

ANALYSE COMPARATIVE DES DIFFÉRENTES MÉTHODES D'INTERPRÉTATION DES DIAGRAPHIES INSTANTANÉES

COMPARATIVE ANALYSIS OF DIFFERENT INTERPRETATION METHODS FOR MWD DRILLING PROFILES

Guilherme DE OLIVEIRA SOUZA¹, Philippe REIFFSTECK², Fabien SZYMKIEWICZ², Catherine JACQUARD¹, Michel RISPAL¹

¹ Groupe Fondasol, Avignon, France

² Université Gustave Eiffel, Paris, France

RÉSUMÉ – Les enregistrements de paramètres de forage offrent une grande quantité de données sur le sol des projets de construction. Comme l'interprétation de chaque paramètre isolément peut être difficile en raison du bruit et l'hétérogénéité naturelle du sol, plusieurs auteurs proposent des algorithmes d'interprétation. Cet article présente une comparaison de trois différentes méthodes d'identification des couches proposées dans la littérature.

ABSTRACT – Measuring while drilling (MWD) offers a large quantity of data about the soil layers. As interpreting one single drilling parameter can be difficult due to signal noise and the soil's natural heterogeneity, multiple authors propose interpretation algorithms. This paper presents a comparison between three different methods found in the literature.

1. Introduction

La reconnaissance des terrains est une partie essentielle de tout projet de génie civil. Ces données informent les ingénieurs sur la nature et les propriétés mécaniques du sol testé, ce qui est indispensable pour une conception sûre et efficace des projets de construction (Cardu et al., 2013 ; Reiffsteck et al., 2018).

Il y a plusieurs méthodologies de mesure des paramètres du sol in situ, et la plus utilisée en France est le pressiomètre Ménard. Dans cet essai, une sonde gonflable est introduite dans un trou foré préalablement afin de mesurer la résistance et la déformation du sol qui l'entoure. Des foreuses hydrauliques sont employées pour créer le trou où le pressiomètre est utilisé et les paramètres de ces forages sont souvent enregistrés en fonction de la profondeur, une pratique nommée Enregistrement de Paramètres de Forage (EPF) ou Monitoring While Drilling (MWD) en anglais, qui permet de tracer des courbes en fonction de la profondeur appelées diagraphies. Ces enregistrements offrent ainsi des données précieuses sur le sous-sol (Girard, 1985 ; Kreziak et Pioline, 2005).

Ces paramètres ont une importance qualitative, car on peut établir des corrélations entre l'allure de ces courbes et les caractéristiques du sol foré. La transition d'un type de sol à l'autre est généralement marquée par d'importantes variations d'un ou de plusieurs paramètres (Reiffsteck et al., 2018).

Pour faciliter l'interprétation des diagraphies et réduire l'influence des décisions du sondeur lors du forage, plusieurs auteurs proposent l'utilisation de paramètres composés calculés à partir de relations mathématiques entre les paramètres mesurés in situ. Ces paramètres sont conçus pour être indépendants des conditions de forage et pour rendre les transitions entre les différentes couches plus visibles (Reiffsteck et al., 2018).

2. Méthodes d'interprétation

Les méthodes d'interprétation de diagraphies peuvent être divisées en deux catégories principales. La première façon de les interpréter consiste à faire des comparaisons qualitatives entre les diagraphies sur la base des rapports des investigations précédentes

et la connaissance de la géologie locale. Ce genre d'interprétation ne peut qu'être faite dans une région où la géologie est bien connue et avec une équipe projet expérimentée (de Paoli et al., 1988).

Une autre méthode traite les diagraphies comme des mesures expérimentales qui représentent une caractéristique mécanique. Il faut prendre comme hypothèse de base que l'outil utilisé pour forer le trou peut reproduire à l'échelle réduite les mêmes mécanismes qui gouvernent le comportement du sol lors de grands forages comme la construction des fondations (de Paoli et al., 1988). En adoptant cette hypothèse, on peut utiliser des algorithmes pour identifier des couches de sol et formations lithologiques.

