

Contrôle de vibro-compactage de remblai hydraulique sableux

Philippe Liausu
Ménard, Nozay, France
Claire Mollereau
Geopac Inc, Montréal, Canada



RÉSUMÉ

Cette communication présente les résultats d'un traitement de remblai hydraulique sableux par vibro-compactage avec un objectif d'indice de densité I_d de 70%. Les travaux ont été contrôlés par des essais de type CPT et SPT, dont les résultats ont permis d'établir des corrélations entre résistance dynamique N et résistance en pointe q_c , qui sont comparées aux corrélations de la littérature.

ABSTRACT

This paper presents the results of the treatment of an hydraulic sandfill by vibrocompaction, with a target of 70% relative density. The works have been monitored by CPT and SPT tests, the results of which allowed to establish correlations between blowcount N and cone resistance q_c , which are compared to correlations found in the literature.

1 INTRODUCTION

Le projet concerne la réalisation du nouveau terminal à conteneurs TAC3 dans le Port de Dakar au Sénégal.

Ce terminal consiste en une plate forme d'environ 70 000 m² qui a été constituée par remblaiement hydraulique d'une ancienne darse sur des épaisseurs moyennes de l'ordre de 12 à 13 mètres. Il est bordé par un quai de 700 mètres de longueur fondé sur une couche d'enrochements basaltiques.



Figure 1. Localisation du projet – Port de Dakar

Les investigations géotechniques préliminaires ayant montré que le remblai hydraulique sableux était dans un état peu compact, un traitement par vibro-compactage s'est avéré nécessaire avant tout aménagement du terre-plein.

Les critères de réception de ces travaux consistaient en un indice de densité I_d (ou densité relative D_r) de 70% à obtenir après compactage. Le contrôle de cette densité relative s'est effectué par la réalisation d'essais de pénétration statique et dynamique.

Cette communication présente les différents résultats obtenus sur ce chantier, les corrélations constatées entre résistance dynamique N et résistance en pointe q_c et compare ces corrélations avec celles trouvées dans la littérature telles qu'abaques de Robertson (1989), Burlan & al. (1983) ou Chin & al. (1988), en fonction de la teneur en fines ou du D_{50} du matériau.

Cette analyse a permis de définir, en accord avec la maîtrise d'œuvre du chantier, des critères de réception simples, essentiellement basés sur la valeur N mesurée au SPT.

2 CARACTÉRISTIQUES DU MATÉRIAU À COMPACTER ET OBJECTIFS DU TRAITEMENT

Plusieurs campagnes d'investigations géotechniques préliminaires ont été réalisées sur le site, comprenant des sondages carottés avec prélèvement d'échantillons et essais SPT, ainsi que des essais de pénétration dynamique.

Ces informations ont été complétées, lors de la réalisation des planches d'essais par des sondages de pénétration statique CPT.

Ces reconnaissances ont montré que le remblai hydraulique était constitué de sable beige à blanc moyen à fin mélangé avec des débris de coquillages, dans un état généralement peu compact. On rencontre par

endroits quelques traces de vase noirâtre à la base des remblais, au niveau de l'ancien fond marin.

Les analyses granulométriques montrent que la teneur en fines du remblai sableux est faible, de l'ordre de 5% en moyenne, avec quelques valeurs plus élevées comprises entre 20 et 30%, correspondant aux passées vaseuses emprisonnées à la base du remblai. La figure 2 montre une courbe granulométrique typique du matériau à traiter.

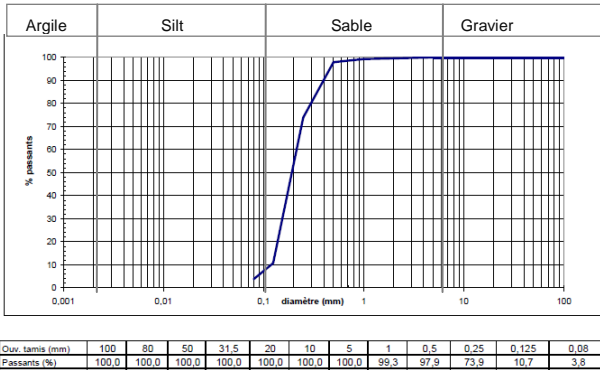


Figure 2. Courbe granulométrique typique des sols traités

Ces résultats ont mis en évidence la nécessité d'une amélioration préalable du terrain ; compte tenu de la nature et de l'épaisseur du matériau à traiter, la technique du vibro-compactage a été retenue, avec les objectifs suivants :

