

NOUVELLE TECHNOLOGIE DE MESURE PENDANT LE FORAGE ASFOREC

NEW MEASURING WHILE DRILLING TECHNOLOGY ASFOREC

Michaël PERONNE¹, Michel RISPAL², Panagiotis Georgios KARAGIANNOPOULOS¹, Catherine JACQUARD², Philippe REIFFSTECK³

¹ Jean Lutz SA, Jurançon, France

² Fondasol, Avignon, France

³ Université Gustave Eiffel-IFSTTAR, GERS-SRO, Champs sur Marne, France

RÉSUMÉ – Cette communication présente un nouveau système de mesure pour l'enregistrement des paramètres de forage. Ce nouveau système avec des capteurs situés sur les tiges de forage enregistre les paramètres au plus près de l'outil permettant la connaissance de la réponse directe du sol. Une comparaison des paramètres enregistrés avec les deux techniques est présentée et discutée.

ABSTRACT – This paper will present a new measuring system for drilling parameter recording. This new system with transducers located on the drilling rods records parameters close as ever to the tool allowing the knowledge of the direct response of the soil. Comparison of the parameters recorded with both techniques is presented and discussed.

1. Contexte

Dans le cadre de l'industrie de conception et de construction de bâtiments (tours, immeubles de grande hauteur, etc.) et d'infrastructures (ports, ponts, centrales électriques, tunnels, etc.), la nécessaire connaissance du sous-sol qui portera ces ouvrages met en œuvre un processus d'investigation. Il s'agit de "sonder" ponctuellement le terrain par des machines.

La réalisation de forages géotechniques est actuellement basée sur des machines de forage équipées d'un système de mesure de paramètres physiques dont l'analyse repose en grande partie sur l'expérience de l'opérateur du site. Le dispositif de mesure aujourd'hui disponible sur le marché et équipant la machine enregistre indirectement les paramètres de forage sur les éléments hydrauliques de la machine. Ces équipements donnent lieu à de nombreux développements (Somerton 1959 ; Teale, 1965 ; Diehl, 1978 ; Pfister, 1985 ; Cailleux 1986 ; Falconer et Normore, 1987 ; CEN, 2013).

Ainsi, pour être interprétées, ces mesures nécessitent un étalonnage de la machine qui ne tient pas compte des conditions d'utilisation (échauffement, usure, etc.). C'est la principale difficulté pour pouvoir dériver des paramètres composés qui peuvent être liés aux paramètres mécaniques et aux propriétés géotechniques (De Paoli et al., 1988 ; Nishi, et al., 1998 ; Reiffsteck, 2011 ; Laudanski et al., 2012 ; Gui et al., 2002 ; Reiffsteck et al., 2018 ; Reiffsteck et al., 2016).

Un mauvais réglage des paramètres de contrôle de la machine conduit à détériorer la qualité des parois du forage dans le cas des essais in situ, à dépenser une énergie excessive et à augmenter le risque d'usure ou de casse, avec souvent des conséquences sur la productivité des sites.

Par ailleurs, les signaux mesurés par les capteurs sont toujours transmis par voie filaire, ce qui est une source importante de défauts (60% des défauts proviennent de

ruptures de câbles). Une autre source de difficultés résulte du couplage mécanique des capteurs avec certaines pièces mobiles, ce qui provoque des défaillances précoces.

Enfin, l'amélioration de la gestion des forages ne sera possible qu'en améliorant encore la qualité des mesures (précision). Cet article présente la conception et la validation d'un nouveau type de capteur pour le MWD (Measuring While Drilling) visant à pallier tous ces inconvénients.

2. Objectifs de la nouvelle technologie ASFOREC

La nouvelle technologie ASFOREC propose de révolutionner ce marché de l'investigation des sols en développant un nouveau système de mesure basé sur l'instrumentation in situ des tiges de forage juste sous la tête de rotation en utilisant un capteur haut de gamme purement sans fil et sans contact pour la mesure et la transmission.

