

ÎLE DE LA RÉUNION : APPLICATIONS GÉOSYNTHÉTIQUES SUR LA DIGUE DE LA NOUVELLE ROUTE DU LITTORAL

REUNION ISLAND: USE OF GEOSYNTHETICS ON NEW COASTAL ROAD

Rémy MATTRAS ¹, Steven LECORRE ², Stéphane MAGNE ³, Mathieu MARTIN ⁴, Alain NANCEY ⁵

¹ EGIS STRUCTURES ET ENVIRONNEMENT, Grenoble

² EGIS PORTS, La Réunion

³ GTOI, La Réunion

⁴ STRUCTURES GEOTECHNICS, VINCI, Nanterre

⁵ TENCATE Geosynthetics, Bezons

RÉSUMÉ – Située dans l’Océan Indien sur l’Île de la Réunion, la Nouvelle Route du Littoral comprend 12 km de tracé neuf en mer dont 6500 m de digues. La conception de cette infrastructure de circulation majeure, qui présente une plateforme de plus de 30 m de largeur, et qui permet la création d’une voie routière 2x2 voies, de deux voies de type TCSP et d’une voie en mode doux, fait amplement appel à la mise en œuvre de solutions géosynthétiques : soutènement côté terre en sol renforcé, et filtres géotextiles à l’intérieur de la digue. Avec près de 60.000 m² de parement en cumulé, pour une hauteur moyenne comprise entre 10 et 16 m, le soutènement en sol renforcé constitue ainsi une des principales réalisations de ce type à ce jour.

Mots-clés : Réunion, sol renforcé, soutènement, géosynthétique, filtre

ABSTRACT – On Indian Ocean Island, La Réunion, « Nouvelle Route du Littoral » is a 12 km offshore road, with more than 6 km long dike. This major infrastructure, supporting a 30m wide platform with 6 lanes dedicated to vehicles and future railways, is widely built on geosynthetic solutions: use of geotextile filter within the structure between different materials, and construction of a 60 000 m² facing soil reinforcement using geotextile reinforced earth.

Keywords: Reunion island, soil reinforcement, retaining structure, geosynthetic, filter

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 Figure 1 montre l’effondrement survenu en 2006 et qui a bloqué complètement la circulation sur cet axe, ainsi que les franchissements par la houle en cas de cyclone.

La solution d’aménagement, présentée sur la Figure 2, est un projet maritime mixte alternant digue et viaduc de Saint-Denis (à l’Est) vers La Possession (à l’Ouest) : digue D1 de 1 400 m de longueur environ ; grand viaduc d’une longueur de 5 400 m environ ; digues de longueur 5 150 m environ avec viaduc intermédiaire de 300m à la Grande Chaloupe.

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 plateforme de 34 m : une 2x2 voies routières, un transport collectif de type routier (bus) sur voies dédiées, et une piste bidirectionnelle dédiée aux modes doux (piétons et cyclistes).



Figure 1. Risques naturels de la route actuelle : éboulements et houle cyclonique



Figure 2. Localisation des secteurs de digue

1.2. La digue

La géométrie de la digue a été conçue pour s'adapter aux contraintes du site :

- elle est située à une distance suffisante du pied de falaise pour être hors d'atteinte en cas d'éboulement de masse ;
- le profil en long de la crête de digue est calé à une hauteur suffisante pour ne pas être soumis aux houles cycloniques.

La digue est constituée d'un noyau en tout venant de carrière 1-500 kg, surmonté d'un mur chasse mer en béton armé de 10 à 15 m de hauteur. La protection côté mer est assurée par une carapace en blocs artificiels Accropode™ et Xbloc™ de 4 à 11 m³, et des couches filtres de blocométrie comprise entre 0,2 et 3,8 tonnes.

La plateforme est réalisée en remblai 0-300 mm, dont la partie inférieure est mise en œuvre en eau moyennant une adaptation de sa courbe granulométrique.