- Indice de densité moyen : 70%
- Indice de densité minimal : 60%

Pour l'évaluation de cet indice de densité I_d ou D_r , les critères suivants étaient proposés dans les spécifications du contrat, en termes de résistance mesurée au pénétromètre statique (CPT) (figure 3) ou dynamique (SPT) (tableau 1):

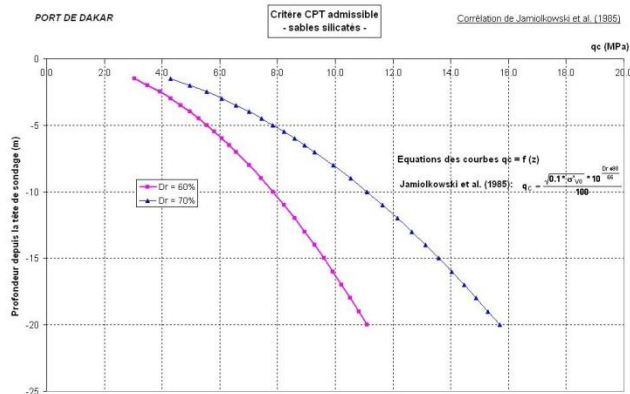


Figure 3. Critères de réception - CPT

Tableau 1. Critères de réception - SPT

Profondeur (m)	N SPT (coups/300mm)	
	Minimum	Moyenne
1.00	10	12
4.00	16	18
8.00	20	22
12.00	24	26

On peut noter que la corrélation entre ces 2 critères correspond à des rapports de q_c/N de l'ordre de 3 à 5, (q_c étant exprimé en kg/cm^2 ou bar).

3 MISE EN ŒUVRE DU COMPACTAGE ET PREMIERS RÉSULTATS

Le traitement par vibro-compactage a été réalisé avec 2 ateliers utilisant des vibreurs de type V23 de 130 kW de puissance, 23 mm d'amplitude et 300KN de force centrifuge, selon le principe rappelé en figure 4.

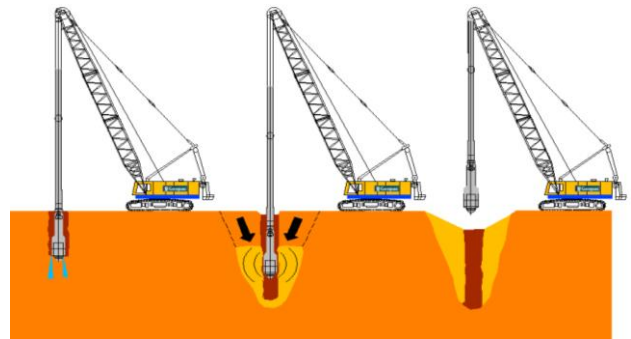


Figure 4. Principe du vibro-compactage

Le traitement a débuté par la réalisation de planches d'essais qui ont permis de fixer les paramètres du traitement : grille de compactage (de 2,50 m à 3,80 m de côté), pas de remontée du vibreur, temps de traitement et critères de refus. La figure 5 montre un atelier de vibro-compactage au travail.

Pour cette planche d'essais, les 2 types d'essais in situ ont pu être mobilisés, CPT et SPT.



Figure 5. Vue d'un atelier de vibro-compactage

On trouvera en figure 6 et 7 les résultats obtenus en termes de CPT et SPT, très largement supérieurs aux critères contractuels. Sur la figure 6, le CPT 4 est le CPT préliminaire de référence et les courbes en pointillé correspondant aux critères minimum et moyen.

La fine couche de vase emprisonnée en fond de remblai apparaît sur le CPT6.

