

Extension du port de la Condamine à Monaco Confortement des sols en place et des remblais sous-marins

H. FARHAT

Arcadis
Centre Gvio, bât. D3
Impasse Paradou
13009 Marseille
hfarhat@arcadis-fr.com

J. ROBERT

Arcadis
18, rue Troyon
92310 Sèvres
jrobert@arcadis-fr.com

P. BERTHELOT

Bureau Veritas
BP 76000
13792 Aix-en-Provence
Cedex 3
patrick.berthelot@fr.
bureauveritas.com

Résumé

Sont présentés dans cet article les techniques mises en œuvre et les résultats des améliorations des sols en place et des remblais dans le chantier de l'extension du port de la Condamine dans la principauté de Monaco. Ces techniques ont permis de maîtriser les tassements sous les caissons et, surtout, sous le caisson de culée, destiné à recevoir une digue semi-flottante.

Mots-clés : Eurocode, calcul géotechnique, norme, fondations, soutènements, états limites, facteurs partiels.

Extension of the Port of Monaco Consolidation of the existing soils and the submarines backfills

Abstract

The following paper describe the techniques as well as the results obtained from the soil improvements adapted to the existing soils and the backfills for the extension of the port of Monaco. These constructions techniques permitted us to master the soil settlement under the caissons (boxes).

Key words : Eurocode, geotechnical design, standard, norm, foundations, retaining structures, limit states, partial factors.

NDLR : Les discussions sur cet article sont acceptées jusqu'au 1^{er} mars 2006.

Introduction

L'extension du port de la Condamine, à Monaco, par la mise en place d'une digue semi-flottante de 360 m de longueur, a nécessité la réalisation d'un terre-plein, d'un hectare environ, au pied du fort Antoine.

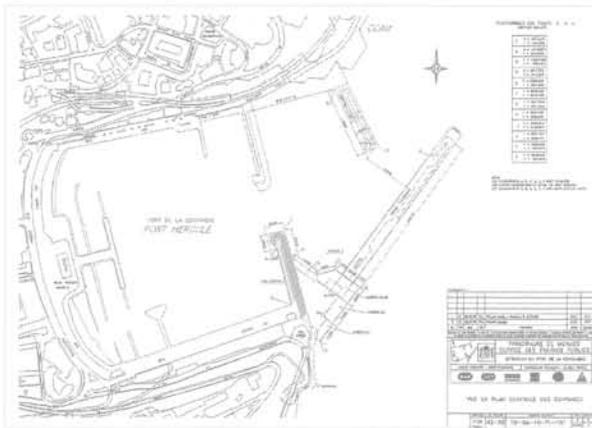


FIG. 1 Vue en plan des ouvrages.

Ce terre-plein est constitué par remblaiement, à l'abri de caissons géants, dont les hauteurs vont de 10 m à 30 m (caisson « culée »).

La mise en œuvre des caissons et du terre-plein a nécessité les travaux suivants :

- le dragage des fonds marins médiocres (vases) ;
- le remblaiement par voie maritime, jusqu'à 30 m de profondeur, soit une hauteur maximale de remblai de 18 m ;
- le vibrocompactage des remblais ;
- la pose des caissons préfabriqués ;
- l'injection solide des terrains en place, pour le caisson « culée », traitement à partir du toit du caisson par des réservations et des tubes guides spécialement aménagés ;
- le ballastage solide des caissons.

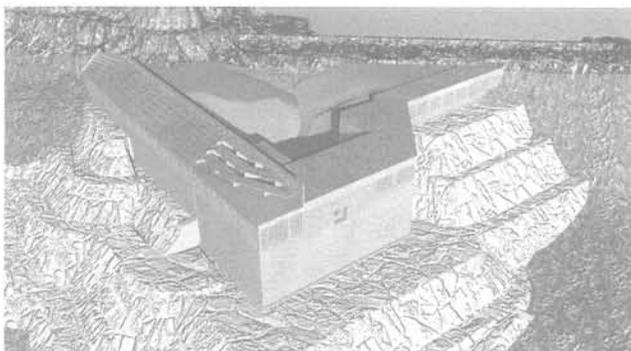


FIG. 2 Vue des remblais et des caissons (modèle numérique).

Les travaux ont démarré au début de l'année 2000. Le caisson « culée » a été posé en juillet 2001. La digue semi-flottante a été connectée en septembre 2002.