La partie supérieure de la digue est soutenue côté falaise par le talus raidi, sol renforcé par géosynthétique avec parement minéral en gabions. Le talus raidi a un rôle de soutènement de la

chaussée, et de rétention des éventuels blocs isolés en cas d'éboulement de masse. Des filtres géotextiles sont mis en œuvre entre les matériaux de granulométrie différente ne respectant pas la loi des filtres.

Le piège à cailloux réalisé entre la digue et le pied de falaise a une largeur suffisante pour retenir les éventuels éboulements de masse de la falaise.

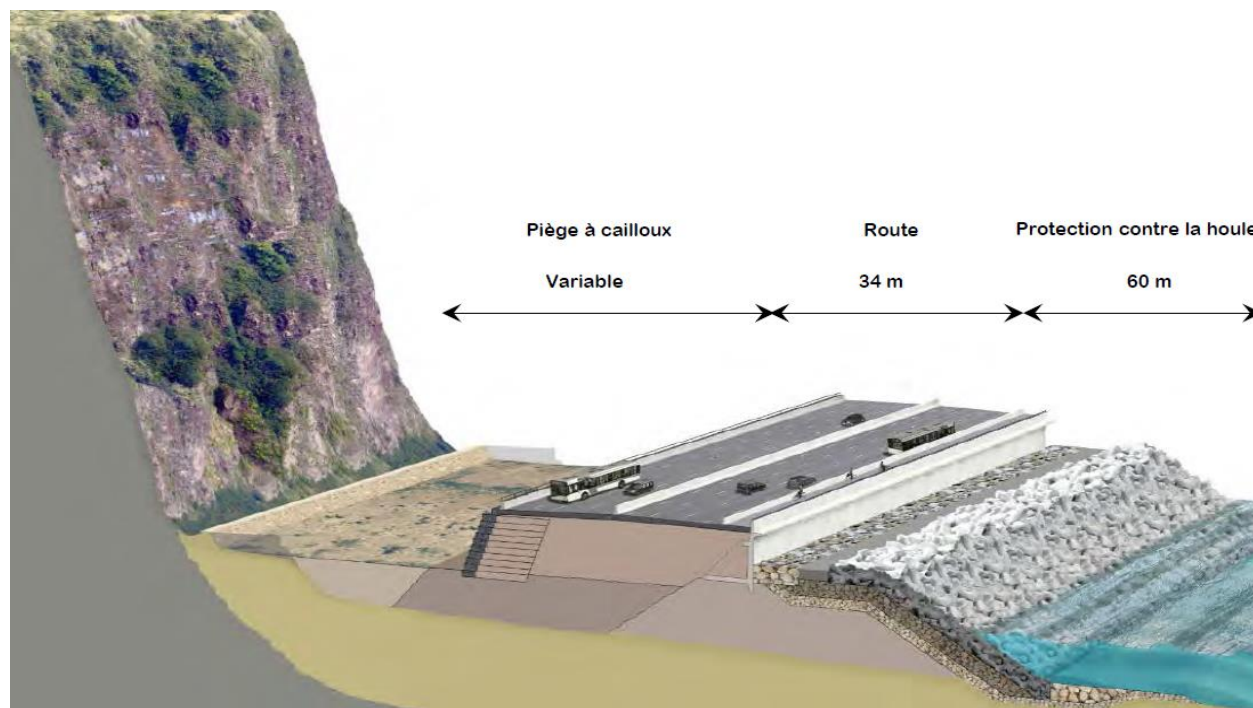


Figure 3. Profil type de la digue de la Nouvelle Route du Littéral

2. Conception des ouvrages

2.1. Contexte géologique et géotechnique

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 blocs, galets et sables, 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 (Figure 4).

