

AMELIORATION ET RENFORCEMENT DE SOL A L'ARRIERE DES QUAIS

SOIL IMPROVEMENT AT THE BACK OF A PIER

Serge LAMBERT¹

1 Keller Fondations Spéciales, Duttlenheim, France

RÉSUMÉ — Pour répondre à l'augmentation du trafic de transport maritime par conteneurs et offrir une alternative multimodale, les ports aménagent à travers le monde de nouveaux terminaux à conteneurs. Ils se composent souvent de quais avec de forts tirants d'eau, adossés à une surface aménagée directement connectée aux réseaux routier, ferroviaire ou fluvial. A l'arrière du mur de quai constitué de caissons, palplanches, paroi moulée ou Combiwall, le terreplein est habituellement remblayé par des matériaux issus du dragage effectué en mer sur une zone proche du port. Ces remblais sableux doivent être au préalable compactés ou consolidés en présence d'eau, afin d'éviter des tassements qui peuvent être très importants sous les surcharges d'exploitation ou sous la charge des portiques de conteneurs ou tout simplement sous leur propre poids. Cet article a pour objet d'aider les concepteurs à choisir le procédé d'amélioration ou renforcement de sol le mieux adapté en fonction du contexte géotechnique afin d'atteindre les objectifs fixés. Quelques outils sont donnés pour fixer des objectifs de compacité atteignables par les différents procédés d'amélioration de sol.

ABSTRACT — To meet the increasing traffic of container shipping and to offer a multimodal alternative, ports are developing new container terminals worldwide. They often consist of quays with deeper drafts, backed and connected to road, rail or river networks. At the rear of the quay wall, built with caissons, sheet piles, diaphragm walls or Combiwalls, the platform is generally backfilled with materials dredged from areas close to the port. These sandy fills have to be compacted under water level or reinforced beforehand, in order to avoid future settlements, which may be very important under operating loads or container crane loads or simply under their own weight. This article aims to help the designer to choose the right ground reinforcement according to the geotechnical environment and the settlements criteria. Some tools are given to estimate the compacity after ground improvement.

1. Introduction

L'aménagement portuaire rencontre souvent des problèmes de portance et de compressibilité des sols d'assise des digues, quais ou terre-plein, et des remblais hydrauliques du terre-plein déversés tout simplement dans l'eau. Avec des critères de tassements très restrictifs pour l'exploitation du port, un procédé d'amélioration ou de renforcement de sol devient souvent alors indispensable.

Au stade de la conception, différents aspects sont à étudier:

- les zones de dragage permettant d'obtenir un matériau de remblaiement adapté au compactage,
- le pourcentage de fines (passant inférieur à 80 microns) des matériaux de dragage une fois mis en place et leur état initial de compacité,
- le risque de liquéfaction et de lateral spreading (glissement de terrain) pour les sols sableux en zone sismique,
- le procédé d'amélioration ou de renforcement de sol le plus adapté,
- les objectifs de compacité réalistes après amélioration de sol.

2. Constitution des quais

Les quais peuvent être classés en 2 familles:

- les quais en caissons ou en blocs de bétons armés: le sol support doit être portant et peu compressible (figure 1).