Dans ce qui suit, seront présentées les phases de vibrocompactage des remblais et de l'injection solide des sols en place.

Vibrocompactage des remblais

Aspect théorique

Il s'agit d'un serrage du matériau par vibration (Debats et Sims, 1995) et donc d'une diminution de l'indice des vides (e) et d'une augmentation de la densité relative (D_r) :

$$D_r = \frac{e_{\max} - e}{e_{\max} - e_{\min}}$$

L'évaluation de l'efficacité du traitement nécessite :

- des mesures au pénétromètre statique avant et après compactage avec utilisation des lois de corrélation entre la résistance de pointe q_c et la densité relative D_r :

$$D_r = 98 + 66 \log_{10} \frac{q_c}{\sqrt{\sigma'_{v0}}} \quad (\text{Lunne et Christoffersen, 1985})$$

- des mesures du tassement induit par le compactage :

$$\frac{\Delta H}{H} = \frac{\Delta e}{1 + e_0}$$

Description et résultats du traitement

Les remblais sont constitués d'un matériau en concassé calcaire de granulométrie 20/180 mm. La hauteur maximale du remblai à traiter est de 18 m. La technique de vibrocompactage est normalement utilisée dans des matériaux plus fins : sables, sables et graviers. Compte tenu du manque d'expérience pour ce type de matériaux et de la grande hauteur de remblais à traiter, il était indispensable de valider cette technique dans une planche d'essai sur terre. Et ce, d'autant plus, que les essais de contrôle avant et après traitement sur site sont très onéreux.

La planche d'essai

Fouille remblayée de 10 m x 20 m et 11 m de profondeur ;

Vibreux : aiguille V23 ; poids 22 kN ; diamètre : 35 cm ; remontée par passes de 0,5 m ;

Maille de traitement : maille triangulaire 3,1 m x 3,1 m.

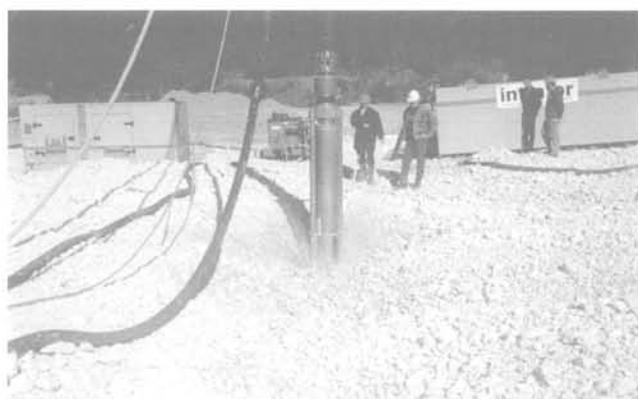


FIG. 3 Planche d'essai, vibreur V23.

Résultats des essais avant et après traitement	Avant	Après
Résistance de pointe q_c	2 à 3 MPa	7 à 20 MPa
Densité relative D_r	42 %	76 %
Tassement		93 cm (8,45 %)

2.2.2

Le chantier

- Traitement à partir d'une barge flottante (Fig. 4) ;
- Même maille triangulaire que la planche d'essai ;
- Implantation des points de traitement par DGPS ;
- Mesures des niveaux de plate-forme avant et après par bathymétrie de précision (plusieurs passages au droit du même profil).

Résultats ont donné :

- un tassement de 6 à 9 % ;



FIG. 4 Vibrocompactage en mer et clapage.

- des mesures par pénétromètre statique à partir du caisson culée : $q_c = 5$ à 50 MPa.

Les valeurs très élevées de q_c peuvent être expliquées par le fait que les mesures ont été effectuées après la phase d'injection solide.

Le vibrocompactage a permis la pose des caissons en toute sécurité. Son efficacité a été confirmée lors de la phase suivante de traitement par injections solides.

3

Injections solides

3.1

Description de la technique

La technique, apparue en France dans les années 80 (Vezhinet *et al.*, 1996 ; Deniau et Farhat, 1997), consiste à incorporer dans le sol un mortier à haute pression (pression allant jusqu'à 5 MPa), le but étant de repousser le terrain autour d'un forage induisant ainsi un compactage horizontal. D'ailleurs, la technique est appelée également « compactage statique horizontal ».

Cette technique est bien adaptée aux terrains lâches et de forte perméabilité. En revanche dans les terrains fins, type argiles ou limons, les déformations se font à volume constant, ce qui induit des soulèvements sans compactage.

