Proceedings of the XVII ECSMGE-2019
Geotechnical Engineering foundation of the future
ISBN 978-9935-9436-1-3
© The authors and IGS: All rights reserved, 2019
doi: 10.32075/17ECSMGE-2019-0645

XVII European Conference
ECSMGE 2019
Reykjavik
on Soil Mechanics
and Geotechnical Engineering

Extension works of Port Est – Phase 2 (Reunion Island)

Travaux d'extension de Port Est – Phase 2 (la Réunion)

S. Desprez
ARTELIA Eau et Environnement – Maritime Branch, Grenoble, France

C. Peronnard
ARTELIA Eau et Environnement – Maritime Branch, Grenoble, France

D. Duvaut
Port Réunion, Le Port, la Réunion (France)

ABSTRACT: ARTELIA was the Engineer of the second step of the extension works of Port Est (Reunion Island) between 2008 to 2016 (including both design and supervision phases). The works (with a high soil structure interaction) consists in extending the quay on 160 ml, in dredging, excavating and deepening the basin, reinforcing the quay blocks basement on 515 ml and implementing railway beams for gantry cranes. So, the aim of this paper is to describe simultaneous progression of large scale geotechnical and civil engineering works, localised in a restricted area (harbour basin).

RÉSUMÉ: ARTELIA a été Maître d'œuvre de la phase 2 de l'extension de Port Est à la Réunion (conception 2008 – 2014 et travaux 2014 – 2016). Les travaux – à forte interaction sol structure - ont consisté en l'allongement du quai de 160 ml, le dragage, l'excavation et l'approfondissement de la darse, le rempiètement du quai existant sur 515 ml et des poutres de roulement des portiques à conteneurs. L'objectif de cette publication est de décrire le déroulement simultané des travaux géotechniques et génie civil de grande ampleur à l'échelle d'un bassin portuaire.

Keywords: embedded wall, dredging, capping beam, planning, gantry crane, jet grouting, soil improvement

1 INTRODUCTION

Port Réunion est l'unique port commercial de l'île de la Réunion, département français d'Outre-Mer, et assure 99% en masse des échanges (import/export) de l'île avec l'extérieur.
Il occupe deux sites :
– le port Ouest, historique, situé en centre-ville de la ville du Port,
– le port Est, récent, situé au niveau d'une zone industrielle.

Le port Est assure la majorité de l'activité commerciale et constitue la principale porte d'entrée des vracs liquides et solides, conteneurs, et divers, ainsi que quelques liaisons touristiques.
Port Est est situé sur la ligne maritime mondiale Nord – Sud (Europe – Est de l'Afrique).

Il a été mis en service en 1986, et régulièrement agrandi pour répondre aux besoins croissants de l'île :

- 1986 : Mise en service du port Est avec les quais 10 et 11
- 1993 : Mise en service des quais 14 et 15
- 1994 : Mise en service des 2 premiers portiques à conteneurs

• 1995 : Mise en service d'un troisième portique à conteneurs

• 1996 : Extension de 5ha par exondement du terminal conteneur

• 2007 : Extension et approfondissement du cercle d'évitage (400 mètres de diamètre, dragage à -16 mètres), élargissement à 160 mètres du chenal d'entrée

• 2008 : Mise en service d'un quatrième portique à conteneurs, extension de 5ha supplémentaires des terre-pleins à l'ouest de la darse conteneur.

• 2009 : Mise en service des quais 20 et 21 (terminal multi-vracs)

Pour faire face à l'augmentation du trafic de marchandises et à l'évolution de la taille des navires porte-conteneurs, la dernière phase d'extension du port a eu lieu entre 2014 et 2016.

