

MISE EN PLACE D'UN PARAMETRE COMPOSE FACILITANT L'INTERPRETATION DES PARAMETRES DE FORAGE

DEVELOPMENT OF A COMPOUND PARAMETER WHICH FACILITATES DRILLING PARAMETERS INTERPRETATION

Margot FROSSARD¹, Michael REBOUL¹

¹ TECHNOSOL, Ballainvilliers, France

RÉSUMÉ – Lors de la réalisation d'un forage destructif, les variations des paramètres de fonctionnement de la machine peuvent être enregistrées. Cependant, leur interprétation est complexe étant donné le nombre important de facteurs qui influent sur leur valeur. L'article présente la démarche de mise en place d'un paramètre composé qui permet de faciliter l'interprétation de ces paramètres et son application.

ABSTRACT – During drilling, variations of the machine's working parameters can be recorded. However, their interpretation remains a complex task because of the number of external factors which can influence their value. The article presents the development of a compound parameter which facilitates drilling parameters interpretation and its application.

1. Introduction

Dans le cadre d'une campagne de reconnaissances géotechniques, la réalisation de sondages est essentielle car ils permettent de connaître la nature du terrain rencontré au niveau du futur ouvrage. Lors du processus de forage, les enregistrements de la variation des paramètres de la machine ou diagraphies peuvent être réalisés. L'observation de la variation de ces paramètres peut permettre de repérer les différentes transitions des couches de sols ou de roches. Cependant, l'interprétation des paramètres enregistrés est une tâche complexe étant donné leur multiplicité et le nombre important de facteurs qui peuvent influencer sur leur valeur. Ainsi, les paramètres composés, qui combinent des paramètres individuels entre eux, permettent de faciliter leur interprétation.

Nous commencerons par présenter les principaux paramètres qui peuvent être enregistrés lors des forages. Puis nous aborderons les différents traitements possibles sur ceux-là afin de faciliter leur interprétation et nous nous intéresserons plus particulièrement au paramètre que nous avons retenu, en l'appliquant sur des cas concrets.

2. Présentation des paramètres enregistrés

Les machines les plus répandues en forage géotechnique sont les machines hydrauliques puisqu'elles peuvent être instrumentées pour les enregistrements de paramètres (Moussouteguy, 2002). De manière générale, les paramètres de forage peuvent être classés en quatre catégories (Cailleux, 1986) :

- les paramètres qui sont imposés par la méthode et qui ne sont pas enregistrés numériquement (type d'outil et diamètre, nature du fluide d'injection, performances/limites de la machine et du système d'injection) ;

- *les paramètres fixés par l'opérateur et à maintenir constants au cours du forage* (poussée sur outil, vitesse de rotation mesurée au niveau de la tête de forage, débit d'injection du fluide de forage) ;
- *les paramètres dépendant de la nature du terrain* (vitesse d'avancement, couple de rotation, pression d'injection, débit de retour, pression de retenue) ;
- *les paramètres évolutifs non maîtrisés et très souvent non mesurés* (usure des outils, changement dans la composition du fluide, volume de sol effectivement détruit par l'outil).

Les machines utilisées dans le cadre de notre étude appartiennent à la société Forensol, filiale de Technosol. Ce sont des machines hydrauliques qui réalisent l'enregistrement des paramètres suivants :

- la *vitesse instantanée d'avancement* (en $m.h^{-1}$) ;
- la pression hydraulique mesurée à proximité du piston de vérin ou du moteur hydraulique. Afin d'obtenir la pression sur outil, il faudrait effectuer une mise à l'échelle avec la valeur de poussée maximale évaluée lors de l'étalonnage et prendre en compte le poids des tiges (Reiffsteck, 2010). Par souci de simplification, nous avons utilisé dans notre étude la pression hydraulique brute, que nous appellerons tout de même « *pression sur outil* » dans la suite de notre article.
- la pression hydraulique mesurée dans le moteur de rotation (en bar), que nous appellerons, toujours par souci de simplification, « *couple de rotation de la tête de forage* » ;
- la *pression d'injection* du fluide de forage (en bar).