D'un point de vue théorique, les contraintes appliquées sur le terrain restent mal connues, car faisant partie du domaine des grandes déformations.

En début d'incorporation, pour des déformations dans le domaine élastique, le champ de contraintes induit par l'expansion de la cavité peut être assimilé à celui d'un essai pressiométrique. Il s'agit d'un champ déviatorique (cisaillement pur). Pour ce type de sollicitation les variations de volume se font par dilatance (terrains compacts) ou par contractance (terrains lâches).

Au-delà et à grandes déformations, il est probable que les sollicitations engendrent une augmentation de la contrainte moyenne induisant, ainsi, un compactage du terrain.

Plusieurs points d'interrogation sur les phénomènes qui accompagnent l'incorporation persistent à ce jour. Ces points méritent des approfondissements qu'il n'est pas possible de traiter dans le présent article.

3.2

Caractéristiques du traitement

Le but du traitement par injection solides était d'améliorer les caractéristiques des terrains en place et, plus particulièrement, des terrains superficiels qui n'ont pas été dragués pour des raisons d'accessibilité du bateau de dragage (zone non purgée, voir Fig. 5).

Il était prévu, également, de réaliser l'injection solide dans les remblais, déjà vibrocompactés, en guise de validation du traitement par vibrocompactage.

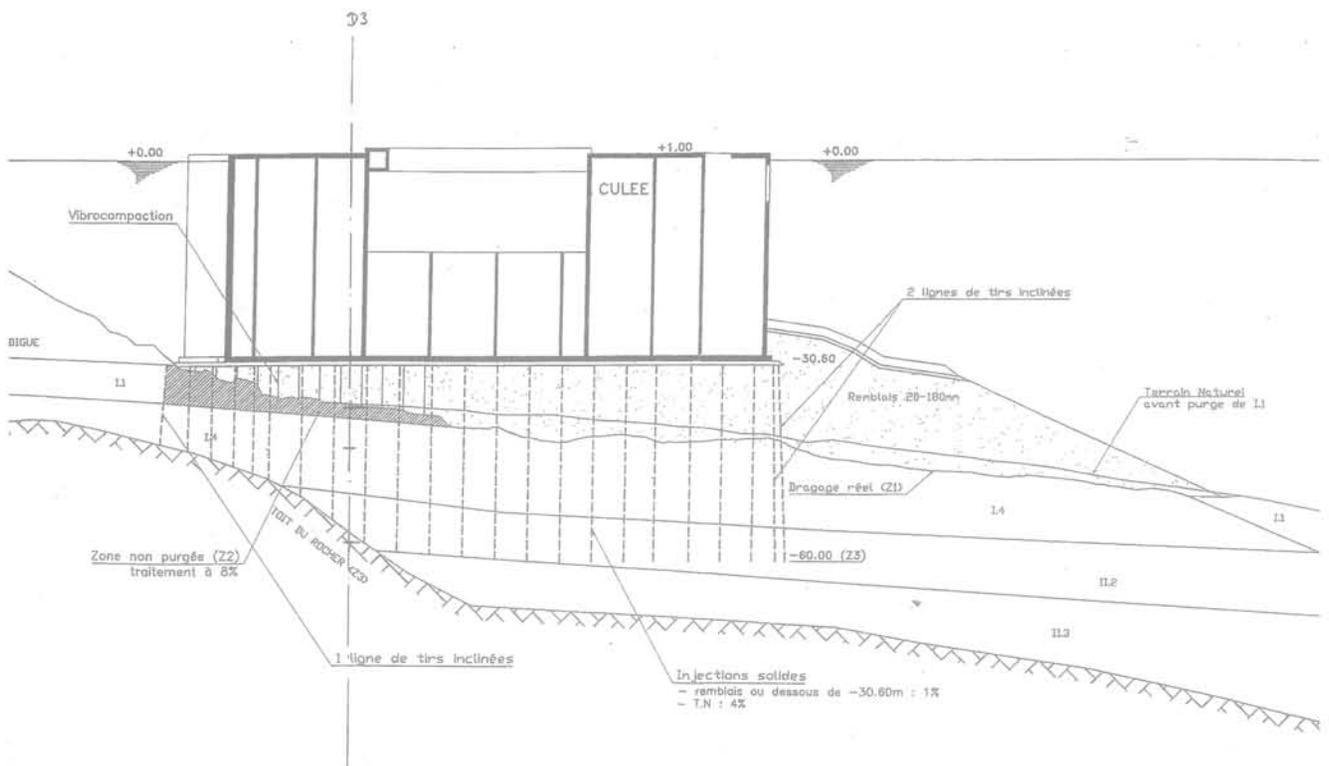


FIG. 5 Coupe géotechnique et forages d'injection solide au droit de la culée.

