CORRELATION ENTRE PARAMETRES DE FORAGE ET CARACTERISTIQUES PRESSIOMETRIQUES ET PENETROMETRIQUES

B. MELBOUCI
Dr Ingénieur, Chargé de Cours, Université de Tizi Ouzou
J.C ROTH
Ingénieur

Résumé

Cette étude a pour but de rechercher les relations entre paramètres de forage enregistrés avec le dispositif STARSOL-ENBESOL et les caractéristiques pressiométriques et pénétrométriques. En vue d'une exploitation quantitative, ces paramètres de forage ouvrent ainsi la voie au calcul de portance des pieux forés.

Mots clés : paramètres • caractéristiques • forage • essais • corrélation • dispersion • sols.

1 INTRODUCTION

L'exploitation de nombreuses données, données récentes essentiellement, a mis en évidence la nécessité d'effectuer une approche statistique entre paramètres des diagraphies instantanées et paramètres pressiométrique et pénétrométrique pour une meilleure compréhension de l'utilisation du sol.

En effet, la diagraphie instantanée permet d'obtenir l'enregistrement graphique des différentes grandeurs physiques (paramètres de forage, essentiellement couple et vitesse d'avancement) traduisant les actions de la foreuse accompagnées des réponses du terrrain.

Il est donc logique d'effectuer la comparaison de ces paramètres du dispositif STARSOL-ENBESOL avec les paramètres pressiométrique et pénétrométrique et d'analyser l'effet de la variabilité de ces différents paramètres pour aboutir au comportement du sol.

On examinera d'abord les problèmes de dispersion des paramètres propres de la STARSOL qui sont liés à la nature du sol et ensuite les problèmes apportés par la comparaison avec les essais classiques.

2 ETUDE DES DIFFERENTS PARAMETRES

2.1 Enregistrement des paramètres de forage

Ces enregistrements sont réalisés par le dispositif STARSOL-ENBESOL qui se compose de deux parties :

- ✔ la STARSOL, qui est un outillage de forage à tarière continue ;
- ✔ l'ENBESOL, qui est une centrale électronique d'acquisition de paramètres.

Ce dispositif de forage développé par l'entreprise SOLETANCHE a permis d'améliorer de façon significative la technique d'exécution du pieu moulé en place. Les contrôles sont assurés par l'ENBESOL qui saisit et gère, en temps réel, les indications des capteurs vitesse d'avancement "V" et couple "C".

Les enregistrements des paramètres couple "C" et vitesse d'avancement "V" (Figure 1) sont lissés de façon à éviter toutes les irrégularités et une trop grande dispersion des résultats. Nous avons donc considéré les paramètres moyens : vitesse et couple moyens. Quant au paramètre "C/V" utilisé dans la forabilité des roches, il dépend de la résistance au forage et de l'énergie spécifique.

Cette étude repose sur l'interprétation de 16 pieux forés dans cinq sites différents. L'ensemble de ces essais de forage a été réalisé par SOLETANCHE Entreprise (France).

