

CORRÉLATIONS ANALYTIQUES ET PROBABILISTES ENTRE ESSAIS IN-SITU ET DIAGRAPHIES INSTANTANÉES

ANALYTICAL AND PROBABILISTIC CORRELATIONS BETWEEN IN-SITU TESTS AND INSTANTANEOUS LOGGING

Umit YALCINKAYA¹, Umur Salih OKYAY¹

¹ Société INFRANEO, Paris, France

RÉSUMÉ – Cet article met en avant l'importance des diagraphies instantanées des forages pour optimiser l'interprétation des paramètres géotechniques. Il vise à établir des corrélations analytiques, identifier les influences majeures et proposer une comparaison des données de forage. L'approche novatrice cherche à améliorer la précision des interprétations pour des pratiques de reconnaissance géotechnique plus performantes et fiables.

ABSTRACT – This paper highlights the importance of real-time borehole logging for optimizing the interpretation of geotechnical parameters. It aims to establish analytical correlations, identify major influences, and propose a comparison of drilling data. The innovative approach seeks to enhance the accuracy of interpretations for more efficient and reliable geotechnical reconnaissance practices.

1. Introduction

Cette recherche se focalise sur l'importance des paramètres de forage dans le domaine de la reconnaissance géotechnique, en mettant en lumière l'utilisation de machines hydrauliques équipées de capteurs pour la collecte de données en temps réel. Les diagraphies instantanées, Measurement While Drilling (MWD), émergent comme une solution efficace, offrant une quantité substantielle d'informations à un coût modéré. Ces données permettent une analyse approfondie de la lithologie, la détection de cavités, ainsi que des propriétés mécaniques du sol. Le processus de forage est décomposé en trois phases distinctes (Bourget, 1995) : la première consiste à enregistrer les paramètres tout en réalisant des observations visuelles, suivie du traitement de ces paramètres en fonction de leurs caractéristiques, et enfin, l'interprétation des enregistrements obtenus. Cette étude présente une approche novatrice dans l'interprétation des diagraphies instantanées en prenant en considération les paramètres influents. Ses objectifs comprennent l'établissement de corrélations analytiques, une étude de sensibilité approfondie, ainsi qu'une comparaison des données de forage.

1.1. Paramètres mesurés et enregistrés

Certains paramètres, tels que le type d'outil et son diamètre, la nature du fluide d'injection, ainsi que le type de machine et sa méthode de fonctionnement, ne sont pas enregistrés numériquement et dépendent plutôt de la méthode de forage utilisée. En revanche, d'autres paramètres sont contrôlés en temps réel par le sondeur en fonction de la réponse du terrain, tels que la poussée sur l'outil, la vitesse de rotation, et la pression d'injection (Cailleux, 1986).

Certains paramètres, comme la vitesse d'avancement, le couple de rotation, le débit de retour, et la pression de retenue, dépendent exclusivement de la réponse du sol. En parallèle, des facteurs non maîtrisés tels que l'usure des outils et les variations de la composition du fluide contribuent à la complexité de l'enregistrement des paramètres. L'enregistrement de ces paramètres reflète la gestion opérationnelle de la machine et capture les particularités des terrains explorés. La compréhension complexe de ces données de forage réside dans leur interdépendance mutuelle (Moussouteguy, 2002).

1.2. Paramètres calculés

Vitesse d'avancement : Vitesse d'avancement se calcule selon la formule suivante :

$$V_A = \frac{a_{t+dt} - a_t}{dt} \#(1)$$

dt : l'intervalle de temps

a_t : la longueur de pénétration à l'instant initial t

a_{t+dt} : la longueur de pénétration à l'instant $t + dt$

V_A : La vitesse d'avancement

Cette formule permet de déterminer la vitesse moyenne en fonction de la variation de position sur un intervalle de temps donné.

Pression sur outil : La pression de poussée P_O correspond à la pression hydraulique mesurée dans le cylindre du piston du vérin ou du moteur hydraulique mis en échelle avec la poussée maximum P_{max} évaluée lors de l'étalonnage tête en bute basse à laquelle on ajoute le poids de la tête de forage W_{tete} et du nombre de tiges n de poids unitaire W_{tige} (Reiffsteck et al., 2012).

$$S_O * P_O = \frac{p}{p_{max}} * P_{max} + W_{tete} + n * W_{tige} \#(2)$$

P_O : la pression de poussée,

P_{max} : la poussée maximale évaluée lors de l'étalonnage tête en butée basse,

W_{tete} : le poids de la tête de forage,

n : le nombre de tiges,

W_{tige} : le poids unitaire d'une tige de forage,

S_O : la surface d'action de l'outil de diamètre D ,

p : la pression d'alimentation du système hydraulique.

