

Analyse des forages des micropieux du projet Paravalanche de la Marionnaise

Analysis of micropile drilling logs for the Marionnaise Avalanche barrier project

Romario RAKOTOMALALA^{1,2*}, Amélie VENELLE², Guillaume CHAMPAGNE DE LABRIOLLE²

1 ENTPE, Vaulx-en-Velin, France

2 ARCADIS ESG, Lyon, France

**jeanrovaromario.rakotomalalaphamvanai@entpe.fr*

RESUME : Cette analyse se base sur les données du projet Paravalanche de la Marionnaise, dans les Hautes-Alpes où la construction de fondations sur micropieux exige une caractérisation précise du sol. L'objectif principal était d'analyser les données de forage des micropieux dans le but de mieux comprendre la nature du sol. Ainsi, la problématique visait à savoir comment l'analyse de ces données permet de cerner la variabilité du terrain. Les objectifs spécifiques étaient la détermination du toit du rocher sain et la caractérisation des schistes fracturés.

La méthodologie a commencé par l'extraction des données des fiches de forage, suivi d'un prétraitement des données brutes (vitesse d'avancement, pression sur outil, couple de rotation), incluant le rééchantillonnage et la filtration des bruits. L'approche a été complétée par des méthodes exploratoires (écart-type mobile, gradient, entropie). Ensuite, l'analyse s'est principalement concentrée sur deux algorithmes : le KNN qui a servi à prédire les types de sol, et l'algorithme de Fisher qui a servi à identifier les changements de terrain et à localiser les interfaces. Une application web a été mise en place pour le KNN, avec des bases de données d'entraînement spécifiques aux foreuses pour affiner les prédictions. L'indice de Somerton modifié a aussi été utilisé pour valider l'algorithme de Fisher.

Les résultats obtenus ont pu montrer la cohérence du toit du rocher sain déterminé par Fisher avec les observations des foreurs. Le KNN a prédit la classe de sol avec une bonne précision (éboulis et schistes compacts), avec des confusions entre schistes fracturés et éboulis. Le paramètre « Vitesse d'Avancement » s'est avérée fiable pour identifier l'interface éboulis et schistes compacts.

ABSTRACT: This analysis is based on the data of the project « Paravalanche de la Marionnaise » in the Hautes-Alpes region (France) where building foundations on micropiles requires an improved soil characterization. The main goal was to study the drilling data of these micropiles in order to have a better understanding of the soil nature. The research problem aimed to determine how the analysis of these data can help better assess the site variability. The specific goals were to determine the top of the competent schist and to characterize the fractured schists.

The process began with pulling data from the drilling records. This raw data, which included penetration rate, force on bit and torque, was then cleaned by resampling it and filtering out noise. Other exploratory methods like moving standard deviation, gradient and entropy were used as well. The main analysis focused on two algorithms : KNN, which was used to predict the soil class, and the Fisher algorithm, which helped to spot changes in the ground and locate the boundaries between soil layers. A web application was developed for the KNN model, using specific training databases for each drilling machine to improve the predictions. The modified Somerton index was also used to double check the results from the Fisher algorithm.

The results showed that the top of the competent schists determined by the Fisher algorithm matched well with what the drillers observed on site. The KNN model was able to predict the soil class with good accuracy (for fractured and competent schists), although it confused fractured schists with scree. The drilling speed proved to be a reliable indicator for spotting the boundary between the fractured and the competent schist.

Mots-clés: Paramètres de forage ; micropieux ; algorithme KNN ; méthode de Fisher ; Schistes.

1 INTRODUCTION ET PROBLEMATIQUE

Pour un projet alpin situé en bord de versant, la précision de la caractérisation de l'interface entre

éboulis et rocher sain est un enjeu majeur pour la conception des fondations et la pérennité des ouvrages. Les formations superficielles de type éboulis

présentent souvent une forte variabilité spatiale et une hétérogénéité qui rendent les interpolations entre sondages géotechniques classiques incertaines. Le projet de la galerie paravalanche de la Marionnaise, situé sur la route du Col du Lautaret à 2000 m d'altitude (Fig.1), s'inscrit dans ce contexte géotechnique complexe. Quand le rocher affleure, l'ouvrage est sur semelles superficielles. Dans le cas contraire, la stabilité de la structure dépend côté aval de l'ancrage correct des micropieux dans le rocher sain (schistes), situé sous une couche d'éboulis pouvant atteindre jusqu'à 20 mètres d'épaisseur. 232 micropieux 250 mm (2/3 verticaux, 1/3 inclinés à 30°) ont été réalisés en 2024 et 2025.