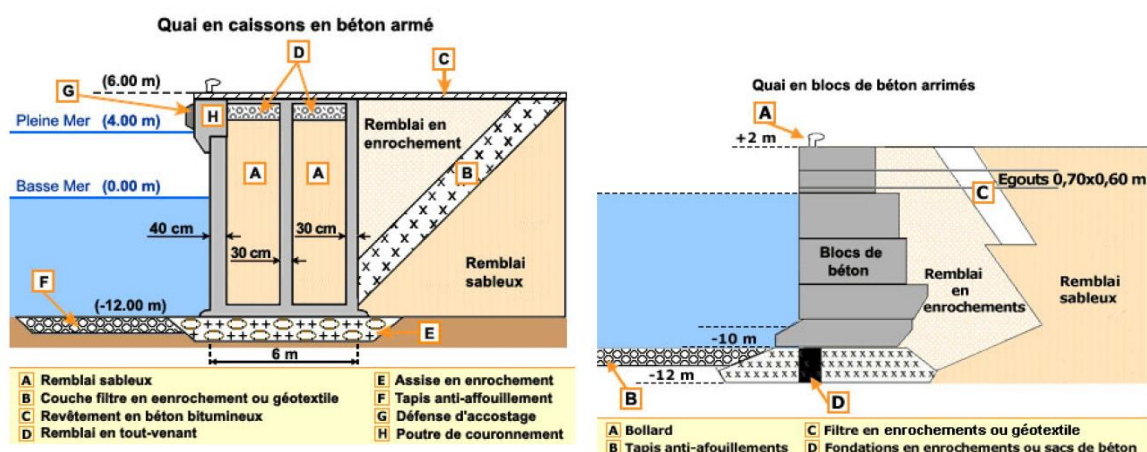


Figure 1: Constitution des quais en caissons et en blocs de béton armés.

- les quais en rideau ou sur pieux (figure 2).

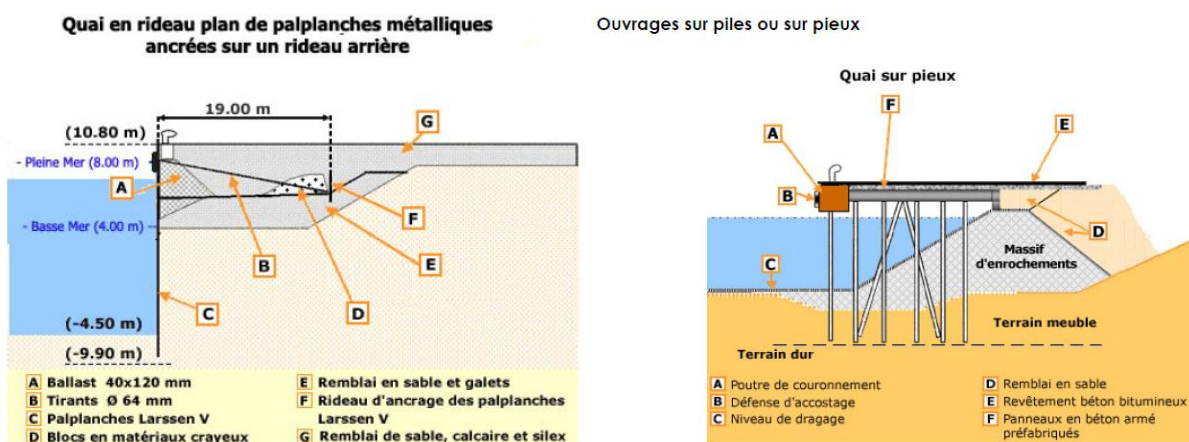


Figure 2: Constitution des quais en rideau (palplanches) ou quais sur pieux.

Les surcharges sont de plusieurs types: surcharges routières et de poids lourds de l'ordre de 10 à 20 kN/m², une grue mobile, un stockage containers de 4 à 10 t/m² ou un stockage en vrac (figure 3).

Les objectifs en termes de tassements sont souvent très faibles, de l'ordre de quelques centimètres.

