

ILE DE LA REUNION : LES FONDATIONS DU VIADUC DE LA NOUVELLE ROUTE DU LITTORAL

REUNION ISLAND: BRIDGE FOUNDATIONS OF NEW COASTAL ROAD

Rémy MATTRAS¹, Guillaume DANAN², Ludovic BOUCAUX³, Sophie LELIEVRE³, Frédéric DURAND³, Aurélie DELVALLEE³, Romain LEONARD⁴

¹ EGIS STRUCTURES ET ENVIRONNEMENT, Grenoble

² EGIS STRUCTURES ET ENVIRONNEMENT, La Réunion

³ STRUCTURES GEOTECHNICS, VINCI, Nanterre

⁴ DEMATHIEU BARD CONSTRUCTION, La Réunion

RÉSUMÉ – Située dans l'Océan Indien sur l'Ile de la Réunion, la Nouvelle Route du Littoral comprend sur ses 12 km de tracé neuf en mer une section en viaduc, qui avec 5400 ml de longueur sera le plus long de France en milieu maritime. Le projet, entré en phase de réalisation depuis 2014, a mobilisé des moyens hors du commun depuis la réalisation des reconnaissances géotechniques, jusqu'aux travaux de construction en mer.

ABSTRACT – On Indian Ocean island, La Réunion, « Nouvelle Route du Littoral » is a 12 km offshore road, with a 5.4 km viaduct, the longest in France. This project, whose execution began in 2014, has needed exceptional measures from geotechnical investigation to offshore building work.

1. Introduction

1.1. Présentation de l'opération

L'opération concerne la réalisation d'une nouvelle liaison sécurisée entre Saint-Denis et La Possession, en remplacement de l'actuelle Route du Littoral soumise aux aléas climatiques (houles australes et cycloniques) et physiques de la falaise (éboulements et chutes de pierres).

La solution d'aménagement est un projet maritime mixte alternant digues et viaducs entre Saint-Denis (à l'Est) et La Possession (à l'Ouest) : 3 digues (1 460 m, 600 m et 4 610 m) et 2 viaducs (5 400 m et 240 m).

Le profil en long des voies de circulation est calé au-dessus de la cote +13 m NGR pour être hors d'atteinte de la houle, et monte jusqu'à +30 m NGR sur la zone de viaduc. Le fond marin se trouve entre -5 et -10 m NGR.

Le profil en travers fonctionnel comprend sur la largeur de tablier de 28.90 m : une 2x2 voies routières avec bandes d'arrêt d'urgence, un transport collectif de type routier (bus) sur voie dédiée, et une piste bidirectionnelle dédiée aux modes doux (piétons et cyclistes).

1.2. Section en viaduc

Etant donnée la grande longueur de l'ouvrage, celui-ci est divisé en 7 tronçons indépendants d'environ 770 m chacun. Chaque tronçon comprend un appui fixe situé vers le centre, les autres piles étant équipées d'appareils d'appuis mobiles (libres longitudinalement) permettant les mouvements de tablier occasionnés par le retrait, le

fluage et les dilatations thermiques. Les extrémités des tronçons voisins de tablier reposent sur des piles culées, qui permettent les déformations longitudinales du tablier.

La portée principale est de 120 m et la longueur des travées de rive est de 84,64 m. Le tablier a une hauteur variable de 7,30 m sur pile à 3,80 m à mi-travée, pour une largeur de 28,90 m.

Les fondations superficielles des 48 piles (P1 à P48) sont constituées de semelles cylindriques de 20 m de diamètre pour les piles courantes et 23 m de diamètre pour les piles-fixes et les piles-culées.

Les 2 culées (C0 et C49) situées à chaque extrémité du viaduc sont fondées sur des pieux de 1 m de diamètre traversant les musoirs de digue, et ancrés dans le substratum rocheux.