Les injections ont été effectuées depuis la surface de la culée (Fig. 6) à travers des réservations prévues à cet effet. La maille prévue initialement était la suivante :

- forages primaires : 4,8 m x 4,8 m ;
- forages secondaires : 3,4 m x 3,4 m ;
- forages tertiaires : 2,4 m x 2,4 m (prévus uniquement dans la zone non purgée).

La formulation du mortier et les critères de traitement (pression et volume de mortier) ont été ajustés après des essais préalables et même en cours de chantier. Sans détailler ces critères, l'efficacité du traitement a été rendue possible grâce à un suivi strict et très précis des travaux en temps réel. Les essais et les contrôles suivants ont été réalisés pendant les travaux d'injection :

- forages carottés préalables et essais pressiométriques avant et après traitement par secteur ;
- enregistrement des paramètres de forages et analyse des résultats avant injection ;
- analyse des paramètres d'injection et plus particulièrement ceux des forages primaires qui ont permis de bien caractériser le terrain et d'orienter la suite des traitements.

Ainsi ce suivi a conduit à :

- raccourcir des forages dans les zones naturellement compactes en profondeur ;
- supprimer des forages secondaires (secteurs où les forages primaires ont montré sur des hauteurs importantes des refus en pression de 3 à 5 MPa) ;
- réaliser des forages tertiaires dans les secteurs où les

forages secondaires ont donné des pressions d'incorporation inférieures à 1 MPa.

3.3

Résultats du traitement

Au total 328 forages ont été réalisés au droit de la culée, dont :

- 181 forages primaires ;
- 102 forages secondaires ;
- 45 forages tertiaires ;



FIG. 6 Injections solides à partir de la surface de la culée.

- Avec les taux d'incorporation suivants :
- 1,47 % dans les remblais vibrocompactés ;
 - 5,89 % dans les terrains superficiels médiocres non purgés : vases, limons, blocs (faciès I.1)
 - 1,07 % dans les silts et limons (faciès I.4 et II.2).

Dans les remblais, les volumes incorporés se concentrent en surface immédiatement sous le radier du caisson. Il s'agit, par endroits, de petits vides localisés dus à des irrégularités dans la surface du remblai. Les injections ont donc permis de combler ces vides et d'assurer un bon contact du radier au terrain. Ailleurs, dans les remblais, les volumes incorporés sont restés négligeables ce qui prouve l'efficacité du vibrocompactage réalisé en phase précédente.

C'est dans les terrains médiocres non purgés que les taux d'incorporation ont été les plus élevés, et c'est dans ces terrains que l'amélioration des caractéristiques mécaniques a été la plus sensible.

On constate, dans les essais pressiométriques, qu'aucun module n'est inférieur à 8 MPa et qu'aucune pression limite n'est inférieure à 1 MPa. Ces deux valeurs sont très significatives, car il est souvent constaté, dans les chantiers d'injection solide, que le module, dans les terrains médiocres après traitement, est souvent aux alentours de 8 MPa. Autre constatation, la pression limite de 1 MPa constitue une limite au-delà de laquelle des montées brusques en pression et donc des refus sont constatés pendant l'incorporation.

L'analyse à rebours des tassements mesurés du caisson culée, en prenant en compte les phases réelles de traitement et de ballastage, montre que le module élastique des terrains superficiels (module œdométrique) peut être estimé de l'ordre de 5 MPa avant traitement et de 15 MPa après traitement. Ces deux valeurs sont en concordance avec les valeurs des essais *in situ* (Tableau I).

TABLEAU I Caractéristiques mécaniques des terrains médiocres non purgés mesurées *in situ*.

	Avant traitement	Après traitement
Résistance de pointe q_c	Environ 2 MPa	3 à 10 MPa
Modules pressiométriques	de 3,5 à 8,9 MPa	8,2 à 10,1 MPa
Pressions limites	de 0,86 à 1,44 MPa	1,06 à 1,54 MPa

4

Tassements des ouvrages

La figure 7 donne, sur le plan des ouvrages, les valeurs de tassement mesurées fin août 2003. Elle indique également les valeurs estimées par calcul.