L'enregistrement des paramètres témoigne donc du pilotage, du fonctionnement de la machine et des caractéristiques du terrain rencontré. Toute la difficulté de l'interprétation des paramètres de forage provient du fait qu'ils dépendent les uns des autres (Moussouteguy, 2010).

3. Traitement des paramètres de forage et applications

Les paramètres composés combinent des paramètres individuels entre eux. Ils ont pour but de minimiser la part de la machine et des conditions de pilotage qui ne sont pas pris en compte, qui peuvent ainsi influencer sur les paramètres et donc fausser l'interprétation des données (Moussouteguy, 2010). Ainsi, les paramètres composés sont moins dépendants des conditions de forage que les paramètres enregistrés et permettent de synthétiser les données afin de créer un plus grand contraste entre les différentes couches.

3.1. Choix d'un paramètre composé adapté

Un travail bibliographique a tout d'abord été réalisé afin de connaître les différentes approches déjà existantes. En effet, de nombreuses recherches ont été menées sur ce sujet, tout d'abord dans le domaine pétrolier et plus récemment dans le domaine du génie civil (depuis les années 1970) afin d'apporter une simplification dans l'interprétation des paramètres de forage.

Nous avons appliqué les différents paramètres trouvés dans la bibliographie sur plusieurs chantiers déjà traités, chantiers qui présentaient des couches lithologiques variées, classiques de la géologie parisienne (limon, argile, sable, marne, calcaire). De cette étude a pu être retenu un critère qui semblait le mieux retranscrire la variation de

compacité le long du forage (comparaison des courbes des paramètres composés avec le log des pressions limites nettes mesurées dans le forage) : l'indice de Somerton S_d .

Cette relation a été développée à partir de résultats expérimentaux obtenus au laboratoire (Somerton, 1959) et décrit la résistance au forage dans la roche. Pour chaque formation géologique d'un chantier donné, si on néglige l'effet de la variation de la vitesse de rotation, il est possible de réduire S_d à :

$$S_d \simeq \frac{P_E}{\sqrt{V_A}} \quad (1)$$

avec :

- V_A la vitesse d'avancement en $m.h^{-1}$;
- P_E la poussée nette appliquée à l'outil de forage en bar (qui est égale à la pression de retenue soustraite à la pression de poussée).

Remarque : Le fait d'utiliser la racine carrée de la vitesse permet de réduire l'impact des pics de vitesse (LCPC, 2010).

La pression de retenue n'étant mesurée que pour un certain nombre de machines de Forensol, nous avons choisi dans notre analyse de travailler avec la pression sur outil à la place de la pression effective. Toutefois, nous avons pu remarquer que la valeur de la pression de retenue reste négligeable par rapport à la valeur de la pression de poussée dans les zones où les terrains ne sont pas décomprimés et où il n'y a pas de vide. En effet, nous avons pu remarquer sur un chantier, pour 20 sondages où 3 machines différentes ont été utilisées, que le rapport $\frac{P_R}{P_o}$ vaut entre 1 et 10 % (en moyenne).

Dans l'application que nous avons réalisée, plusieurs adaptations de ce paramètre ont ensuite été étudiées (en plus de l'indice de Somerton) :

- L'inverse de l'indice de Somerton pour que l'échelle de variation des données soit plus étendue, ce qui permet d'avoir des écarts plus importants de valeurs au niveau des terrains où la vitesse d'avance est forte et ainsi mieux différencier les terrains de faibles compacités ;
- L'indice de Somerton avec la vitesse d'avancement multipliée ou divisée par le couple de rotation afin de prendre en compte les variations du couple dans les formules ;
- L'indice de Somerton avec la vitesse d'avancement multipliée par le couple de rotation le tout normalisé par les plus grandes valeurs de vitesse d'avancement et de couple de rotation obtenues lors du forage afin de prendre en considération les caractéristiques maximales de la machine.

L'observation des graphiques a permis de sélectionner le critère qui retransmet au mieux les variations de faciès et le comportement mécanique (comparaison de la courbe du paramètre composé avec les graphiques pressiométriques) :

$$K = \frac{P_o}{C_R \sqrt{V_A}} \times 10 \quad (2)$$

Remarque : L'indice a été multiplié par dix afin d'obtenir des valeurs comprises dans un intervalle facilement manipulable.