Nous cherchons ici à répondre à la question suivante : *dans quelle mesure l'exploitation avancée des paramètres de forage (Measure While Drilling ou MWD) permet-elle de compléter les reconnaissances géotechniques pour mieux appréhender la variabilité du sol et localiser les interfaces stratigraphiques avec précision ?*



Figure 1. Localisation du projet de la galerie de la Marionnaise

Les objectifs sont de présenter une méthodologie de traitement des données de forage pour :

- Reconstituer la lithologie traversée et valider le toit du rocher sain
- Distinguer les horizons intermédiaires, notamment les schistes fracturés (SF).
- Comparer les résultats issus d'approches statistiques (Fisher) et d'apprentissage supervisé (KNN) avec le modèle géotechnique initial (G2PRO) et les observations des foreurs.

2 ACQUISITION ET PRETRAITEMENT DES DONNEES

2.1 Contexte du site et matériel

Le site est caractérisé géologiquement par des schistes, surmontés d'éboulis, deux types de schistes ont été découverts dont les schistes sains et les schistes fracturés. Les travaux de fondation ont été réalisés à l'aide de foreuses hydrauliques (Comacchio MC600, MC8 et MC12) utilisant un marteau fond de trou, adaptée aux terrains durs. Les paramètres de forage ont été enregistrés en continu par un système d'acquisition type Jean Lutz. Les paramètres exploités dans cette étude, conformes aux standards de la profession (Reiffsteck, 2010), sont :

- La vitesse d'avancement (VA en m/h) ;
- La pression sur outil (PO en bar) ;
- Le couple de rotation (CR en bar)

Une contrainte majeure de cette étude réside dans l'absence de l'enregistrement systématique de la pression de retenue (PR), empêchant le calcul de la pression nette. L'analyse se fonde donc sur la pression de poussée brute, ce qui constitue une limite à l'analyse présentée, bien qu'acceptable pour distinguer un interface nette éboulis / rocher.