Pression d'injection : La pression d'injection P_I à la sortie de l'outil peut être calculée en ajoutant à la pression du fluide P_F enregistrée à la surface la contribution due à la hauteur du fluide de forage dans le train de tiges, ajustée par la hauteur du niveau de la nappe phréatique mesurée à partir de l'outil. L'équation correspondante est :

$$P_I = P_F + z_w * \gamma_M \#(4)$$

P_I est la pression du fluide à la sortie de l'outil,

P_F est la pression du fluide enregistrée à la surface,

z_w est la hauteur du niveau de la nappe phréatique mesurée à partir de l'outil,

γ_M est la masse volumique du fluide de forage.

Couple de rotation : Le couple de rotation C_R appliqué à l'outil de forage est déterminé par la pression hydraulique p_{CR} fournie au moteur, ajustée en fonction de la pression maximale p_{CRmax} observée lors de l'étalonnage. L'équation correspondante est :

$$C_R = \frac{p_{CR} - p_{CR0}}{p_{CRmax}} * C_{Rmax} \#(5)$$

C_R représente le couple de rotation de la tête de forage appliqué à l'outil,

p_{CR} est la pression hydraulique fournie au moteur,

p_{CR0} est une éventuelle pression de base,

p_{CRmax} est la pression hydraulique maximale,

C_{Rmax} est le couple maximal évalué lors de l'étalonnage.

Pression de poussée nette : La pression de poussée nette se calcule selon la formule suivante :

$$P_E = P_O - P_R$$

P_E : la pression de poussée nette,

P_O : la pression de poussée,

P_R : la poussée retenue, fonction du poids des tiges de forage et du poids de la tête de rotation.

La valeur de P_R doit être déterminée par un processus d'étalonnage où l'effort maximal H_{max} est appliqué progressivement jusqu'à ce que le mouvement indique que la pression de retenue est dépassée. Ce processus permet d'évaluer la pression de retenue nécessaire pour maintenir cet effort. Une fois P_R déterminée, elle peut être utilisée dans le calcul de la pression de poussée nette P_E .

$$S_O * P_R = \frac{P_H}{P_{Hmax}} * H_{max} \#(3)$$

S_O : la surface d'action de l'outil de diamètre D ,

P_H : la pression hydraulique,

P_{Hmax} : la pression hydraulique maximale,

H_{max} : l'effort maximum chargé jusqu'à ce que le mouvement indique que la pression de retenue est dépassée.

Débit d'injection et de retour : Le débit de fluide Q_f est mesuré par un capteur qui est placé dans le sorti de la pompe. La différence entre le débit d'injection et débit de retour peut nous communiquer une idée de volume observé par le terrain.

Le débit de fluide Q_f est calculé en soustrayant le débit de retour retour Q_{retour} du débit d'injection $Q_{injection}$. Mathématiquement, cela s'exprime comme suit :

$$Q_f = Q_{injection} - Q_{retour} \#(6)$$

Q_f représente le débit de fluide,

$Q_{injection}$ est le débit d'injection de fluide,

Q_{retour} est le débit de retour de fluide.

1.3. Mesures et étalonnage

Les paramètres de forage subissent l'influence de divers facteurs. Le type de forage exerce une influence sur la vitesse et la pression exercée sur l'outil. La machine de forage, son niveau d'usure, ainsi que les variations du fluide d'injection représentent des variables cruciales à prendre en compte lors de l'interprétation des données de forage.

Le système de mesure, tel que décrit par Cailleux (1986), est composé d'un enregistreur doté d'une interface utilisateur et d'un dispositif de transfert des données, d'un conditionneur alimentant les capteurs, ainsi que des capteurs installés sur la machine. Sous le contrôle du sondeur, le système peut être arrêté pendant certaines manœuvres. Avant toute intervention, l'étalonnage sert à vérifier les enregistrements des paramètres de forage, garantissant ainsi le bon fonctionnement des capteurs et établissant les valeurs maximales des paramètres spécifiques à la machine. L'étalonnage se révèle également utile dans la détection de cavités, en fournissant des graphiques continus des paramètres à vide, en vue d'une interprétation ultérieure.