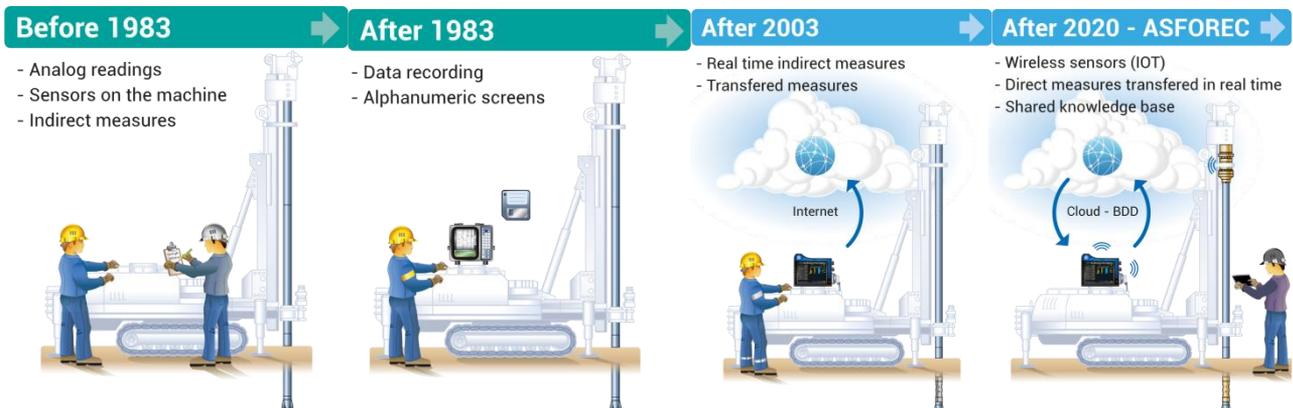


Figure 1. Évolution de l'instrumentation dans la mesure en cours de forage.

Les résultats attendus du projet sont un gain de précision, une augmentation de la quantité et de la qualité des informations recueillies, et une amélioration de l'efficacité.

L'évolution des systèmes de mesure au cours des dernières décennies et les objectifs qui en découlent pour notre projet sont résumés dans la Figure 1.

3. Introduction à l'instrumentation

3.1. Paramètres mesurés

Tous les acteurs actuels du domaine des paramètres de forage utilisent des mesures de débits ou pressions d'huile hydraulique alimentant les éléments actifs de la foreuse (moteurs, vérins, etc.), plutôt qu'au plus près du forage (c'est-à-dire directement sur le train de tiges ou au niveau de l'outil de forage), en raison des contraintes mécaniques et des difficultés technologiques des mesures rencontrées in situ. Il s'agit donc de mesures indirectes des phénomènes hors sol qui sont assez imprécises (erreur de l'ordre de 30% pour une machine donnée) et peuvent dépendre d'une machine à l'autre de l'architecture du circuit hydraulique.

Ainsi, la vitesse de pénétration dans le sol (utilisée pour qualifier la résistance du sol) dépend de la nature du sol mais aussi (entre autres) de la force de poussée et de la vitesse de rotation exercées sur l'outil de forage par la machine. Cette force de poussée est elle-même approximée par la mesure de la pression hydraulique d'entraînement, qui n'est pas strictement linéaire (hystérésis, dépendance à la température, filtrage mécanique des composants hydrauliques, etc.) tandis que la vitesse de rotation est difficilement mesurable en raison de l'exposition du capteur à une contrainte mécanique due à sa proximité avec les tiges de forage.

3.2. Système de mesures directes

La réalisation de mesures directes, c'est-à-dire plus proches du forage, permet d'augmenter sensiblement la précision des mesures. Jean Lutz propose déjà plusieurs systèmes embarqués de mesures in situ parmi lesquels on peut citer :

- Le capteur TIGOR, inséré dans le train de tiges juste au-dessus de l'outil de forage pour mesurer les déviations.
- Le capteur TAUPI, installé au bas du profil d'injection à écran fin, pour la mesure des déviations, de l'amplitude et de la fréquence des vibrations appliquées au profil.

