

PARAMETRES DE FORAGE POUR UN POSITIONNEMENT JUDICIEUX DE LA SONDE PRESSIOMETRIQUE

USING BOREHOLE DRILLING PARAMETERS FOR IMPROVING PROBE POSITIONING AND RESULTS INTERPRETATION

Francis COUR¹, Alexandre LOPES DOS SANTOS²

¹ Calyf

² Fugro Geoconsulting, Nanterre, France

RÉSUMÉ – L'enregistrement des paramètres de forage est une pratique usuelle lors de la réalisation des forages pressiométriques en France. Cette communication présente une réflexion sur son utilisation comme outil d'aide à la décision pour le placement de la sonde dans le terrain avant la réalisation de l'essai, permettant de réduire le risque d'éclatement des sondes, d'améliorer la qualité de l'essai et de sa représentativité dans le profil de sol.

ABSTRACT – Recording drilling parameters is a common practice when drilling boreholes for pressuremeter tests in France. This paper presents considerations about using these parameters as a decision-aid tool for positioning the probe in place before performing the test. This would reduce the risk of probe bursting, improve the quality of the test results, of its interpretation and its representativeness regarding the soil profile.

1. Introduction

L'enregistrement des paramètres de forage est une pratique usuelle lors de la réalisation des forages pressiométriques en France. Cet enregistrement demeure cependant, faute de recommandations, peu ou mal utilisé pour la poursuite des opérations sur site.

Cette communication présente une réflexion sur l'utilisation des paramètres de forage comme outil d'aide à la décision pour le placement de la sonde pressiométrique dans le terrain avant la réalisation de l'essai. Elle montre comment un positionnement contrôlé de la sonde permet, d'une part d'améliorer la qualité de l'essai et la pertinence de l'interprétation géotechnique et, d'autre part, de réduire les risques d'éclatement.

Le traitement numérique des données enregistrées lors du forage et leur présentation à une échelle adaptée à l'emprise de l'essai se sont montrés utiles pour placer adéquatement la sonde, notamment dans des formations géologiques fortement hétérogènes telles que le Calcaire Grossier ou les Marnes et Caillasses. Positionner entièrement la sonde sur des niveaux homogènes à l'échelle de la sonde permet notamment (1) de limiter considérablement les risques d'éclatement résultant de déformations longitudinales différentielles, (2) de s'assurer que le gonflement de la sonde est cylindrique sur la longueur de l'essai et donc que la relation volume injecté - déformation radiale est pertinente et (3) de relier les paramètres pressiométriques à une nature de sol précise, celle-ci pouvant être mécaniquement caractérisée par des essais de laboratoire adjacents.

La discussion est menée à partir de cas réels dans les sols et roches tendres de la Région Parisienne.

A la lumière des considérations exposées, il pourrait s'avérer judicieux de poursuivre une réflexion sur la pertinence de rédaction des appels d'offres imposant des essais avec des espacements fixes.

1.1. Les paramètres de forage

Lors de la réalisation d'un forage par une machine hydraulique adéquatement instrumentée, certains des paramètres de son fonctionnement peuvent être enregistrés avec pour objectif de garder un historique de l'évolution du comportement de la machine au cours du forage.

Ces paramètres sont une image quantitative de ce que le sondeur aperçoit de façon qualitative pendant son travail. Ils peuvent indiquer des contrastes liés à la façon dont le forage avance qui permettent de déterminer des limites entre les couches de terrain, ainsi que des passages indurés dans un sol mou et vice-versa, des passages mous dans un terrain dur.

Reiffsteck (2010) présente le schéma de principe d'acquisition des données issues de la foreuse. Compte tenu de ce travail et de celui de Cailleux (1986), la réalisation d'un forage dépend de quatre facteurs principaux : (1) les outils choisis (tête de coupe, diamètre, fluide d'injection et ses performances), (2) l'opération (poussée sur l'outil, vitesse de rotation et le débit d'injection), (3) la réponse du terrain (vitesse d'avancement, couple de rotation, pression d'injection et débit de retour du fluide, pression de retenue) et (4) les paramètres évolutifs lors du forage (usure des outils et variation de la composition du fluide de forage).