On constate que :

- pour le caisson culée (C30), dont la position finale était primordiale pour la connexion de la digue semi-flottante, les tassements mesurés sont du même ordre que ceux calculés. La cote finale au droit de la digue est à + 1,03 NGM pour + 1,00 prévue au projet. Cette différence de 3 cm intègre à la fois la précision sur le nivellement de l'assise du caisson (sous 30 m d'eau) et celle sur le tassement prévisible pris en compte dans le calage en surélévation de la plate-forme. Il s'agit donc d'une excellente prévision ;

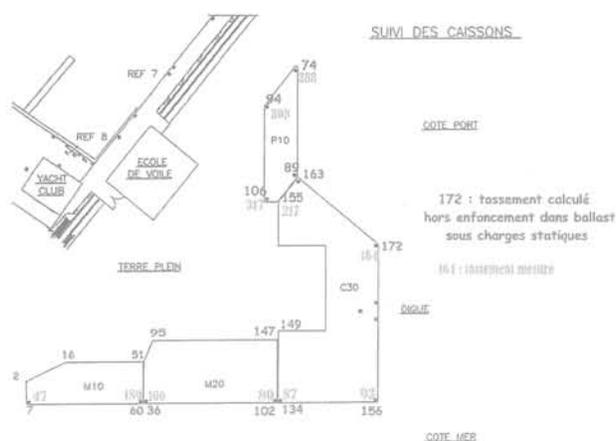


FIG. 7 Valeurs de tassement (en mm).

- pour les caissons P10 et M10, les tassements réels sont supérieurs aux tassements calculés. Les tassements du caisson M10 ont été aggravés par plusieurs tempêtes. Or, les tassements calculés de la figure 7 sont simplement ceux déduits des charges statiques. Les calculs sous l'effet de houle donnent un tassement supplémentaire de 10 à 30 mm. Concernant le caisson P10, il est probable que les caractéristiques des terrains sous-jacents et, surtout, ceux du corps de l'ancienne digue ont été surestimées.

Les courbes de tassement à fin août 2003 confirment la stabilisation des caissons.

5

Conclusion

Les travaux de confortement décrits dans cet article ont été réussis grâce à la maîtrise de toutes les étapes du projet. Au stade des études préalables, le choix des techniques de confortement des sols est une étape délicate, car ces techniques dépendent de nombreux facteurs : nature du sol, conditions du site, exigence en terme de stabilité et de tassement des ouvrages, etc. En phase travaux, le suivi d'exécution est primordial. Ce suivi doit être réalisé rigoureusement et en temps réel. Le chargé du suivi doit analyser quasiment tous les jours les résultats des traitements, et avoir un dialogue permanent avec l'entreprise pour évaluer ces résultats et orienter la suite des travaux.

Participants au projet

Le bon déroulement des travaux est à mettre à l'actif de tous les intervenants dans ce projet. Tout d'abord le maître d'ouvrage : le Service des travaux publics de la principauté de Monaco, qui a été réceptif aux techniques proposées par le maître d'œuvre, parmi lesquelles la technique d'injection solide qui a été largement développée dans les années 80 sur les chantiers de confortement des terrains du quartier de Fontvieille, à Monaco.

Ensuite le maître d'œuvre (Doris engineering), son conseiller en géotechnique (Arcadis-EEG Simecsol) et le contrôleur technique (Bureau Veritas).

Et, enfin, le groupement d'entreprises (Bouygues Off-Shore) et ses sous-traitants des travaux de fondations spéciales (Intrafor et Soletanche Bachy).

Bibliographie

- Debats J.M., Sims M. – La vibroflotation dans les terrains gagnés sur la mer à Hong-Kong. *Compte rendu des Premières Journées Louis Ménard*, Paris, 1995.
- Deniau A., Farhat H. – Compaction grouting for foundation stabilization. *International conference on rehabilitation of civil engineering systems*. Beyrouth, 1997.
- Lunne T., Christoffersen H.P. – Interpretation of cone penetrometer data for offshore sands. *Norwegian Geotechnical Institute Bulletin*, n° 156. Oslo, 1985.
- Vezhinet, *et al.* – Confortement du sol sous une longrine de voie de portique. *Travaux*, avril 1996.