Il est à noter que d'autres fabricants (notamment aux Etats-Unis) proposent des dispositifs de mesure de l'énergie transmise au trépan lors du battage des palplanches sans rotation : des jauges de contraintes et des accéléromètres positionnés sur le train de tiges transmettent les mesures par des câbles à une boîte de jonction électronique pour le traitement du signal. L'utilisation de tels câbles n'est pas possible lors de la réalisation de forages d'investigation du sol, l'outil étant alors en rotation.

4. L'innovation ASFOREC

4.1. Les capteurs actuels

Le tableau 1 ci-dessous reprend les mesures effectuées avec les capteurs classiques et les difficultés qui leur sont associées.

Tableau 1. Liste des capteurs classiques et leurs inconvénients

Paramètre mesuré	Inconvénient des capteurs actuels
Couple de rotation	Mesure indirecte et imprécise : capteur installé sur un circuit hydraulique dont la valeur dépend de la vitesse de rotation, de la température de l'huile et de l'usure de l'engrenage.
Pression de poussée	Mesure indirecte et imprécise : capteur installé sur un circuit hydraulique dont la valeur dépend de la vitesse de translation, de la température de l'huile et de l'usure de l'engrenage.
Vitesse de rotation	Capteur précis mais fragile en raison de sa proximité avec les tiges en rotation.
Amplitude et fréquence des vibrations	Mesure indirecte (réalisée sur l'entraînement du train de tiges)
Pression du fluide de forage	Colmatage ou cavitation de l'arrangement
Débit du fluide de forage	Débitmètre peu facile à embarquer sur une machine.
Taux d'avance	Capteur à câble fragile.

4.2. L'innovation apportée

En 2018, Jean Lutz a commencé à développer un capteur de mesure de couple et de force longitudinale positionné en haut de l'arbre. Les premiers tests sur le terrain ont eu lieu avec Fondasol et IFSTTAR au cours de l'année 2019 établissant une première étape vers le développement des solutions attendues dans ASFOREC.

Avant la solution ASFOREC, il n'existait pas de technologies in situ pour mesurer les paramètres de forage adaptés à la géotechnique. Celui-ci combine en un seul capteur sans fil (communication radio, charge par induction) les paramètres de mesure nécessaires à l'élaboration d'une étude géotechnique détaillée d'un site (comme décrit dans la Figure 2).

L'innovation réside dans l'approche in situ de la réalisation des mesures, c'est-à-dire que les capteurs sont positionnés plus près de l'outil de forage, ce qui a l'avantage d'éliminer les calibrages contraignants de la machine de forage et plusieurs approximations nécessaires lorsque les mesures sont faites indirectement (par exemple, le couple exercé sur l'outil est jusqu'à présent calculé à partir d'une pression hydraulique).