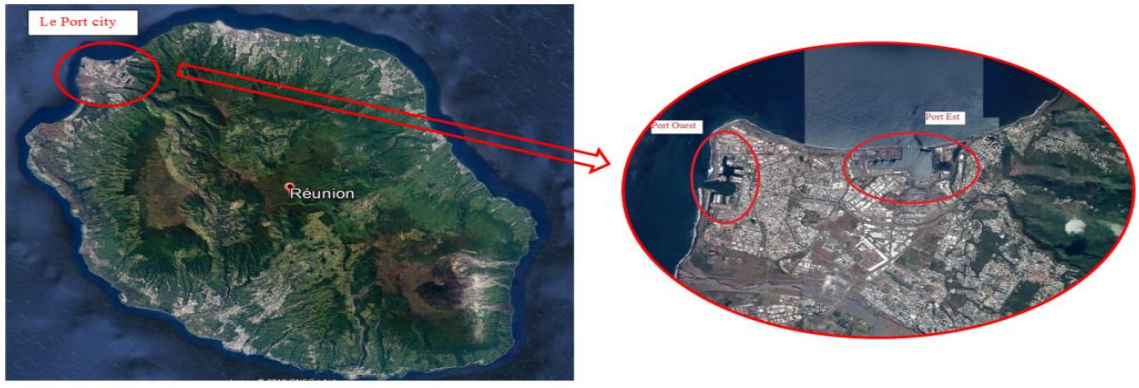


Figure 1. Localisation des Ports Ouest et Est

2 PRÉSENTATION DU PROJET

Les travaux de cette phase d'extension ont consisté en l'allongement du linéaire de quai accostable du terminal conteneurs de 160 m et l'approfondissement de 2 m (de -13,5 à -15,5 m CM) de la darse dans le but d'accueillir simultanément 2 navires porte-conteneurs de 300 m. De plus, en cours de travaux, il a été nécessaire de prendre en compte 3 nouveaux portiques à conteneurs sur rail ZPMC pouvant opérer des navires over Panamax de 21 rangées de conteneurs.

Les travaux ont été allotis comme suit :

- Lot 1 : Prolongement et rempiètement des quais conteneurs – Travaux de Génie Civil,
- Lot n° 2 : Dragage, terrassements,
- Réalisation de la voie de roulement arrière des portiques à conteneurs ZPMC.

L'ensemble des travaux d'extension de Port Est Phase 2 s'est déroulé sous exploitation portuaire, en communication constante avec les services de la capitainerie afin de minimiser l'impact des travaux sur l'activité du port.

La prestation d'Artelia Eau & Environnement est une mission complète de Maître d'œuvre : conception (2008 - 2014) et réalisation (2014 - 2016).

Les travaux du lot n°1 et du marché de réalisation de la voie de roulement arrière des portiques à conteneurs ZPMC ont été réalisés par le groupement Solétanche-Bachy (mandataire) / Forintech.

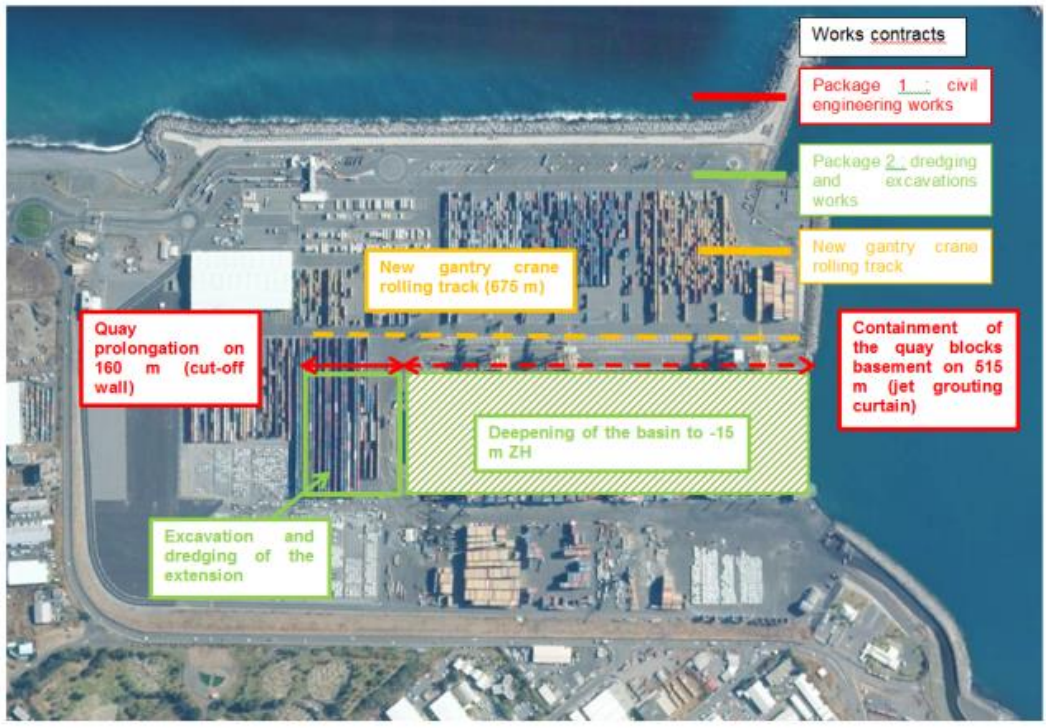


Figure 2. Consistance des travaux de l'extension

Les travaux du lot n°2 ont été réalisés par le groupement SBTPC (mandataire) / SDI (filiale DEME) / Sogea Réunion.