Les travaux sont effectués dans des conditions naturelles défavorables du fait de leur situation en pleine mer, sur la côte Nord de l'île qui est particulièrement exposée aux houles. Le système de fondation est complété par une protection anti-affouillement qui a été dimensionnée et testée sur modèle physique en cuve à houle.

Les semelles de fondation reposent sur une assise granulaire afin d'obtenir un fond de fouille horizontal réglé et un matelas homogène. Une injection de mortier liquide (grout) entre la sous-face de la semelle et le dessus de l'assise granulaire permet l'obtention d'un contact parfait entre les deux.



Figure 1. Vue du futur viaduc (Lavigne et Chéron Architectes, 2012)

2. Justification des fondations

2.1. Préambule – Contexte géologique et reconnaissances antérieures à la phase EXE

L'île de la Réunion est d'origine volcanique, elle est sortie de mer il y a environ 2 millions d'années lors des éruptions successives de son volcan principal, le Piton des Neiges, qui culmine à ce jour à plus de 3000 m d'altitude. Le cône volcanique du Piton des Neiges plonge dans l'Océan Indien avec une pente régulière et se termine à l'extrémité Nord-Ouest de l'île par une falaise instable de 100 à 200 m de hauteur, composée de coulées basaltiques intercalées de scories et niveaux de paléosols, par nature friables. Cette

hétérogénéité est à l'origine des nombreuses instabilités rocheuses et éboulements qui menacent la route actuelle lors des épisodes pluvieux importants.

Le projet est situé en pied de cette falaise, en mer, et dans la zone d'érosion soumise aux houles australes. On retrouve dans l'axe du projet des sols hétérogènes composés de sables, galets et blocs, de compacité et d'épaisseur variables (5 à 20 m en général), recouverts en surface d'une couche de sables lâches de 2 à 5 m d'épaisseur moyenne, régulièrement remaniés par la houle.

Les reconnaissances géotechniques de la zone du viaduc ont été lancées lors des études d'APS au début des années 2000. Elles ont nécessité des moyens spécifiques et se sont étalées sur plusieurs années : environ 40 sondages géotechniques carottés ou pressiométriques de 20 à 40 m de profondeur réalisés en mer à l'aide d'une plateforme jack-up, et 20 km de reconnaissances géophysiques par sismique réfraction selon la technique de flûte trainée.

Dans le cadre du marché de travaux, le Groupement Constructeur a réalisé une campagne spécifique de sondages au droit de chaque fondation en vue de justifier de manière détaillée le dimensionnement et les dispositions constructives à employer.

2.2. Reconnaissance par appui

Dans un premier temps, la totalité du tracé du viaduc a fait l'objet d'une reconnaissance géophysique par flûte trainée sur une bande élargie, avec pour objectif de définir les épaisseurs de sables lâches en surface, ainsi que la stratigraphie jusqu'au substratum, en couplant les analyses en ondes P (sismique réfraction) et ondes S plus discriminantes sous eau (méthode MASW).

Ensuite, au droit de chaque appui, 7 sondages sont réalisés depuis une plate-forme jack-up équipée, ils sont disposés de manière à couvrir au mieux toute la surface de la future fondation :

- 1 sondage carotté et 1 sondage destructif avec essais pressiométriques sont réalisés avec pénétration d'au moins 3 m dans le substratum et un minimum de 10 m et un maximum de 1.5B depuis la base de la semelle,
- 5 sondages au pénétromètre statique CPT-u menés jusqu'au refus ($Q_c = 50 \text{ MPa}$).

Ce programme systématique est adapté au droit des singularités géologiques où affleurent le substratum ou d'anciens éboulements : suppression des sondages CPT, et remplacement par un sondage profond supplémentaire.

Les échantillons prélevés sur les sondages carottés font l'objet d'essais en laboratoire.

2.3. Modèle géotechnique

Afin de définir le modèle géotechnique appui par appui pour les calculs de fondations, les essais géotechniques (CPT, sondages et essais pressiométriques, carottages et essais de laboratoire) et géophysiques sont interprétés et synthétisés en intégrant les données issues des campagnes précédentes.