3.2. Application du paramètre composé K

Trois chantiers ont plus particulièrement été étudiés pour la mise en place de ce paramètre K, il s'agit du projet de prolongement de la ligne 14 entre Saint-Lazare et la mairie de Saint-Ouen, du projet de construction d'un site de maintenance SNCF à Vaires-sur-Marne (77) et du projet de construction du nouveau campus de l'Ecole Centrale de Paris à Gif-sur-Yvette (91). Nous détaillerons plus particulièrement la méthodologie mise en œuvre pour ce dernier.

Nous avons appliqué le paramètre composé K sur tous les sondages de la campagne de reconnaissances réalisée en juin 2013 à Gif-sur-Yvette (10 sondages pressiométriques de 15 à 30 m de profondeur réalisés par 3 machines différentes). La succession lithologique globalement tabulaire rencontrée au droit des forages de ce chantier est la suivante :

- de la terre végétale ;
- des limons argileux marron-brun (Limon des Plateaux) ;
- des argiles marron-orangé (Argiles à Meulière) ;
- des sables beige-blanc (Sables de Fontainebleau).

Sur les graphiques que nous avons tracés, nous arrivons à distinguer avec le paramètre K les différentes couches de sol avec une forte ressemblance entre la courbe du paramètre et les valeurs de pression limite. Ci-dessous, un exemple de sondage pressiométrique avec enregistrement de paramètre où nous avons appliqué le paramètre K.

