

SONDE MONOCELLULAIRE INNOVANTE POUR LA REALISATION D'ESSAIS D'EXPANSION DE CAVITE CYLINDRIQUE

INNOVATIVE MONOCELL PROBE FOR PERFORMING CYLINDRICAL CAVITY EXPANSION TESTS

Francis COUR¹, Alexandre LOPES DOS SANTOS²

¹ Calyf

² Fugro Geoconsulting, Nanterre, France

RÉSUMÉ – Une nouvelle génération de sondes pressiométriques mono-cellulaires permet d'étendre le domaine de mesure depuis les faibles déformations jusqu'au doublement de la cavité cylindrique, et donc, de parvenir à la mesure directe de la pression limite conventionnelle. L'historique du développement de la sonde Monochambre Francis Cour[®] est présenté, ainsi que ses spécificités techniques, les méthodes d'exploitation et un exemple d'essai.

ABSTRACT – A new generation of mono-cell pressuremeter probes allows extending the measuring range from small deformations up to doubling the cylindrical cavity volume, and thus providing a direct measurement of the conventional limit pressure. The history of the development of the Francis Cour Monochambre[®] probe is presented, as well as its technical specificities, the operating methods and a test example.

1. Introduction

Une nouvelle génération de sondes pressiométriques Francis Cour[®] a été récemment développée par la société Calyf. Ces nouvelles sondes mettent en œuvre des gaines textiles de contention pour le contrôle du gonflement. Elles sont en utilisation par les géotechniciens depuis plus de 5 ans, comme présenté par Jacquard et al. (2013). Elles peuvent atteindre un taux de dilatation radiale suffisant pour doubler le volume de la cavité cylindrique et mesurer effectivement la pression limite pressiométrique du sol.

Cette communication concerne la nouvelle gamme des sondes Monochambre Francis Cour[®]. Leur capacité en pression permet leur utilisation dans les sols et dans les roches tendres. La géométrie de ces sondes a été particulièrement étudiée pour permettre un contrôle précis du taux de déformation radiale en fonction du volume injecté. Elles offrent ainsi la possibilité d'étendre le domaine d'étude de la déformation des matériaux, partant des niveaux de déformation bien plus faibles que ceux pouvant être mesurés avec des sondes tri-cellulaires usuelles, et allant jusqu'à la mesure effective de la pression limite conventionnelle. Les résultats d'essais obtenus avec ces sondes peuvent néanmoins être exprimés sous une forme équivalente à celle des sondes tri-cellulaires usuelles, ce qui permet leur utilisation directe dans le dimensionnement des ouvrages avec les règles pressiométriques courantes.

Dans le texte qui suit, on présente un bref historique du développement de la sonde, ainsi que ses spécificités techniques et les méthodes d'exploitation. Des applications seront illustrées à partir de résultats d'essais sur site réalisés dans la Région Parisienne. Une communication parallèle (Lopes et al., 2018) à cette même conférence est consacrée à l'analyse de mesures de modules à faibles déformations avec ce type de sonde.

2. Historique du développement

2.1. Du packer à la sonde pressiométrique

Les sondes pressiométriques et les sondes dilatométriques sont des corps gonflables utilisés pour faire un essai d'expansion de cavité cylindrique dans le terrain. Elles permettent d'appliquer une pression connue au sol, puis de mesurer les déformations radiales associées aux paliers de chargement imposés, ou vice-versa : d'imposer une déformation au sol et de mesurer la pression associée.

On remarquera qu'il s'agit d'un principe de fonctionnement identique à celui des *packers* (obturateurs) gonflables, outils beaucoup utilisés dans le domaine du forage et de l'injection haute pression pour obturer des cavités cylindriques. Ces outils, cependant, ne permettent pas de faire de la mesure. Les obturateurs ont subi un développement technologique parallèle et souvent indépendant de celui des sondes pressio / dilatométriques, d'où l'intérêt de s'y référer.

De façon similaire aux sondes, les *packers* sont limités dans leur expansion en diamètre et en pression. Un regard sur l'histoire des *packers* à tête fixe montre que la plupart ne dépassaient pas un taux de dilatation de 1,25 à 1,30 fois leur diamètre au repos. Pour pouvoir dépasser de tels taux de dilatation, les fabricants ont dû concevoir et fabriquer des *packers* à tête coulissante. Ils permettent d'atteindre des taux de dilatation de 40 à 50%. Cependant, l'application de cette technologie aux sondes de mesure n'est pas envisageable, car sa longueur varie au cours du gonflement diamétral. Pour ce faire, il est impératif de rester dans le domaine des obturateurs à tête fixe, ce qui ramène à la problématique de limitation en gonflement radial.