A l'issue de cette synthèse, des coupes synthétiques transversales et longitudinales sont établies au droit de la future fondation, et le niveau de fondation de la semelle est défini. En effet, les descentes de charges importantes au droit de chaque appui (charge verticale en service de l'ordre de 100 000 à 150 000 kN, chargement externe de houle, choc de bateau ou séisme) induisent des niveaux de contrainte élevés sur le sol de fondation, avec des contraintes de référence de plus de 1 MPa aux ELU, et 700 kPa aux

ELS, et donc la recherche d'un horizon porteur suffisamment résistant (pression limite $P_i > 2 \text{ MPa}$, Module Pressiométrique $E_m > 20 \text{ MPa}$).

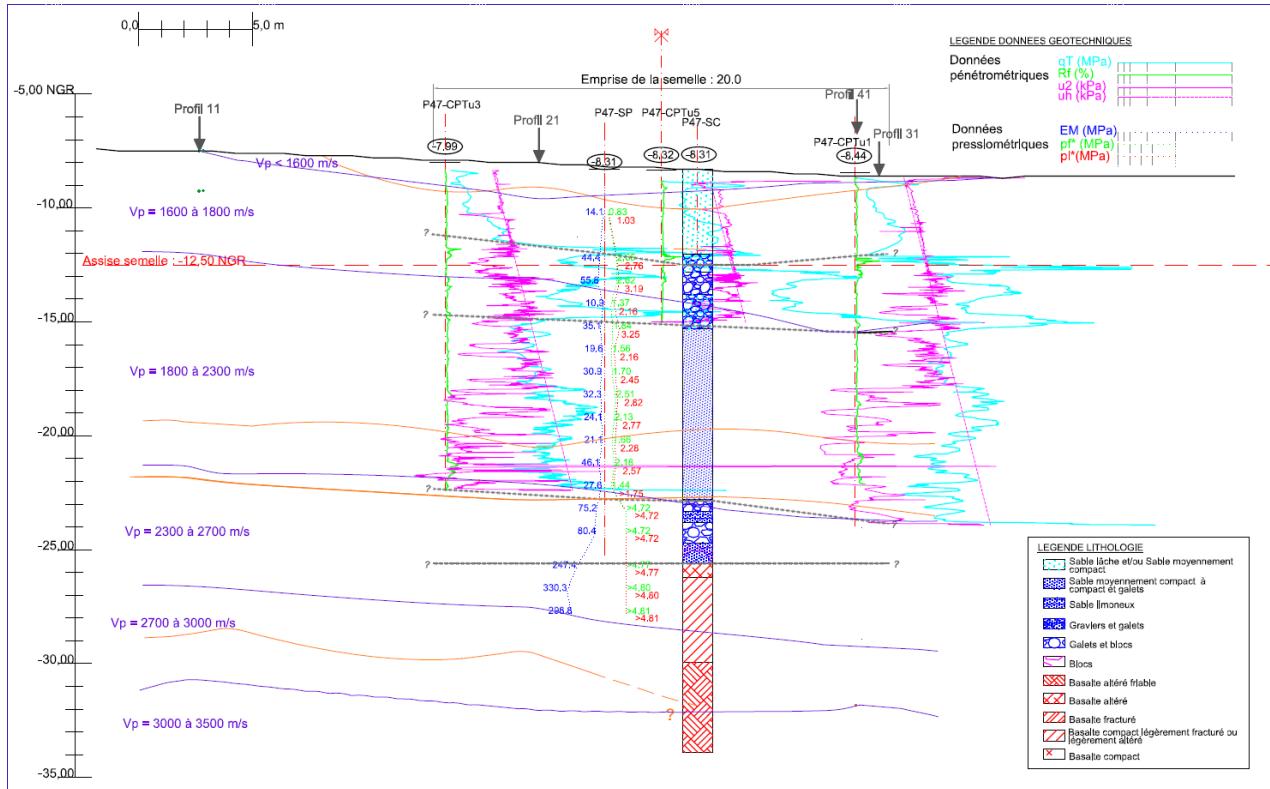


Figure 1. Exemple de profil en travers géotechnique – pile P47

2.4. Calculs d'exécution

A partir du modèle géotechnique ayant permis de définir le niveau d'assise de la fondation, les calculs d'exécution ayant pour but de valider le diamètre de la semelle se découpent en deux volets :