2.1. Filtrage du signal et régularisation

Avant l'utilisation de l'une ou l'autre des méthodes d'interprétation, il est recommandé de traiter les données brutes pour obtenir de meilleurs résultats. Ce traitement consiste en deux procédés complémentaires : l'élimination des valeurs aberrantes et le filtrage du bruit (Bourget et Rat, 1995).

Le premier procédé consiste à éliminer les mesures qui ne représentent pas la réalité du terrain, par exemple lorsque la machine s'arrête de forer et lors des manœuvres pour ajouter une nouvelle tige ou si l'un des capteurs devient défectueux en cours de fonctionnement. Il est estimé que les pauses pour les manœuvres conduisent aux chutes suivies par des montées rapides de pression dans les circuits hydrauliques qui peuvent tromper les capteurs. Simultanément, le fluide de forage continue à percoler le sol lorsque la foreuse est arrêtée, en modifiant légèrement les caractéristiques du sol en dessous. La recommandation est de remplacer ces valeurs par celles juste avant leur apparition pour supprimer ces pics soudains et d'utiliser les tiges les plus longues possibles pour minimiser leur existence en premier lieu (Bourget et Rat, 1995).

La deuxième phase est celle du filtrage du signal pour enlever le bruit. La courbe présentée comme la diagraphie peut être considérée comme la somme d'une fonction déterministe et une fonction aléatoire de moyenne nulle (Amokrane, 1988). Le composant aléatoire du signal est surtout produit quand l'outil casse les grains les plus gros du sol et peut tourner librement pour un bref instant avant de rattraper le contact avec le sol. Ce phénomène est le plus évident quand la sondeuse fore des sols graveleux, qui généralement ont un plus grand espace entre les particules (Bourget et Rat, 1995).

Il est considéré que ce composant aléatoire ne contient aucune information relevant des propriétés du sol, en même temps qu'il peut masquer des variations résultant d'un changement du matériau (Bourget et Rat, 1995). Pour ces raisons, le bruit est considéré comme un obstacle pour l'interprétation fiable des diagraphies et il faut l'enlever ou au moins le réduire (Schunnesson, 1998). Quelques publications recommandent l'utilisation d'une transformée de Fourier lorsque d'autres utilisent un simple filtre de médiane mobile (Bourget et Rat, 1995 ; Kreziak et Pioline, 2005).

2.2. Algorithmes d'interprétation

Les algorithmes d'interprétation ont, eux, pour objectif d'identifier les couches de sol.

2.2.1. Algorithme de Amokrane

Cet algorithme a comme hypothèse de base l'idée que, lorsque la sondeuse fore un sol homogène et que les paramètres d'entrée (pression de poussée et vitesse de rotation) sont maintenus constants, les diagraphies des paramètres de sortie (vitesse d'avancement, couple de rotation, pression du fluide de forage) seront constants aussi. Par conséquent, une variation importante d'un paramètre indique que l'outil a commencé à forer un sol différent (Amokrane, 1988).

À partir de cette hypothèse, un algorithme a été créé avec l'enjeu de trouver ces zones homogènes dans les diagraphies. Pour ce faire, il faut déterminer un risque statistique acceptable en choisissant un niveau de variation acceptable dans une zone dite « homogène » et la résolution de l'algorithme en déterminant le nombre de mesures évaluées ensembles (Amokrane, 1988).

L'algorithme sépare la diagraphie en plusieurs blocs composés par le numéro n de mesures choisi au début. Les valeurs de chaque bloc sont considérées comme des échantillons indépendants d'une population gouvernée par une distribution gaussienne. Chaque bloc est comparé avec le bloc suivant pour établir la probabilité qu'il appartienne à la même population, donc à la même couche de sol, ou s'il est statistiquement différent, ce qui indique que la limite de la couche considérée a été trouvée.

Cette comparaison est faite avec le test d'Aspin-Welch, un test statistique qui compare des groupes en fonction de leurs moyennes et variances. Dans le test, les groupes a et b composés respectivement de n_1 et n_2 échantillons, de moyennes m_1 et m_2 et variances s_1 et s_2 représentent les populations A et B dont les moyennes M_1 et M_2 et les variances σ_1 et σ_2 sont inconnues.