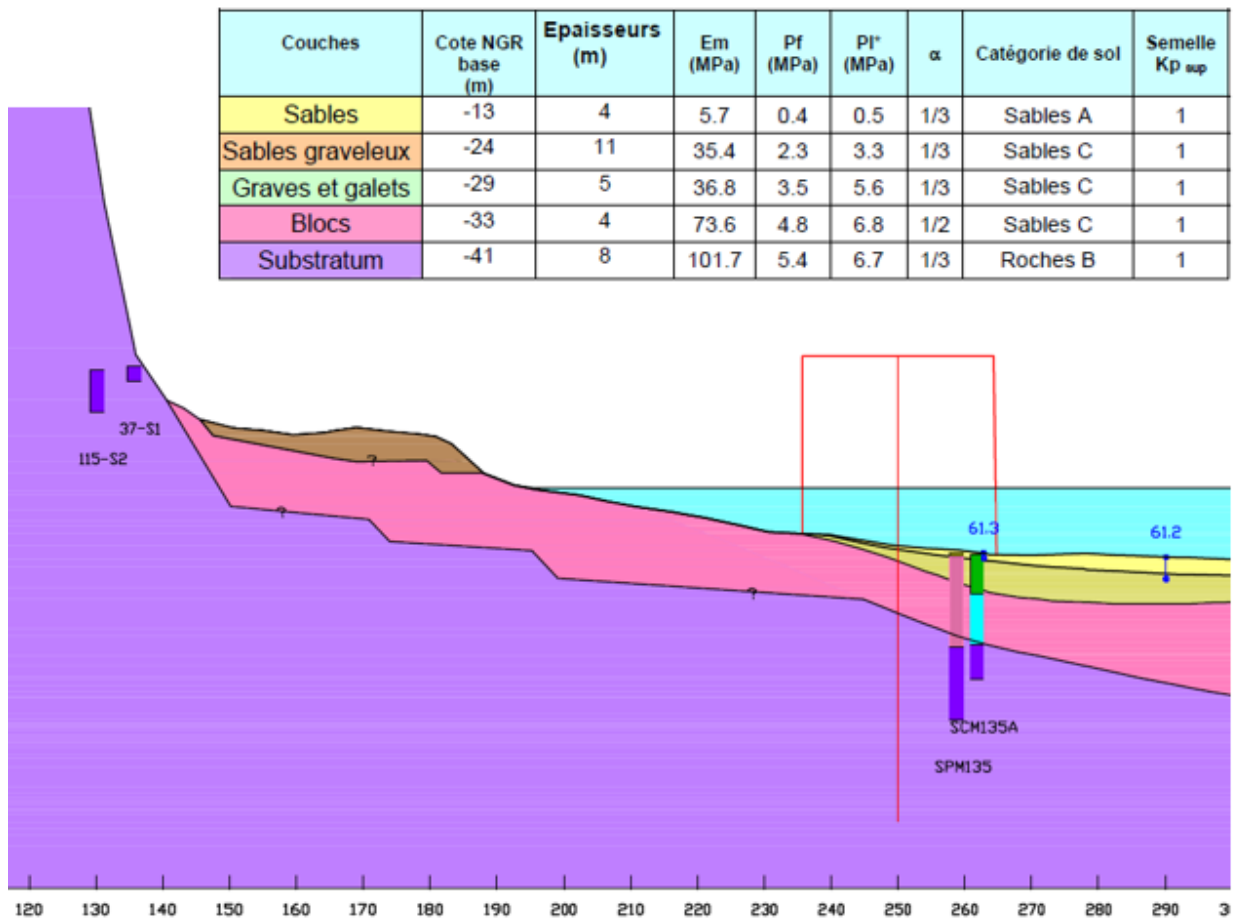


Figure 4. Profil géotechnique type

2.2. Conception hydraulique

Le littoral Nord de l'île de la Réunion est soumis à d'importantes houles en cas d'épisode cyclonique (H_s projet = 12,80m), qui ont été prises en compte dans la conception de la digue, ainsi qu'une surélévation du niveau de la mer sous l'action cumulée du réchauffement climatique et de l'effet de dépression cyclonique (soit un niveau d'eau maximal de projet de + 2,20 m NGR).

Au stade études, le Maître d'œuvre Egis a réalisé de nombreux essais sur modèle physique 2D ou 3D (canal et cuve à houle, Figure 5) permettant notamment de valider le choix des tailles des blocs artificiels de la carapace, et de quantifier les efforts produits par l'impact de la houle sur le mur.