1.2. Utilisation des paramètres de forage en géotechnique

L'enregistrement numérique ne permet que de conserver les données provenant de l'opération et de la réponse du terrain (points 2 et 3 dans le paragraphe ci-dessus). Le déroulement du forage est, cependant, fortement influencé par le choix des outils, son évolution au cours des travaux et la façon dont travaille l'opérateur. Pour cette raison, l'utilisation de ces seuls paramètres pour la classification des sols et pour l'accès à ses propriétés mécaniques en passant, par exemple, par un abaque de corrélation, est encore aujourd'hui très complexe, comme conclu par Reiffsteck et al (2016).

Les forages destructifs enregistrés sont souvent utilisés pour détecter des vides ou anomalies souterraines, contrôler l'efficacité de travaux de comblement ou d'injection et trouver les transitions entre les couches de terrain.

1.3. Utilisation des paramètres de forage sur le terrain

Malgré la difficulté d'établir des corrélations précises entre les paramètres de forage et les propriétés géomécaniques des sols, les paramètres de forage peuvent être utilisés par le foreur, sur le terrain, comme support aux opérations. Par exemple, pour positionner une sonde pressiométrique préalablement à la réalisation d'un essai, le sondeur doit s'assurer de trouver une formation géologique précise pour la réalisation de l'essai. Il doit également éviter les passages hétérogènes dans le terrain, qui peuvent à la fois endommager la sonde ou engendrer un essai qui n'est pas interprétable au sens de la théorie d'expansion de cavité cylindrique.

L'utilisation en temps réel des paramètres obtenus lors du forage requiert un traitement numérique des données et un affichage à une échelle adaptée à l'emprise d'un essai pressiométrique. Dans les paragraphes qui suivent, des exemples pratiques d'utilisation des paramètres de forage pour le placement de la sonde sont présentés, ainsi que les conséquences de sa non-utilisation.

2. Quelques formations particulièrement difficiles à caractériser par essai PMT

La réalisation d'essais pressiométriques dans des roches tendres requiert une attention spéciale. De fortes hétérogénéités sont présentes dans ces formations dues aux variations sédimentaires (de faciès), aux différents degrés d'altération de la roche et à la présence de discontinuités.

La caractérisation de la roche par n'importe quel type d'essai, soit en place, soit en laboratoire, est très compliquée car il est souvent difficile de trouver un échantillon qui soit à la fois représentatif du comportement du massif et dans un état de qualité suffisant pour permettre la réalisation des essais.

Pour cette même raison, un essai d'expansion de cavité réalisé dans une telle formation, ne peut être interprétable que si la sonde a été placée dans une zone de caractéristiques relativement homogènes. Dans le cas contraire, le gonflement de la sonde ne sera pas cylindrique et des déformations longitudinales différentielles auront lieu (gonflement à diamètres variables le long de la sonde). Les sondes pressiométriques ne peuvent pas supporter ces déformations, surtout dans le domaine des hautes pressions (supérieures à 5 MPa) atteintes dans ces roches, et peuvent être endommagées prématurément ou même éclater.

2.1. Le Calcaire Grossier

La difficulté décrite dans le paragraphe précédent s'est montrée très importante lors de la réalisation d'une campagne de reconnaissance des sols dans le Région Parisienne menée par Fugro Geoconsulting dans laquelle une sonde type Monochambre FC[®] a été utilisée pour la réalisation d'essais à haute pression dans le calcaire grossier. Cette sonde, dont une description détaillée est présentée par Cour et Lopes (2018), permet la réalisation d'essais à haute pression jusqu'à des volumes de gonflement supérieurs au doublement de la cavité du forage. La calibration des sondes et l'expérience acquise dans des sols raisonnablement homogènes ont montré que dans ces conditions le risque d'éclatement de ce type de sonde était très faible.