Avec des améliorations technologiques diverses (gaines armées, couches en caoutchouc et autres), il a été possible de pousser le taux de gonflement à 1,4 fois le diamètre initial, pour des pressions limitées, avec un taux de défaillance limité. Le temps de survie de ce matériel, par contre, était de peu d'essais (inférieur à une dizaine).

Cette constatation a amené le concepteur à revoir complètement la structure du corps gonflable. La gaine en caoutchouc qui fait l'étanchéité a été entourée d'une gaine de contention textile. Cette gaine, qui a fait l'objet d'un dépôt de brevet (Cour, 2007), a la capacité de se dilater librement jusqu'à un profil diamétral limite à partir duquel elle s'oppose à toute déformation complémentaire. Une forme en biseau (fuseau) a été sélectionnée dès le départ. Cette forme a l'avantage considérable de ramener les contraintes dans les extrémités à des valeurs négligeables, et à supprimer les élongations longitudinales (qui demeurent inférieures à 1%). Ces gaines sont fabriquées par tissage cylindrique.

Dans la gaine de contention, les fils de chaîne n'ont pas de caractéristiques mécaniques particulières puisqu'ils sont soumis à très peu d'élongation. Les fils de trame sont des fils hybrides associant des fils élastiques (élastomère) et des fils à très haute résistance (kevlar, polyéthylène haute densité, etc). Ces fils hybrides ont fait l'objet d'un dépôt de brevet (Cour, 2014). Ils ont la particularité de pouvoir, à partir d'une position au repos, s'étirer jusqu'à de facteurs d'élongation de plusieurs centaines de pourcents, en opposant qu'une très faible résistance (quelques centaines de grammes pour un fil), et, à partir d'un taux d'élongation limite, d'opposer des résistances de plusieurs centaines de kilos par fil, pour des élongations complémentaires de quelques pourcents. C'est cette particularité qui définit le comportement de la sonde lors de son gonflement.

2.2. De la sonde tri-cellulaire à la sonde monocellulaire

Le système a été conçu initialement comme sonde tri-cellulaire, la mesure de la dilatation radiale étant faite à partir du volume injecté dans la cellule centrale. En fait, il s'est avéré que la cellule centrale, qui était indispensable dans des sondes pressiométriques

classiques, n'était plus nécessaire dans le cas des nouvelles sondes Monochambre FC[®], dont le taux de dilatation pouvait être directement obtenu à partir du volume injecté dans la chambre principale (gaine externe). En effet, un ajustement adéquat de la géométrie de la gaine de contention a permis d'accéder très précisément et directement à la dilatation radiale de la sonde à partir de la mesure du volume, et plus particulièrement d'aboutir au résultat suivant : le taux de dilatation diamétrale de la sonde est proportionnel au volume injecté.

3. Spécificités techniques

Les limites d'utilisation des sondes Monochambre FC[®] en termes de pression et volume sont données la formule suivante :

$$\text{Pression [MPa]} \times \text{Diamètre maximum après gonflement [cm]} = \text{valeur nominale}$$

La valeur nominale dans la formule précédente est une fonction propre de la gaine de contention employée. Cette valeur figure dans le nom commercial du modèle de la sonde. Par exemple, une sonde FC60 a une valeur nominale de 60 et permet une pression maximale de 6 MPa pour un diamètre maximum de 10 cm après gonflement. Une sonde FC160 (valeur nominale de 160), admet une pression maximale de 16 MPa pour un diamètre maximum de 10 cm.

Dû à la conception de la sonde, la limite en pression est purement liée à la résistance mécanique des fils périphériques de la gaine de contention, ce qui confère une grande simplicité du comportement mécanique à la sonde (minimisation des effets de bord, élongations longitudinales négligeables). De ce fait, en changeant le type de fil de la gaine de contention ou la quantité de tours de spires par centimètre de gaine, on augmente sa résistance.

Le taux de gonflement maximal de la sonde est de 1,65 fois son diamètre au repos. Le gonflement et la mise en pression sont faits exclusivement par injection d'eau.