2. Etude pratique et analytique

Dans le cadre de notre investigation, nous avons examiné les données de forage générées par les équipements d'Infraneo. Les machines hydrauliques, munies de capteurs, enregistrent une variété de paramètres, comprenant la vitesse d'avancement, la pression sur l'outil, entre autres. Un étalonnage systématique est effectué à deux reprises

pendant le processus de forage afin de surveiller l'influence du poids des tiges. Le traitement initial des données brutes est effectué sur le terrain par le foreur, à l'aide d'un enregistreur spécialisé.

Par la suite, nous allons traiter les enregistrements des paramètres de différents chantiers avec certaines approches existantes. :

- La relation de Somerton modifié : $Sd = P_o / \sqrt{V_A}$ en $kPa \cdot \left(\frac{m}{s}\right)^{\frac{1}{2}}$ (Somerton 1959 ; Reiffsteck et al, 2012) ;
- L'indice d'altération $A = 1 + [(P_o/P_o\max) - (V_A/V_A\max)]$ sans unité avec $P_o\max$ et $V_A\max$ valeurs maximales de P_o et V_a sur l'ensemble du chantier ;
- La résistance à la pénétration : représente la durée en seconde nécessaire à forer 20 cm de terrain : $Rp = (t)dz = 0,2 m$ en s .

Nous avons étendu l'application de ces relations à une trentaine de chantiers, englobant approximativement 100 forages au total. Ces chantiers présentent une diversité géographique et englobent une variété d'outils et de techniques de forage.

2.1. Application de l'indice de Somerton

Nous avons procédé à l'application de l'indice de Somerton pour évaluer les relations entre la pression limite pressiométrique et ledit indice, en fonction du type de sol. L'indice de Somerton, un outil analytique reconnu dans le domaine géotechnique, offre une mesure précieuse de la résistance du sol à la pression.

Notamment, nous avons observé une similitude marquée entre l'allure des courbes des valeurs composées et les caractéristiques spécifiques des sols. Cependant, il est important de souligner que, bien que cette similitude existe, les valeurs associées ne sont pas toujours du même ordre de grandeur.

Afin d'illustrer ces relations, les figures suivantes présentent des exemples de courbes mettant en corrélation l'indice de Somerton modifié avec la pression limite. Ces courbes offrent une représentation visuelle de la relation entre ces deux paramètres et mettent en évidence la diversité des données collectées à travers les différents chantiers.