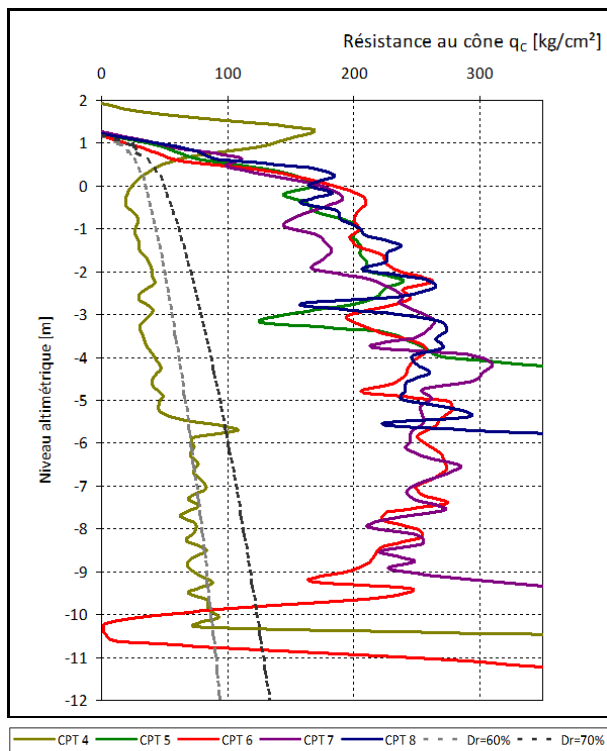


Figure 6. Amélioration du terrain mesurée au CPT

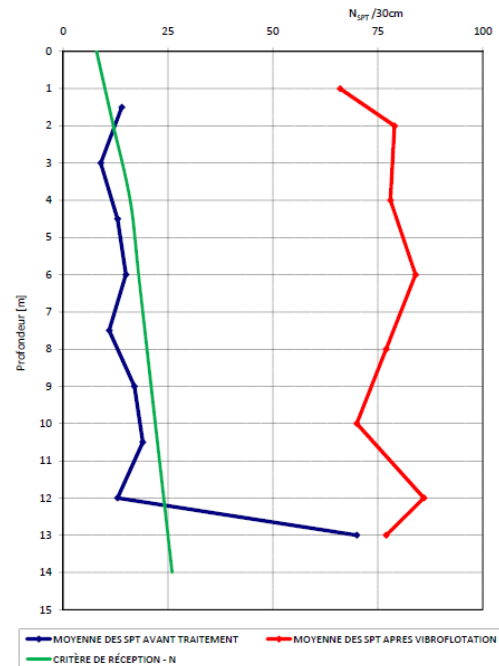


Figure 7. Amélioration du terrain mesurée au SPT

Les résultats des mesures d'indice de pénétration standard SPT sont résumés sur la figure 7. Les valeurs avant traitement varient entre 10 et 20, alors que les valeurs après traitement ont varié entre 65 et 85.

Pour la suite du chantier, il n'a pas été possible de garder en permanence sur le site un atelier CPT ; de plus beaucoup de sondages CPT ont rencontré des refus prématurés du fait de la forte compacité du sable après traitement. Le chantier a dû par la suite être réceptionné seulement en termes de valeur N mesurées au SPT.

Toutefois la maîtrise d'œuvre qui avait fixé les objectifs premiers du traitement en termes de densité relative déduite du CPT a souhaité adapter les corrélations q_c/N en fonction des mesures des plaques d'essais et des corrélations usuelles trouvées dans la littérature.

4 ÉTABLISSEMENT DE CORRÉLATION ENTRE QC ET N

4.1 Corrélations à partir des Résultats des Planches d'Essais

La première analyse a consisté à corréler les 10 sondages SPT avec les 10 sondages CPT voisins réalisés lors des plaques d'essais, en comparant les résistances en pointe et le nombre de coups obtenus à profondeur égale.

On trouve ainsi un rapport q_c/N moyen de l'ordre de 3. Cependant, ce rapport n'est pas forcément très représentatif, car une proportion importante des CPT a rencontré des refus précoces, ce qui n'a pas permis de tester le terrain compacté en profondeur. Sur la figure 8, on peut voir les ateliers de forage CPT et SPT.



Figure 8. Vue des ateliers de forages de contrôle

4.2 Corrélations de la Littérature

Pour définir des critères SPT permettant d'atteindre une densité relative minimum de 60% et moyenne de 70%, on peut également se baser sur les corrélations classiques q_c/N publiées dans la littérature technique, basées sur une compilation de données recueillies sur un grand nombre de chantiers.

La plupart des corrélations usuelles reconnues font intervenir la granulométrie du sable considéré. Parmi ces corrélations classiques, on peut citer celles décrites dans les paragraphes ci-dessous :

4.2.1. L'abaque de Robertson et al. (1983)

Cet abaque définit un ratio q_c/N moyen en fonction du diamètre moyen des particules de sol (D_{50}).