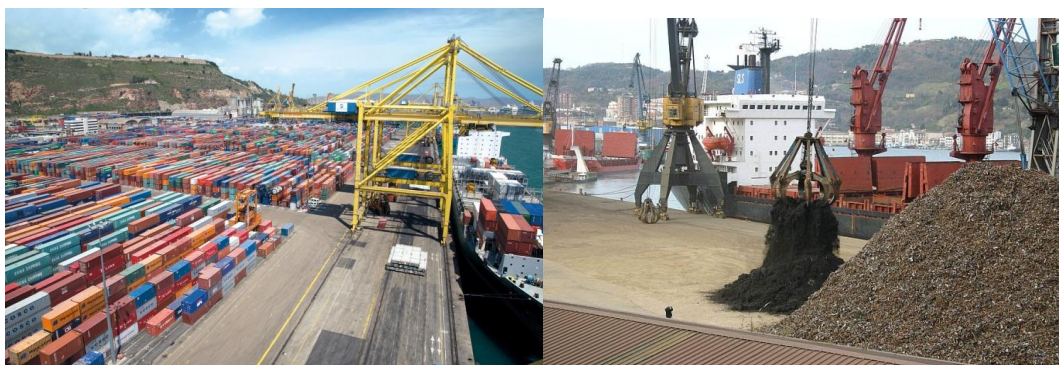
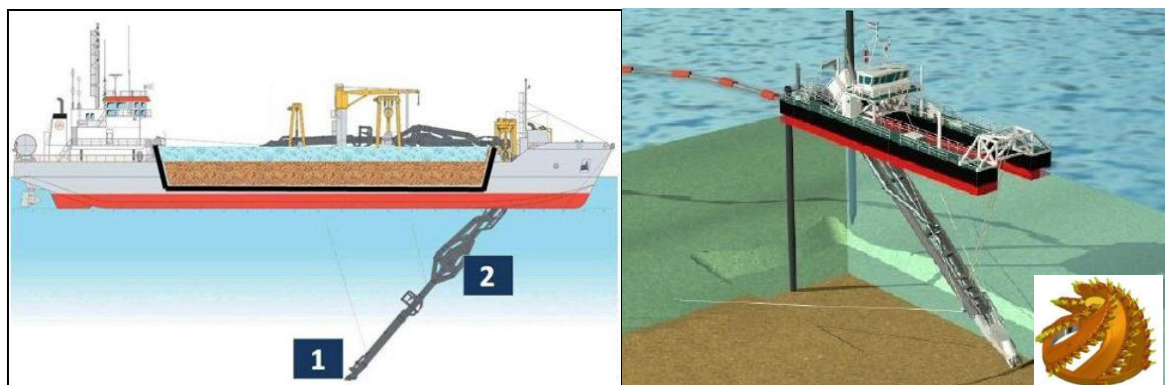


Figure 3: Différents types de surcharges appliquées à l'arrière des quais.

3. Matériaux de dragage

Un approfondissement du fond marin par dragage pour le passage des bateaux est en général réalisé et peut permettre de disposer facilement d'une grande quantité de matériau pour le remblaiement du terre-plein. Les 2 types d'engins les plus courants pour le dragage sont la drague aspiratrice en marche et la drague suceuse à désagrégateur.



Drague aspiratrice

Drague suceuse à désagrégateur

Figure 4 : Exemple de dragues

Une campagne de reconnaissance préliminaire doit permettre d'identifier la nature des sols des zones à draguer afin de vérifier leur aptitude à être réutilisés. Les sondages carottés sont à privilégier, à compléter par des profils réalisés au pénétromètre statique ou CPT.

Les sols devront ensuite être classés en 3 grandes familles en donnant le pourcentage de présence par sondage:

- Famille A: sol cohésif constitué généralement de limon, d'argile ou de vase,

- Famille B: sable limoneux,
- Famille C: sable propre.

Il est également très important de déterminer le pourcentage de débris coquilliers car ces éléments réduisent les caractéristiques de compacité.

A partir de cette analyse les zones de prélèvement peuvent être définies en privilégiant les zones où la famille C est dominante, éventuellement la famille B. La famille A par sa durée importante de consolidation et sa compressibilité est à écarter.

Sondages de la zone étudiée	FAMILLE A		FAMILLE B		FAMILLE C	
	Epaisseur (m)	% de la formation	Epaisseur (m)	% de la formation	Epaisseur (m)	% de la formation
SC						

Figure 5 : Exemple d'analyse permettant de définir la répartition des différentes familles en % par zone.

Une autre difficulté réside dans l'estimation du pourcentage de fines (passant à 80 μ) après la mise en œuvre au niveau du terre-plein. Elle peut être obtenue à partir de l'analyse précédente et en considérant un abattement de quelques pourcents liés au délavement provoqué par les opérations de dragage.

4. Procédés d'amélioration et de renforcement de sol

Lorsque le remblaiement du terre-plein sur la mer est achevé, les caractéristiques mécaniques des matériaux sableux ne peuvent être que très faibles de par leur mise en œuvre et sont de plus sous-consolidés notamment sur les 6 à 8 premiers mètres. Il n'est donc pas possible d'envisager la réalisation de fondations superficielles pour les appareils portuaires avant que des tassements pluri-décimétriques ne soient apparus. En zone sismique, les matériaux sableux lâches sont de plus liquéfiables.