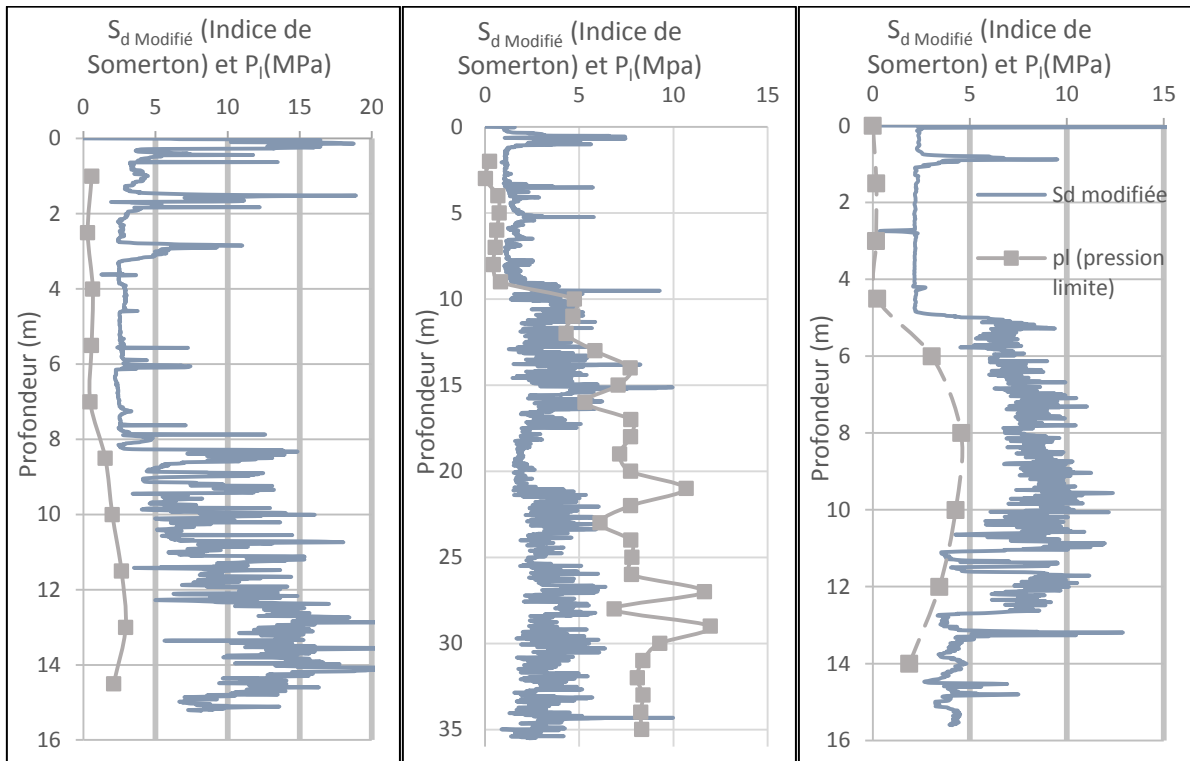


Figure 1 : Exemples d'application de l'indice de Somerton et la pression limite

Cependant, étant donné la variabilité observée, nous envisageons d'intégrer ces variations en appliquant un facteur de correction, lequel sera détaillé dans la section suivante. Cette approche vise à prendre en compte les nuances spécifiques à chaque intervention, garantissant ainsi une interprétation plus précise et ajustée des données géotechniques recueillies. L'application de ce facteur de correction contribuera à affiner notre compréhension des relations entre l'indice de Somerton modifié et la pression limite dans des conditions géologiques variées.

2.2. Application d'un facteur de correction

La disparité observée dans nos données peut être attribuée à l'influence de divers paramètres, tels que le type de forage, le choix de l'outil, etc., que nous avons déjà présentés. Pour atténuer les effets de ces paramètres, nous suggérons l'utilisation de l'étalonnage, anticipant ainsi l'obtention de graphiques représentatifs de la machine. Dans cette démarche, des paramètres composés, notamment liés à l'étalonnage, sont pris en compte. En théorie, les paramètres composés issus de l'étalonnage devraient être nuls, étant donné que le forage est effectué à vide. Cependant, dans la réalité, ces valeurs demeurent toujours supérieures à 0 et diffèrent en fonction des paramètres influençant.

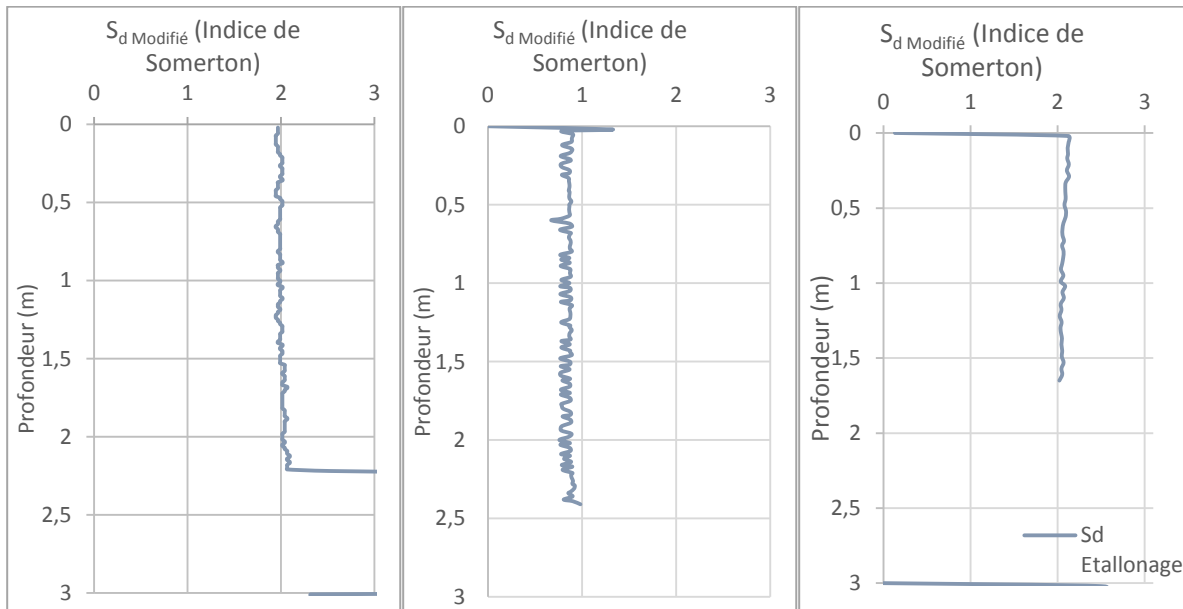


Figure 2 : Exemples d'applications de l'indice de Somerton appliqué aux paramètres d'étalonnage.