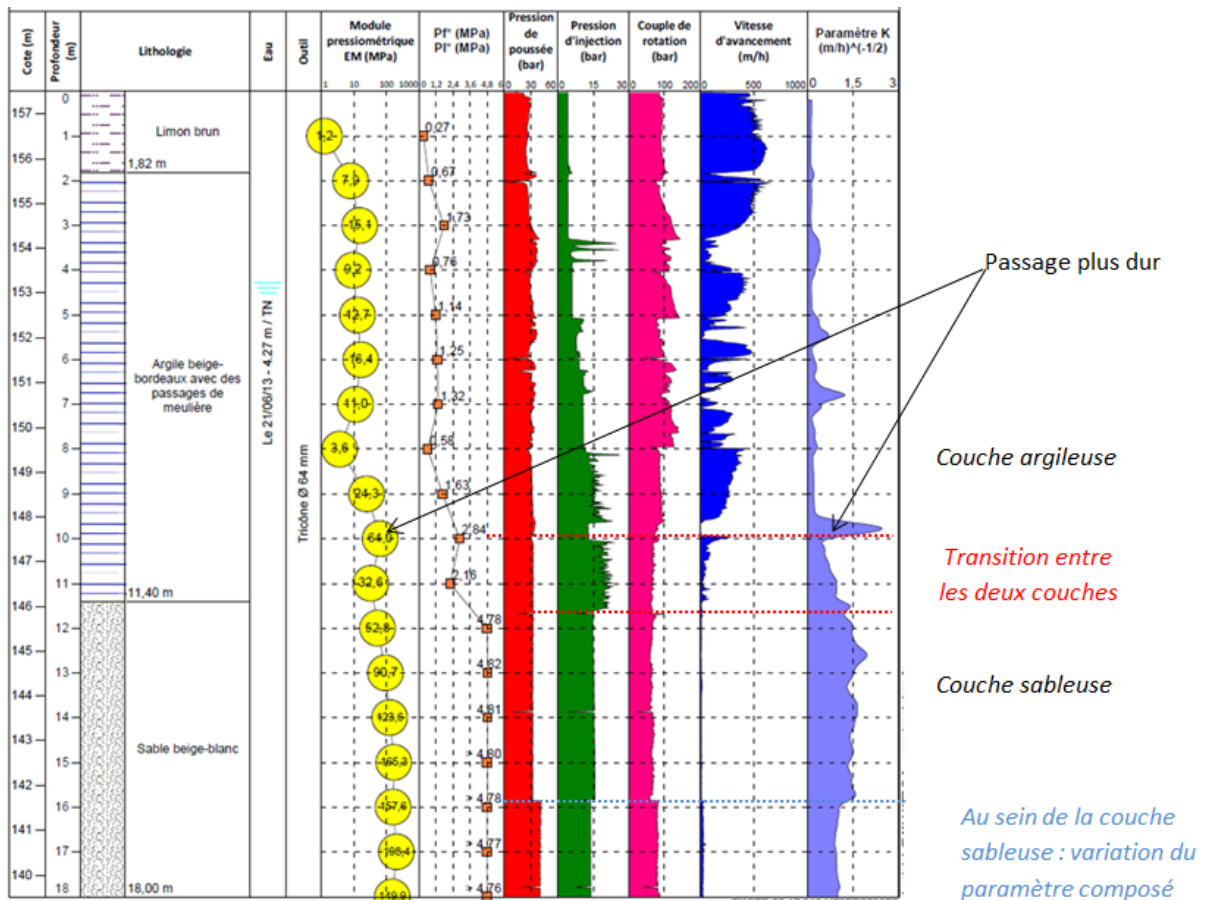


Figure 1 : représentation des résultats des essais pressiométriques et des paramètres de forage pour un sondage avec application du paramètre composé K

Sur ce graphique, nous pouvons repérer la transition entre la couche argileuse et la couche sableuse avec une augmentation du paramètre K. Ce paramètre met aussi en évidence une légère variation des caractéristiques mécaniques au sein de la couche sableuse, avec une diminution du paramètre K à 16 m de profondeur, ce qui n'était pas visible sur les résultats des essais pressiométriques.

Le paramètre K permet de souligner un passage plus dur à 9,5 m de profondeur (pression sur outil plus forte avec un couple de rotation et une vitesse d'avancement plus faible, donnant donc un paramètre K de valeur plus élevée) ce qui est bien visible sur l'essai pressiométrique réalisé à la même profondeur. Cependant, cette valeur très élevée du paramètre ne peut pas être comparée de manière quantitative aux valeurs du paramètre dans les sables. En effet, on peut voir que le paramètre K est plus élevé dans l'argile à 10 m de profondeur que dans les sables, alors que la pression limite est plus importante dans les sables que dans l'argile. Ceci peut être expliqué par le fait qu'une forte diminution de la vitesse entraîne une très forte augmentation du paramètre K qui n'est pas forcément équivalent à une pression limite beaucoup plus élevée.

Les variations du paramètres K doivent donc être analysées de manière qualitative (variation des paramètres de sol lorsqu'il y a une diminution ou une augmentation du paramètre K) plutôt que de manière quantitative (les valeurs du paramètres K ne doivent pas être comparées directement entre elles lorsque deux couches de caractéristiques différentes sont observées).

3.3. Définition et application du paramètre composé K'

3.3.1. Chantier de Gif-sur-Yvette

En observant de plus près les graphiques du chantier de Gif-sur-Yvette, nous avons pu remarquer que dans les sables beige-blanc (Sables de Fontainebleau), là où les caractéristiques pressiométriques sont les plus élevées et les différents paramètres sensiblement constants, la valeur du paramètre K est maximale et est identique pour une même machine, mais est différente entre deux machines. Ainsi, nous avons défini un « coefficient machine » afin de pouvoir comparer les valeurs du paramètre entre les différents sondages, quelle que soit la machine utilisée. Le paramètre composé suivant a été appliqué sur chacun des sondages :

$$K' = \frac{P_o}{CM \times C_R \sqrt{V_A}} \times 100 \quad (3)$$

avec CM le coefficient machine correspondant à la valeur maximale du coefficient K obtenue dans les Sables de Fontainebleau, formation sableuse résistante ($PI^* > 5\text{MPa}$) et homogène.

Nous avons ainsi choisi de retenir :

- Pour la machine SOCOMAFOR : $CM = 8$;
- Pour la machine EMCI : $CM = 1,5$;
- Pour la machine ABYSS : $CM = 2$.

En appliquant ce paramètre sur la totalité des sondages réalisés, nous pouvons remarquer qu'en mettant les courbes sur le même graphique, celles-ci se trouvent toutes dans le même fuseau de valeurs.

Ci-dessous sont représentées les variations des coefficients K et K' et les pressions limites en fonction de la profondeur, sur différents sondages réalisés avec trois machines différentes.

