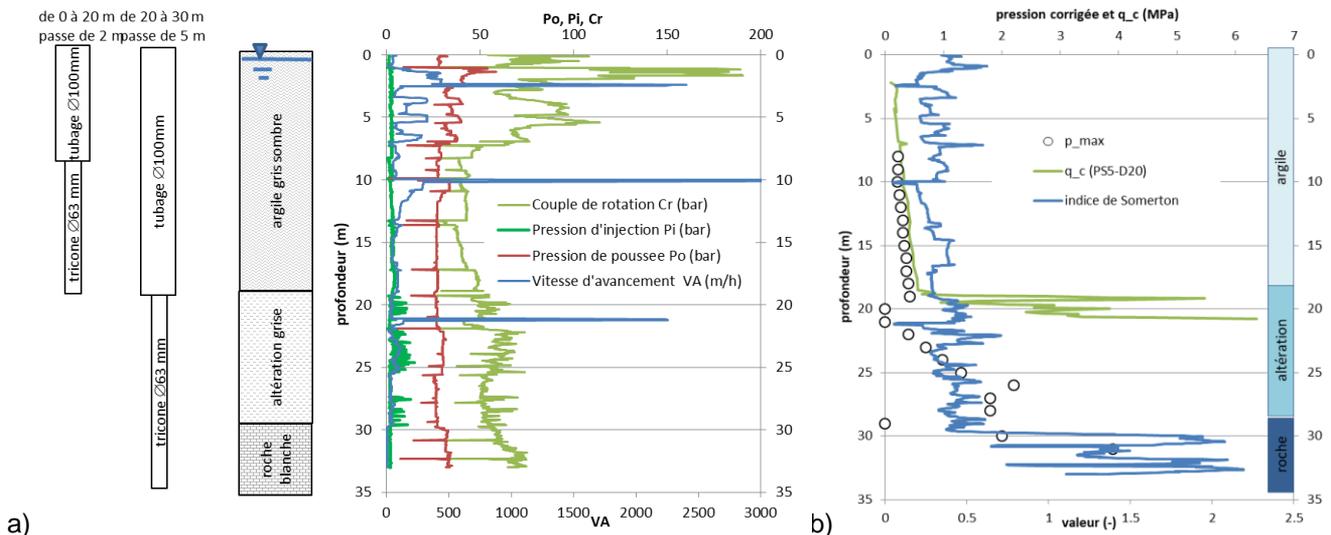


Figure 4 Profils (a) du mode de réalisation de la cavité, des paramètres de forage et (b) des paramètres dérivés des essais pressiométriques et pénétrométriques et des paramètres de forage

La campagne de reconnaissance du projet comportait des sondages au pénétromètre statique avec des essais de dissipation. La Figure 4 représente les paramètres de forage obtenus lors de la réalisation des essais. L'indice de Somerton  $I_s = P_o / \sqrt{V_a}$  est un bon

indicateur des transitions lithologiques et discrimine précisément les trois couches observées à la remontée des débris de forage (Reiffsteck et al., 2018).

La Figure 5 présente les résultats bruts du pilotage de l'essai avec les différentes phases définies sur la Figure 3 pour l'essai à 15 m de profondeur.