- Justifier la fondation en portance pour l'ensemble des sollicitations (en service et accidentelle sous houle cyclonique et choc de bateau, sous séisme) calculées par Interaction Sol-Structure à partir des raideurs préalablement fournies. La portance est justifiée analytiquement par l'approche pressiométrique et en prenant en compte l'excentrement et l'inclinaison significatifs des charges sous houle cyclonique et en cas de choc de bateau.
- Déterminer les matrices de rigidité (raideurs verticales et horizontales, et raideurs à la rotation) pour permettre au BE Structure de réaliser l'analyse du viaduc en Interaction Sol-Structure. Les raideurs sont calculées analytiquement, en utilisant la norme NF P 94-261, mais adaptée compte tenu de la présence d'un substratum rigide à faible profondeur sous la semelle : les formules de Gazetas (Gazetas, 1990) sont utilisées, en considérant un modèle bicouche (épaisseur finie de sol déformable sur horizon peu déformable). La raideur verticale est déduite d'un calcul du tassement de type Boussinesq uniquement dans les couches granulaires déformables. En cas de pendage significatif du toit du substratum, des valeurs de raideurs en fourchette sont fournies au BE Structure pour en estimer l'impact sur l'ouvrage.

La plupart des appuis reposent sur un sol à matrice sableuse, dont le comportement sous sollicitation cyclique du fait de la houle a été jugé satisfaisant lors des études, la part

cyclique des efforts de houle étant très faible en rapport du poids de la structure, et les terrains en question présentant une forte compacité.

La justification des pieux des culées est plus classique, et suit les règles énoncées dans la norme NF P 94-262.

2.5. Cas particuliers

2.5.1. Validation des méthodes analytiques par modélisation numérique

En cas de conditions géotechniques éloignées des limites de validité des méthodes analytiques de calcul des raideurs (conditions de pendages ou d'épaisseur inadaptées), un calcul numérique en 3 dimensions est mené à l'aide du logiciel Plaxis 3D afin de vérifier la capacité portante et/ou le comportement de la semelle sous sollicitations verticales et inclinées associées à des moments de renversement. Les raideurs fournies analytiquement peuvent ainsi être validées ou le cas échéant corrigées.