L'exemple porte sur la réalisation d'un essai dont la cote avait été imposée dans le Calcaire Grossier à une profondeur de 32,75 m. L'essai a été conduit de façon à permettre la mesure effective de la pression limite conventionnelle de la roche tendre en question (doublement du volume de la cavité). Cependant, pour un volume d'eau injecté dans la sonde correspondant à un niveau théorique de déformation du forage de 33%, et une pression radiale de 9 MPa (Figure 1) il est survenu un éclatement de la sonde. Cet incident a conduit à analyser les causes possibles et à mener une série de réflexions sur la conduite d'essais dans ce type de formation géologique.

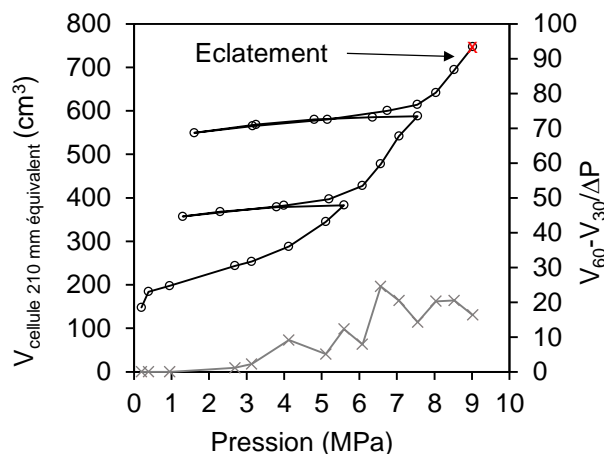


Figure 1 – Exemple d'essai dans le Calcaire Grossier où la sonde a été endommagée, analysé en termes de volume équivalent d'une sonde tri-cellulaire.

Il a été remarqué, après la remonté de la sonde hors du forage, que ses lamelles métalliques de protection avaient subi des déformations permanentes principalement aux extrémités de la sonde. Comme montré dans la Figure 2, il paraît clair que la sonde a sollicité deux matériaux de compressibilités différentes au cours de l'essai, un niveau plus

rigide dans sa partie centrale et deux niveaux plus mous dans les extrémités. De ce fait, elle a subi des elongations longitudinales, à l'origine de son éclatement.

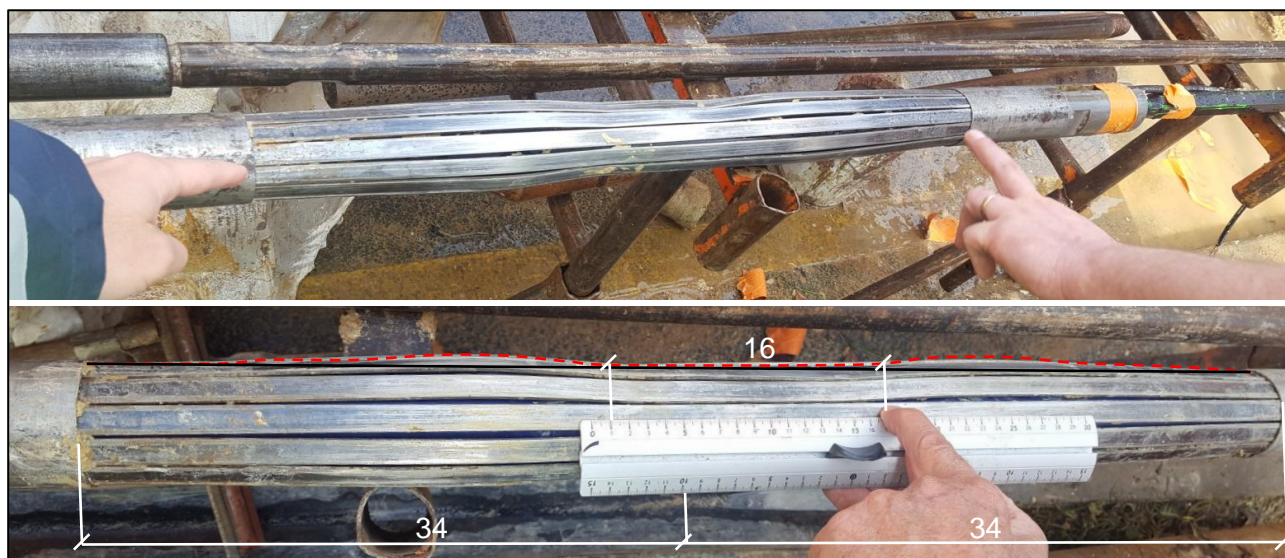


Figure 2 – Endommagement de la sonde engendré par son mauvais positionnement dans le terrain.