À partir des valeurs connues, l'écart-type entre les deux groupes et la valeur T sont calculés avec les équations 1 et 2.

$$sd^2 = \frac{s_1^2}{n_1} + \frac{s_2^2}{n_2} \quad (1)$$

$$T = \frac{m_1 - m_2}{sd} \quad (2)$$

T est donc comparé à une valeur du Test-t de Student, qui détermine la probabilité que les deux populations aient la même moyenne et variance quand on ne connaît que des échantillons. Les résultats de ce test sont déjà connus et tabulés selon les degrés de liberté v et le risque statistique r choisi. Les degrés de liberté sont considérés comme le numéro entier le plus proche de l'inverse de :

$$\frac{1}{v} = \frac{1}{n_1 - 1} \left[\frac{s_1^2/n_1}{sd^2} \right] + \frac{1}{n_2 - 1} \left[\frac{s_2^2/n_2}{sd^2} \right] \quad (3)$$

Finalement, les valeurs T des deux groupes et $T(v, r)$ du test-t sont comparées : si l'absolu de T est plus petit que $T(v, r)$, les deux groupes sont statistiquement similaires ; sinon, les groupes sont statistiquement différents.

En utilisant cette méthode, l'algorithme d'Amokrane divise la diagraphie en plusieurs groupes de même taille. Ensuite, les groupes sont comparés en ordre selon leur profondeur : si les deux premiers groupes sont considérés similaires, ils sont mélangés et ce nouveau groupe est donc comparé avec le troisième groupe. S'ils sont différents, la profondeur qui sépare les deux groupes est notée comme la profondeur de transition entre deux couches et l'algorithme redémarre avec les deux groupes en dessous de cette profondeur-là. La procédure continue jusqu'à atteindre le dernier groupe (Amokrane, 1988).

2.2.2. Algorithme de Moussouteguy

L'objectif de cet algorithme est d'établir une lithologie plausible à partir des diagraphies et d'une estimation préliminaire définie soit par l'opérateur de la machine, soit par le géotechnicien à partir de sa connaissance de la géologie locale. Les résultats finaux seront des séries de probabilités en fonction de la profondeur, une pour chaque couche établie dans la lithologie préliminaire, où chaque valeur représente la probabilité que ce point appartient à une telle couche de sol (Moussouteguy, 2002).

La lithologie préliminaire est aussi interprétée par l'algorithme comme des probabilités, établies selon l'information donnée au début de l'interprétation. Pour chaque couche, la profondeur maximale z_i est requise. Entre ses deux limites, la couche correspondante reçoit une très forte probabilité (recommandée comme 95%) avec une zone d'incertitude autour de la profondeur de transition où cette probabilité décroît linéairement lorsque celle de la couche suivante croît linéairement aussi. Les probabilités sont calculées par les équations :

$$p(\text{form}_1) = p_{\text{sur}} = 95\% \text{ lors que } z \leq z_1 - \frac{z_{\text{inc}}}{2} \quad (4)$$

$$p(form_1) = \frac{1-(NF*p_{sur})}{z_{inc}(NF-1)} * z + p_{sur} - a \left(z_1 - \frac{z_{inc}}{2} \right) \text{ si } z_1 - \frac{z_{inc}}{2} \leq z \leq z_1 + \frac{z_{inc}}{2} \quad (5)$$

$$p(form_1) = \frac{1-p_{sur}}{NF-1} \text{ lors que } z \geq z_1 + \frac{z_{inc}}{2} \quad (6)$$

Où NF est la quantité de couches considérée et z_{inc} est la largeur de la zone d'incertitude.

L'étape suivante examine la diagraphie choisie pour créer des fonctions de distribution de chaque couche et de la diagraphie entière. À partir de ceux fonctions, la probabilité qu'un point de la diagraphie ait une valeur égale ou au-dessous d'une certaine valeur est déterminée. Ces probabilités sont donc interpolées et utilisées pour établir des densités de probabilités $p(D/form_i)$ pour chaque couche de la lithologie préliminaire.