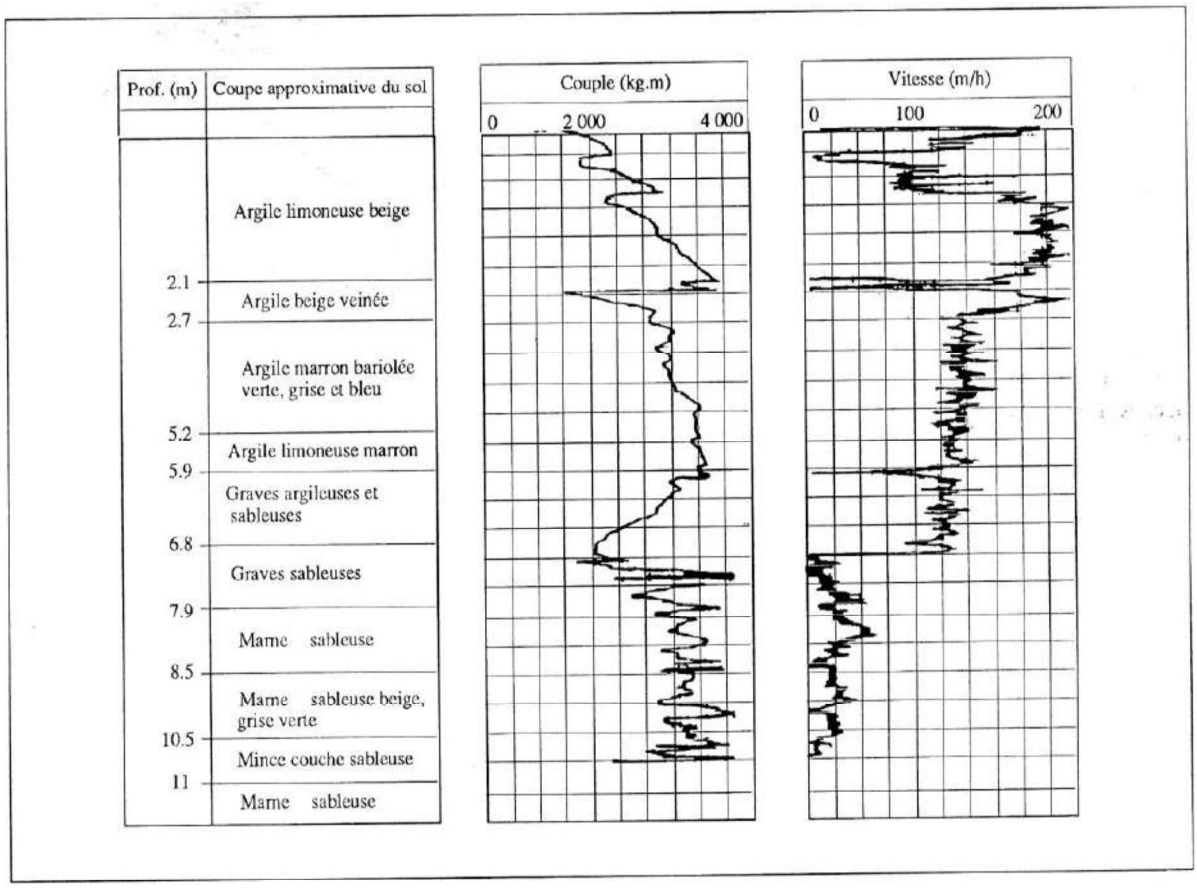


Figure 1 : Enregistrement des deux paramètres de forage couple et vitesse d'avancement avec le dispositif STARSOL-ENBESOL.

2.2 Paramètres des essais pressiométrique et pénétrométrique

Au niveau de la campagne de reconnaissance pour différents sites, on a tenté de diversifier au maximum les essais, s'efforçant de réaliser pour chaque site des essais en place (pénétrométrique ou pressiométrique) permettant la mesure en continu des caractéristquies mécaniques (résistance de pointe "Qc" ; frottement latéral "Fl" et pression limite "Pl"), lesquelles varient selon la nature des sols et selon la compacité ou la consistance des couches rencontrées.

Rappelons que les essais pénétrométriques fournissent essentiellement l'effort d'enfoncement. Cet effort détermine à la fois la résistance de pointe et le frottement latéral. La résistance de pointe est une grandeur complexe qui intègre les caractéristiques de déformation et de résistance du sol. Quant à l'essai pressiométrique, il fournit la pression limite qui correspond à l'état limite de stabilité des terrains.

3 CORRELATIONS ENTRE PARAMETRES DE FORAGE ET PARAMETRES "Qc", "Fl", "Pl"

Les corrélations établies à l'aide des paramètres "C", "V" et "C/V" à partir des essais d'enregistrements et des paramètres "Pl", "Qc" et "Fl" découlant des essais pressiométriques et pénétrométriques ont fait l'objet d'un ensemble de tracés que nous jugeons assez difficile à insérer dans cet article.

Les efforts d'analyse de ces liaisons entre paramètres physiques d'une part et les paramètres mécaniques d'autre part, ont été surtout concentrés sur le coefficient de corrélation traduisant la plus ou moins bonne linéarité de la relation entre les paramètres analysés. Cette analyse fait l'objet de deux types de corrélations :

- les corrélations générales,
- les corrélations spécifiques.

Il est vrai que la variabilité naturelle des sols a des conséquences sur les propriétés physiques et mécaniques. Cependant, en jumelant plusieurs forages, des différents sites, pour une même nature de couche, nous avons réussi à corréler les paramètres physiques du dispositif STARSOL-ENBESOL avec les paramètres mécaniques "Pl", "Qc" et "Fl", respectivement du pressiomètre et du pénétromètre statique. Ces corrélations faites indépendamment du site et permettant de

savoir quels sont les paramètres significatifs de ces liaisons sont appelées corrélations générales.