Ce phénomène influence également les valeurs caractéristiques du sol obtenues à partir des diagraphies instantanées. Afin de rectifier cette divergence, nous proposons l'utilisation d'une équation empirique comme suit :

$$P_{Corrigé} = \frac{P_{Calculé}}{P_{Etal}} - 1 \quad (7)$$

$P_{Corrigé}$: paramètre composé corrigé de sol,

$P_{Calculé}$: paramètre composé calculé avec des paramètres de sol,

P_{Etal} : paramètre composé calculé avec des paramètres d'étalonnage.

Les motivations sous-tendant le choix de cette corrélation sont les suivantes :

Dans un sol fortement compact, les résultats escomptés des essais pressiométriques et pénétrométriques devraient être élevés. Cependant, les valeurs des paramètres composés dépassent notablement celles anticipées. Afin d'homogénéiser les échelles de valeurs, nous procédons à une normalisation en divisant $P_{Calculé}$ par P_{Etal} .

Dans un sol très mou, caractérisé par des valeurs intrinsèquement basses, les résultats escomptés des essais pressiométriques et pénétrométriques devraient être également faibles. Néanmoins, les valeurs des paramètres composés excèdent les attentes. De manière similaire, pour ajuster les ordres de grandeur, nous soustrayons 1.

Il est important de noter que les valeurs composées d'étalonnage présentent des variations au sein d'un même chantier, même avec une machine et un foreur identique, en raison de la sensibilité des enregistrements à des facteurs tels que la température des fluides. En effet, les fluctuations de température influent sur la viscosité de l'huile de la machine, impactant ainsi les paramètres enregistrés. Par conséquent, nous calculons ces valeurs d'étalonnage pour chaque forage afin de prendre en compte ces variations.

Sur les graphiques suivants, nous appliquons les valeurs des paramètres composés d'étalonnage aux paramètres composés du sol, créant ainsi une corrélation ajustée qui prend en compte les particularités de chaque forage.