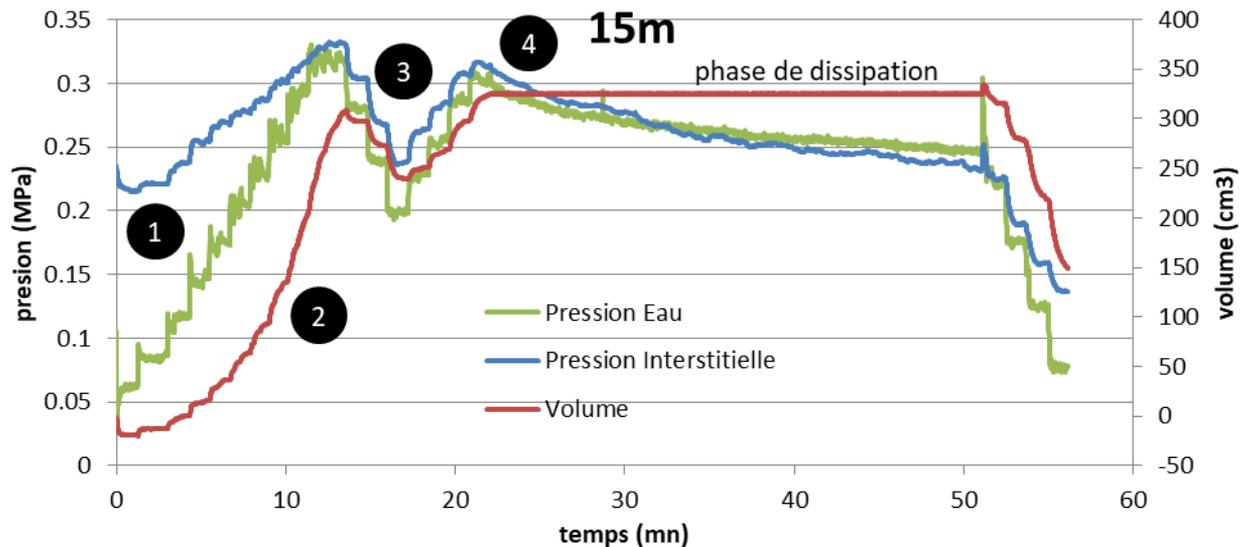


Figure 5 Courbes des résultat bruts en fonction du temps

La détermination des modules sur les courbes vierges et les boucles a été réalisée selon les normes en vigueur pour le module pressiométrique Ménard  $E_M$  (NF EN ISO 22476-4) et de rechargement  $E_R$  (XP P 94-110-2) et sur différents segments pour les modules sécants de rechargement et déchargement (Figure 6). On a avec les notations de la Figure 3 :

$$E_M = 2 \cdot (1 + \nu) \cdot \left( V_s + \frac{V_E + V_{r2}}{2} \right) \cdot \frac{p_{r2} - p_E}{V_{r2} - V_E} \quad (3)$$

$$E_R = 2 \cdot (1 + \nu) \cdot \left( V_s + \frac{V_{r3} + V_f}{2} \right) \cdot \frac{p_f - p_{r3}}{V_f - V_{r3}} \quad (4)$$

Les modules effectifs ont été calculés en soustrayant les pressions interstitielles mesurées au moment de la mesure du couple pression-volume. La formule (5) ci-dessous est pour le module Ménard effectif  $E'_M$ , une définition similaire a été utilisée pour le module de rechargement  $E'_R$ .

$$E'_M = 2 \cdot (1 + \nu) \cdot \left( V_s + \frac{V_E + V_{r2}}{2} \right) \cdot \frac{(p_{r2} - u_{r2}) - (p_E - u_E)}{V_{r2} - V_E} \quad (5)$$

Les rapports des modules Ménard et de rechargement ont des évolutions perturbées dans la zone de transition à 19 m, puis ils croissent rapidement dans la zone d'altération, le matériau devenant vite compact (Figure 6).