La sonde peut être équipée d'un habillage de protection extérieure de type lamelles métalliques pour la réalisation des essais dans des terrains très grossiers. Dans des terrains relativement homogènes, la sonde peut être insérée nue, habillée juste d'une gaine en polyuréthane.

Au stade actuel du développement de son système de pilotage, il est possible de contrôler le volume de gonflement de la sonde par incréments de 0,2 cm³ par cycle d'injection. Ce système permet de dilater la sonde jusqu'à son diamètre maximal, soit correspondant à un volume de 2500 cm³, et pour des valeurs de pression allant jusqu'à 25 MPa.

Un schéma de la géométrie de la sonde lors de son gonflement est présenté dans la Figure 1 (a). Une photo de la sonde gonflée à son volume maximal est présentée dans cette même figure (b), ainsi que son système de contrôle en utilisation sur chantier (c).

4. Exploitation

4.1. Calibrage à multiples diamètres

La géométrie de la gaine extérieure de la sonde a été conçue de telle façon que les déformations radiales de la sonde soient proportionnelles au volume injecté dans la cellule de mesure. La relation de proportionnalité est obtenue à partir d'essais de calibrage dans lesquels la sonde est placée dans un tube d'acier épais de diamètre intérieur connu et gonflée. Cet essai est répété avec plusieurs diamètres de tubes de calibrage et permet d'obtenir, pour une valeur de pression donnée, une relation entre le volume et le diamètre. Cette relation, linéaire, peut être utilisée lors de l'interprétation de l'essai, permettant une

analyse fine en termes de déformation radiale. Un essai de calibrage à multiples diamètres est montré sur la Figure 2 (a). L'analyse de la relation entre le volume et le diamètre est présentée sur la Figure 2 (b).

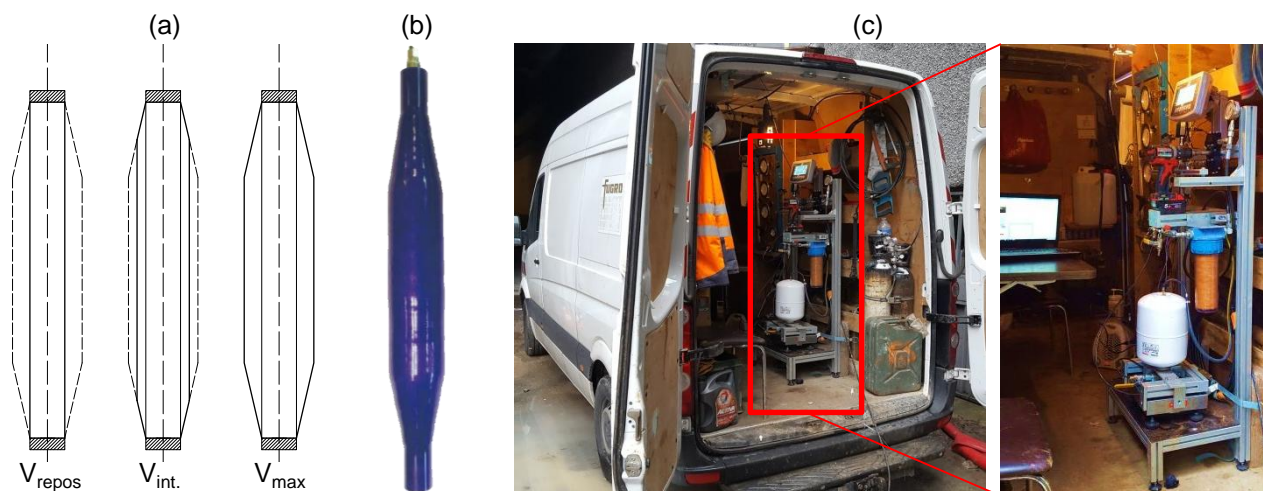


Figure 1 – Détail sur la géométrie et le principe de gonflement contrôlé de la sonde (a), une photo de la sonde gonflée (b) et son système de contrôle en utilisation sur chantier (c).

Dans l'exemple présenté, on obtient un coefficient de proportionnalité de 0,016 entre le diamètre (en millimètres) et le volume (en centimètres cubes). L'ordonnée à l'origine pour un volume nul est, dans ce cas, de 53 mm. Cette valeur est liée au diamètre extérieur de la sonde et varie selon son habillage. Le coefficient de proportionnalité varie très légèrement avec la pression. Sa variation avec l'habillage de la sonde (notamment les lamelles métalliques) est négligeable.