Comme montré dans la photo ci-dessus, les extrémités de la sonde ont subi une déformation plus importante que le centre. Toute interprétation de l'essai présenté dans la Figure 1 en termes d'expansion de cavité cylindrique est, donc, impossible. Les empreintes laissées dans l'habillage de la sonde ont mis en évidence un problème qui pourrait être inaperçu sans une analyse plus approfondie. Dans ce cas, les déformations réelles autour de la sonde ne correspondent pas à un champ de déformation cylindrique.

Les enregistrements des paramètres de forage sont présentés dans la Figure 3 (a) en valeurs brutes à l'unité de mètre par heure et dans la Figure 3 (b) en termes de l'inverse de la vitesse à l'unité de minutes par mètre. La poussée sur l'outil est présentée dans un graphique à côté pour vérification. Ce paramètre est contrôlé manuellement par l'opérateur au cours du forage, qui doit veiller à le garder constant à une valeur raisonnable en fonction de la réponse du terrain pendant le forage de la poche d'essai.

L'affichage des paramètres dans ces termes, filtrés pour éliminer certains pics dus exclusivement aux bruits d'enregistrement et, surtout, dans une échelle appropriée à l'emprise de l'essai, permet une appréciation plus intuitive des passages dur / mou. Elle permet aussi de sensibiliser l'opérateur et l'ingénieur, qui sera mené à interpréter l'essai pressiométrique, sur le temps total passé à faire la passe de forage destinée à l'essai. Cette approche facilite une démarche de contrôle de la qualité de la conduite de l'essai.

On constate une grande hétérogénéité de la résistance à l'avancement du forage à la profondeur où la sonde a été théoriquement placée. On rappelle, à ce propos, que l'incertitude tolérée sur la profondeur de la sonde est de 20 cm selon la norme courante (AFNOR, 2015). Les positions possibles où la sonde a pu être placée, selon les tolérances normatives, sont également présentées dans cette figure. L'amplitude des hétérogénéités mesurées lors du forage est la même que celle observée sur les lamelles métalliques endommagées.