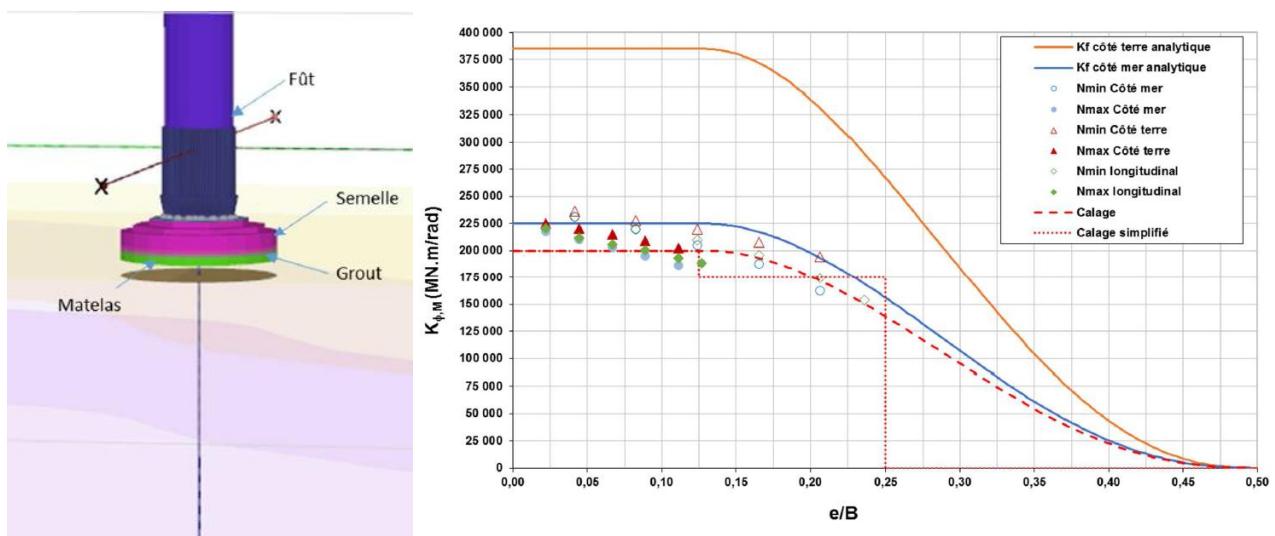


Figure 2. Modèle de calcul Plaxis 3D, et validation de la raideur sous appui par modélisation numérique, pour différents cas de charge et rapport e/B

2.5.2. Amélioration du sol de fondation

La campagne géotechnique complète a montré que 11 appuis connaissent une forte épaisseur de sables de compacité insuffisante, et nécessitent une amélioration du sol de fondation par vibrocompactage. Les modalités du traitement par vibrocompactage sont alors déterminées :

- Définition de la solution d'amélioration de sol par vibro-flottation, avec ou sans incorporation, complétée éventuellement par un approfondissement et/ou un élargissement de la semelle,
- Quantification de l'amélioration des caractéristiques mécaniques des couches traitées et son impact sur le dimensionnement de la semelle (raideurs et portance) par une approche analytique.

La solution d'amélioration est définie en utilisant les critères de granulométrie et la caractérisation au CPT des sols à traiter :

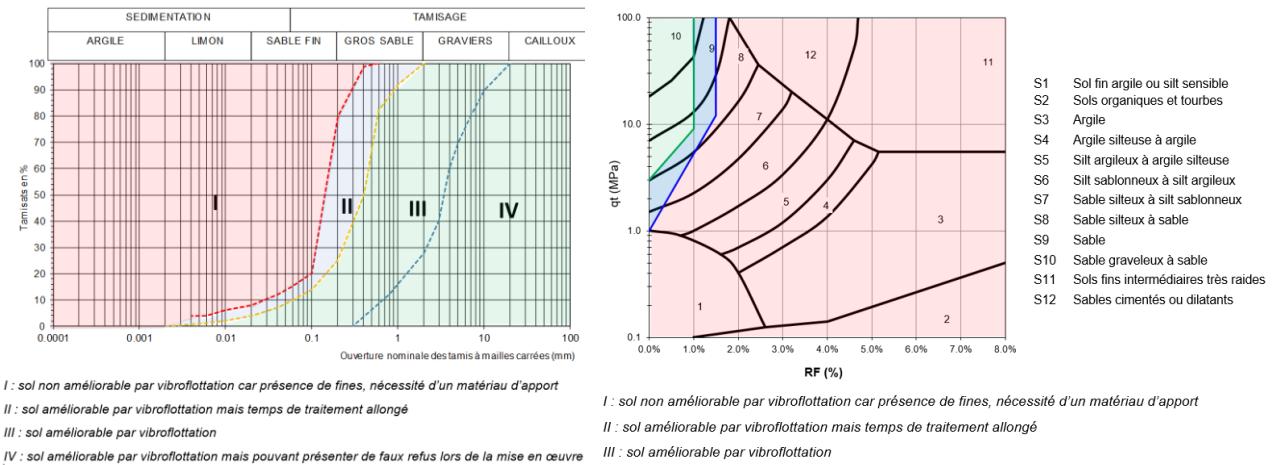


Figure 3. Détermination de la méthode d'amélioration de sol selon les critères granulométrique et CPT (Robertson, 1986)

La qualité de l'amélioration est ensuite contrôlée sur chaque appui par la réalisation de sondages CPT-u effectués à l'aide d'un bâti CPT immergé présent en permanence sur le ponton depuis lequel la vibrofrottage est réalisée, et directement posé sur le fond marin lors des essais de contrôle.