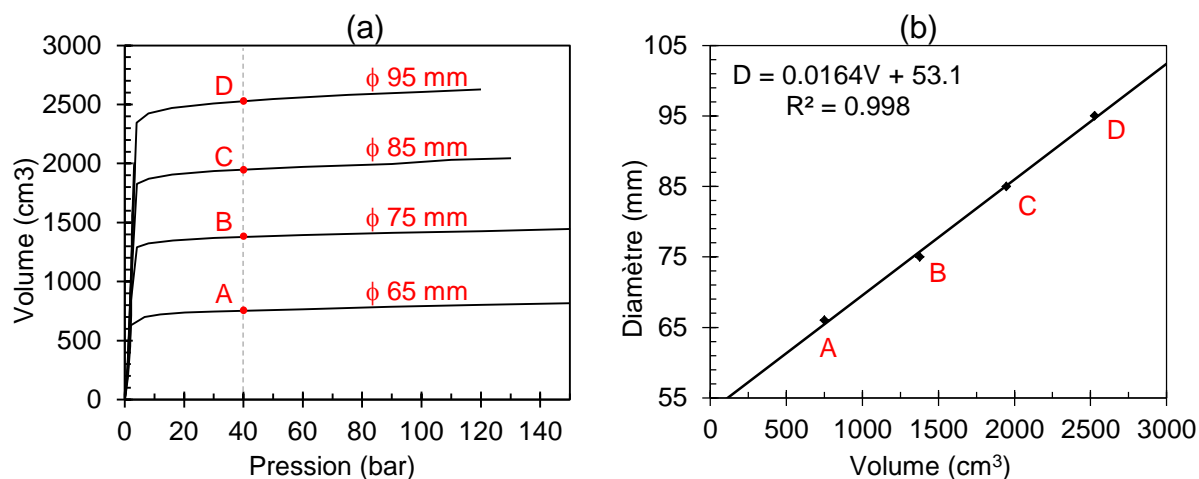


Figure 2 – Essai de calibrage sur plusieurs diamètres (a) et son interprétation (b).

4.2. Comparaison avec les essais standards

La procédure de calibrage sur plusieurs diamètres permet de corréliser les volumes injectés dans une sonde monocellulaire à ceux d'une sonde tri-cellulaire.

On peut écrire une relation entre le volume d'eau dans la sonde monochambre et celui dans la sonde tri-cellulaire pour un diamètre donné. Cette analyse est présentée dans la Figure 3. Elle peut être utilisée pour transcrire les résultats obtenus par une sonde Monochambre sous une forme équivalente à celle des sondes tri-cellulaires usuelles, ce qui permet leur utilisation directe dans le dimensionnement des ouvrages avec les règles pressiométriques courantes. Un exemple d'application pour un essai cyclique dans la craie est présenté dans le paragraphe 5.

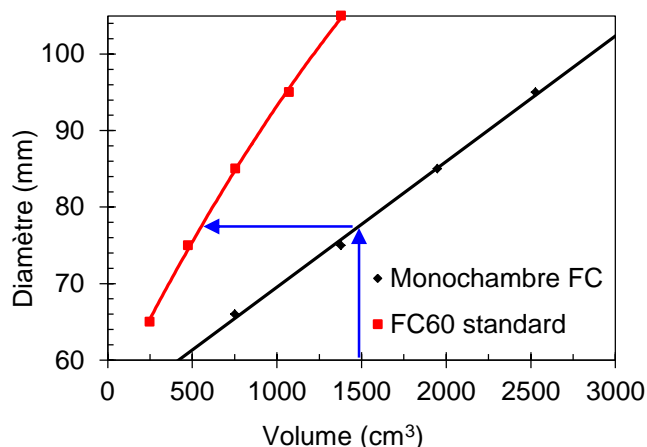


Figure 3 – Corrélation entre les volumes des sondes monocellulaire et tri-cellulaire.

4.3. Méthodes d'essai et d'interprétation

La sonde Monochambre FC® peut être utilisée pour la réalisation d'essais en suivant les principaux protocoles de chargement proposés par les normes courantes (contrôle en pression, en volume ou en débit – donc en taux de déformation). La simplicité du dispositif de contrôle met en évidence l'intérêt de son utilisation pour la réalisation d'essais cycliques, allant des essais avec quelques boucles de décharge-recharge jusqu'aux essais à grand nombre de cycles.