Figure 6 : Situation avant et après un remblaiement des terre-pleins.

Une amélioration ou un renforcement de sol est en général indispensable pour permettre d'augmenter la portance, réduire les tassements et le risque potentiel de

liquéfaction (en zone sismique). Les efforts de poussée sur le mur de quai sont réduits par la même occasion.

La technique d'amélioration de sol dans la masse est en premier lieu étudiée car très performante et la plus économique mais étroitement liée à la granulométrie du sol à traiter. Les performances les plus élevées en terme de compacité sont atteintes dans les sols sans cohésion (sables, sables et graviers) traités par des techniques vibratoires (vibro-compactage, compactage dynamique, compactage par Induction Hydraulique®).

La détermination du pourcentage de fines peut se faire par des analyses granulométriques effectués sur des échantillons issus de sondages carottés ou par corrélation avec le pénétromètre statique ou CPT.

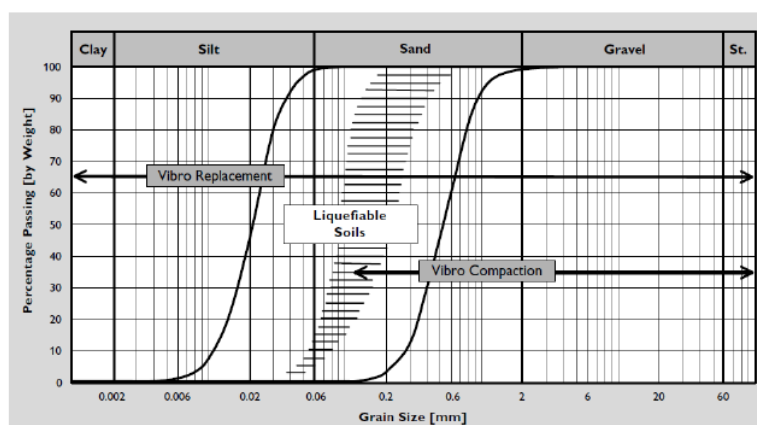


Figure 7 : Domaine d'application des procédés vibratoires (Priebe 1998).

Massarsch 1991 a proposé des critères basés sur les valeurs du pénétromètre statique pour déterminer les zones compactables et non compactables sous l'effet des vibrations.

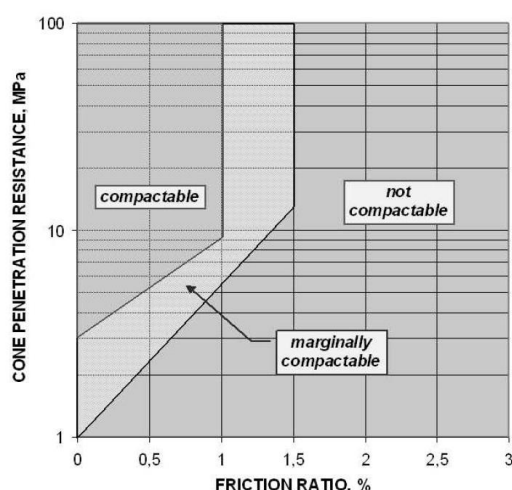


Figure 8: Compactage par vibration des sols basé sur l'essai CPT (Massarsch 1991)

Les techniques de vibration profonde (figure 9) avec un vibreur sont largement utilisées, car elles sont souvent les plus efficaces en profondeur et les plus économiques. Les équipements et les procédures sont décrits dans la norme NF EN 14731. L'avantage de la technique de vibro-compactage réside dans le fait que l'on obtient une assise d'ouvrage d'un degré de qualité très élevé et bien maîtrisé, en ayant supprimé tout risque de déformation ultérieure lors d'un séisme. La résistance en pointe au pénétromètre après amélioration peut atteindre des valeurs comprises entre 8 et plus de 20 MPa selon la nature des sables siliceux, ou carbonatés et le coefficient d'uniformité C_u de la courbe granulométrique. Un sable siliceux avec une granulométrie étalée ($C_u = D_{60}/D_{10} > 6$), atteindra très facilement des compacités élevées. La source vibratoire étant située en pointe de l'outil, l'intensité du compactage reste homogène sur toute la hauteur du traitement, à la différence du compactage dynamique où elle est forcément décroissante avec la profondeur.