2.5.3. Forte hétérogénéité, présence de blocs ou remontée du substratum rocheux

En présence d'une forte hétérogénéité sous la semelle (gros bloc ne pouvant être extrait ou assise hétérogène), les cas de charge significatifs sont étudiés numériquement par un modèle en 3 dimensions et une analyse en stabilité (c-phi réduction), dans le but de valider la capacité portante et le comportement de la fondation.

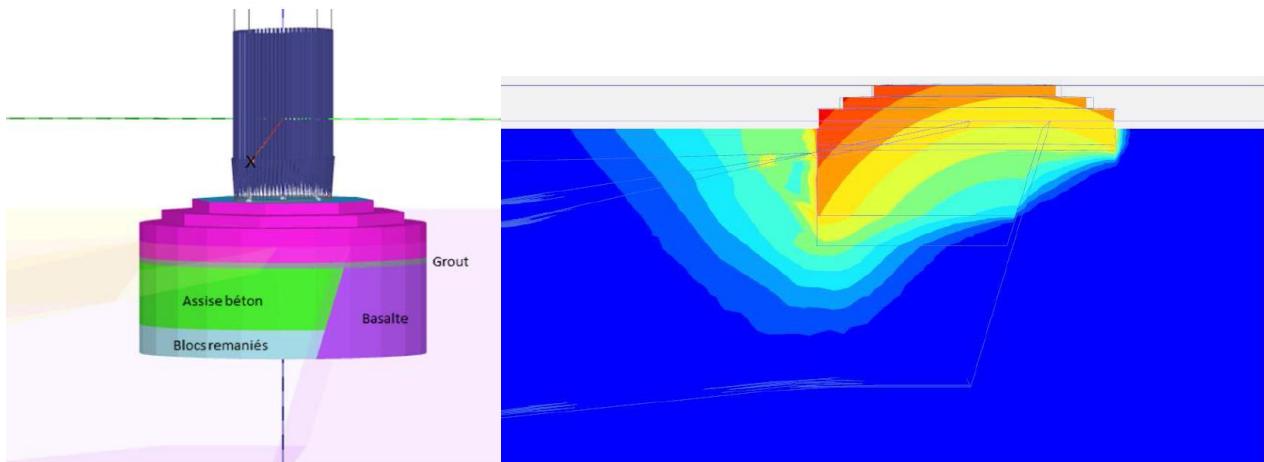


Figure 4. Validation de la capacité portante et du comportement d'une fondation d'appui sur sol de fondation hétérogène

3. Les travaux

Les travaux sont effectués dans des conditions naturelles défavorables du fait de leur situation en pleine mer, sur la côte Nord de l'île qui est particulièrement exposée aux houles. Le planning du chantier doit donc intégrer des périodes d'arrêt des travaux en mer

en fonction des conditions de houle et des caractéristiques du matériel utilisé. Les ateliers de travaux maritimes retenus pour le chantier (terrassements et pose des piles) ont ainsi été choisis pour accepter des hauteurs de houle maximales de 1m à 1.50m en opération. En cas de houle importante ou d'alerte cyclonique, des procédures spécifiques d'arrêt de chantier voire de mise en sécurité des ateliers sont activées.

Par ailleurs, le projet se situe en mer avec des enjeux environnementaux essentiels : présence de mammifères marins (baleines à bosse, dauphins), coraux, avifaune endémique. La protection du milieu naturel est donc un souci quotidien de l'ensemble des intervenants.