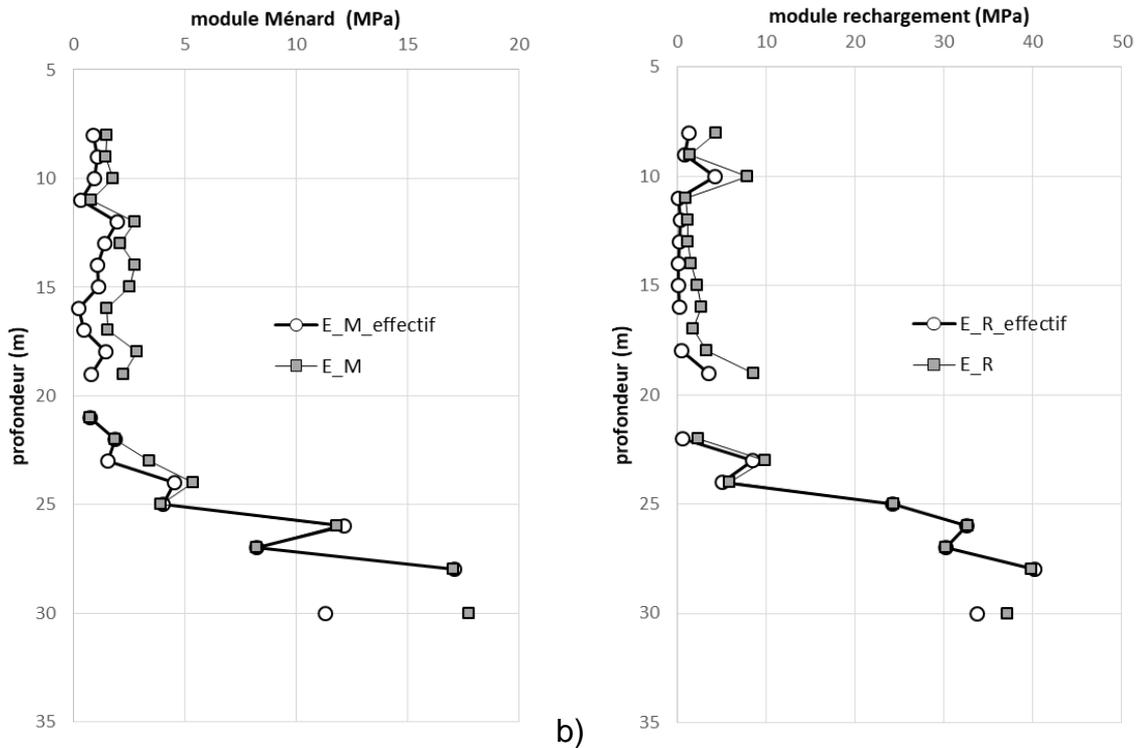


Figure 6 Comparaison des profils des (a) modules pressiométriques Ménard (NF EN ISO 22476-4) et (b) modules de rechargement (NF P 94-110-2) avec les valeurs effectives

La plage utilisée pour le calcul du module de rechargement étant plus grande que pour le module Ménard, dans les matériaux mous de la première couche, du fait de l'hystérésis, des valeurs inférieures au module Ménard sont observées (Figure 6).

La Figure 6 permet de comparer les modules effectifs ou "long terme" aux modules Ménard et de rechargement normalisés. Les modules effectifs ou "long terme" sont inférieurs aux modules normalisés en moyenne de 50% dans la couche supérieure et quasiment identique dans la couche d'altération (89%). Pour les modules de rechargement, ce rapport tombe à 30-40% pour la couche molle et reste élevé dans la couche d'altération (85%). Les valeurs négatives observées pour le module de rechargement effectif découlent également de la définition de ce module.

### 5. Essais de dissipation

La Figure 7 présente les résultats des essais de dissipation qui ont été maintenus pendant 30 minutes. Nous n'avons représenté ici que les résultats obtenus dans la couche argileuse.