Par contre, nous appelons corrélations spécifiques les corrélations entre paramètres "C" et "V" et paramètres "Pl" du pressiomètre et "Qc" et "Fl" du pénétromètre statique obtenues sur un site précis.

3.1 Corrélations générales

Ces corrélations (C-V) ; (C-C/V) ; (V-C/V) ; (Pl-C) ; (Pl-V) ; (Pl-C/V) ; (Qc-C) ; (Qc-V) ; (Qc-C/V) ; (Fl-C) ; (Fl-V) et (Fl-C/V) sont obtenues avec une grande variété de sols ; argiles, sables, marnes, craies et limon, couches prises dans les différents sites étudiés. Ces corrélations sont en fait obtenues à partir de plusieurs forages jumelés de façon à étudier la dispersion des paramètres de chacune des couches indépendamment du site, en utilisant les régressions linéaires.

Le nombre de corrélations réalisées étant très grand, il est pratiquement impossible de les présenter dans ce document mais à titre d'exemple on donne en figure 2 la corrélation "Pl-C" dans la couche d'argile.

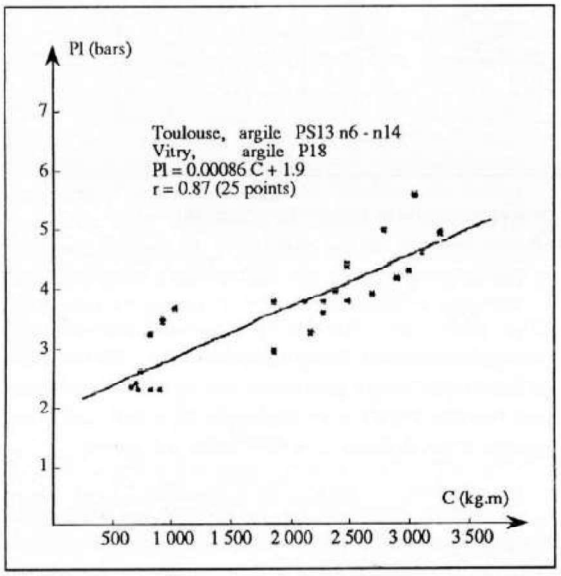


Figure 2 : Corrélation Pl-C obtenue dans les argiles en jumelant 3 forages sur les sites de Toulouse et de Vitry.

3.2 Corrélations spécifiques

Ces corrélations spécifiques à un site, ont fait l'objet d'un étalonnage spécial (essais pressiométriques et pénétrométriques) et n'intéressent qu'une famille de sols bien définie (argiles, sables, craies, marnes et limons). Il en résulte donc qu'une relation empirique entre les paramètres de forage et les paramètres pressiométriques ou pénétrométriques n'est donc valable que pour des sols de même nature et dans un même site. A titre d'exemple, nous présentons en figure 3 la corrélation "Qc-C" dans une couche de limon.

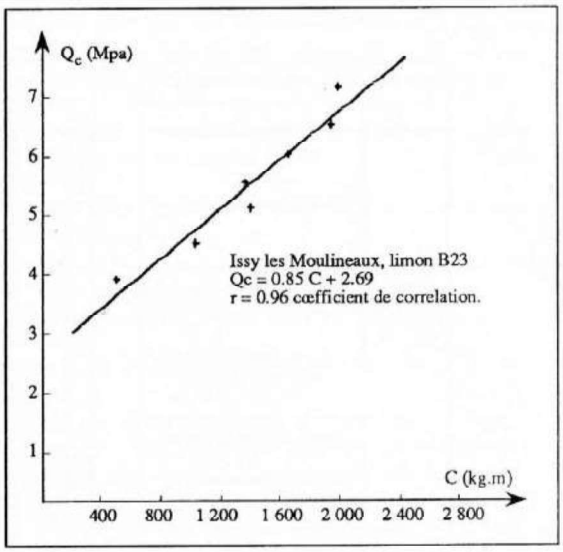


Figure 3 : Corrélation spécifique "Qc-C" obtenue dans une couche de limon du site Issy les Moulineaux.

4 INTERPRETATION DES RESULTATS

4.1 Corrélations générales

1/Corrélation "C-V"

Dans les marnes (Figure 4), la liaison "C-V" est assez bien déterminée, le nuage de points est légèrement dispersé autour de la droite de régression mais suggère une certaine linéarité ; il en est de même pour les craies. Par contre, dans le sable et l'argile, on obtient un nuage de points très dispersé et un coefficient de correlation médiocre.