3 LE CONTEXTE GÉOTECHNIQUE DE PORT EST

A une échelle macroscopique, l'île de la Réunion est une île volcanique formée par un volcanisme de point chaud. Le socle rocheux (plus ou moins profond) est essentiellement constitué de basaltes. Port Est est situé sur le cône de déjection historique de la rivière des Galets, et à proximité de l'embouchure de la ravine à Marquet. Ainsi, au niveau du port, le contexte géologique est marqué par la présence d'alluvions superficielles dont la compacité croît avec la profondeur, et de puissance variable (entre 15 et 20 m), surmontant un substratum basaltique. On notera la présence sporadique de coulées boueuses conglomératiques et cimentées très compactes, rencontrées lors de la phase 1 des travaux d'extension, et une seule fois lors des reconnaissances de la phase 2 sur une fine passée (0.5 m d'épaisseur) qui n'a pas impacté les travaux.

La géométrie et la profondeur des ouvrages de la phase 2 concernent essentiellement les alluvions, subdivisées en 2 catégories :

- Les alluvions moyennement compactes (notées par la suite AMC)
- Les alluvions compactes (notées par la suite AC)

Il s'agit d'alluvions à galets et blocs (ponctuellement métriques) dans une matrice sablo-graveleuse. Les AMC et AC possèdent des caractéristiques pressiométriques élevées (2 à 3 MPa dans les AMC) à très élevées (> 7 MPa dans les AC).

Ces alluvions présentent également une cohésion apparente respectivement de 40 et 70 kPa (provenant d'essais de cisaillement), dite « cohésion d'enchevêtrement » ayant fait l'objet d'études spécifiques, et dont l'origine serait un enchevêtrement chimique dû au caractère volcanique des éléments basaltiques ayant subi l'érosion de la rivière des Galets et de la ravine à Marquet.

Le tableau ci-dessous présente les caractéristiques géotechniques moyennes rencontrées sur la darse de Port Est issues de la campagne de reconnaissances G2-AVP.

Tableau 1. Paramètres géotechniques des AMC et AC

Formation	Poids volumique apparent γ	Poids volumique effectif γ'	Cohésion apparente C	Angle de frottement interne ϕ'	Pression limite nette Pl*	Module pressiométrique E_M
AMC	21 kN/m3	11 kN/m3	40 kPa	35°	2.2 MPa	20 MPa
AC	25 kN/m3	15 kN/m3	70 kPa	40°	8.0 MPa	110 MPa

4 LES TRAVAUX DE REMPIETEMENT DE QUAIS EXISTANT

Le quai est constitué d'un empilement de blocs béton évidés initialement remplis de ballast reposant sur un matelas en petits enrochements 30/60 mm, ce qui assure la stabilité d'ensemble par le poids du système. La figure 3 présente une coupe de principe du quai conteneurs en blocs avant travaux.

En référence à la Figure 2, et du fait de l'approfondissement de la darse (côté conteneur uniquement soit côté Nord), le rempiètement de 515 ml de quais a été nécessaire, le quai étant initialement fondé à la cote -14,00 m CM. L'approfondissement de la darse a été réalisé à la cote -15.5 m CM (pour une cote de calcul à -16 m CM).