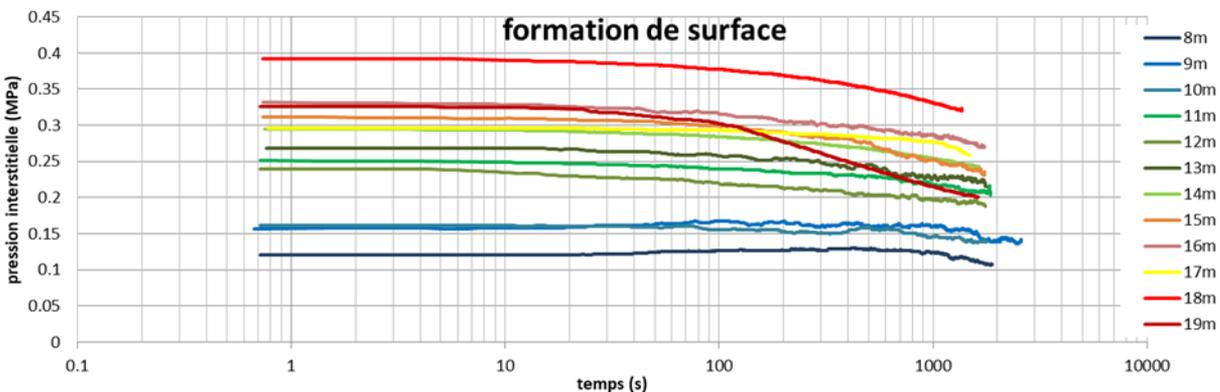


Figure 7 Courbes de dissipation dans la formation argileuse imperméable

Les valeurs de la pression interstitielle au début de la phase de dissipation  $u_{ini}$  ont été estimées avec la méthode de Casagrande, c'est-à-dire une hypothèse de décroissance en racine carrée. La valeur finale  $u_0$  correspond à la hauteur piézométrique sauf pour la couche d'altération où un décalage a été observé et nous nous sommes servis de l'essai à 21 m pour caler la pression hydrostatique.

Pour analyser les données de dissipation, nous avons privilégié la méthode proposée par van Baars et van de Graaf (2007), s'intéressant au cas à volume constant et qui correspond à notre configuration au détriment de celles classiquement utilisées (Lunne et al., 1997) se basant sur la consolidation, soit à volume de sol variable.

Pour un écoulement bidimensionnel axisymétrique :

$$\frac{\delta p}{\delta t} = c_{\beta} \cdot \left( \frac{\delta^2 p}{\delta r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\delta p}{\delta r} \right) \quad (6)$$

avec  $c_{\beta} = \frac{k}{n \cdot \beta \cdot \gamma_w}$ , coefficient de consolidation

Où

$n$  est la porosité du milieu prise à 0,4 pour un sable à 0,7 pour le sol organique ;

$k$  est la perméabilité prise égale à  $1 \cdot 10^{-9}$  dans l'argile et  $1 \cdot 10^{-8}$  m/s dans l'altération ;

$\beta$  est la compressibilité de l'eau qui vaut  $0,5 \cdot 10^{-9}$  m<sup>2</sup>/N lorsque la saturation est parfaite ;

$\gamma_w$  est le poids volumique de l'eau pris égal à 10 kN/m<sup>3</sup>.

La résolution de cette équation consiste en des fonctions de Bessel et une forme exponentielle. Le tableur Microsoft Excel disposant de ces fonctions, la résolution est rapide.

La Figure 8 montre la détermination de la valeur de  $t_{50}$ , et le calage de la courbe de la méthode de van Baars et van de Graaf (2007). Un bon calage est observé pour tous les essais réalisés.