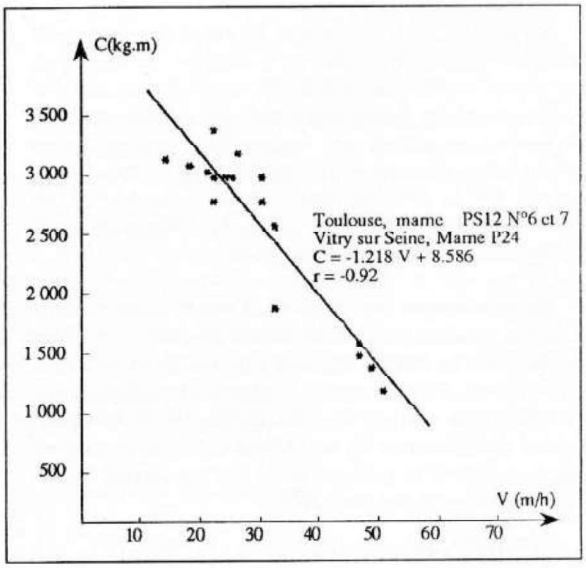


Figure 4 : Corrélation C-V obtenue dans les marnes en jumelant 3 forages sur les sites de Toulouse et de Vitry.

2/ Corrélation "C-C/V"

Dans le cas général, les coefficients de corrélation indiquent que le couple est bien correlé avec la résistance au forage C/V dans les sables, les craies et les marnes.

3/ Corrélation "V-C/V"

Les corrélations obtenues ont donné de bons coefficients pour les sables, les craies et les marnes. On notera que pour l'argile, la liaison n'est pas parfaite car le paramètre "V" est moins sensible aux variations que le couple dans les terrains argileux.

4/ Corrélation "Pl-C"

Dans les sables et les argiles, la liaison entre "Pl" et "C" est bonne ; cependant, il faut noter que cette liaison dans le sable est moindre, car les terrains sableux sont plus délicats à travailler au pressiomètre. Par contre, dans les marnes nous avons constaté une grande dispersion et ceci peut être expliqué par l'hétérogénéité des formations marneuses avec des passées sableuses dans les sites étudiés.

5/ Corrélation "Pl-V"

Les comparaisons effectuées entre "Pl" et "V" dans les argiles, sables, craies et les marnes ont donné une très grande dispersion et ne suggèrent pas en général une droite. Dans une certaine mesure, ces deux caractéristiques ne sont pas comparables car "Pl" et "V" ne font pas appel au même principe.

6/ Corrélation "Pl-C/V"

On remarquera que la dispersion quoique encore importante est cependant raisonnable dans les marnes. Il en est de même pour les argiles et les sables. Par contre, dans la craie, la dispersion est assez importante et le résultat obtenu pour le coefficient de corrélation est inférieur à 0.8.

7/ Corrélation "Qc-C ou V"

D'une façon générale, on a obtenu des corrélations acceptables avec une faible dispersion pour le couple dans le cas des sables ; alors qu'on a obtenu des résultats très dispersés dans la craie.

8/ Corrélation "Qc-C/V"

La comparaison de "Qc" et "C/V" a donné un bon coefficient de corrélation dans le sable. Dans le cas de la craie, on a constaté que la dispersion est assez importante et ceci peut être expliqué par les enregistrements en dents de scie de la résistance de pointe du pénétromètre statique qui ne facilite pas la comparaison avec "C/V".

9/ Corrélation "Fl-C" ; "Fl-V" et "Fl-C/V"

Nous avons par ailleurs essayé de comparer le frottement latéral "Fl" du pénétromètre statique et les paramètres de forage "C, V et C/V". La disparsion était encore plus importante, néanmoins nous avons remarqué que la liaison de "Fl" avec le couple est meilleure qu'avec la vitesse d'avancement. Par contre la comparaison de "Fl" avec "C/V" est pratiquement insignifiante dans les couches étudiées.

4.2 Corrélations spécifiques

1/ Corrélations "C-V" ; "C-C/V" ; "V-C/V"

Dans le cas général, les coefficients de corrélation indiquent que "V" est assez bien correlée avec le couple "C". On notera qu'une meilleure corrélation apparait dans les argiles que dans les craies ; ceci rejoint les observations générales qui ont toujours fait ressortir dans les enregistrements une sensibilité du couple aux terrains argileux. Dans les sables, les limons et les marnes, on obtient aussi une bonne liaison entre couple et vitesse.