Figure 5. Essai en canal à houle – impact de la houle sur le mur chasse mer



Figure 6. Modèle physique 3D en cuve à houle en cours de construction

2.3. Le talus raidi : sol renforcé par géosynthétiques

Le talus raidi réalisé côté falaise a pour fonction principale de soutenir la plateforme routière. Il présente une hauteur comprise entre 9 et 15 m, pour un linéaire cumulé de plus de 6 km.

Le massif en sol renforcé, dimensionné selon la norme NFP 94-270, est constitué de nappes de renfort géosynthétiques de 5 à 15 m de longueur pour un espacement vertical de 0,50 m. Les nappes de renfort ont une résistance de calcul ($R_{t;d}$) comprise entre 25 et 100kN/ml selon leur position dans le massif. Les nappes sont retournées au niveau du parement afin de séparer la fonction de soutènement de la fonction d'habillage assurée par le parement minéral en gabions. Le contexte particulier de l'ouvrage a été pris en compte pour le choix du type de renfort :

- l'atmosphère marine particulièrement corrosive écartant les renforts métalliques,
- la température tropicale (25°C moyenne) à prendre en compte pour le comportement à long terme des polymères,
- l'utilisation de matériaux de remblai structural relativement grossiers (granulométrie 0/80mm et 0/300mm) susceptibles de générer un fort endommagement lors de la mise en œuvre.
- la prise en compte des actions réglementaires pour le dimensionnement du soutènement : les charges d'exploitation au niveau de la plateforme NRL, efforts accidentels en cas d'impact sur le dispositif de retenue par GBA, contexte sismique du projet (zone 2 – niveau faible)

À l'issue de la phase de conception, il a donc été retenu d'employer pour la réalisation du talus raidi des nappes de renfort géosynthétiques (géotextile tissé ou géogrille), constituées de polyester (PET) ou polyvinyl Alcool (PVA), du fait de leur comportement intéressant vis-à-vis du fluage. Les résistances de calcul étant globalement fixées au stade de la conception, les propriétés intrinsèques de chaque produit de renforcement seraient à justifier par le fournisseur lors des travaux (endommagement, fluage, dégradation physico chimique).

La réalisation du talus raidi comprend également d'autres produits géosynthétiques : grille de connexion du parement gabion avec le massif en sol renforcé, géotextile filtrant pour éviter la fuite de fines du remblai contre le parement en gabions, et membrane d'étanchéité en tête de massif permettant de collecter les eaux d'infiltration sous la plateforme.

La figure 7 montre une coupe type de l'ouvrage avec les gabions en parement et les nappes de renforcement géosynthétique à l'arrière du massif.