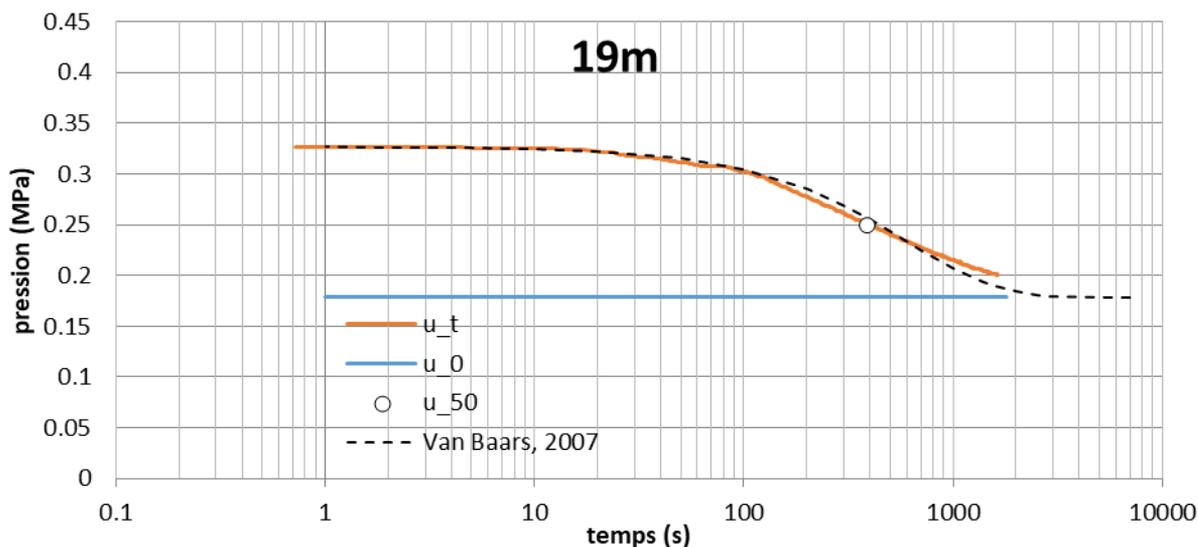
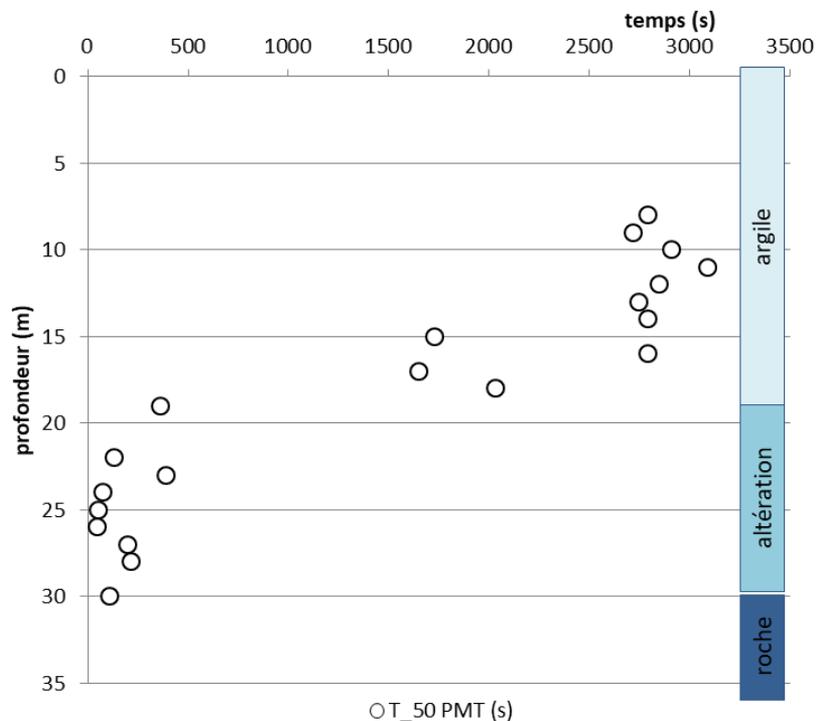


Figure 8 Courbes de dissipation et évaluation de  $t_{50}$  pour l'essai à 19 m

La valeur de  $t_{50}$ , représentée sur la Figure 9, est donc, soit la valeur mesurée, soit la valeur estimée par la solution de l'équation de van Baars et van de Graaf (2007), pour  $u_{50}$ . La Figure 9 permet de comparer les évolutions de  $t_{50}$  à la lithologie. Une bonne cohérence est observée avec la caractérisation physique des terrains disponible dans le dossier géotechnique de projet ainsi que les autres essais de dissipation réalisés au CPTu. La transition de la couche argileuse à la couche d'altération est plus progressive et en accord avec l'évolution des paramètres de forage de la Figure 4.

Figure 9 profil de  $t_{50}$ 

Avec cette Figure 9, il est important de signaler que l'emploi de l'appareil permet la pénétration avec mesure de perméabilité dans les formations rencontrées sous 21 m alors que le refus est obtenu au piézocône à cette profondeur.

Les résultats obtenus permettront un dimensionnement des pieux sous charge latérales plus précis et argumenté.