Pour chaque point de la diagraphie, la probabilité associée à la profondeur (venue de la lithologie préliminaire) est multipliée par les densités de probabilité de chaque couche, associées à la valeur du paramètre à cette profondeur. Pour éviter des valeurs en dessus de l'unité, chaque valeur est divisée par la somme des valeurs à la même profondeur.

$$p(form_i/D) = p(D/form_i) * p(form_i) \quad (7)$$

$$p(form_i/D)_{renormée} = \frac{p(form_i/D)}{\sum_{i=1}^{NF} [p(form_i/D)]} \quad (8)$$

Il s'agit d'un algorithme itératif, et le critère de convergence est la moyenne des variations des probabilités finales par rapport à ceux de l'itération précédente. Pour démarrer une nouvelle itération, les probabilités selon la lithologie préliminaire sont remplacées par les probabilités calculées lors de la dernière itération et tout le reste de la procédure est fait sans altération. L'algorithme s'arrête si cette valeur devient plus petite que $2 * 10^{-2}$ (Moussouteguy, 2002).

Cette méthode raffine les estimations faites après le sondage. Le résultat final montrera des zones où la probabilité d'une certaine couche se rapproche de 100% avec des transitions soudaines au début d'une nouvelle couche. Si l'estimation initiale a été correcte, les profondeurs de ces transitions de probabilité seront similaires aux profondeurs de la lithologie préliminaire et l'algorithme s'arrêtera après quelques itérations (Moussouteguy, 2002).

2.2.3. Entropie

La troisième méthode analysée dans cette communication est celle de l'analyse de l'entropie du signal (Bourget et Rat, 1995). L'entropie H est définie par l'équation :

$$H(X, z) = \int_{z_0}^z \left| \frac{dX(u)}{du} \right| du \quad (9)$$

où z_0 est la profondeur de référence au début du forage (cela peut être 0 ou l'élévation du point de mesure) et X le paramètre mesuré. L'hypothèse de base de cette méthode est qu'après le filtrage, si le sol foré est homogène, l'entropie présentera une augmentation régulière relative à la croissance de la contrainte verticale du sol sur le point mesuré. Cette régularité est représentée sur la courbe d'entropie comme une section qui rassemble une ligne droite. Par conséquent, un changement de sol entraînera un changement de pente de la courbe d'entropie (Bourget et Rat, 1995).

Cependant, des sols très hétérogènes peuvent aussi créer des changements de pente ou des sauts soudains du graphe sans que ça signifie une transition de couches. A l'heure actuelle, il n'y a pas de procédure établie pour différencier les variations de pentes dues à une transition lithologique et celles dues à l'hétérogénéité d'un sol (Bourget et Rat, 1995).

3. Comparaison et analyse

Pour évaluer l'efficacité de ces trois méthodologies, un signal synthétique a été utilisé en première approche. Dans un deuxième temps, des sondages faits dans les Pyrénées Atlantiques en 2023 par la compagnie Fondasol ont été analysés.

Le paramètre réel analysé a été l'indice d'altération I_A , un paramètre composé calculé par l'équation 10 où P_E est la pression de poussée effective et V_A la vitesse d'avancement.

Pour cette analyse, les constantes de proportionnalité k_0 et k_1 ont été considérées unitaires. Le paramètre varie entre 0 et 2, où 2 indique le sol le plus dur trouvé lors de ce forage.

$$I_A = 1 + k_0 \left(\frac{P_E}{P_{E,max}} - k_1 \frac{V_A}{V_{A,max}} \right) \quad (10)$$

Mais avant le calcul de ce paramètre, les diagraphies originelles ont été filtrées par un filtre de médiane mobile, tel que recommandé par (Kreziak et Pioline, 2005 ; Reiffsteck et al., 2018). La médiane pour la position n de la diagraphie est donnée par la médiane de valeurs entre les positions $n - k$ et $n + k$. Si la valeur du paramètre dans la même position diffère de la médiane de plus d'un pourcentage limite f , la valeur est remplacée par la médiane. Pour la présente publication, on a utilisé $k = 10$ et $f = 5\%$.

3.1. Signal Synthétique

Un signal synthétique a été créé avec un total de 530 mesures espacées de un centimètre. Ce signal a été divisé en deux zones avec le point de division à 2,5m de profondeur comme montré dans la Figure 1. Dans chacune de ces zones la valeur de la « mesure » a été égale à une constante ajoutée à une valeur aléatoire entre 0 et 2 selon une courbe gaussienne qui a simulé le bruit de la mesure dans le sondage.