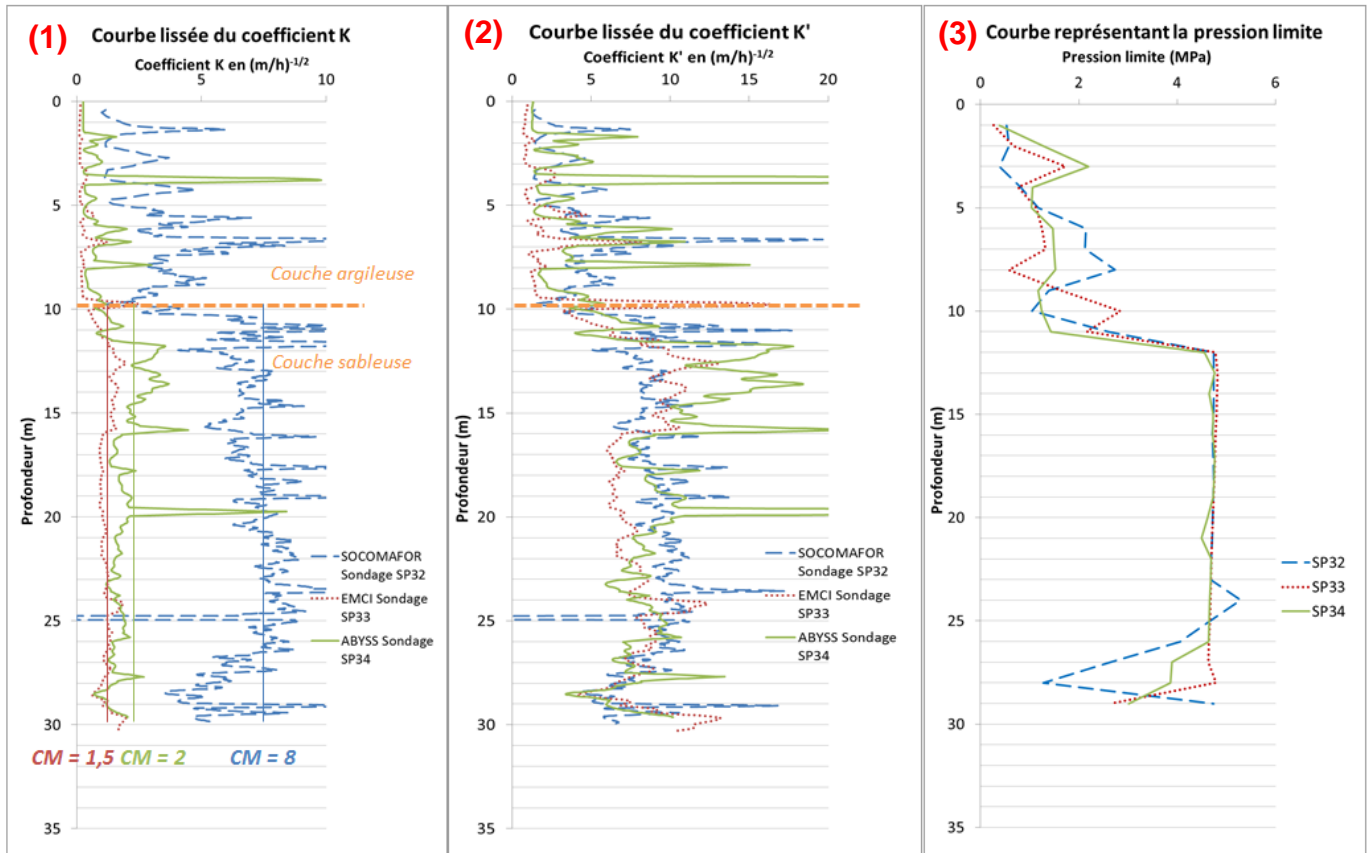


Figure 2 : (1) : représentation graphique du coefficient K en fonction de la profondeur pour différentes machines ; (2) : représentation graphique du paramètre K' en fonction de la profondeur pour différentes machines ; (3) : courbes pressiométriques correspondantes

Le terrain où ont été réalisés les sondages est relativement plat et les couches géologiques sont tabulaires. Ainsi, une même profondeur correspond à une même cote altimétrique et s'il n'y a pas de discordance, une même profondeur correspond à une même couche géologique. Ceci nous permet donc de comparer directement les graphiques entre eux.