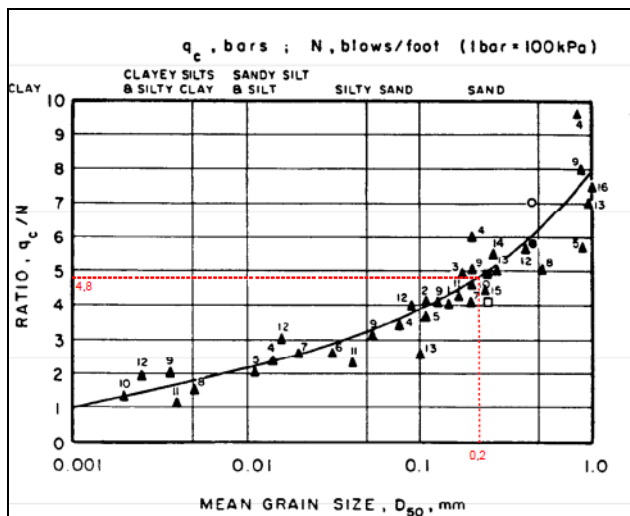


Figure 9. Corrélation q_c/N de Robertson et al. (1983)

En analysant les courbes granulométriques du remblai sableux, on constate que le diamètre moyen D_{50} est de l'ordre de 0,2 mm.

En se reportant à la courbe de Robertson, on trouve ainsi un rapport q_c/N de l'ordre de 4,8.

4.2.2. L'abaque de Burland et Burbidge (1985)

Cet abaque fait lui aussi intervenir le D_{50} du sol :

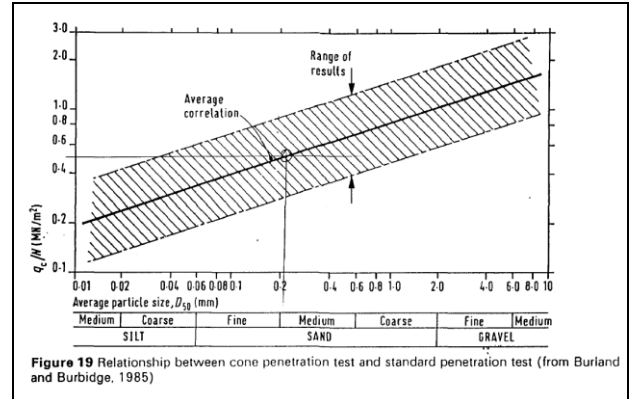


Figure 10. Corrélation q_c/N selon Burland et Burbidge (1985)

Avec un D_{50} , de l'ordre de 0,2 mm, on trouve cette fois ci un rapport q_c/N de l'ordre de 5.

4.2.2. L'abaque de Chin et al. (1988)

Cet abaque fait intervenir la teneur en fines du sol comme on peut le voir sur la figure 10 :

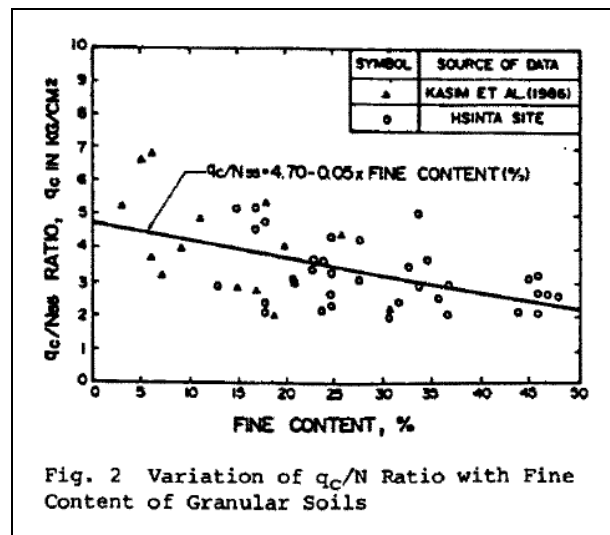


Figure 11. Corrélation q_c/N selon Chin et al. (1988)

Les analyses granulométriques déjà citées montrent que pour les échantillons de sable testés, la teneur en fines moyenne est très faible et se situe généralement aux alentours de 5%.

On trouve ainsi un rapport q_c/N de l'ordre de 4,6.

4.2.4 Synthèse des Corrélations de la Littérature (pour le remblai concerné).

En prenant la moyenne des 3 corrélations analysées ci dessus, on arrive donc à un rapport q_c/N moyen de l'ordre de 4,8

Ce ratio moyen permet donc d'établir une corrélation simple entre densité relative et nombre de coups N mesuré au SPT. Le tableau 2 présente les critères SPT équivalents aux densités relatives des spécifications, à partir du ratio $q_c/N = 4,8$.