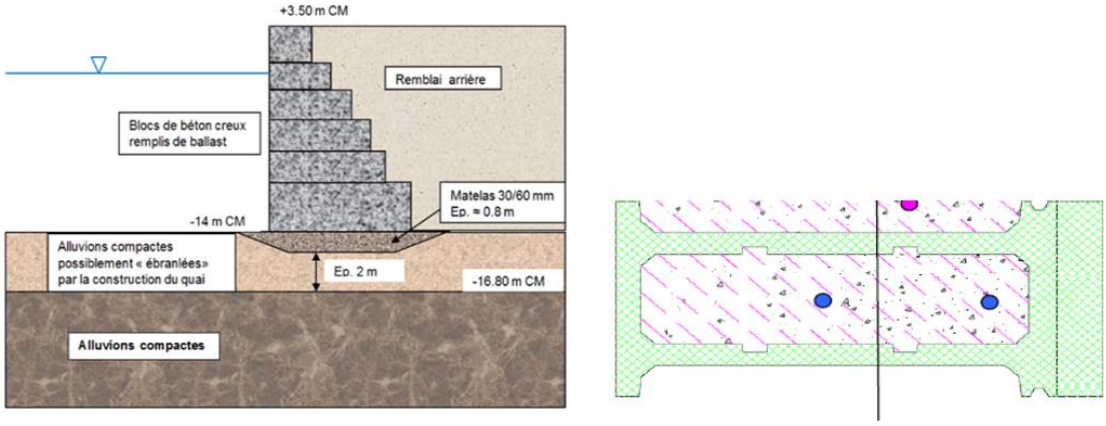


Figure 3. Coupe de principe du quai conteneurs initial et vue en plan du bloc du bas évidé

La solution de rempiètement des quais 10 & 11 a consisté en une combinaison de 2 types d'injection : un rideau de jet grouting en pied de quai afin d'empêcher le déconfinement du massif lors du dragage, et des injections de ciment gravitaires dans le bloc d'embase et dans le massif de sol naturel sous ce dernier.

En effet, compte tenu d'un remplissage des blocs décrit comme anarchique lors de la campagne de reconnaissances, le dernier bloc et le matelas 30/60 mm ont été injectés au coulis. Ces injections ont eu pour but de conférer à l'ensemble un aspect monolithique et de renforcer le matelas support en créant un massif de sol renforcé capable de reprendre les charges de poinçonnement transmises du bloc au sol support.

Les travaux de jet grouting ont fait l'objet d'une planche d'essais préalable à la phase dite « industrielle » afin de caler les paramètres comme le tempo de remontée, le dosage du coulis, la technique de pré-foration etc. Ce calage a permis de respecter l'objectif du diamètre des colonnes, issu des calculs EXE de stabilité externe du quai.

Le rideau de jet grouting ne joue pas de rôle structurel ou mécanique, sa finalité n'étant que d'assurer l'étanchéité et le confinement nécessaires en pied du mur pour éviter les fuites de matériaux et la décompression locale une fois la darse approfondie de 2m.

Les colonnes de jet grouting ont été mises en œuvre en jet simple selon un maillage de colonnes primaires et secondaires sécantes (ou « de serrage ») afin d'assurer le recouvrement entre colonnes, et ainsi garantir l'étanchéité du système comme illustré sur la figure 4.

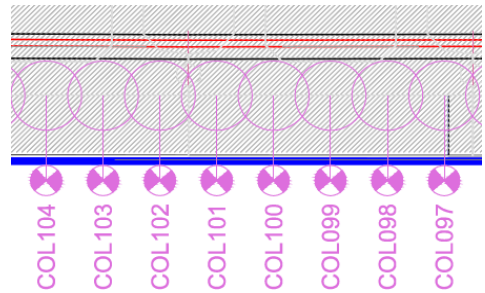


Figure 4. Vue en plan du maillage d'implantation des colonnes de jet grouting en pied de quai

Les colonnes ont été réalisées depuis le haut du quai avec l'utilisation de tube guide pour orienter le train de tige et la buse et ainsi récupérer les « spoils » (résidus de sol mélangés au coulis) par un système bord à quai.

La géométrie du rideau de rempiètement est la suivante :

- 520 colonnes de 1.25 m de diamètre et de recouvrement 0.25 m
- Colonnes de 4 m de haut (de -14 à -18 m CM)

Au bilan, la coupe de principe du quai rempiété et partiellement renforcé est illustrée sur la figure 5.

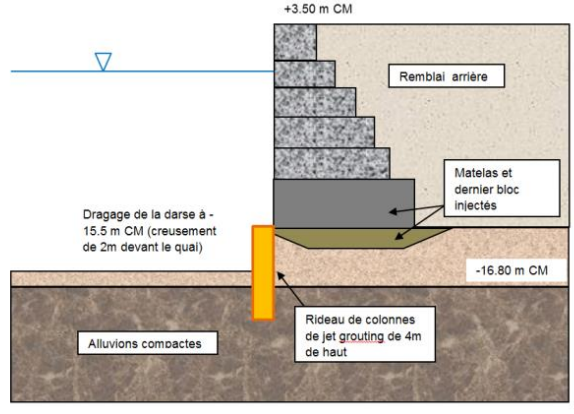


Figure 5. Coupe de principe du quai conteneurs rempiété

5 LES TRAVAUX D'ALLONGEMENT DE LA DARSE CONTENEURS

L'allongement du quai de 160 m (voir figure 2) a été réalisé par une paroi moulée dont les caractéristiques sont données ci-dessous :

- Paroi ancrée à -22 m CM totalisant une hauteur de 25.5 m et d'épaisseur 1m et réalisée par panneaux de 7m de longueur,
- Tirants forés injectés de 22,5m de long au total dont 11 m de scellement et espacés de 2.47 m.