On observe que les courbes du coefficient K' ont la même forme quelle que soit la machine utilisée, et la mise en place du coefficient machine permet d'obtenir des valeurs de paramètre comparables.

Le coefficient K' met en évidence de manière uniforme la transition entre l'argile à meulière et le sable fin beige à environ 10 m de profondeur, aussi repérable avec le changement de caractéristiques pressiométriques et les carottés faits à proximité.

3.3.1. Chantier de Vaires-sur-Marne

Nous avons ensuite souhaité appliquer le paramètre K' sur un autre chantier, où 6 sondages pressiométriques avec enregistrement des paramètres de forage ont été réalisés par deux machines différentes dont l'une avait déjà été utilisée à Gif-sur-Yvette (ABYSS). La succession lithologique rencontrée au droit des forages est la suivante :

- du sable graveleux gris brun (remblais et terrains de surface) ;
- du sable avec des passages graveleux marron-gris (Alluvions Anciennes) ;

- de la marne argileuse plus ou moins sableuse beige (Marnes Infragypseuses / Sables de Monceau) ;
- de la marne argileuse blanc-gris (Calcaire de Saint-Ouen).

Nous avons conservé le même coefficient $CM = 2$ pour la machine ABYSS et avons calé $CM = 3$ pour la machine APAFOR, avec CM la valeur maximale du paramètre K dans la formation des Alluvions Anciennes (formation homogène et résistante avec $PI^* > 5$ MPa à l'instar des Sables de Fontainebleau).

Notons que pour ce site, les couches n'étant pas tabulaires, nous n'avons pas pu superposer les graphiques comme nous avons pu le faire pour le chantier de Gif-sur-Yvette. Mais, nous avons tout de même pu remarquer grâce à l'application du coefficient machine que chaque formation présente une même gamme de variations du paramètre K' , quelle que soit la machine utilisée.

Le graphique ci-dessous représente l'application du paramètre K' pour deux sondages réalisés par ces deux machines à Vaires-sur-Marne, avec les fuseaux de valeurs du paramètre K' pour les différentes formations rencontrées.