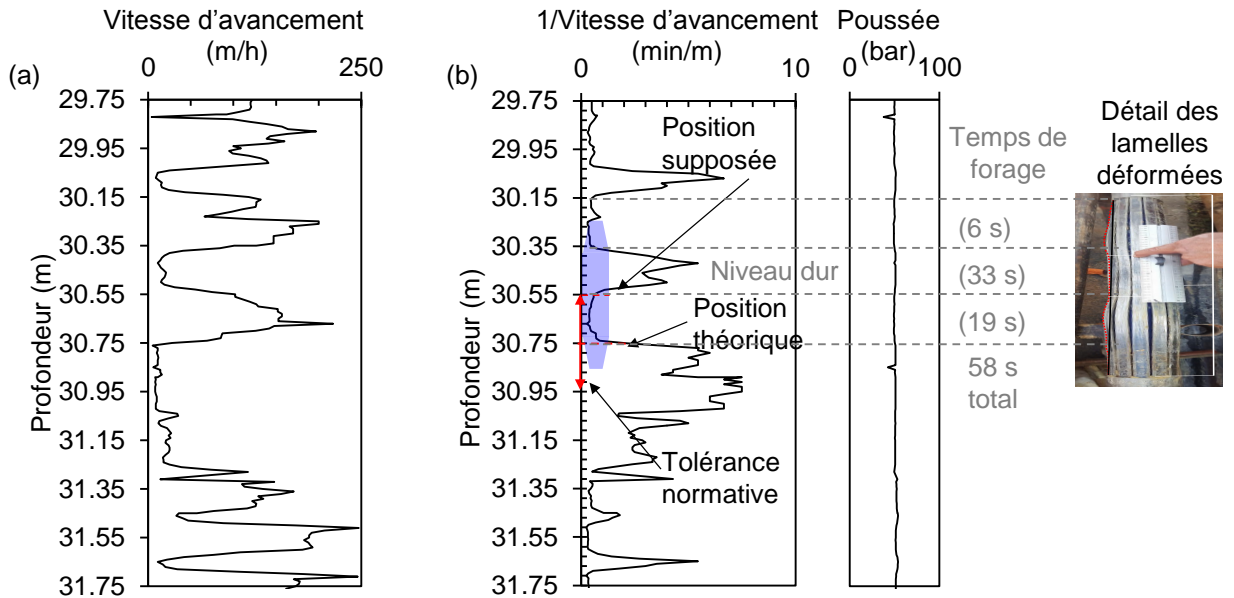
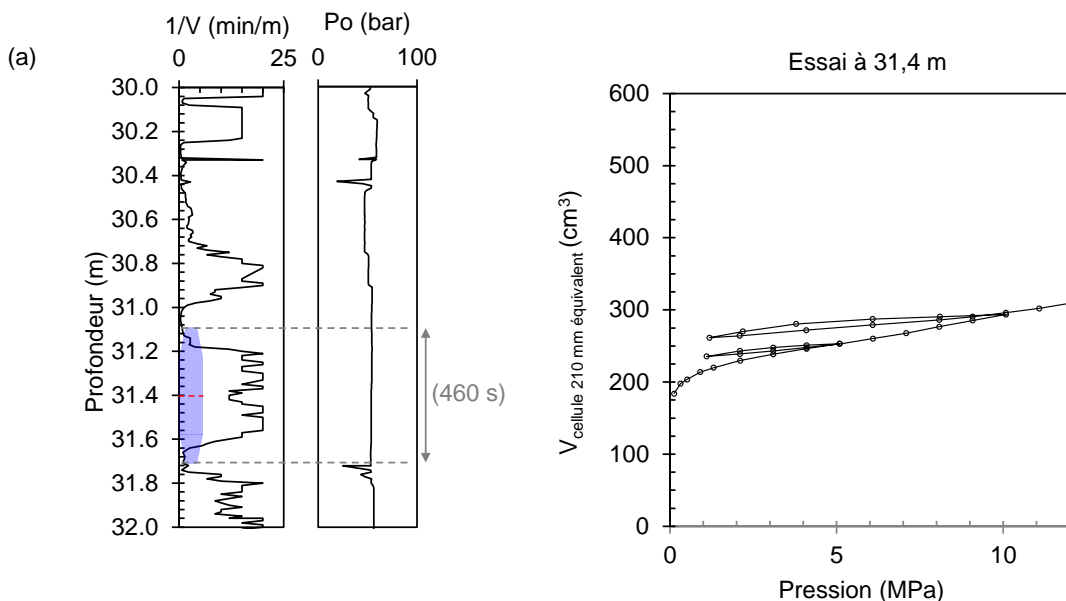


Figure 3 – Enregistrement des paramètres de forage à la profondeur de l'essai : (a) Données brutes en [m/h] et (b) données traitées en [min/m], avec la poussée sur l'outil affichée à côté (constante pendant la passe de forage) et le temps total de forage. Les hétérogénéités détectées sont de la même amplitude que les endommagements subis par la sonde.

2.2. Les Marnes et Caillasses

Les Marnes et Caillasses sont une formation de nature très hétérogène, notamment du fait de l'alternance des marnes et des bancs de calcaire. La caractérisation d'une telle couche du point de vue mécanique est complexe. En pratique, la réalisation d'essais de laboratoire permet de caractériser soit les passages marneux, soit les bancs de calcaire. La problématique est la même pour la réalisation d'essais *in-situ*, ce qui met en évidence le besoin de placer l'équipement d'essai précisément sur le passage désiré.

L'utilisation des paramètres de forage sur le terrain, après le traitement numérique décrit précédemment, a permis de choisir précisément l'emplacement de la sonde aux cotes souhaitées dans les Marnes et Caillasses. Sur la Figure 4 (a) est présenté le résultat d'un essai placé à 31,4 m de profondeur de façon à permettre la réalisation de l'essai dans un banc calcaire. Sur le graphique 4 (b), est présenté le résultat d'un essai placé à 33,3 m, dans un passage marneux.