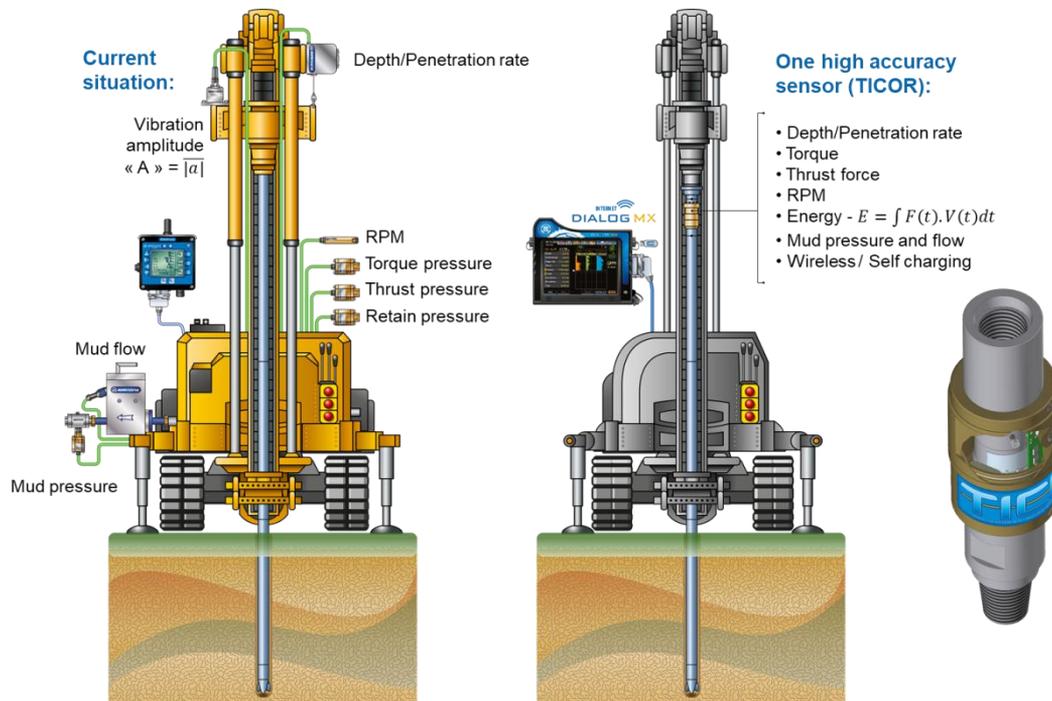


Figure 2. Description du système de capteurs ASFOREC.

Pour ce faire, des circuits intégrés miniatures sont introduits dans un ensemble mécanique et électronique robuste. Les dernières technologies de transmission d'informations sans fil ont été mises en œuvre.

Cet ensemble pourra à terme couvrir ses besoins énergétiques en profitant du mouvement de rotation des tiges pour éviter les opérations régulières de recharge des batteries embarquées (en pratique peu effectuées par les opérateurs du chantier).



Figure 3. Capteur ASFOREC (a) installé sur une machine de forage standard utilisée pour l'étude du sol. (b) Zoom sur le capteur.

4.3. Installation sur un appareil de forage

Le système de mesure ASFOREC a déjà été installé sur différentes machines de forage géotechnique représentatives de celles couramment utilisées sur le marché. Le capteur ASFOREC est installé en contact direct avec le train de tiges, juste en dessous de la tête de rotation et avant la première tige de forage (à l'aide d'un raccord de tige de forage), comme le montrent les figures 3a et b.

5. Cas d'étude

Nous présentons ci-après l'analyse de cinq sondages réalisés sur des machines de forage différentes avec des capteurs conventionnels et le système ASFOREC. Ces études ont été menées afin de réaliser des essais in situ concomitants (pressiomètre Menard PMT non décrit ici) pour permettre l'établissement de corrélations et déterminer une étude complète des sols rencontrés.

5.1. Première série d'essais 2019-2020

Ces premiers essais ont permis de valider les performances du capteur ASFOREC. Nous avons travaillé sur trois sites :

- site n°1 dans le pays Basque où le profil du sol était composé de remblais sur les premiers mètres, de sables meubles, puis de sables compacts (figure 4a).
- site n°2 en Saxe (Allemagne). La machine de forage plus grande et plus puissante a été utilisée dans une zone alluviale avec présence de conglomérats anciens et de matériaux à grossiers (Figure 4b, forage de 10.4 à 80 m de long).
- site n°3 dans les Landes (France). Le site est situé dans le sud-ouest de la France dans une carrière de sable. Une épaisse couche de sable dense avec quelques intercalations de sable cimenté et/ou graveleux. La machine utilisée est la même que celle mise en place lors du premier essai. Les paramètres sont présentés dans la Fig. 4c, (forage de 0 à 13.7 m de long).

Les paramètres présentés dans la Fig. 4, en fonction de la profondeur sont de gauche à droite :

- (Bleu) Vitesse de pénétration à l'aide d'un capteur conventionnel (encodeur rotatif).
- (Rose) Pression du couple de rotation (capteur de pression analogique monté sur la conduite hydraulique).
- (Orange) Couple de rotation provenant du capteur ASFOREC (mesure directe).
- (Vert) Pression de la force de poussée (capteur de pression analogique monté sur la conduite hydraulique).
- (Jaune) Force de poussée du capteur ASFOREC (mesure directe).