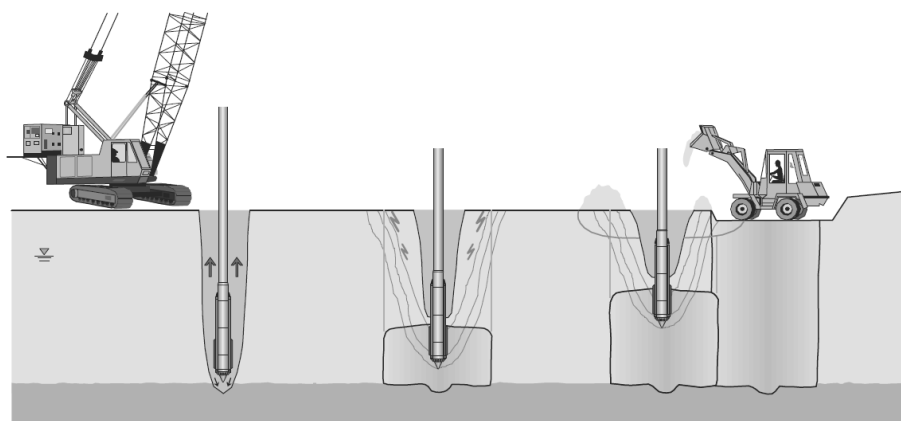


Figure 9 : Procédure d'exécution du vibro-compactage par vibreur radial.

Le domaine d'application du vibro-compactage est limité aux sols granulaires comportant très peu de fines (passant à 80 μm inférieur à 10 % environ), alors que le compactage dynamique du fait de l'effet de compression instantané généré par la chute de la masse, a un domaine d'utilisation qui s'étend aux sols limoneux.

Par contre pour les sols cohésifs, les vibrations n'ont que très peu d'effet sur les augmentations de caractéristiques mécaniques, surtout en présence d'eau. Dans ce cas, il faudra plutôt privilégier les procédés qui favorisent la compression des sols (injection solide, colonnes ballastées, préchargement avec ou sans drains). Les augmentations de caractéristiques mécaniques resteront cependant très en deçà des compacités que l'on peut atteindre avec des matériaux pulvérulents.

Lorsque cette augmentation de compacité est insuffisante ou lorsque les sols sont hétérogènes (alternance de lentilles sableuses et sablo-limoneuses), il faudra s'orienter alors plutôt vers des techniques qui combinent les vibrations et le refoulement (par exemple colonnes ballastées, plots ballastés, injection solide vibrée).

Une estimation de l'augmentation de la compacité en fonction du pourcentage de fines (passant à 80 microns) et du taux de substitution des colonnes ballastées est donnée dans l'abaque de la figure 10. Pour tenir compte de la profondeur, les valeurs de résistance à la pointe au pénétromètre statique q_c objectifs peuvent être divisées par le coefficient de profondeur suivant:

$$CN = \sqrt{100 / \sigma'_{vo}}$$

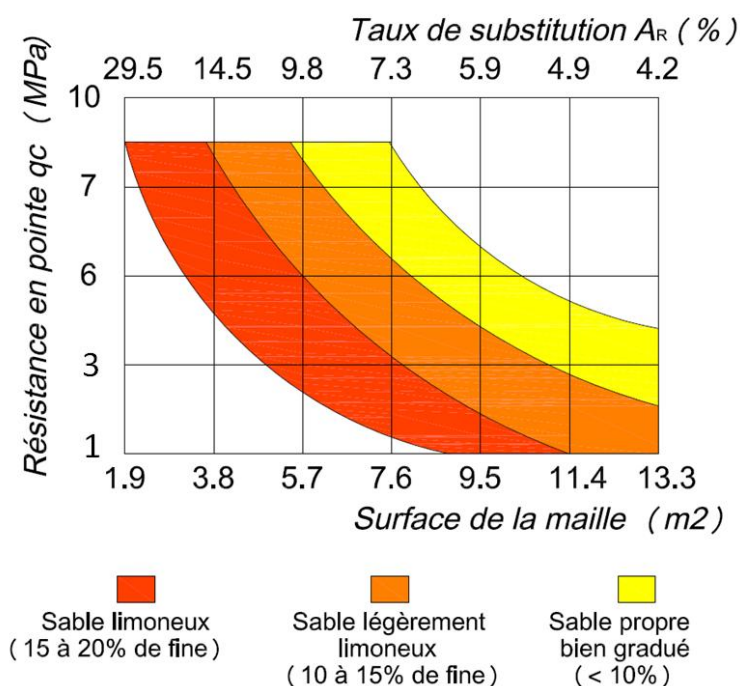


Figure 10 : Estimation des objectifs maximums en q_c après renforcement par colonnes ballastées à partir de la nature des sols et le taux de substitution $A_R = A_c/A$ (A_c section de la colonne et A surface de la maille)

A proximité d'ouvrages existants, les vibrations générées par la chute de la masse du compactage dynamique et les vibreurs de vibro-compactage de forte puissance ne sont souvent pas envisageables au voisinage d'ouvrages existants. Dans un tel contexte, il est recommandé de prévoir soit des vibreurs de vibro-compactage moins puissants vibrant à des hautes fréquences entre 40 et 60 Hz et avec des amplitudes inférieures à 1 cm, soit de proposer un renforcement de sol par injection solide. Ce dernier consiste à injecter lentement du mortier avec une ouvrabilité très faible (valeur de "slump" inférieure à 10 à l'essai d'affaissement au cône) par l'intermédiaire d'un forage de petit diamètre (10 à 15 cm), afin de comprimer le sol latéralement. Les avantages de cette technique résident dans la possibilité de travailler dans des espaces très restreints et même à l'intérieur d'ouvrages. Le forage de petit diamètre permet de traverser des horizons compacts ou des blocs, pour lesquels la technique de vibro-compactage est souvent stoppée par un refus.

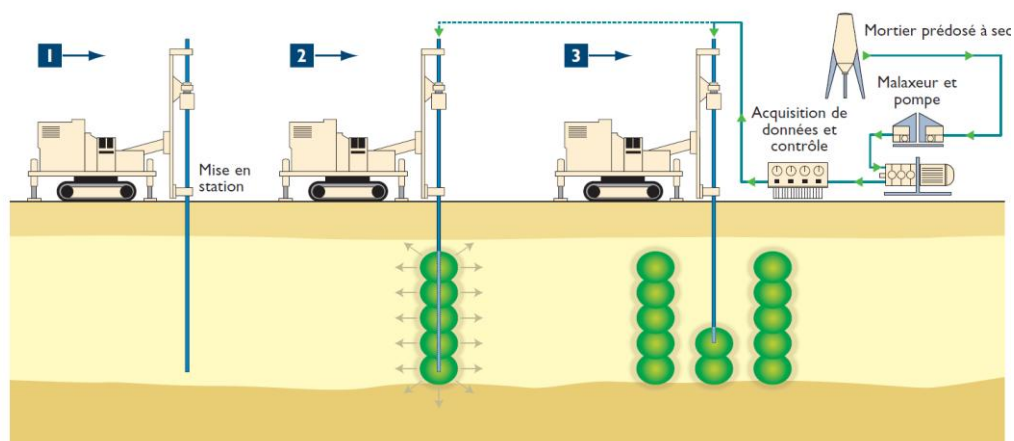


Figure 11: Procédure d'exécution de l'injection solide (Compactage Statique Horizontal CHS®).

5. Exemple de chantier: quai des Avisos en Martinique

Le projet consiste à réhabiliter un quai d'amarrage pour les navires par la mise en œuvre d'un comby-wall et d'un renforcement de sol par colonnes ballastées sur le terre-plein et à l'avant du quai. L'objectif du traitement est de supprimer le potentiel de liquéfaction des sables, assurer la portance du terre-plein, limiter les tassements sous le quai et accélérer la consolidation.