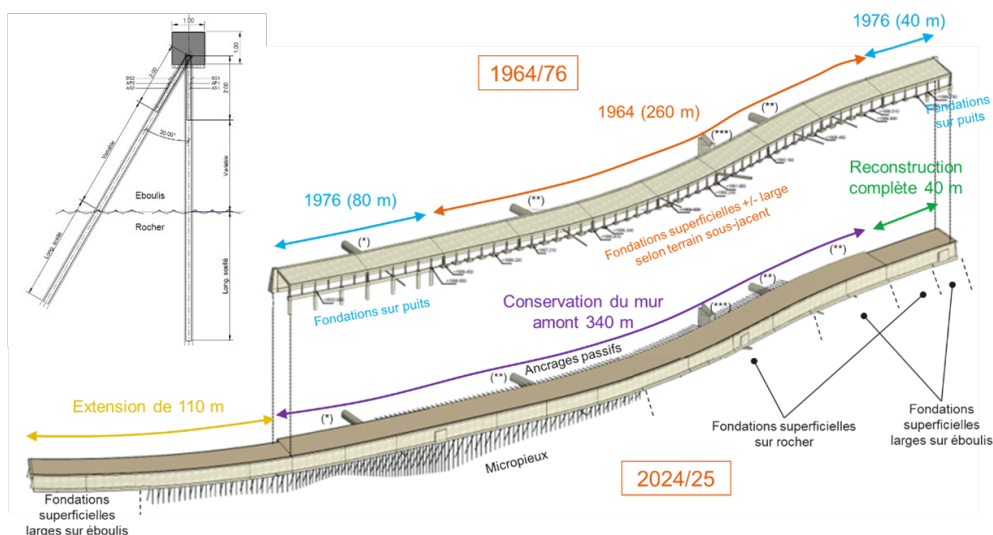


Figure 2. Illustration de la galerie

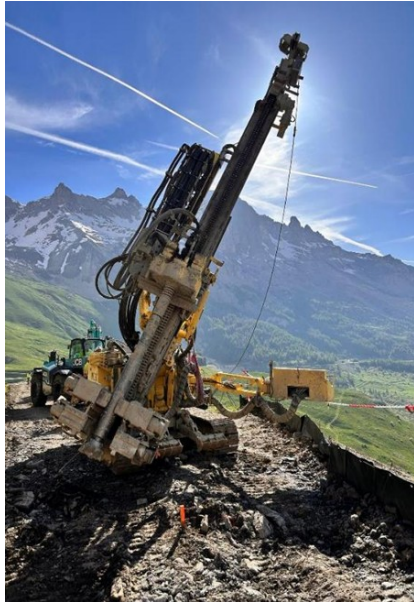


Figure 3. Foreuse Comacchio MC600



Figure 4. Enregistrement des paramètres de forage

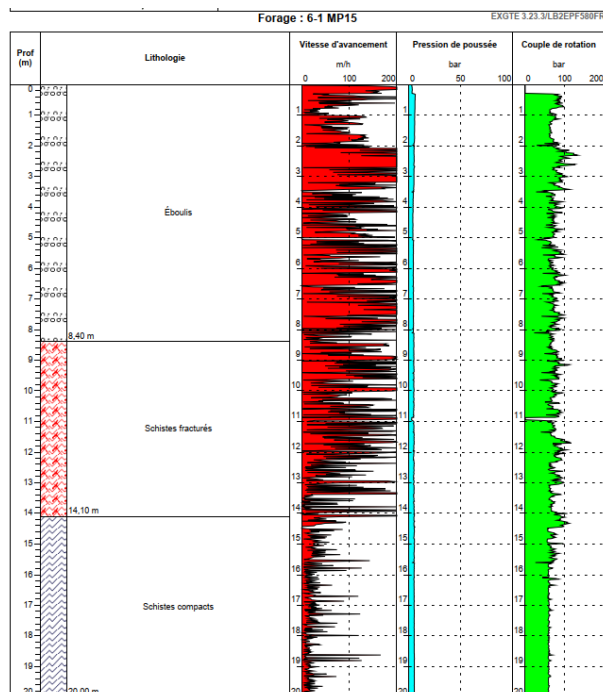


Figure 5. Exemple d'enregistrement des paramètres de forage sur un micropieu (Vitesse d'avancement, pression sur outil et couple de rotation).

2.2 Méthodologie de prétraitement

L'extraction des logs bruts (fichiers PDF) a révélé plusieurs biais qui nécessitent une correction avant toute modélisation :

- Nettoyage : suppression des doublons et des points aberrants. Une attention particulière doit être portée aux rallongements de tiges, bien que l'information manuelle fût manquante, nécessitant une vigilance sur les pics de valeurs artificiels.
- Rééchantillonnage : les données brutes n'ayant pas un pas de profondeur constant, une interpolation linéaire a été réalisée pour obtenir un pas spatial régulier, prérequis indispensable pour les analyses algorithmiques.
- Filtrage : les signaux bruts contiennent du bruit inhérent aux vibrations du train de tiges, etc. Nous avons appliqué un filtre passe-bas avec la transformée de Fourier discrète. Une fréquence de coupure de 40 m^{-1} (correspondant à une longueur d'onde de 2,5 cm) a été retenue à la suite de tests de sensibilité. Ce seuil constitue un compromis optimal pour lisser le bruit tout en conservant les informations importantes sur les transitions lithologiques rapides caractéristiques des interfaces éboulis/schistes.

3 HYPOTHESES ET METHODOLOGIE D'INTERPRETATION

Pour interpréter les signaux MWD, notre démarche compare une approche statistique globale, donc l'algorithme de Fisher, à une approche par apprentissage supervisé, lié aux développements récents sur la classification automatique des sols, et donc l'algorithme KNN (Goldstein et al., 2025).

3.1 Segmentation par l'algorithme de Fisher

Hypothèse : le sol est constitué d'une succession de couches homogènes. Au sein d'une même couche géologique, les paramètres de forage oscillent autour d'une moyenne stable avec une variance faible. L'algorithme de Fisher est une méthode statistique qui segmente un signal en K zones statistiquement homogènes en minimisant la variance intra-zone et en maximisant la variance interzone (Bourg et Rat, 1995). Pour traiter simultanément les trois paramètres de forage (VA, PO et CR), nous avons procédé par étapes :

- **Etape 1, normalisation logarithmique** : les paramètres variant sur des échelles très différentes, une transformation en variables

centrées réduites sur le logarithme a été appliquée :

$$LX_i = \frac{\ln(X_i) - \mu(\ln(X_i))}{\sigma(\ln(X_i))} \quad (1)$$

Où μ est la moyenne et σ l'écart-type, et X_i est le paramètre de forage considéré.