Pour le site n°1, les courbes affichées montrent une bonne corrélation sur la mesure du couple de rotation, au moins jusqu'à 6,5 m. Dans la zone suivante, de 6,5 à 8 m, la puissance de la machine tend à minimiser le couple nécessaire à la rotation de la tige.

L'analyse de la pression de poussée montre que la réaction sur les tiges est beaucoup plus "douce" (grâce au capteur ASFOREC) que celle mesurée avec le capteur installé sur l'entraînement hydraulique. Ensuite, à partir de 8 m lorsque le taux de pénétration diminue, les paramètres mesurés sur les circuits hydrauliques montrent une variation continue alors que le capteur ASFOREC indique une augmentation par palier et un plateau. Les MWD classiques montrent des pertes de force et de pression dues au système d'amortisseurs sur les tiges de forage et aux valves d'actionnement sur le circuit hydraulique.

Les profils des paramètres de forage montrent une corrélation quasi parfaite du capteur ASFOREC avec l'instrumentation MWD classique. Comparé aux deux autres tests, le signal du site n°2 est beaucoup plus bruité en raison des différents types de disposition de la foreuse pour appliquer la poussée. Cependant, les signaux des capteurs de type hydraulique et direct (ASFOREC) montrent clairement les mêmes tendances (Figure 5).