Tableau 2. Corrélation D_r , q_c et N

Profondeur (m)	Dr minimum 60%		Dr moyenne 70%	
	q_c (kg/cm ²)	N	q_c (Kg/cm ²)	N
2	41	9	58	12
4	54	11	77	16
6	65	14	92	19
8	74	15	105	22
10	82	17	116	24
12	90	19	127	26

4.3. Formules Directes D_r en Fonction de N

Des auteurs ont également établi des corrélations directes permettant d'estimer la densité relative d'un sable à partir de la valeur N mesurée au SPT, en fonction de la contrainte verticale au niveau de l'essai.

La plus connue et universellement reconnue est celle de Gibbs and Holtz (1957) que nous donnons ci dessous :

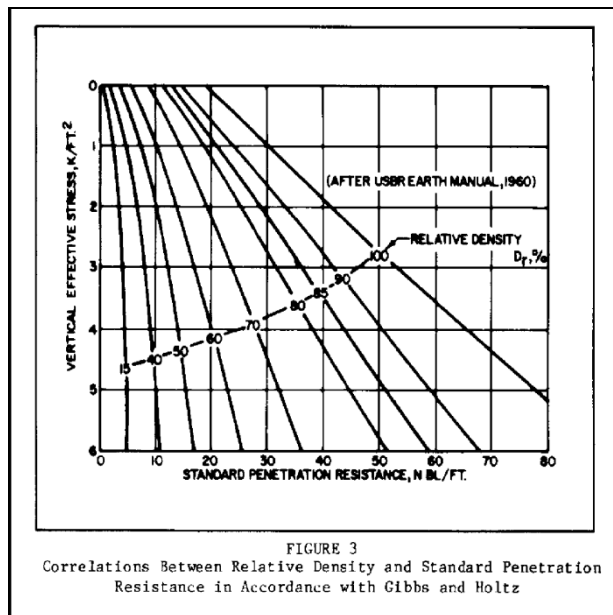


Figure 12. Corrélation entre densité relative et N selon Gibbs and Holtz (1957)

Ces abaques correspondent à l'application de la formule suivante :

$$D_r = 100 [N/(12$$

Avec D_r en pourcentage (%) et σ'_{vo} en ksf (1 ksf = 0,4788 kg/cm²)

Ce qui nous permet dans le tableau 3 de décrire les spécifications du projet en terme de contrainte verticale (poids des terres supposé de 19 kN/m³) pour notre cas :

Tableau 3. N fonction de D_r et de la profondeur

Profondeur (m)	Contrainte verticale (kg/cm ²)	N mini (Dr=60%)	N moyen (Dr=70%)
2	0,28	9	12
4	0,46	10	14
6	0,64	12	16
8	0,82	14	18
10	1,00	15	21
12	1,18	17	23

5 COMPORTEMENT DES SOLS

Plus récemment, Robertson (1990) a développé un graphique permettant de distinguer les types de sols et leur comportement en fonction de la résistance en pointe normalisée Q et le rapport de friction normalisé F. Cette analyse reste néanmoins difficile à comparer avec les études précédentes, étant donné l'utilisation d'un N corrigé, mais reste néanmoins une information supplémentaire sur le comportement des sols après vibro-compactage. Ce graphique est basé sur les formules suivantes:

Q

f

Avec P_a la pression atmosphérique, f_s le rapport de friction, q_t la résistance en pointe et $n=0.5$ pour le sable.

Ce graphique est basé sur un ensemble d'arcs de cercle dont le rayon est I_c , indice de comportement des types de sols.

Les valeurs de I_c calculées avant et après vibro-compactage sont calculées à partir des formules suivantes :

$$I_c = [(3.47 - \log Q)^2 + (\log F + 1$$

$$\frac{q_{cl}}{(N_1)_{60}}$$

La figure 13 présente les données avant et après vibro-compactage sur l'abaque de comportement des sols proposé par Robertson (1990).