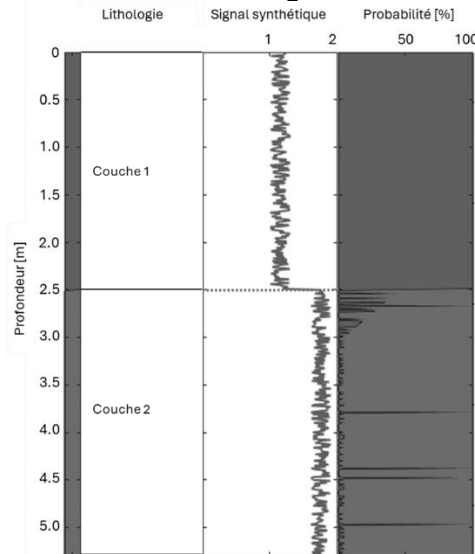


Figure 1. Signal synthétique avec division entre zones homogènes et résultat de l'algorithme de Moussouteguy

L'algorithme d'Amokrane, la première méthode testée, a été capable de trouver correctement les deux couches dans ce signal. Ensuite, l'algorithme de Moussouteguy a été testé avec plusieurs versions de lithologie préliminaire. Quand la profondeur correcte a été donnée à l'algorithme, il a convergé après 2 itérations avec la Figure 1 comme résultat final où les probabilités pour chaque couche sont empilées. Ensuite, le test a été refait avec des lithologies préliminaires qui ratent la vraie profondeur de transition jusqu'à 1,0 m d'écart en plus ou en moins. Dans ces cas, l'algorithme a eu besoin de 1 à 3 itérations en plus mais est arrivé à la profondeur correcte.

Sur la Figure 1 on voit que l'algorithme de Moussouteguy arrive toujours à 100% de probabilité dans la couche dont la moyenne a une valeur moins importante mais il reste des pics ponctuels dans l'autre couche où la probabilité d'appartenance à la couche de moyenne moins importante est très élevée. Ce phénomène se produit aux points avec les valeurs les plus basses des couches de moyenne élevées et est un effet indésirable de la façon dont les probabilités sont calculées.

Une des étapes de la méthode est le calcul des fonctions de répartition pour chaque couche selon la lithologie préliminaire. C'est-à-dire, la probabilité de trouver dans la diagraphie une mesure supérieure ou inférieure à une valeur x . Ensuite, cette fonction est

interpolée pour avoir plusieurs points également espacés au long de la courbe. Finalement l'algorithme calcule des densités de probabilités qui correspondent à la pente de la courbe jusqu'à chaque valeur interpolée.

Pour calculer la probabilité d'appartenance d'une mesure de la diagraphie à une couche, l'algorithme cherche dans les courbes de répartition la valeur interpolée la plus proche mais inférieure à la mesure et multiplie la densité de probabilité de cette valeur interpolée par la probabilité de la lithologie préliminaire.

Si la valeur de la diagraphie est au début de la courbe de répartition, elle recevra une densité de probabilité nulle et la probabilité finale sera aussi nulle, ce qui fait chuter les probabilités pour les autres couches dans ce point-là.

La méthode de l'entropie n'a pas pu être testée avec ce signal synthétique parce que nature du bruit artificiel utilisé était trop régulière et résultait en une seule ligne droite.

3.2. Diagraphies réelles

Des diagraphies de trois sondages ont été analysées pour cet article. Ces trois sondages ont été réalisés dans les villes de Bayonne, Hendaye et Espelette. Selon les rapports de forage envoyés par les sondeurs, il y avait 5, 2 et 4 couches de sols respectivement.