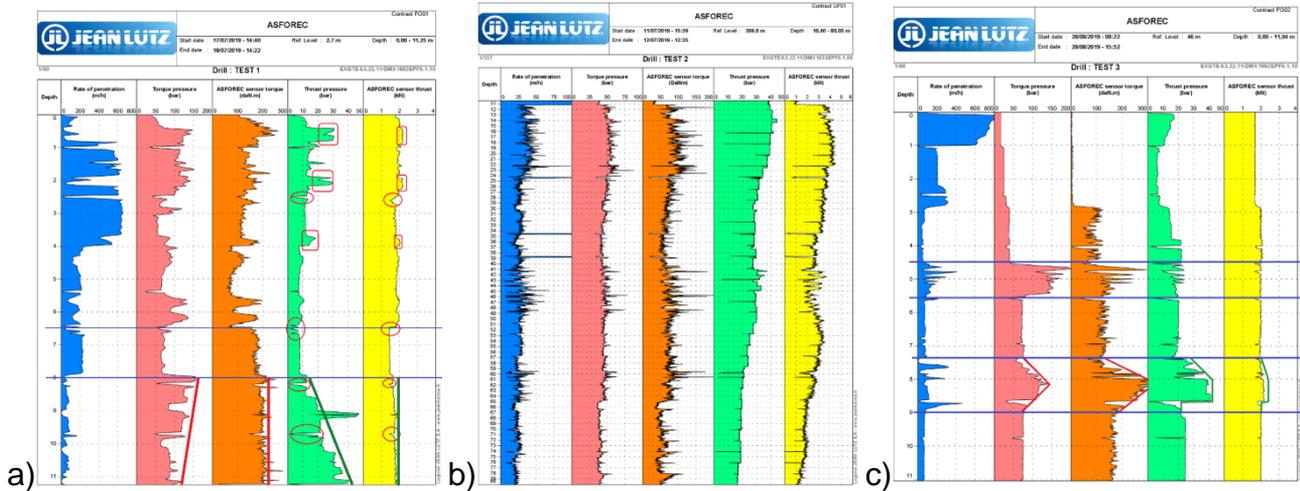


Figure 4. Sites (a) n°1. (b) n°2. Et (c) n°3

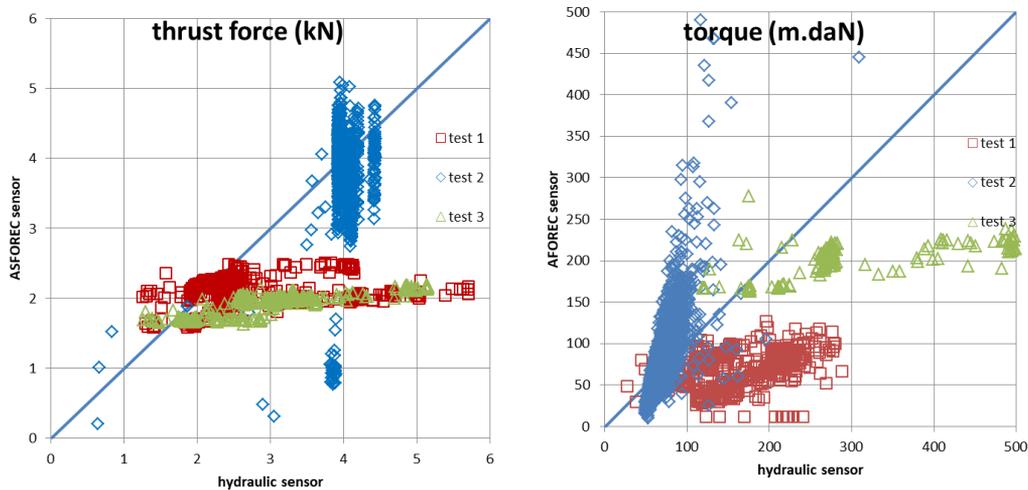


Figure 5. Comparaison des valeurs de (a) force de poussée, (b) couple pour les trois essais réalisés.

5.2. Deuxième série d'essais 2021-2022

Cette série d'essais a permis de mettre en œuvre la dernière version du capteur dont les plages de mesure ont été adaptées aux sondeuses hydrauliques destinées aux essais pressiométriques. Les trois sites sont situés dans le sud-ouest de la France, les essais ont été réalisés à relativement faible profondeur. La machine utilisée est la même que celle mise en place lors de la première série d'essais. Les paramètres sont présentés dans la Figure 6.

Les profils montrent que le capteur ASFOREC se compare bien avec l'instrumentation MWD classique. Dans ces derniers essais, la mesure de l'effort de poussée colle mieux aux résultats du système hydraulique et son nouvel étalonnage le rend plus sensible.

La représentation de la Figure 7 permet de le confirmer.

6. Analyse - Influence sur la qualité

Ces essais sur sites réels montrent que le capteur ASFOREC donne une mesure de haute qualité, très proche du MWD réel basé sur des transducteurs de pression situés sur le circuit hydraulique des foreuses. Les principales caractéristiques du profil du sol sont bien observées.

La comparaison, illustrée sur les figures 5 et 7, des valeurs mesurées obtenues avec les deux systèmes permet de tirer les conclusions suivantes :

- selon la machine de forage, la plage de variation peut être différente,

- l'amélioration de la sensibilité du capteur a permis de l'adapter aux machines hydrauliques classique de géotechnique, avec pour les mêmes conditions de forage le passage d'un nuage de résultat très horizontal à un nuage quasiment aligné sur la bissectrice,
- Sur la machine allemande, la plus puissante, le circuit hydraulique semble plus "rigide" et une augmentation de pression conduit à une variation immédiate du couple ou de la pression, induisant un nuage de points plus vertical.