Le sol est constitué sur les 4 premiers mètres de sable madréporique propre, puis des sables plus ou moins limoneux avec madrépores comportant quelques lentilles argileuses.

Sous les formations sableuses, une couche de tuffite argileuse au-delà de 12.60 m devenant très compacte (assise des colonnes ballastées) a été mise en évidence.

L'analyse de la figure 12 fait apparaître les augmentations suivantes:

- pour un indice de comportement I_c entre 1,31 à 2,05 (sable et sable limoneux): le vibrocompactage est très performant (fines moins de 10 %): les q_c varient de 8 à 12 MPa (q_c 8 à 10 fois plus importants que les valeurs initiales),
- pour un I_c entre 2,05 et 2,6 (sable limoneux et limon sableux 5), les fines se situent entre 10 et 15 %: les q_c ont atteints 5 à 6 MPa et ils ont été multipliés par 2 à 3,
- pour un I_c entre 2,60 et 2,95 (argile limoneuse limon argileux avec des fines entre 15 à 20 %) les q_c atteignent des valeurs de 2 à 3 MPa (q_c multiplié par 1,5 à 2),
- pour un I_c supérieur à 2,95 (argile comportant un pourcentage de fines > 20 %), aucune amélioration n'a été constatée.

Compte tenu de l'hétérogénéité des sables, une solution de colonnes ballastées de 90 cm de diamètre disposées selon une maille triangulaire de 6,45 m² a été retenue (taux de substitution de 10 % environ).