Les terrassements des fouilles sont réalisés à l'aide d'un ponton dipper. Cet outil spécifique, constitué d'une pelle Liebherr 400T équipé d'un godet de 15 m³, permet de descendre les fouilles jusqu'aux profondeurs maximales de 15/16 m sous le niveau de l'océan, soit 5 à 7 m en moyenne sous le fond marin, avec des pentes de 3H/1V. Les travaux d'amélioration de sol sont réalisés depuis un ponton flottant ancré équipé d'une grue 250T.

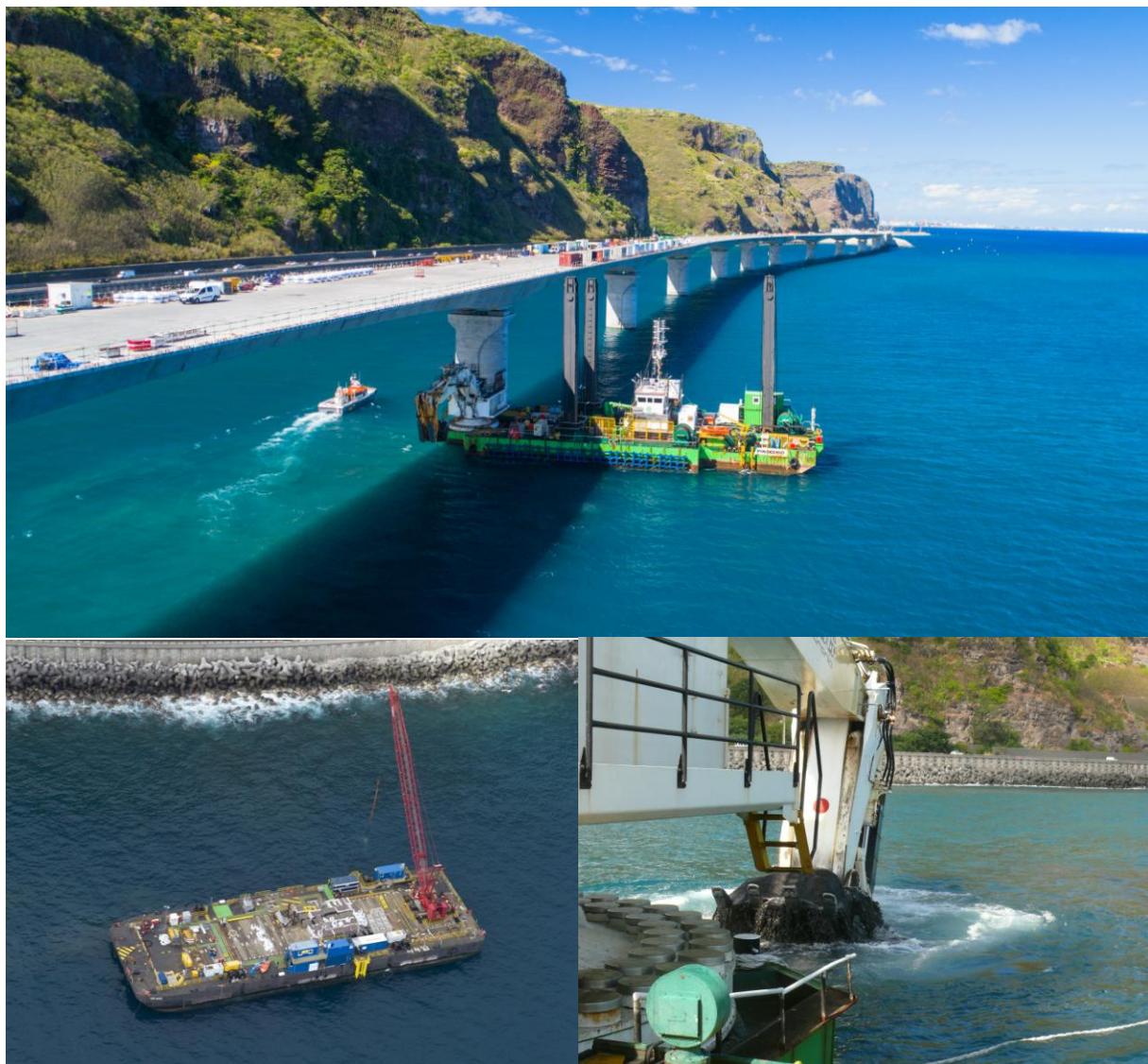


Figure 5. Ponton dipper et atelier d'amélioration de sol sur ponton équipé

Afin de limiter les aléas liés aux conditions maritimes, les éléments constitutifs du viaduc sont en totalité préfabriqués à terre sur les aires de chantier de la commune du