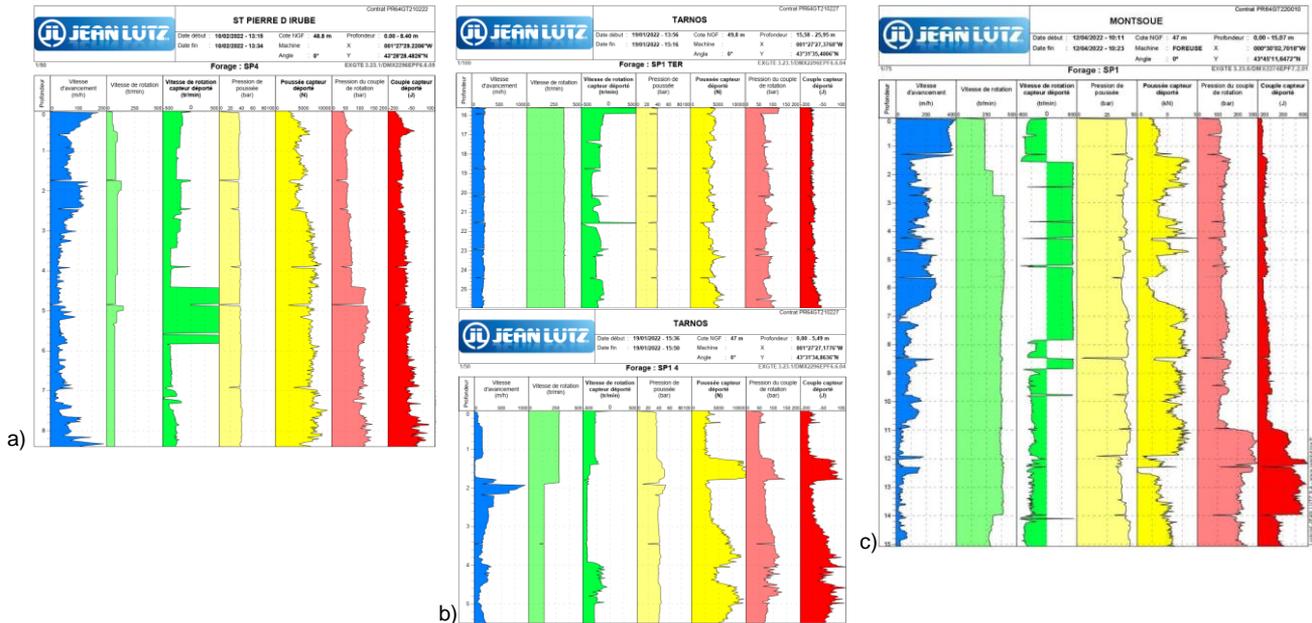


Figure 6. Sites (a) n°4 et (b) n°5 et (c) n°6.

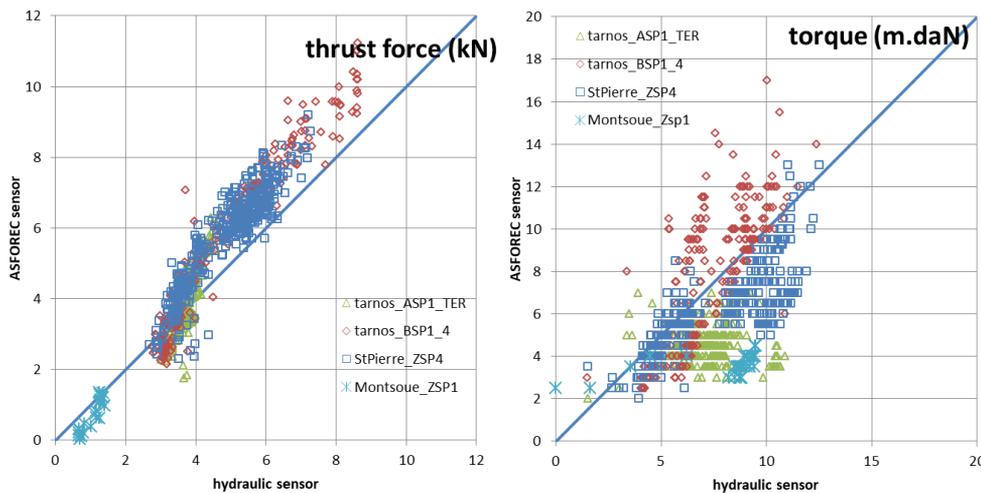


Figure 7. Comparaison des valeurs de (a) couple (b) force de poussée, pour les trois essais réalisés (ASFOREC vs capteur hydraulique).