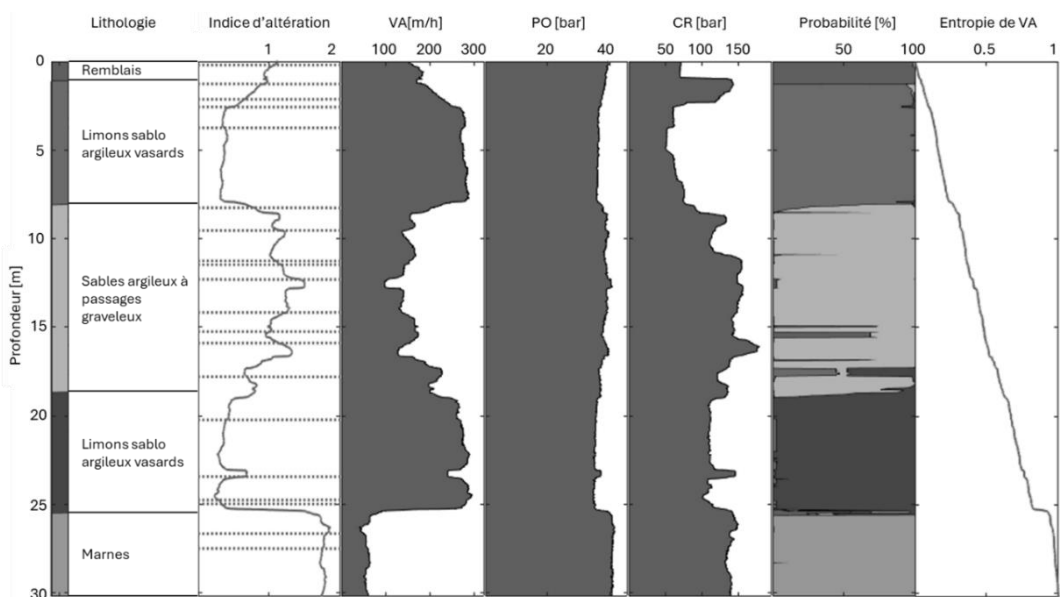


Figure 2. Lithologie, indice d'altération, diagraphies, résultat de l'algorithme de Moussouteguy et entropie pour le sondage 1

Pour le premier sondage (Figure 2), l'algorithme d'Amokrane a trouvé 19 zones qu'il considère homogènes, démarquées sur la courbe de l'indice d'altération. Des tentatives de réduire la sensibilité de l'algorithme aux variations aléatoires dans la diagraphie n'ont pas réussi à réduire la quantité de zones. Il faut souligner que, même si l'algorithme se montre trop sensible, il y avait une grande proximité entre les profondeurs estimées par le sondeur et certaines des frontières trouvées.

À son tour, l'algorithme de Moussouteguy a convergé après 2 itérations. Il y a des zones d'incertitudes, comme autour de 17,5 m (Figure 2), mais quand même le résultat est très clair et bien corrélé avec le rapport du sondeur. Le signal de l'entropie ne permet de localiser clairement que deux changements de couches à 8 et 25 m.

Le deuxième sondage (Figure 3) avait une transition très évidente autour de 0,80 entre les 2 sols forés. L'algorithme d'Amokrane a trouvé cette profondeur mais a aussi divisé la deuxième couche en plusieurs zones. À son tour, l'algorithme de Moussouteguy a aussi trouvé la profondeur de transition entre couches mais juste avant 9m de profondeur, où sont

groupées les valeurs les plus basses dans la deuxième couche, il a calculé une importante probabilité pour la couche 1.

Le troisième sondage (Figure 4) était supposé avoir 4 couches différentes. Comme pour les autres sondages, l'algorithme d'Amokrane a trouvé un nombre plus important de zones homogènes. L'algorithme de Moussouteguy a encore convergé rapidement mais ses résultats ne sont pas si bons que ceux des sondages 1 et 2. Comme les couches 3 et 4 occupent des plages similaires du paramètre analysé, la méthode n'est jamais parvenue à 100% de certitude pour la couche 3. Il y a aussi une diminution de l'indice d'altération à la transition entre ces couches, ce qui fait remonter fortement la probabilité de la couche 1 en raison du problème décrit dans le paragraphe 3.1.