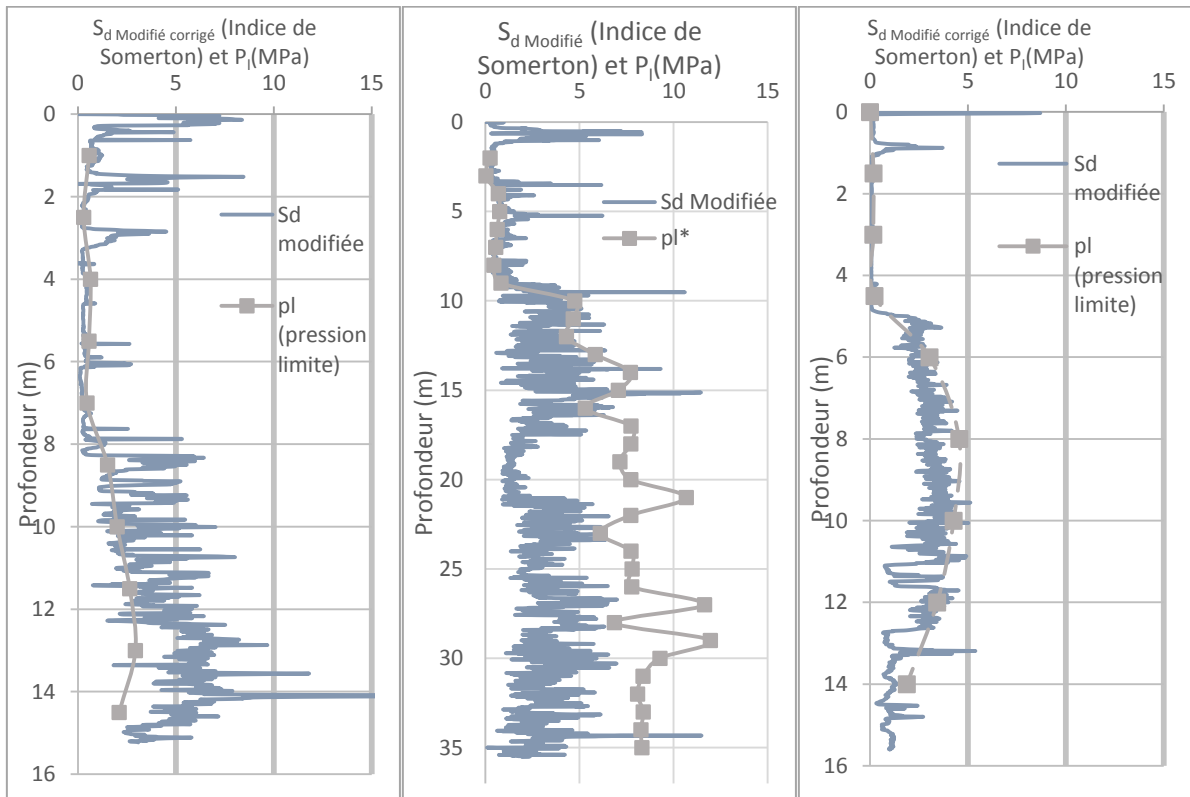
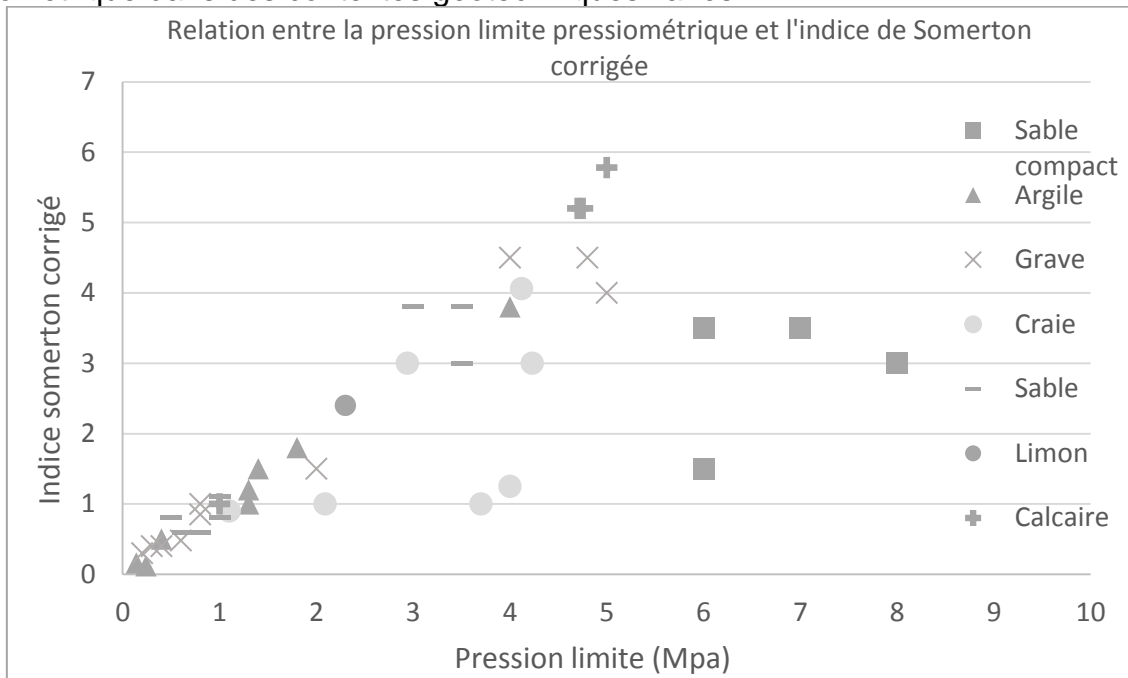


Figure 3: Les courbes de paramètres composés non corrigés et corrigés.

Nos observations révèlent des tendances pratiquement linéaires lorsqu'on analyse la pression limite pressiométrique en corrélation avec l'indice de Somerton dans des forages effectués par foration, en prenant en considération les différentes natures de sol. Cette linéarité suggère une relation étroite entre ces deux paramètres, soulignant ainsi la pertinence de l'indice de Somerton comme indicateur prédictif de la pression limite pressiométrique dans des contextes géotechniques variés.