Signalons aussi que les données du couple et la résistance au forage "C/V" ont montré une très bonne liaison dans la craie, dans l'argile et limon, et avec un degré moindre dans les sables. Quant à la liaison de "V" avec "C/V", les essais comparatifs ont donné des résultats très satisfaisants ; ceci justifie que la vitesse d'avancement est un paramètre lié à la résistance au forage.

2/ Corrélations "Pl-C" ; "Pl-V" ; "Pl-C/V"

Les travaux de Flepp et Goguel ont été élargis à d'autres matériaux tels que les marnes, les limons et les craies. On a obtenu des résultats comparables pour les autres couches étudiées. Signalons que le résultat des essais comparatifs d'un forage à un autre dans un même site peut varier jusqu'à 30% dans l'argile et jusqu'à 20% dans la craie.

Quant aux corrélations liant "Pl" au couple, elles montrent une parfaite liaison dans les marnes, les argiles, les limons et avec un degré moindre pour les craies. Nous remarquons que la liaison de "Pl" avec "C" est meilleure qu'avec "V".

Concernant la liaison "Pl-C/V", elle apparait très difficile à établir dans les marnes mais elle donne un coefficient de corrélation acceptable dans les argiles, les sables, les limons et les craies.

3/ Corrélations "Qc-C" ; "Qc-V" ; "Qc-C/V"

Les courbes obtenues entre "Qc" et "V" confirment les observations de Flepp et Goguel pour les sables et on obtient des résultats analogues pour les limons. Par contre, on obtient des résultats nettement meilleurs pour la craie, ce qui explique que le phéno-

mène de poinçonnement du sol autour de la pointe d'un pénétromètre statique présente de grandes analogies avec le phénomène de pénétration de la tarière sous une vitesse d'avancement "V". On notera aussi que la liaison "Qc-C" est très satisfaisante et elle est meilleure que celle de "Qc-V". Le couple est donc un paramètre lié à la résistance du terrain au niveau de la pointe. De même, les essais comparatifs entre "Qc" et "C/V" ont établi une très bonne liaison dans les craies, les limons et les sables. On peut ainsi admettre que la résistance de pointe "Qc" du pénétromètre et la résistance au forage "C/V"' de la STARSOL, procèdent à des phénomènes comparables au cours de l'enfoncement.

5 CONCLUSION

L'analyse des enregistrements des paramètres de forage de la STARSOL-ENBESOL "C" et "V" et des essais pressiométriques et pénétrométriques, reste très délicate, compte tenu du type d'essai et de la diversité des terrains. Les résultats obtenus montrent néanmoins des relations intéressantes entre "C" ou "V" et la caractéristique de la forabilité "C/V" du terrain. En fait, tout semble indiquer que ces paramètres sont indispensables pour déterminer la résistance des sols.

Les différentes tentatives tant pour les corrélations générales que spécifiques, pour les différentes couches de terrains, entre "C" et la caractéristique pressiométrique "Pl" sont concluantes. Il semble donc bien que le couple caractérise comme la pression limite, la compacité des sols. Par contre, les corrélations entre "V" et "Pl" s'avèrent infructueuses dans les corrélations générales.

Avec le pénétromètre statique, les corrélations obtenues entre "Qc" et les paramètres "C" et "V" sont acceptables. D'une façon générale, nous avons obtenu de meilleurs coefficients de corrélation avec le couple qu'avec la vitesse "V".

Enfin, les corrélations "Qc-C/V" et "Pl-C/V" donnent des résultats satisfaisants et semblent être d'une grande utilité pour l'établissement d'un rapprochement entre forabilité des sols et les paramètres d'essais pressiométriques et pénétrométriques.

BIBLIOGRAPHIE

[1] G. Flepp & B. Goguel : "*Utilisation de corrélations entre paramètres pour une reconnaissance du site plus efficace au barrage du Chélif (Algérie)*". Ext. du Bull de l'Ass. Int. de Géol. de l'Ing. N° 26-27. pp 71-75, 1983.

[2] J.P Magnan : "*Les méthodes statistiques et probabilités en mécanique des sols*" Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées ; Décembre 1982.

[3] J.P Magnan & S. Baghery : "*Statistiques et probabilités en mécanique des sols*" Rapport de Recherche des Laboratoires des Ponts et Chaussées" n°109, Janvier 1982.

[4] B. Melbouci : "*Détermination de la capacité portante des pieux réalisés avec le dispositif STARSOL ENBESOL*". Thèse de Doct. Ing. présentée à l'INPL de Nancy, Février 1988.