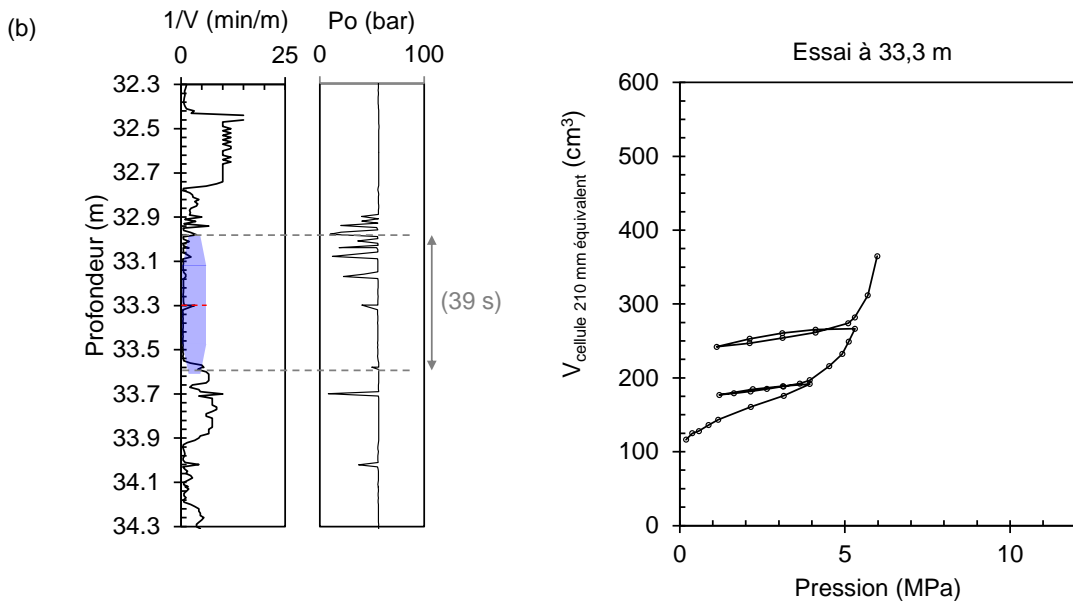


Figure 4 – Deux exemples où l'utilisation des paramètres de forage a permis de placer la sonde dans des passages souhaités : (a) banc calcaire et (b) marnes.

Un cas plus délicat est présenté dans la Figure 5. Cet exemple concerne un essai réalisé à 35,25 m de profondeur dans le même sondage, visant à tester, de façon similaire au cas précédent, un passage marneux. Ce cas est plus compliqué surtout parce que la marge d'erreur sur la profondeur réelle de la sonde était très petite, sous peine de la placer à cheval entre la transition et endommager la sonde. Dans ce cas, malgré la tentative de positionner l'essai à une profondeur adéquate, la sonde a été endommagée. Son inspection après essai a montré que sa profondeur réelle n'a probablement pas correspondu à celle de la couche souhaitée. Les dégâts longitudinaux dans son habillage métallique ne coïncidaient pas avec la disposition des zones molles/dures enregistrées lors du forage.