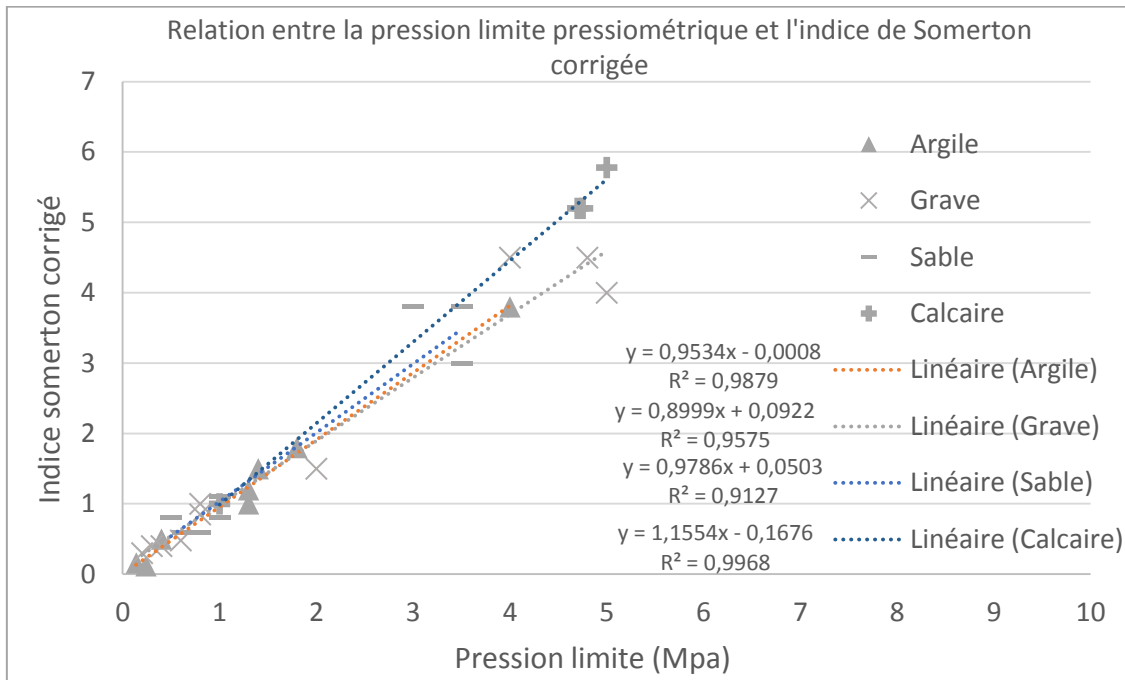


Figure 4 : Relation entre la pression limite pressiométrique et l'indice de Somerton corrigé

Dans les zones de sable compact et de craie, nous constatons des pressions limites élevées, tandis que les valeurs de l'indice de Somerton sont relativement basses. Cette observation suggère une robustesse mécanique accrue de ces types de sols, traduite par une résistance à la pression significative malgré des valeurs d'indice de Somerton moins élevées. De manière similaire, dans les sols très durs, les paramètres enregistrés perdent leur représentativité, notamment lorsque la machine de forage utilisée est sous-puissante.

2.3. Sensibilité du modèle analytique

2.3.1. Etalonnage

Lors de l'interprétation du MWD, basée sur le principe d'étalonnage inertie/calibrage d'un essai pressiométrique, il est impératif d'inclure l'étalonnage des enregistrements des paramètres. L'absence de cet étalonnage rend les résultats sensibles aux variations des paramètres de la machine, de la température, etc. Afin d'assurer des résultats précis, nos recherches ont identifié certaines conditions à respecter pour la réalisation des étalonnages :

Stabilité de la température du fluide : La température du fluide doit demeurer constante lors de l'étalonnage et du forage, garantissant ainsi une viscosité d'huile identique. La viscosité de l'huile peut influencer les mesures des capteurs. Nous recommandons donc la réalisation d'un étalonnage avant et après le forage.

Consistance du type de forage : Les étalonnages doivent être effectués selon le même type de forage (rotation, rotoperçussion) que celui du forage en question.

Maintien de la pression sur l'outil : La pression sur l'outil doit être maintenue à la même valeur lors de l'étalonnage et du forage. Cette uniformité est cruciale, car la pression sur l'outil peut affecter la valeur mesurée de la vitesse d'avancement. Bien que cette différence puisse disparaître dans le cas de certains paramètres composés, il est recommandé de maintenir la même valeur de pression sur l'outil. Dans d'autres cas, notamment avec la résistance à la pénétration, où seule la vitesse d'avancement est utilisée, des résultats incohérents peuvent survenir si la valeur de la pression sur l'outil diffère entre l'étalonnage et le forage.