Port, puis assemblés en mer lors de leur mise en œuvre. Les embases des piles reposent entre 12 et 15 m sous le niveau de la mer, soit entre 3 et 8 m sous le fond de l'océan.

L'embase est adaptée pour chaque appui en fonction des conclusions de l'étude géotechnique d'exécution : ajustement du diamètre de la semelle, et de la longueur du fût pour respecter le niveau de fondation prescrit. Chacune des 48 embases présente ainsi un poids de 40 000 à 48 000 kN. Elles sont chargées au niveau de la zone de préfabrication du Port Est à l'aide de la barge Zourite, spécifiquement conçue et construite à cet effet, puis transportées jusqu'à la zone de chantier sur une distance de 8 à 13km selon l'appui considéré, et posées en mer à leur position définitive. La durée moyenne d'un cycle complet de pose d'une pile comprenant embase, tête de pile, et voussoir sur pile, est d'environ 2 semaines hors aléa climatique majeur.



Figure 6. Préfabrication et pose en mer des semelles de fondation et barge Zourite

Les tassements et mouvements de chaque pile sont suivis tout au long de leur chargement dans le cadre du suivi de chantier, et comparés aux déformations estimées par les études d'exécution. A ce jour, les tassements cumulés constatés pour les 15 premiers appuis du viaduc, sous le poids propre des piles et du tablier, sont proches des estimations et compris entre 40 et 60 mm.

4. Conclusion

La question de la sécurisation de la route du littoral est ancienne et récurrente. Elle est intrinsèquement liée à l'aménagement initial de la route située en pied de falaise.

La réalisation d'un nouvel ouvrage hors d'atteinte des plus importants effondrements et des plus fortes houles s'impose. Le tracé maritime retenu comporte des sections en digue dans les zones où des échangeurs sont à réaliser et où les fonds marins sont peu profonds et des sections en viaduc dans les zones de plus grandes profondeurs des fonds marins.

Plongé dans plus de 10 m de profondeur d'eau, le viaduc sera le plus grand pont en mer de France. Le tablier est en béton précontraint construit par encorbellements successifs et présente une largeur de 28.90 m adaptable à l'évolution future des modes de transport collectif. Les fondations et les appuis sont conçus pour assurer une stabilité garantie dans le temps et sous chocs de bateaux jusqu'à 300 tonneaux.

Les travaux du viaduc en mer de 5400 m, attribués au Groupement d'entreprises Vinci Construction Grands Projets / Bouygues Travaux Publics / Dodin Campenon Bernard / Demathieu Bard Construction, ont débuté en 2014 et se poursuivront jusqu'en 2019 avec une mise en service programmée en 2020.

La conception et la réalisation des fondations en mer ont nécessité la mise en place de moyens spécifiques en termes de reconnaissances géotechniques et de techniques de travaux (terrassements en mer, vibrocompactage), dans un milieu naturel hostile qui impose des conditions particulièrement défavorables (houle, chantier en pleine mer).

5. Références bibliographiques

Gazetas (1990). Foundation Engineering Handbook, Second Edition, Hsai-Yang Fang.

Robertson. P.K., Campanella, R.G., Gillespie, D., and Greig, J. (1986). Use of Piezometer Cone data. In-Situ'86 Use of In-situ testing in Geotechnical Engineering, GSP 6 , ASCE, Reston, VA, Specialty Publication, pp 1263-1280