- **Etape 2, établissement du paramètre composé A** : une analyse en composantes principales (ACP) a permis de définir un paramètre unique A capturant la variance globale tel que :

$$A = VA^\alpha \times PO^\beta \times CR^\gamma \quad (2)$$

où VA, PO, CR sont respectivement la vitesse d'avancement (m/h), la pression sur outil (bar) et le couple de rotation (bar).

Les coefficients α, β, γ sont issus des composantes du premier vecteur propre. Selon les signes des coefficients (généralement $\alpha < 0, \beta > 0, \gamma > 0$), le paramètre A peut être interprété comme un indicateur de résistance :

$$A \approx \frac{PO^\beta \times CR^\gamma}{VA^{|\alpha|}} \quad (3)$$

- Etape 3, minimisation de la variance : l'algorithme cherche la partition optimale qui minimise la somme des carrés des écarts (SSE) :

$$SSE = \sum_i (x_i - \bar{x})^2 \quad (4)$$

La fonction de coût $E(k, j)$ pour k segments sur j points est définie par :

$$E(k, j) = \min(\sum SSE) \quad (5)$$

Cette méthode permet de localiser objectivement les interfaces majeures, notamment le toit du rocher sain.

3.2 Classification par K-Nearest Neighbors (KNN)

Hypothèse : des terrains de même nature géotechnique induisent des réponses mécaniques similaires sur l'outil de forage, indépendamment de la profondeur. Le KNN est une méthode d'apprentissage supervisé non paramétrique. Pour un point de forage inconnu X , l'algorithme identifie les K points les plus proches dans une base de données d'entraînement (forages labellisés par observation des cuttings).

- **Distance euclidienne** : la similarité est calculée dans l'espace des variables normalisées :

$$d = \sqrt{(VA - VA_i)^2 + (PO - PO_i)^2 + (CR - CR_i)^2} \quad (6)$$

Où d est la distance euclidienne entre le point à tester et le point i de la base de données d'entraînement, VA est la vitesse d'avancement du point à tester et *normalisée*, VA_i est la Vitesse d'avancement d'un point de forage de la base de données et *normalisée*, même signification pour les pressions sur outils (PO) et le couple de rotation (CR).

On utilise les variables centrées réduites pour la normalisation, c'est-à-dire :

$$X_{norm} = \frac{(X_i - \mu)}{\sigma} \quad (7)$$

Où X_i la valeur du point à normaliser et μ la moyenne et σ l'écart-type.

- **Choix de K** : le nombre de voisins à considérer a été fixé selon la règle empirique $K = \sqrt{N}$ (où N est la taille de l'échantillon d'apprentissage), arrondi à l'impair le plus proche pour éviter les ballottages lors du vote majoritaire.

3.3 Indice de Somerton modifié

En complément, l'indice de Somerton (S_d) a été calculé. La formule théorique nécessitant la pression nette (non disponible), nous avons utilisé la pression de poussée brute telle que :

$$S_d = \frac{PO}{\sqrt{VA}} \quad (8)$$

Bien que simplifiée, cette formule fournit un indicateur relatif de la dureté du terrain utile pour corroborer les segmentations de Fisher.

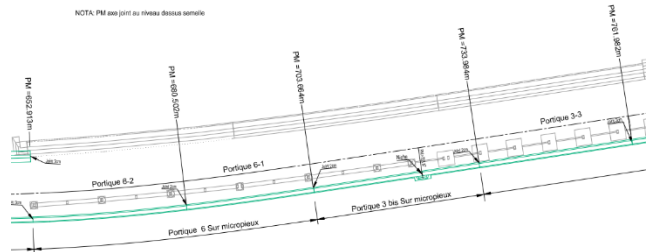


Figure 6. Extrait de la position des portiques le long de l'ouvrage

4 RESULTATS ET DISCUSSIONS

Pour préciser les notations, l'ouvrage présente structurellement 10 coupes-types différentes. Elles sont appliquées par longueur de 30 m maximum. Sur 21 portiques, 13 comprennent des micropieux à l'aval (voir extrait Figure 6 à titre d'illustration).

L'analyse a été menée sur les données de tous les micropieux disponibles au moment de l'analyse. Les résultats présentés ici se concentrent sur trois portiques (notés P3-2, P6-1 et P6-2), représentatifs de la variabilité du site.