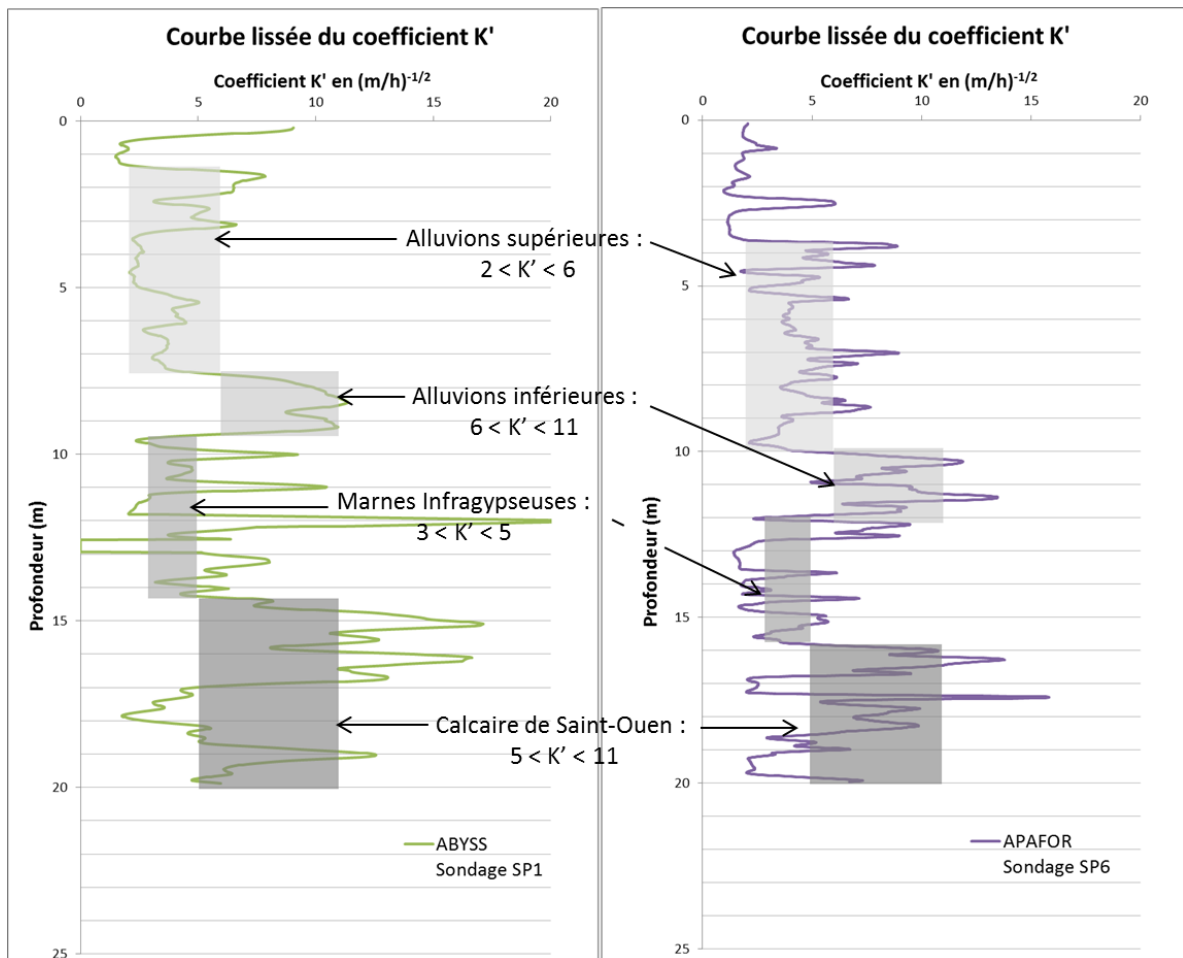


Figure 3 : représentation graphique du coefficient K' en fonction de la profondeur pour deux machines avec les différents fuseaux de valeurs

On remarque une nouvelle fois une très bonne concordance de valeurs de K' pour chaque couche.

4. Conclusion

Les enregistrements de paramètres permettent de localiser les hétérogénéités du milieu au droit d'un sondage. Cependant, les résultats ne sont pas utilisables en l'état dans le cadre du dimensionnement des ouvrages géotechniques et leur interprétation peut être difficile étant donné l'interdépendance des paramètres enregistrés. Ainsi, les paramètres composés permettent de limiter cette interdépendance et rend plus facile l'interprétation des données comme nous avons pu le voir dans notre étude.

Notre étude a montré que le paramètre composé K permet de mettre en évidence les contrastes géomécaniques du sol (dûs à un changement de lithologie).

L'utilisation d'un coefficient machine permet d'obtenir des valeurs de paramètre K' comparables pour une même formation, quelle que soit la machine utilisée.

L'établissement d'une base de données de coefficient machine CM offre ainsi des possibilités nouvelles à l'exploitation des sondages destructifs sur un site pour lequel la stratigraphie aura pu être étalonnée sur un sondage pressiométrique enregistré, permettant donc la comparaison immédiate des sondages entre eux. Notons toutefois que la valeur du coefficient CM dépend avant tout des réglages initiaux effectués sur la machine avant le chantier et pourra ainsi dépendre de l'opérateur, mais est supposée uniforme pour un opérateur donné qui règle toujours sa machine de la même manière.

Les paramètres composés, et plus particulièrement celui qui découle de notre étude, doivent être un plus dans l'interprétation qualitative des sondages mais ne doivent pas être étudiés seuls. L'œil averti de l'ingénieur géotechnicien formé pour interpréter les paramètres de forage est toujours indispensable.

6. Références bibliographiques

- Cailleux, J.-B. (1986). Étude des diagraphies instantanées en forage. Rapport des laboratoires, GT12, 97 pages.
- LCPC (2010). Paramètres de Forage en Géotechnique. Méthode d'essai n°79.
- 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.
- Somerton, W.H. (1959). A Laboratory Study of Rock Breakage by Rotary Drilling. Journal of Petroleum Technology. Vol. 216: 92–97.