Les conclusions de ces essais croisés préliminaires sont :

- une bonne qualité des résultats des tests avec le capteur TICOR - ASFOREC.
- des nuages de points centrés sur la bissectrice.
- une forte influence de la machine de forage (circuit hydraulique, architecture, etc.) nécessitant de dimensionner le capteur à l'application;
 - dans sa nouvelle génération, le TICOR est plus précis que les MWD.

7. Conclusions

A ce stade du développement, le concept a montré sa pertinence, alors que les paramètres mesurés par le TICOR s'accordent de temps en temps bien avec ceux mesurés à l'aide du MWD, le TICOR permet de mettre en valeur des phénomènes jusque-là masqués par l'interface hydraulique de la machine de forage. L'étape suivante sera un design plus compact pour limiter la longueur de cette "tige" spéciale et une optimisation de la plage de mesure des différents transducteurs. De plus, l'ajout d'autres mesures comme la fréquence de vibration et la pression d'injection sont envisagées

8. Remerciement

Les auteurs remercient leurs collègues et clients qui leur donnent accès aux sites.

9. Références bibliographiques

- Cailleux J.-B., Étude des diagraphies instantanées en forage, (study of instantaneous logging of borehole), Rapport des laboratoires, GT12, 1986, 97 p. (in French).
- CEN, Geotechnical investigation and testing — Field testing — Part 15: Measuring while drilling, EN ISO 22476-15, CEN, 2013, 45 p.
- De Paoli B., Viola G., Tomiolo A., The use of drilling energy for soil classification, 2nd International Symposium on Field Measurements in Geomechanics, Kobe, Sakurai Ed, 1988, pp. 313-321.
- Diehl G.W., Automation and optimization of rock drill parameters in hydraulic drilling, Mining magazine, 1978, pp. 38-43.
- Falconer I.G., Normore D., MWD bit efficiency model provides real-time answers, Technology Oil & Gas Journal, 1987, pp. 40-48.
- Gui M.W., Soga K., Bolton M.D. Hamelin J.-P., Instrumented borehole drilling for subsurface investigation, Journal of Geotechnical and Environmental Engineering. ASCE, 2002 Vol. 128 n°4, pp. 283-291.
- Laudanski G., Reiffsteck Ph., Tacita J.-L., Desanneaux G., Benoît J., Experimental study of drilling parameters using a test embankment, Intern. Conference on Site Characterization ISC4, Porto de Galinhas, Brasil, 2012, 4 pages
- Nishi, K., Suzuki, Y., Sasao, H. (1998), Estimation of soil resistance using rotary percussion drill, Proceedings First International Conference on Site Characterization, Atlanta, Robertson and Mayne Editors, vol.1, pp. 393-398.
- Pfister P., Drilling Parameter Recording in Soil Engineering. Ground Engineering, 1985, Vol. 18 n°3, pp. 16-21.
- Reiffsteck P., Benoit, J., Bourdeau, C., Tacita J.-L., Desanneaux G., Enhancing the geotechnical model using drilling parameters, J. Geotech. Geoenviron. Eng., 2018, Vol. 144, Issue 3, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0001836](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0001836)
- Reiffsteck P., Influence factors of measuring while drilling method, European conference on soil mechanics and geotechnical engineering, 15: Geotechnics of Hard Soils - Weak Rocks, Athens, 12-15 September 2011. Proceedings, vol. 1, pp. 67-72.
- Reiffsteck P., Benoît J., Hamel M., Vaillant J.-M., Application and tentative validation of soil behavior classification chart based on drilling parameter measurements, Intern. Conference on Site Characterization ISC5, Brisbane, Australia, 2016, 4 pages
- Somerton W.H., A laboratory study of rock breakage by rotary drilling, Petroleum transaction, AIME, 1959, Vol. 216, pp. 92-97.
- Teale R., The concept of specific energy in rock drilling, International Journal Rock Mechanics and Mining Science, 1965, Vol. 2, pp. 57-73.