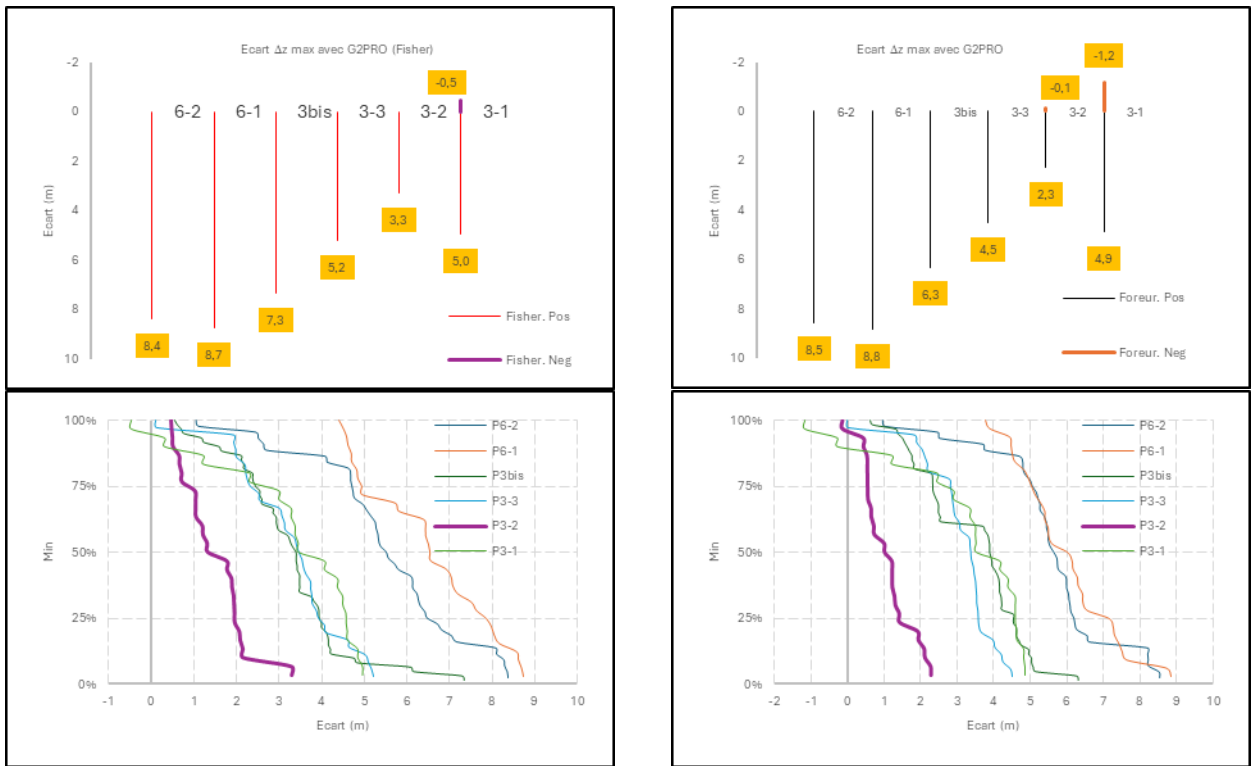


Figure 7. Ecart maximal et pourcentage minimal des écarts entre G2PRO et Fisher (à gauche) et entre G2PRO et le toit par le foreur (à droite) pour les portiques 3, 3bis et 6.