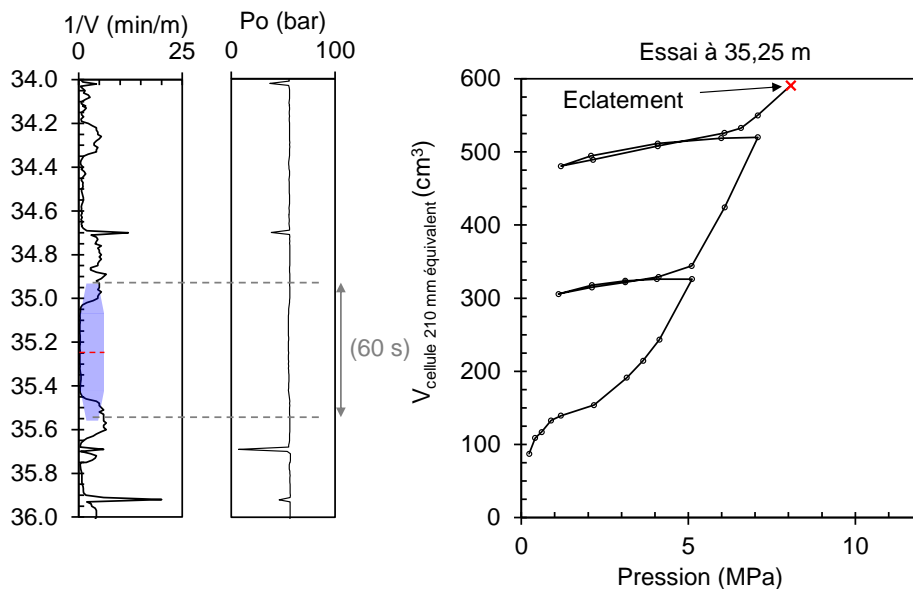


Figure 5 – Exemple d'essai à 35,25 m dans un passage marneux où le positionnement de la sonde n'a pas été suffisamment précis.

3. Perspectives et travaux futurs

Les cas présentés dans les paragraphes précédents mettent en évidence le potentiel de l'utilisation des enregistrements des paramètres de forage sur le terrain comme un outil d'aide à la décision pour le placement de la sonde. Ce procédé peut actuellement être appliqué par les praticiens qui disposent d'un ordinateur sur chantier pour traiter les paramètres de forage. La seule limitation concerne les transitions entre les couches de sol de faible contraste de raideur, qui ne seraient pas détectées par l'enregistrement. Cependant, certains aspects pratiques sont à considérer pour sa mise en œuvre sur un chantier de sondage.

Les paramètres enregistrés doivent pouvoir être consultés en temps réel par l'opérateur, dans une échelle qui lui convienne et avec un traitement numérique permettant de filtrer les données et enlever certains pics qui pourront gêner son analyse. Il est important de rappeler que les données enregistrées contiennent du bruit de mesure qui n'est pas toujours lié à la présence d'anomalies dans le sol. La distinction entre le bruit et les passages difficiles dans le sol n'est pas toujours évidente; le ressenti du sondeur est précieux pour l'interprétation.

L'opérateur doit pouvoir adapter la cote de l'essai pressiométrique de façon à pouvoir placer le corps de la sonde entièrement dans une zone de caractéristiques jugées homogènes. Les instructions pour le chantier doivent être à la fois suffisamment souples pour permettre ces adaptations sur le terrain et précises pour garantir que les essais pressiométriques soient représentatifs des différentes couches existantes. Les passages mous et durs doivent être testés dans une proportion convenable vis à vis des besoins du projet géotechnique.

La précision sur la profondeur de la sonde joue un rôle important. Au cours du forage la profondeur de la tête de coupe est enregistrée numériquement, mais la descente de la sonde est rarement suivie par un capteur numérique. Sa profondeur est souvent mesurée en comptant le nombre de tiges insérées dans le forage, puis en faisant des mesures avec un mètre à ruban à partir de la tête du sondage pour l'ajustement fin. Cette pratique permet de respecter les tolérances normatives de 20 centimètres, mais s'est montrée insatisfaisante pour un positionnement précis de la sonde. Intégrer la descente de la sonde dans le jeu de paramètres enregistrés permettrait non pas seulement de réduire l'incertitude sur sa position, mais aussi de la certifier via l'enregistrement informatique.

Un dernier point à traiter issu de cette réflexion porte sur la qualité de l'essai d'expansion de cavité cylindrique et la protection de la sonde au cours de son gonflement dans le terrain. Un développement dans le cadre du projet national ARSCOP est en cours à ce propos et concerne l'instrumentation de la sonde par des fibres optiques pour la mesure des déformations radiales de sa membrane. Cette mesure complémentaire permettrait d'augmenter la précision des mesures et de s'assurer que le champ de déformations autour de la sonde est cylindrique. Affichées au cours de l'essai, ces données devraient permettre à l'opérateur de juger du bon déroulement de l'expansion et de décider si nécessaire d'arrêter le gonflement de la sonde à temps pour la préserver d'un possible endommagement. Il sera possible de proposer à terme un critère d'arrêt objectif basé sur cette information.