La paroi est surmontée d'une poutre de couronnement ayant pour rôle de reprendre et linéariser les efforts verticaux et horizontaux d'accostage, d'amarrage et du portique à conteneurs.
La coupe de principe sur le figure 6 présente la paroi moulée tirantée.

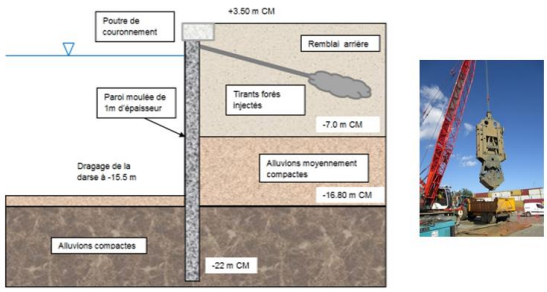


Figure 6. Coupe de principe de la paroi moulée de l'extension du quai conteneurs et benne à câbles du creusement

La paroi a été creusée dans sa grande majorité avec une benne à câbles. Un marteau pilon a été ponctuellement utilisé pour briser les blocs métriques présents dans la section de la paroi et ainsi rendre possible le passage de la benne afin d'évacuer les débris.

Une des particularités des travaux d'allongement de la darse a été le renforcement du coin de poussée d'une zone caractérisée comme étant « décomprimée ». Cette zone, de dimensions restreintes (15m de longueur par 40m de largeur sur 20 m de profondeur), est située à la limite du quai historique, à l'Ouest du quai initial. La figure 7 indique l'emplacement de la zone décomprimée avant les travaux d'extension de la phase 2.



Figure 7. Localisation de la zone décomprimée

La présence de cette zone décomprimée s'explique par le fait qu'en 1986, la construction du quai en blocs a nécessité le décaissement d'un volume de sol nécessaire à la pose des blocs du quai à la cote -14 m CM.

Une fois le mur construit, cette souille a été remblayée (sans être soigneusement compactée), pour refermer l'emprise des travaux, créant alors une zone anthropique composée de matériaux plus décomprimés.

Ainsi, avec l'objectif de maintenir les dimensions et les dispositions de la paroi moulée et des tirants, une série de refends a été mis en œuvre dans cette zone, afin d'améliorer les caractéristiques de sol « dans la masse ».
Ces refends sont composés par une série de colonnes de jet grouting sécantes, créant des panneaux intercalés entre les tirants. L'objectif a été de maintenir la même poussée des terres en augmentant la cohésion des terres en poussée, comme le montre la vue en plan des 2 premiers panneaux de la paroi sur la figure 8.



Figure 8. Renforcement par panneaux de jet grouting de la zone décomprimée



Figure 9. Dragage mécanique de la zone d'extension du quai avec une pelle sur ponton

6 LES TRAVAUX DE DRAGAGE ET D'EXCAVATION

Les mouvements de terre, objet du second lot de travaux, ont totalisé un volume de 510 000 m3 et ont consisté en :

- L'approfondissement partiel de la darse de 2 m (de -13.50 à -15.50 m CM) par dragage mécanique à hauteur de 200 000 m3,
- Des excavations par moyens terrestres à hauteur de 90 000 m3 au niveau de l'allongement du quai,
- Des excavations par dragage à hauteur de 220 000 m3 au niveau de l'allongement du quai pour compléter les excavations terrestres en dessous de la cote -7 m CM (inatteignables avec des moyens terrestres).

Les travaux de dragage ont été effectués avec une drague mécanique de type pelle sur ponton, les matériaux en présence présentaient de caractéristiques mécaniques fortes nécessitant l'emploi d'une technique de déstructuration de la matrice sablo-graveleuse, notamment du fait de la cohésion d'imbrication (voir tableau 1).

La figure 9 illustre la technique de dragage par moyens mécaniques.

7 PRISE EN COMPTE DES PORTIQUES A CONTENEURS

Les travaux d'allongement du quai ont inclus l'allongement des voies de roulement avant et arrière des portiques à conteneurs initiaux afin de leur assurer une continuité de déplacement.