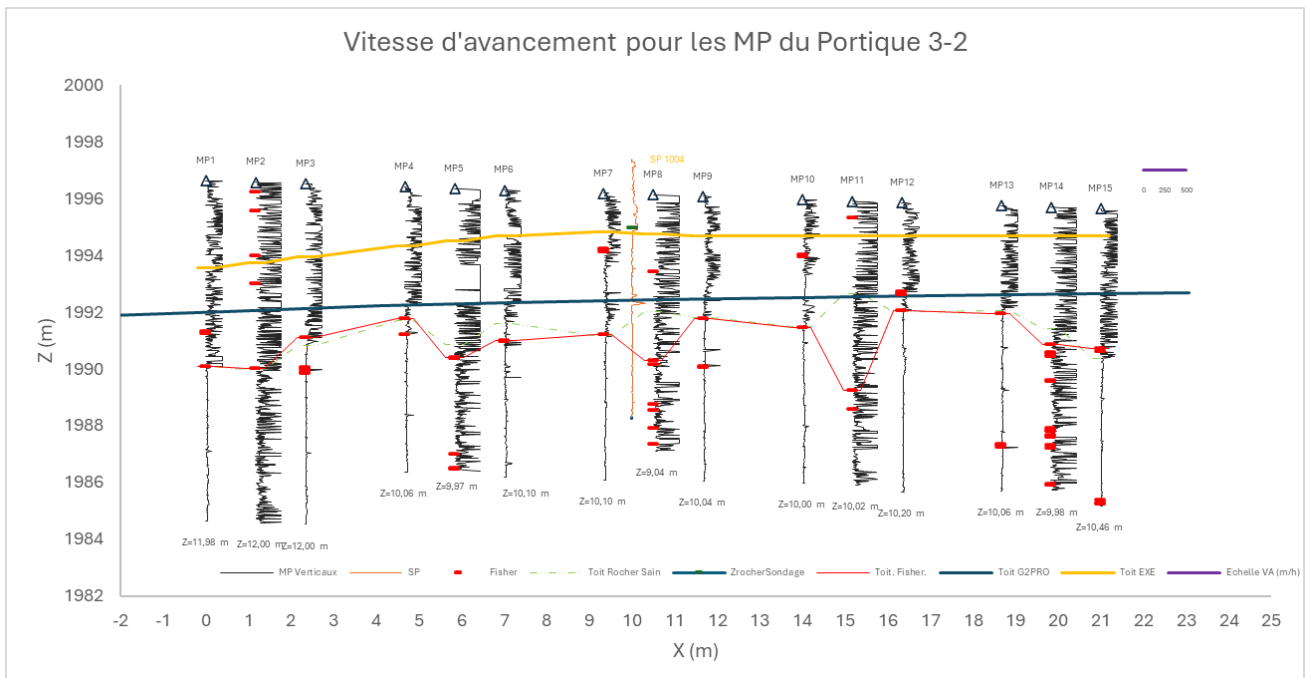


Figure 8. Exemple de cartographie des zones de Fisher.

4.1 Localisation du toit du rocher sain

La comparaison entre le toit du rocher sain déterminé par l'algorithme de Fisher et celui rapporté par les foreurs montre une forte cohérence (Fig.8).

Sur le portique 6-1, nous observons un écart maximal de 8,7 m entre le toit du rocher théorique (projet G2PRO basé sur une interpolation large) et le

toit réel identifié par Fisher (Fig.7). Cependant, l'écart entre Fisher et le foreur reste très faible (souvent inférieur à 1 m). Cette différence avec le G2PRO s'explique avec l'espacement des sondages initiaux et l'interpolation entre ces sondages et surtout la variabilité du terrain. L'algorithme de Fisher a ainsi permis de valider a posteriori que les longueurs de forage exécutées garantissaient bien un ancrage