4. Synthèse et conclusions

La sonde Monochambre FC[®] a été utilisée par Fugro GeoConsulting pour la réalisation d'essais pressiométriques à haute pression dans plusieurs formations géologiques de la région parisienne. Certaines de ces formations sont plus difficiles pour la réalisation de tels essais en raison de leur hétérogénéité, comme c'est le cas des Marnes et Caillasses et du Calcaire Grossier.

La réalisation d'un essai dont la cote avait été préalablement imposée dans le Calcaire Grossier a occasionné l'endommagement d'une sonde. Les traces laissées sur son habillage métallique extérieur ont montré que la sonde avait été placée dans une zone hétérogène du terrain. L'utilisation préalable des paramètres enregistrés lors du forage et le décalage de la sonde auraient permis d'éviter cet inconvénient. Au-delà du dégât matériel, un essai réalisé dans une zone d'hétérogénéités si prononcées ne peut pas être correctement interprété au sens des théories d'expansion de cavité cylindrique. La courbe de chargement issue d'un tel essai n'est pas représentative du comportement des matériaux testés.

L'utilisation des paramètres enregistrés lors du forage s'est montrée efficace pour placer la sonde dans des passages estimés homogènes et ainsi réussir à faire des essais de haute qualité dans ces formations. La mise en œuvre sur chantier de la procédure présentée dans cette communication fait appel à certains développements parallèles concernant le matériel d'acquisition et les procédures d'essai. Il s'agit des points suivants :

- Un dispositif doit permettre l'affichage, dans une échelle adaptée à l'emprise de l'essai, des données enregistrées lors du forage et traitées en temps réel. Ces données doivent être soumises à un traitement numérique approprié. Dans ce travail, il a été utilisé l'inverse de la vitesse, en minutes par mètres. La pertinence de l'utilisation d'autres paramètres mérite d'être étudiée. Un filtre a été appliqué aux données pour supprimer certains pics typiquement issus de bruit d'enregistrement.

- La descente de la sonde doit être enregistrée pour assurer une réduction de l'incertitude sur sa position réelle dans le terrain. Ceci permet d'assurer que l'essai d'expansion soit réalisé dans une couche précise et de préserver la sonde.

- Le protocole de réalisation du sondage doit permettre au sondeur d'adapter la profondeur des essais selon la réalité du terrain. Ce protocole doit être à la fois suffisamment souple pour permettre la réalisation d'essais à espacement vertical variable, mais également précis pour assurer que la variabilité intrinsèque des sols soit adéquatement caractérisée pour le projet géotechnique. A ce propos, le procès-verbal d'essai doit prévoir que ce choix soit explicité et justifié.

- Une réflexion sur les spécifications techniques imposant des sondages à intervalles fixes devrait être initiée, cette pratique étant inadaptée dans ce type de sols.

- Une instrumentation de la sonde qui permettrait la mesure et l'affichage, en cours d'essai, des déformations radiales à plusieurs niveaux de la membrane est souhaitable. Un tel développement est en cours dans le cadre du projet national ARSCOP.

5. 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.
- Cailleux, J. B. (1986). Étude des diagraphies instantanées en forage. Rapport des Laboratoires, GT 12, 97 pages. Ministère de l'urbanisme, du logement et des transports, Laboratoire central des ponts et chaussées.
- Cour, F., Lopes, A. (2018). Une sonde monocellulaire innovante pour la réalisation des essais d'expansion de cavité cylindrique. Journées Nationales de Géotechnique et de Géologie de l'Ingénieur. Juin 2018. Champs sur Marne, France.
- Reiffsteck, P. (2010). Utilisation des paramètres de forage en reconnaissance géotechnique. Journées Nationales de Géotechnique et de Géologie de l'ingénieur, 157-164. Grenoble, France.
- Reiffsteck, P., Benoit, J., Hamel, M., & Vaillant, J. M. (2016). Proposition d'une méthode de classification basée sur les paramètres de forage. In JNGG, Journées Nationales de Géotechnique et Géologie de l'Ingénieur , 746-753. Nancy, France.