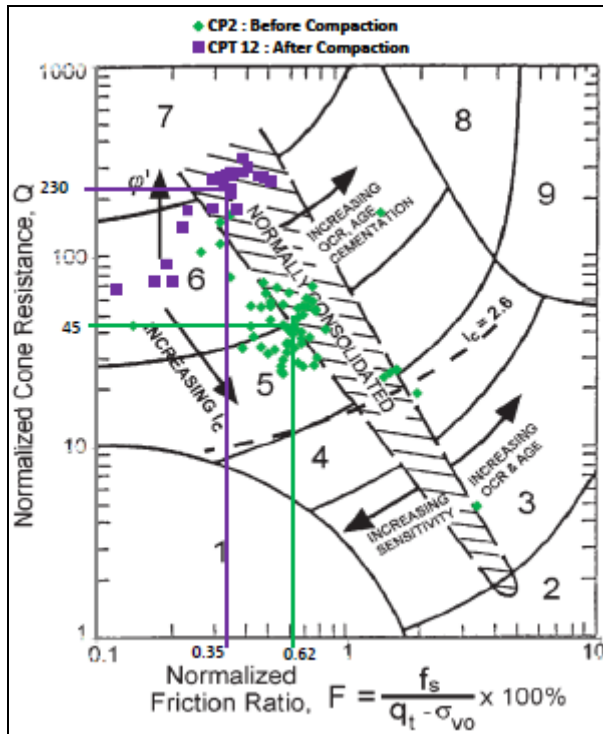


Figure 13 : Comportement des sols après Vibro-compactage

On constate, après vibro-compactage, une augmentation de Q, une légère diminution du F, ainsi qu'un changement de zone (5-6 : mélange de sables, sable silteux à 6-7 : sable graveleux à sable dense).

Le calcul de l_c avant compactage donne 2.1 et donc un q_c/N de 4.7 tandis que le l_c après compactage est de 1.35 et le q_c/N de 6.0 alors que la granulométrie du sol reste inchangée.

Dans le cadre de cette étude, le graphique de Robertson (1990) ne répond pas directement à la problématique du sujet, cependant, il apporte une précision à l'aide des essais CPT sur le comportement des sols après compactage.

On peut donc conclure que prédire le comportement des sols après compactage semble plus complexe que ne semble montrer ce graphique.

6 CONCLUSION

On peut donc maintenant comparer les critères SPT résultant des différentes analyses présentées ci-dessus ; cette synthèse est présentée dans le tableau 4.

Tableau 4. Comparaison des différentes corrélations

Valeurs N à atteindre		N minimum (Dr = 60%)		
Profondeur (m)	Spec.	$q_c/N = 4,8$	$q_c/N = 6,0$	Gibbs and Holtz
2		9	7	9
4	16	11	9	10
6		14	11	12
8	20	15	12	14
10		17	14	15
12	24	19	15	17

Valeurs N à atteindre		N moyen (Dr = 70%)		
Profondeur (m)	Spec.	$q_c/N = 4,8$	$q_c/N = 6,0$	Gibbs and Holtz
2		12	10	12
4	18	16	13	14
6		19	15	16
8	22	22	18	18
10		24	19	21
12	26	26	21	23

On constate une bonne concordance entre ces différentes approches, notamment pour la densité relative de 70% et de façon générale entre les valeurs tirées de $q_c/N=4,8$, $q_c/N = 6,0$ et celles tirées de Gibbs and Holtz.

On signalera que les valeurs moyennes de N effectivement mesurées après compactage ont toutes été très largement supérieures à ces valeurs minimales, permettant de réceptionner les travaux sans problème.

REFERENCES

- Burland, Burbige (1985) Settlement of foundations on sands and gravel, Proceedings of the Institution of Civil Engineers, 78, No. 1, 1325-1381
- Chin C.T., Duann S.W., Kao T.C. (1988) SPT-CPT correlations for granular soils. - Proceedings of 1st International Symposium on Penetration testing, Orlando, 335-339
- Gibbs H.J. and Holtz W.G. (1957) Research on determining the density of sands by spoon penetration testing. Proceedings International Conference on Soil Mechanics, London 1, 35-39
- Robertson P.K. (1989) Soil classification using the cone penetration test. Canadian Geotechnical Journal. 27, 151-158.
- Robertson P.K., Biggar K.W., Campanella R.G., Hofmann B.A., Hughes J.M.O., Kupper A. and Woeller D.J. (2000) Interpretation of in situ test results from the CANLEX sites. Canadian Geotechnical Journal, 37, 505-529
- Robertson P.K., Campanella R.G. and Wightman A (1983) SPT CPT correlations. Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, 109, GT11, 1449-1459
- Robertson P.K., Jefferies M.G., Davies M.P. (1990) Soil classification by the cone penetration test : Discussion and reply. Canadian Geotechnical Journal. 28, 173-176.