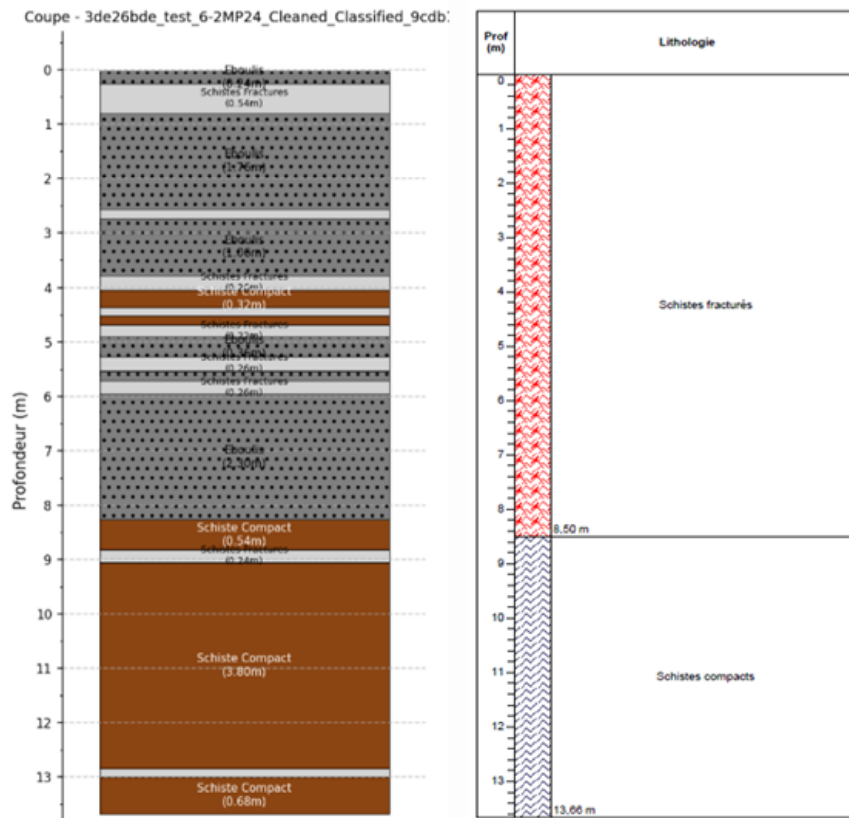


Figure 9. Exemple de profil lithologique reconstitué par l'algorithme KNN (« coupe ») pour un micropieu du portique 6-2 et la lithologie venant du foreur (« Lithologie »).

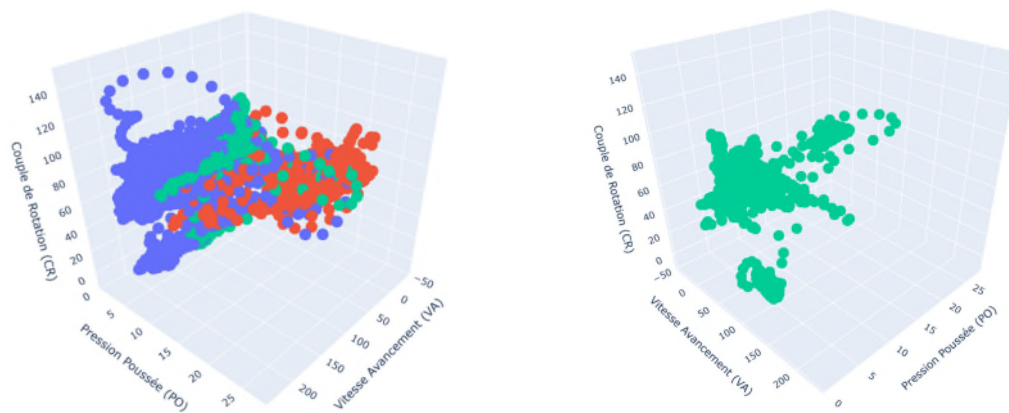


Figure 10. Représentation des classes prédites par KNN (bleu : éboulis, vert : schistes fracturés, rouge : schistes compacts)

suffisant dans le substratum résistant, sécurisant l'ouvrage malgré les aléas géologiques.

4.2 Performance et limites du KNN

L'algorithme KNN a été implémenté via une application web dédiée. L'analyse des résultats montre :

- Une excellente distinction (précision élevée avec une erreur moyenne $<0,5$ m) entre **Eboulis** (caractérisés par une *VA* élevée) et les **Schistes Compacts** (*VA* faible).
- Une zone de confusion pour les **Schistes Fracturés**. L'analyse 3D (Fig.10) révèle que les Schistes Fracturés occupent un espace paramétrique intermédiaire, chevauchant partiellement les éboulis denses. Cette classe est parfois confondue avec les éboulis par le modèle (Fig.9), ce biais reste conservateur du point de vue de la sécurité (conduisant à ancrer plus profond) bien qu'il représente une imprécision lithologique.

4.3 Influence de la machine sur la vitesse d'avancement

L'analyse quantitative met en évidence le rôle prépondérant de la vitesse d'avancement dans la discrimination des faciès. Cependant, les valeurs seuils dépendent intrinsèquement de la puissance de la machine. Les courbes cumulées (Fig. 11) montrent un facteur 4 entre les vitesses critiques des deux foreuses utilisées :

- Pour la foreuse MC8, la transition vers le Schiste Compact se fait autour de $VA < 25$ m/h.
- Pour la foreuse MC12 (plus puissante), cette transition se situe autour de $VA < 100$ m/h.

Ce constat a imposé la création de bases de données d'apprentissage distinctes par machine pour garantir la fiabilité du modèle KNN.