La pression limite conventionnelle du sol peut être directement mesurée lors de l'essai, aucune extrapolation n'étant nécessaire.

Pour la mesure et le calcul des modules de déformabilité des sols, les procédures d'interprétation normatives (on pourra se référer, par exemple, à ASTM (2007) ou à AFNOR (2015)) peuvent être utilisées normalement. La réalisation d'essais suivant le protocole proposé par la norme française avec un cycle (AFNOR, 1999) est également possible.

Concernant la réalisation et l'interprétation d'essais pressiométriques avec plusieurs cycles, dont le protocole d'essai et d'interprétation ne sont pas normalisés, plusieurs méthodes sont proposées dans la littérature. La sonde Monochambre FC® a permis de façon satisfaisante la réalisation d'une procédure d'essai ayant pour objectif accéder à la courbe de dégradation du module de cisaillement des sols en fonction du taux de déformation (Whittle et al, 2017). Deux exemples d'application pour des sables denses et des argiles surconsolidées de la région parisienne sont présentés par Lopes et al. (2018).

5. Exemple d'application – essai dans la craie

La sonde Monochambre FC® a été utilisée par Fugro GeoConsulting France pour la réalisation de plusieurs essais pressiométriques avec des boucles de déchargement et rechargement en région parisienne dans divers types de sols.

Plusieurs essais ont été menés dans le cadre de la validation de l'utilisation de la sonde Monochambre FC® pour la réalisation des essais pressiométriques standards. Il s'agit des essais de calibrage comparatifs, d'essais d'expansion de la sonde dans un « faux sol » (étalon élastique de bonne répétabilité) et essais sur le terrain. L'exemple d'un essai réalisé dans la craie à 42 m de profondeur en région parisienne, encadré par deux essais réalisés avec une sonde tri-cellulaire FC60, un mètre au-dessus et un mètre en-dessous, est présenté par la suite. Les sondes type FC60 sont utilisées depuis plus de 5 ans dans la pratique et permettent la réalisation d'essais comparables avec ceux réalisées avec les sondes type Ménard.

Les résultats en termes de déformation radiale de la cavité sont présentés dans la Figure 4 (a). La pression limite conventionnelle a été mesurée au doublement de la cavité (expansion de 41%) et pour une pression de 14 MPa. On remarquera le très bon accord avec les mesures réalisées avec la sonde tri-cellulaire, comme présenté dans la Figure 4 (b), dans laquelle les volumes mesurés avec la sonde Monochambre FC[®] ont été transformés en volume équivalent pour la sonde tri-cellulaire selon la procédure présentée dans le paragraphe précédent.

On peut remarquer que dans la plage de pressions comprises entre 2 et 6 MPa, zone où l'essai est quasi-linéaire (comportement usuellement appelé « pseudo-élastique »), les pentes des trois courbes sont proches : mêmes modules mesurés aux incertitudes près dues aux variations spatiales entre les trois essais. Le développement de la non-linéarité (plastification du sol autour de la sonde) a lieu à une contrainte radiale d'approximativement 7 MPa dans les trois essais et a été également cerné par les deux types de sondes. L'essai avec la sonde Monochambre FC[®] a été mené jusqu'à la mesure effective de la pression limite conventionnelle. Malgré le fait que les essais avec la sonde FC60 aient été arrêtés à une contrainte de 10 MPa pour des raisons contractuelles spécifiques à ce chantier, la courbure des courbes est identique, suggérant que la pression limite mesurée serait très proche, si elle avait été atteinte. Cet exemple montre que la sonde Monochambre FC[®] permet d'accéder aux paramètres pressiométriques standards couramment utilisés pour le dimensionnement des ouvrages.

On ne présentera pas dans cette communication l'interprétation détaillée de cet essai. Pour un exemple d'interprétation d'essais à la sonde monochambre avec boucles de décharge-recharge, on se référera à la communication de Lopes et al. (2018).