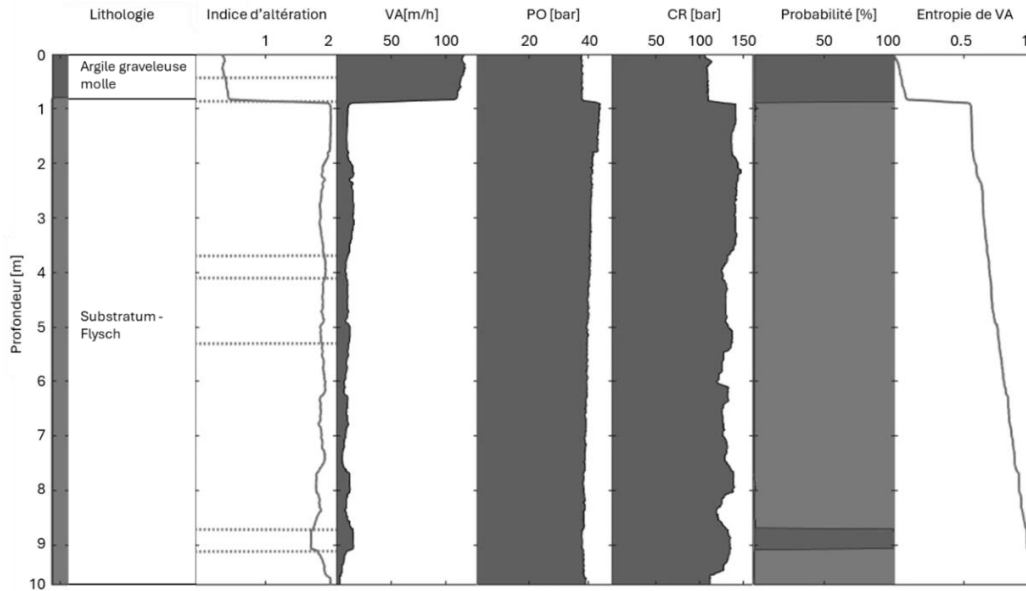


Figure 3. Lithologie, indice d'altération, diagraphies, résultat de l'algorithme de Moussouteguy et entropie pour le sondage 2

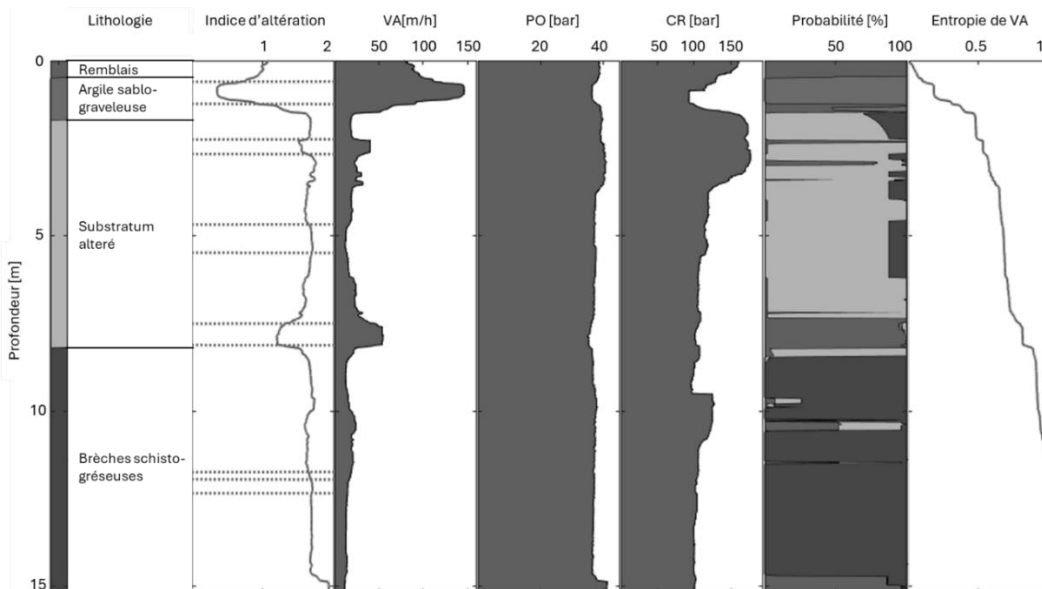


Figure 4. Lithologie, indice d'altération, diagraphies, résultat de l'algorithme de Moussouteguy et entropie pour le sondage 3

Avec ces trois sondages, il est évident que l'algorithme d'Amokrane, très précis avec le signal synthétique, est trop sensible aux variations aléatoires d'une diagraphie réelle et trouve des nombreuses divisions en plus de celles vues par l'opérateur lors de la description

des cuttings de forage. Même si certaines de ces divisions se produisent aux profondeurs similaires à celles vues sur chantier, d'autres n'auraient pas été détectées lors d'une analyse humaine.