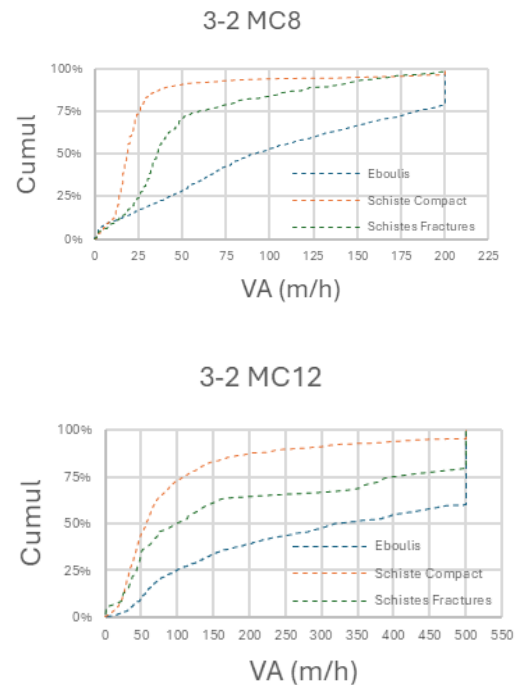


Figure 11. Comparaison des distributions de vitesse d'avancement selon la machine (MC8 vs MC12) pour les différentes classes de sol.

5 PROPOSITIONS D'AMELIORATION

Sur la base des résultats obtenus, plusieurs axes d'amélioration sont proposés pour optimiser l'utilisation du MWD dans les futurs projets :

- **Enregistrement systématique de la pression de retenue** : l'absence de mesure de la pression de retenue (*PR*) est une limite majeure. Son enregistrement systématique permettrait de calculer la pression nette réelle sur l'outil.
- **Gestion des changements de tiges** : les interruptions de forage pour l'ajout de tiges génèrent des valeurs plus ou moins aberrantes dans les données brutes. Une annotation numérique précise ou une détection automatique de ces phases permettrait de nettoyer les jeux de données plus efficacement et d'éviter les faux positifs (comme l'interprétation d'un arrêt comme une couche dure).
- **Base de données universelle** : actuellement, le modèle KNN doit être réentraîné pour chaque nouvelle machine. La perspective est la création d'une base de données normalisée, prenant en compte les caractéristiques techniques des foreuses (puissance, couple max, type d'outils, etc.). Cela permettrait de généraliser le modèle KNN à d'autres sites dès le début du chantier, sans attendre d'avoir foré suffisamment

de micropieux pour constituer un set d'apprentissage local.

6 CONCLUSION

Cette étude menée sur le projet de la Marionnaise valide la pertinence de l'analyse automatisée des paramètres de forage pour la caractérisation des sols en site montagneux complexe.

L'algorithme de Fisher, grâce à son approche statistique globale, offre une méthode robuste pour segmenter le profil de sol. Il permet de valider objectivement la cote du toit du rocher sain avec une bonne précision, sécurisant ainsi l'ancrage des fondations profondes. L'algorithme KNN, bien que sensible à la qualité des données d'apprentissage et à la distinction des faciès intermédiaires (schistes fracturés), permet une identification lithologique fine et rapide.

Loin de se substituer à l'expertise de l'ingénieur, ces outils numériques transforment la donnée brute en un véritable levier d'aide à la décision. Elle permet de transformer une obligation contractuelle (l'enregistrement des paramètres) en une véritable ressource géotechnique pour adapter le projet aux aléas géologiques avec une réactivité accrue.

REMERCIEMENTS

Les auteurs tiennent à exprimer leur gratitude à l'équipe géotechnique d'Arcadis Lyon pour leur

accueil et leur encadrement technique, ainsi qu'à Denis BRANQUE pour son encadrement académique.

Pour ceux qui sont intéressés pour découvrir comment ont été dimensionnés les micropieux au séisme, vous pouvez vous référer à l'article de (Hatem-Quirin & al, 2026).

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Bourget, M., Rat, M. (1995). Interprétation semi-automatique des enregistrements des paramètres de forage (sondeuses hydrauliques en rotation). *Revue Française de Géotechnique*, 73.
<https://doi.org/10.1051/geotech/1995073003>
- Goldstein, D., et al. (2025). A Machine Learning Classification Approach to Geotechnical Characterization Using Measure-While-Drilling Data. *Geosciences*, 15(3), 93.
<https://doi.org/10.3390/geosciences15030093>
- Reiffsteck, P. (2010). Paramètres de forage en géotechnique. Méthode d'essai n°79, IFSTTAR.
- Hatem-Quirin, A., Givet O., Champagne de Labriolle G. (2026). Analyse de l'impact de la stabilité de versant sous séisme sur le comportement des micropieux. JNKG2026, Grenoble, France.