Port Réunion, dans le cadre de son développement global, a par ailleurs acquis 3 nouveaux portiques de marque ZPMC de taille et de descente de charges plus importantes que les portiques Kone historiquement opérants à Port Est.

La voie de roulement avant des portiques est localisée sur la poutre de couronnement et est commune aux 2 types de portiques. En revanche leur empattement étant différent, les voies de roulement arrière sont décalées comme suit :

- Voie arrière des 3 portiques Kone à 21.50 m de la voie avant,
- Voie arrière des 3 portiques ZPMC à 30.48 m de la voie avant.

En cas de cyclone, les portiques doivent être brochés et ancrés dans des zones dédiées afin d'empêcher leur soulèvement et tout déplacement dans la direction des rails. La poutre de couronnement de l'allongement du quai supporte donc 6 portiques sur un linéaire de 160 m.

À cet effet, des « boîtes d'ancrage et de brochage » de tailles différentes les unes

des autres sont régulièrement disposées le long des 160 m de la poutre. D'autre part, des réservations sont laissées pour les bollards, les échelles d'accès, les butoirs etc. Le parement arrière de la poutre n'est pas linéaire, comme le montre la figure 10.

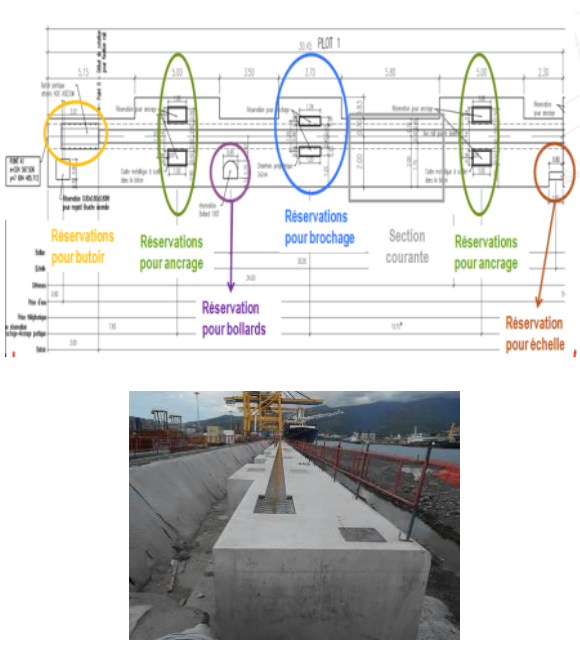


Figure 10. Réservations disposées sur un plot de la poutre de couronnement

Le calcul du ferraillage ainsi que le plan de calepinage des aciers ont dû intégrer ces nombreuses réservations, tout en assurant sa stabilité interne.

8 CONCLUSION

Les travaux de la phase 2 de l'extension de Port Est ont duré 2 ans, incluant les 2 lots (allongement de la darse conteneurs et excavation et dragage) et un nouveau marché pour la mise en place de la voie de roulement arrière des portiques ZPMC (notifié en cours de travaux du lot 1). Durant ces 24 mois, la mobilisation des équipes de la Maîtrise d'Ouvrage, de la Maîtrise d'œuvre et des entreprises a été totale afin de mener à bien ces opérations revêtant un caractère très varié, en faisant appel à différentes typologies d'ouvrages et à des techniques innovantes dans le domaine des travaux maritimes, comme le rempiètement d'un quai blocs en jet grouting en sous-marin, ou le renforcement de sol en poussée par refends.
L'ensemble des travaux a été réalisé sous exploitation portuaire, en communication constante avec les services de la Capitainerie, afin de minimiser l'impact sur l'activité du Port Est.

9 BIBLIOGRAPHIE

Solétanche Bachy France pour le GPMDLR. (2016). Dossier des ouvrages exécutés – Lot 1 – Extension de Port Est Phase 2.

Groupement SDI / SBTPC pour le GPMDLR (2016). Dossier des ouvrages exécutés – Lot 2 – Extension de Port Est Phase 2.

Solétanche Bachy France pour le GPMDLR. (2016). Dossier des ouvrages exécutés – Réalisation de la voie de roulement arrière des portiques à conteneurs – Extension de Port Est Phase 2.

Artelia Eau & Environnement (2011). Dossier d'études Avant-Projet

SEGC / Forintech. (2011). Port Réunion – Extension du Port Est Phase 2 – Etude de faisabilité géotechnique – mission de type G12.

Mascareignes Géologie. (2011). Etat des connaissances géologiques dans la zone portuaire. Synthèse établie dans le cadre de l'extension du port – Phase 2.