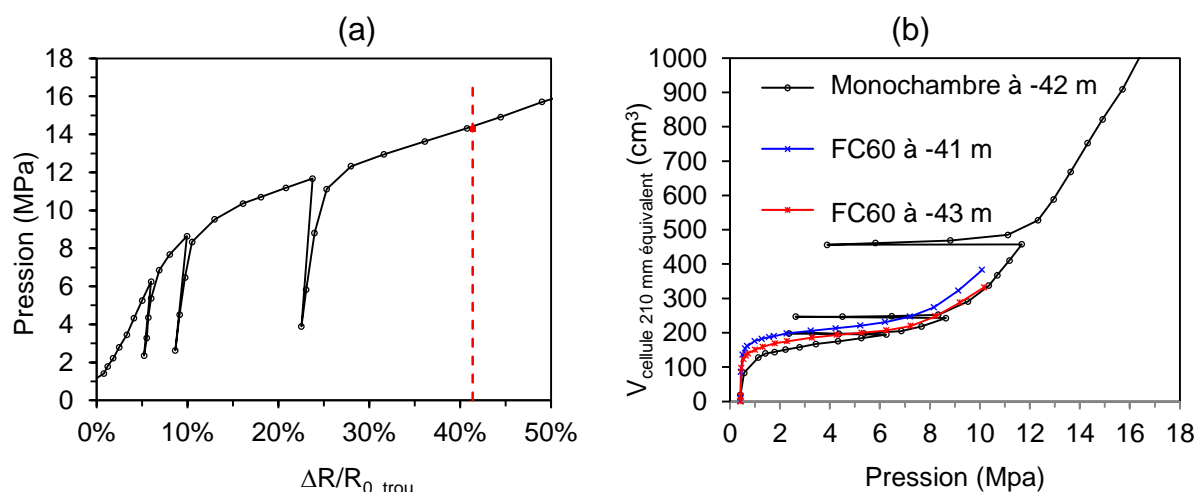


Figure 4 – Essai avec la sonde Monochambre FC[®] dans la Craie à 42 m de profondeur et comparaison avec des essais standards réalisés 1m au-dessus et en-dessous.

6. Conclusions

La sonde Monochambre FC[®] présente des avantages déterminants concernant la simplification des matériels (système de contrôle pression-volume et flexibles d'alimentation) et la possibilité d'application des différents protocoles d'essai et d'interprétation, avec un intérêt particulier pour la réalisation d'essais cycliques.

Elle permet de couvrir l'ensemble des champs d'application des sondes existantes, telles que les dilatomètres, les pressiomètres de type Ménard et les pressiomètres de type mono-cellulaire. Ses capacités, en termes d'expansion diamétrale et de montée en pression, excèdent très largement celles des différentes sondes existantes. Elle permet d'accéder aux paramètres couramment utilisés pour le calcul géotechnique.

7. Références bibliographiques

- AFNOR (2015). NF EN ISO 22476-4, Reconnaissance et essais géotechniques – Essais en place – Partie 4: Essai au pressiomètre Ménard, AFNOR, mai 2015, 55 pages.
- AFNOR (1999). XP P 94-110-2, Essai pressiométrique Ménard, Partie 2 : Essai avec cycle, AFNOR, décembre 1999, 8 pages.
- ASTM (2007) Standard test method for pre-bored pressuremeter testing in soils (D4719). ASTM International, West Conshohocken, PA.
- Cour, F. (2007). Manchon gonflable a déformation contrôlée, procédé de fabrication, et application a la pressiométrie. Brevet WO2008084162A3.
- Cour, F. (2014). Hybrid elastic cable and process for manufacturing such a cable. Brevet US20140373502.
- Lopes, A., Puech, A., Droniuc, N., Geisler, J., Cour, F. (2018). Mesure de G à faibles déformations à partir d'une sonde pressiométrique monocellulaire. Journées Nationales de Géotechnique et de Géologie de l'Ingénieur. Juin 2018. Champs sur Marne, France.
- Jacquard, C., Rispal, M., Puech, A., Geisler, J., Durand, F., Cour, F., Burlon S., Reiffsteck, P. (2013). Une nouvelle sonde permettant de mesurer sans extrapoler la pression limite pressiométrique des sols. In 18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Paris.
- Whittle, R., Palix, E., & Donaghy, D. (2017). The Influence of Insertion Process on Determining the Stiffness Characteristics of Chalk, using pre-bored, self-bored and pushed pressuremeters. In Offshore Site Investigation and Geotechnics (Vol. 1, pp. 308–315). <https://doi.org/10.1145/2505515.2507827>