2.3.2. Type de forage

Le type de forage représente un facteur d'influence significatif. Au cours de nos recherches, nous avons noté une cohérence bien supérieure des paramètres enregistrés lors d'un forage par rotation, comparativement à un forage par rotopercussion. De plus, dans d'autres cas de forage par rotopercussion, même après correction des paramètres composés, les valeurs obtenues pour ces paramètres ainsi que les résultats des essais in situ ne concordent pas toujours comme prévu.

2.3.3. Type d'outils

Le choix du type d'outil est une décision prise par le foreur ou un ingénieur en fonction des caractéristiques du terrain à forer. Opter pour un outil approprié contribue à accroître l'efficacité du forage. Ainsi, les valeurs obtenues varient en fonction de l'outil utilisé. De plus, le type d'outil peut différer selon le choix du type de forage. Dans le cas d'un forage par rotation, les outils couramment utilisés comprennent le tricône, la tarière, et autres. En revanche, pour un forage par rotopercussion, on a souvent recours à des taillants en croix, des taillants à lame, des taillants en boutons, etc. Par conséquent, il est possible d'établir une corrélation entre le type d'outil et le type de forage sélectionné.

2.3.4. Nature de sol

La nature de sol est un déterminant majeur influant sur les paramètres enregistrés. Des sols hétérogènes à granulométrie grossière produisent des enregistrements irréguliers, rendant les résultats des paramètres composés variables. Dans des sols très durs, l'utilisation d'une machine sous-puissante peut fausser les enregistrements, bien que des vitesses d'avancement très basses confirment la dureté. De même, l'incapacité à exploiter les résultats pressiométriques obtenus avec une pression de 50 bars, mais présentant une pression limite supérieure à 5 MPa, nous conduit à conclure que le sol présente de bonnes caractéristiques géomécaniques.

3. Conclusions

En résumé, cette étude approfondie des données de forage met en évidence l'impact significatif de facteurs tels que le type de forage, le type d'outil, et la nature du sol sur les résultats des paramètres enregistrés. L'introduction d'un facteur de correction, intégrant des paramètres composés d'étalonnage, vise à atténuer les variations liées aux conditions de forage. Cette correction s'avère essentielle pour améliorer la cohérence et la fiabilité des résultats, ajustant les données mesurées pour mieux refléter les caractéristiques géotechniques du sol.

Cette approche souligne également l'importance d'une considération détaillée du contexte du forage, incluant des éléments souvent négligés tels que le type de forage, le choix de l'outil et la nature du sol. Ces paramètres, souvent sous-estimés, sont identifiés comme des contributeurs significatifs à la variabilité des résultats et exigent une attention particulière dans l'interprétation des données géotechniques.

Ainsi, la proposition du facteur de correction représente une avancée significative dans le domaine de la reconnaissance géotechnique, offrant une méthode robuste pour obtenir des résultats plus précis et fiables. L'intégration de cette approche dans les protocoles d'interprétation des données de forage devrait améliorer la compréhension des propriétés mécaniques du sol, renforçant ainsi l'efficacité des projets géotechniques et les prises de décision associées.

4. Références bibliographiques

- Bourget M., Rat M. (1995). Interprétation semi-automatique des enregistrements des paramètres de forage (sondeuses hydrauliques en rotation), *Revue Française de Géotechnique* n°73 pp 3 - 14
- Cailleux J.-B. (1986). Étude des diagraphies instantanées en forage, *Rapport des laboratoires*, GT12, 97 pages
- Moussouteguy, N. (2002). Utilisation des essais pressiométriques et diagraphies instantanées pour mieux évaluer le risque géotechnique en reconnaissance des sols. Thèse de l'Université de Bordeaux I.
- Reiffsteck P. (2010). Utilisation des paramètres de forage en reconnaissance géotechnique. *Journées Nationales de Géotechniques et de Géologie de l'Ingénieur JNGG 2010*
- Reiffsteck P. (2011). Influence factors of measuring while drilling method, XVth ECSMGE, Athens, 1, () 67-72
- Reiffsteck P., Benoît J., Hamel M., Vaillant J.M., (2016). Utilisation des paramètres de forage en reconnaissance géotechnique. *Journées Nationales de Géotechniques et de Géologie de l'Ingénieur JNGG 2016*
- Somerton W.H. (1959). A laboratory study of rock breakage by rotary drilling, *Petroleum transaction, AIME*, Vol. 216, pp.92-97
- Reiffsteck P., Lossy D., Benoît J. (2012). Forages, sondages et essais in situ géotechniques – Les outils pour la reconnaissance des sols et des roches, *Presse des Ponts*, 796 pages