## 6. Rendement constatés

Les essais peuvent être classés en deux parties :

- Pour les essais réalisés dans les argiles sombres qui ont nécessité des précautions particulières de forage la durée, y compris forage de la zone, a été en industriel de 3,5 jours, soit environ 3 essais par jour,
- Pour les altérites rouges au-delà de 19 m, cette même durée a été de 2,5 jours, soit 4 essais par jour.

Au global, le forage, qui fait 35 m et qui comprend 21 essais, a été réalisé en 6 jours (10j ouvrables) avec, hors personnel, une équipe de 3 personnes.

En version de production et en métropole, on peut imaginer monter à 4 essais par jour entre 0 et 20 m avec seulement un opérateur supplémentaire.

## 7. Remerciements,

Les auteurs remercient la Direction Générale des Territoires et de la Mer de la préfecture de la Guyane ainsi que leurs collègues G. Desanneaux de Somac et C. Vala, E. Marie-Josèphe, de Ginger LBTP Guyane pour l'aide à la réalisation des essais et V. Moingeon et L. Vigneron pour l'assistance à ce projet.

## 8. Conclusions

La communication a présenté une application à la mesure de la pression interstitielle, du matériel développé dans le cadre des travaux de Karagiannopoulos (2020). Cette mesure de la pression interstitielle lors de la phase plastique (autour de  $1,2.p_f$ ) et sa dissipation dans une phase de maintien de la pression jusqu'à une dissipation de 50% permet

d'approcher avec une méthode type piézocône la valeur du  $C_v$  dans des sols où le matériel CPT ne pénètre pas en raison de la portance très faible des sols de surface ou où un refus de pénétration est observé.

Le protocole d'essais a permis d'observer une dissipation autour de la sonde nue ou dans le tube fendu. Toutefois, une amélioration de la définition de la pression de fluage en temps réel, pour démarrer le cycle de décharge–recharge, pourrait rendre le protocole plus aisé à réaliser pour l'opérateur. La correction des résultats en temps réel étant déjà effective, un algorithme de détermination du point d'inflexion reste à développer (Karagiannopoulos et al., 2020).

Un temps de dissipation supérieur à 30 minutes est à privilégier pour avoir l'assurance, dans les sols fins, d'atteindre  $t_{50}$  et pour éviter l'extrapolation de cette valeur par les différentes lois de dissipation proposées. L'analyse des essais a montré que la méthode d'interprétation de Van Baars et van de Graaf (2007) permet une interprétation pertinente des courbes expérimentales et une définition correcte de  $t_{50}$ .

Cette technique permet d'obtenir des valeurs de  $t_{50}$  dans tous les terrains où le pressiomètre peut être mis en place.

## 9. Références bibliographiques

- Karagiannopoulos P.-G. (2020) Apport de la mesure de la pression interstitielle à l'essai pressiométrique. Chargements cycliques et monotones, Université Paris-Est, 275 pages
- Karagiannopoulos P.G, Peronne M., Dang Q.H., Reiffsteck P., Benoît J., (2020) Cyclic pressuremeter tests with pore pressure measurements, application to CSR evaluation, 6th Int. Conf Geotechnical and Geophysical Site Charac., Budapest Hongrie, 8 pages
- Karagiannopoulos P.G., Peronne M., Reiffsteck P., Szymkiewicz F., (2019), Measure of the pore water pressure during expansion tests - physical and numerical approach, Proc. XVII ECSMGE, Reykjavic, ISBN 978-9935-9436-1-3
- Lunne, T., Robertson, P.K. and Powell, J.J.M. (1997) Cone Penetration Testing in Geotechnical Practice. Blackie Academic & Professional, London, 312 p.
- Reiffsteck P., Benoît, J., Bourdeau, C., Desanneaux G. (2018) Enhancing the geotechnical model using drilling parameters, J. Geotech. Geoenviron. Eng., Vol. 144, Issue 3, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0001836](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0001836)
- Van Baars S. Van De Graaf H. (2007) Determination of Organic Soil Permeability Using The Piezocone Dissipation Test, Environmental and Engineering Geoscience 13(3):197-203, DOI:10.2113/gseegeosci.13.3.197.