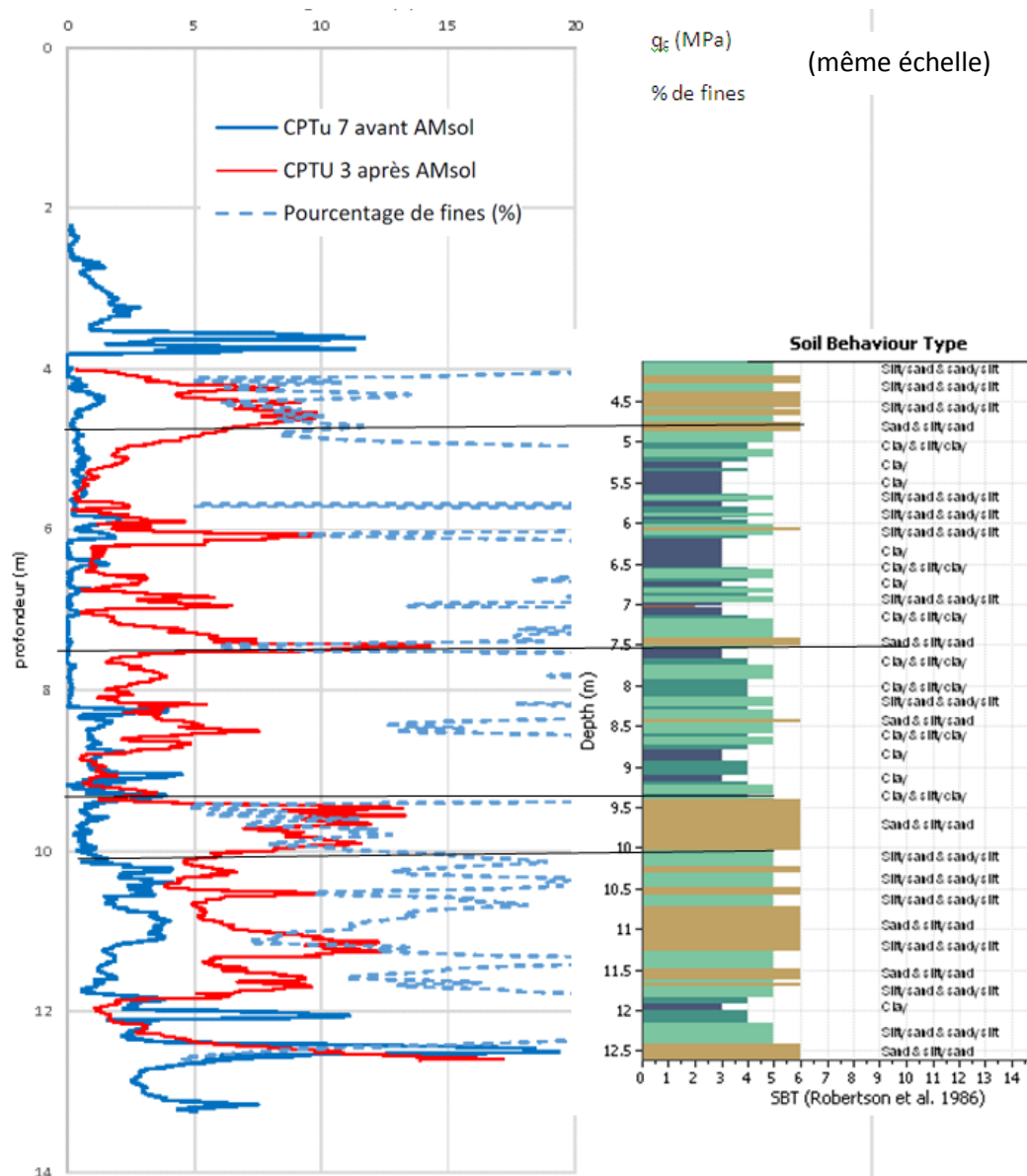


Figure 12: Profils d'essai CPT avant et après amélioration de sol



Figure 13: Amélioration de sol par colonnes ballastées on-shore et off-shore.

6. Conclusion

Les terre-pleins situés à l'arrière de mur de quai sont constitués de remblais hydrauliques issus en général du dragage en mer. Les zones de dragages doivent être sélectionnées de manière à ce que les sols prélevés comportent essentiellement des sables sans fines pour permettre une consolidation des sols. Après remblaiement, les sables déversés dans l'eau se consolide sous leur propre poids essentiellement en profondeur et très peu sur les 6 à 8 premiers mètres, surtout s'ils comportent des fines en grande proportion (état sous-consolidé). Les procédés d'amélioration ou de renforcement de sol qui favorisent les augmentations de compacité par compression et vibration sont donc à favoriser pour mieux maîtriser le comportement des remblais hydrauliques qui ne tasseront plus ainsi sous leur propre poids. Si le projet se situe en zone sismique, le fort risque de liquéfaction est par la même occasion réduit. Pour des sables comportant un passant à 80 μm inférieur à 10-12 %, le vibrocompactage est en général retenu car très efficace et économique (compactage dynamique possible mais l'effet est décroissant avec la profondeur). Pour des sables limoneux ou des sables comportant des fines en proportion très variable, un apport de matériau graveleux est alors nécessaire, mis en œuvre par refoulement. Dans le cas de la colonne ballastée, les vibrations générées par le vibreur permettent de vibrocompacter les sables propres et la colonne de gravier accélère la consolidation des sols par drainage. Ces deux procédés peuvent également être utilisés en off-shore notamment pour améliorer le sol d'assise des caissons, des quais en blocs béton ou des digues de protection.

Si les objectifs de compacité après amélioration de sol par vibrocompactage peuvent être très élevés en présence de sable propre, ce n'est pas le cas pour des sables limoneux. Les augmentations de compacité sont obtenues avant tout par compression et sont étroitement liées au pourcentage de fines et au maillage du réseau de colonnes ballastées. Un abaque a été donné pour mieux apprécier ces augmentations.

Références bibliographiques

- Al-Homoud AS and Wehr (2006) Experience of vibrocompaction in calcareous sand of UAE. Journal of Geotechnical and Geological Engineering 34(3):757-774.
- Bohn C., Lambert S.(2013) Case studies of stone columns improvement in seismic areas, 3ème Conférence Maghrébine en Ingénierie Géotechnique (3ème CMIG'13) Alger.
- Massarsch, K. R., 1991. Deep Soil Compaction Using Vibratory Probes, ASTM Symposium on Design, Construction and Testing of Deep Foundation Improvement: Stone Columns and Related Techniques, Robert C. Bachus, Ed. ASTM Special Technical Publication, Philadelphia, 1990, 23.
- NF EN 14731 Exécution des travaux géotechniques spéciaux Amélioration des massifs de sol par vibration