Comme la méthode de l'entropie ne précise pas lequel paramètre serait le plus adapté pour en être analysé, tous les paramètres de base des forages 1, 2 et 3 ont été examinés. Pour les trois sondages, les entropies de la vitesse d'avancement et de l'indice d'altération ont été les mieux corrélées avec les lithologies rapportées. Les entropies des signaux de vitesse d'avancement sont montrées à droite dans les Figures 2, 3 et 4 renormalisées par leurs valeurs maximales.

Les transitions entre les dernières couches de sol et le rocher de base sont bien mis en évidence, ainsi comme la transition d'un sol mou à un autre plus dur. Par contre, si la couche inférieure est plus molle, comme à 19 m dans la Figure 2, variation est faible. En conclusion, l'entropie peut aider à interpréter certains sondages avec contraste.

4. Conclusions

Les trois méthodes d'interprétation testées ont eu des bons résultats mais doivent être améliorées pour garantir des résultats fiables. L'algorithme d'Amokrane s'est montré trop sensible en divisant les courbes réelles. Il faut retravailler les critères ou le test utilisé pour différencier les couches. L'algorithme de Moussouteguy a montré des valeurs aberrantes à cause de sa formulation. Si ce problème est corrigé, l'algorithme pourra être utilisé pour affiner les estimations faites in situ et trouver une lithologie mieux corrélée avec les enregistrements. Finalement, la méthode de l'entropie a de bonnes corrélations, mais ce n'est peut-être pas toujours le cas. À ce stade, la méthode n'est pas suffisamment définie pour être automatisée comme les autres.

Des travaux futurs utiliseront de nouveaux sondages pour valider les méthodes et des raffinements faits lors de la recherche. Plus tard, des corrélations entre les diagraphies et des tests comme le pressiomètre et le pénétromètre dynamique seront évaluées.

5. Références bibliographiques

- Amokrane, K. (1988). Contribution à l'analyse des diagraphies instantanées en génie civil. Doctorat, Université Bordeaux I, 167 pages.
- Bourget M., Rat, M. (1995). Interprétation semi-automatique des enregistrements des paramètres de forage. *Revue Française de Géotechnique*, vol. 73, pp. 3-14.
- Cardu, M., Oreste, P., Pettinau, D., Guidarelli, D. (2013) Automatic measurement of drilling parameters to evaluate the mechanical properties of soils. *American journal of applied sciences*, vol. 10, n° 7, pp. 654-663. <https://doi.org/10.3844/ajassp.2013.654.663>
- De Paoli, B., Viola, G., Tomiolo, A. (1988). The use of drilling energy for soil classification. *Proceedings, 2nd International symposium on field measurements in geomechanics*, vol. 1, pp. 313-321.
- Girard, H. (1985) Contribution à l'exploitation des paramètres de forage en génie civil. Doctorat, Université Bordeaux I, 304 pages.
- Kreziak C., Pioline M. (2005) Exploitation des paramètres de forage, Partie 2 : rapport d'expérimentation, rapport LRPC Rouen N°6682, 26 pages.
- Moussouteguy, M. (2002). Utilisation combinée des essais pressiométriques et diagraphies instantanées pour mieux évaluer le risque géotechnique en reconnaissance des sols. Doctorat, Université Bordeaux I, 417 pages.
- Reiffsteck, P., Benoit, J., Bourdeau, C. Desanneaux, G. (2018). Enhancing geotechnical investigations using drilling parameters. *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, vol. 14, n° 3. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0001836](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0001836)
- Schunnesson, H. (1998). Rock characterization using percussive drilling. *International journal of rock mechanics and mining sciences*, vol. 35, pp. 711-725.