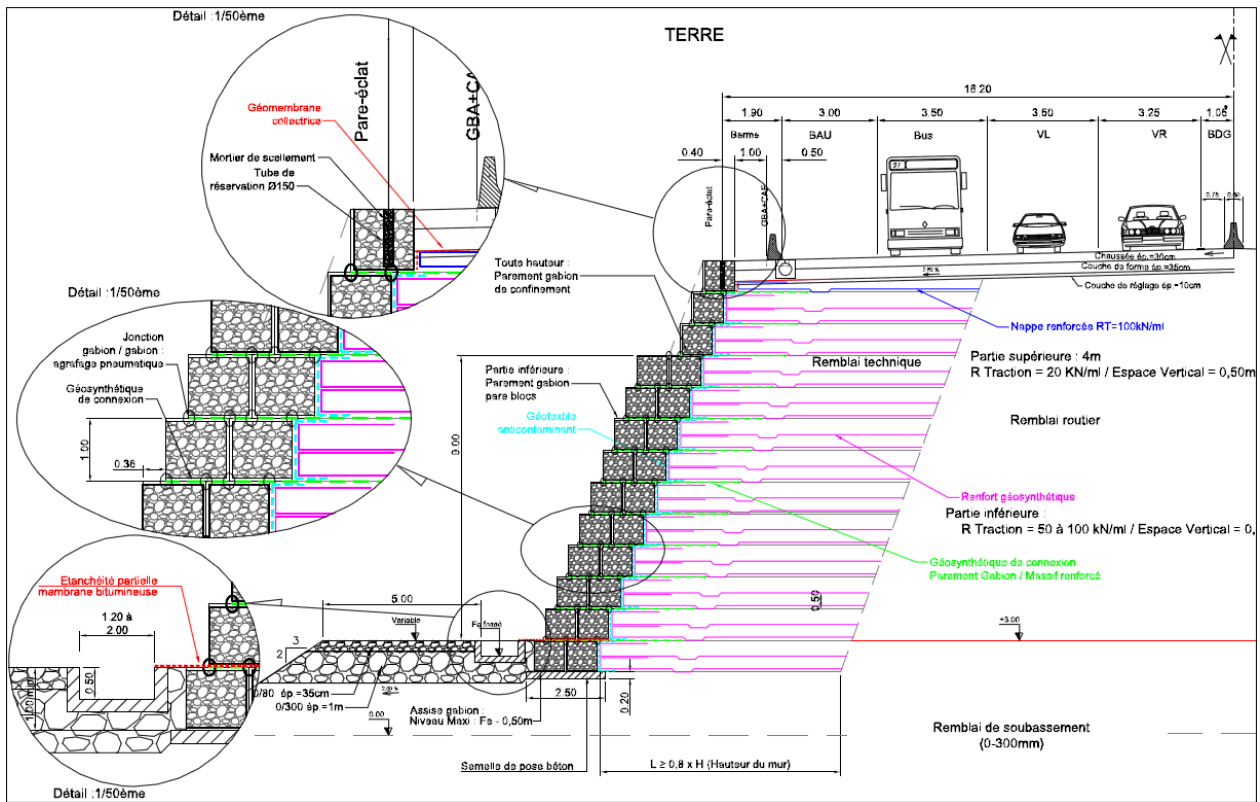


Figure 7. Coupe type du talus raidi

2.3. Les géotextiles filtrants dans le corps de digue

Un géotextile filtrant est mis en place dans le corps de digue entre les matériaux soumis à écoulement et ne respectant pas naturellement la loi des filtres :

- à l'interface entre remblai routier 0/300mm et noyau de digue en 1/500kg,
- à l'interface entre remblai immergé et remblai routier 0/300mm.

Ces géotextiles ont essentiellement un rôle de séparation / filtration. Ils doivent jouer le rôle de filtres par rapport aux matériaux fins en contact tout en étant au moins aussi perméables qu'eux.

3. Exécution : Justification des ouvrages et choix des produits géosynthétiques

3.1 Prédimensionnement du talus raidi

Le prédimensionnement effectué suivant l'approche des états limites définie par les Eurocodes doit répondre pour le cas des ELU fondamentaux, aux critères énoncés dans les normes NF P 94-270 et XP G 38064, en considérant un ouvrage sensible aux déformations du fait de ses dimensions importantes, et de l'importance de la voie de circulation soutenue.

Les coefficients de sécurité et coefficients de réduction pris en compte sur la résistance des armatures polymères sont conformes à cette même norme, en considérant une durée de service de 100 ans. Pour les cas de calcul ELU accidentel sismique, conformément au CCTP on a recours aux exigences de NF EN 1998-5. La distinction est faite pour la détermination de la résistance de calcul des géosynthétiques de renforcement entre les vérifications de dimensionnement à long terme impliquant la prise en compte du phénomène de fluage des polymères, et les vérifications accidentelles ou à court terme n'impliquant pas de fluage dans les renforcements.

Les calculs de stabilité mixte ont été réalisés selon la méthode des tranches avec des surfaces de glissements circulaires en utilisant le logiciel ReSSA 3.0 pour des hauteurs de talus de 10, 12, 14, et 16.5 m et une inclinaison du parement par rapport à l'horizontale de 70 degrés.

Des calculs complémentaires ont par ailleurs été réalisés avec le logiciel DC-GEOTEX pour évaluer l'effet d'un impact accidentel sur un dispositif de retenue de type GBA et l'effet de l'impact

de houle cyclonique sur la digue. La figure 8 montre un exemple de résultats de calculs de stabilité pour un mur de 16,5 m

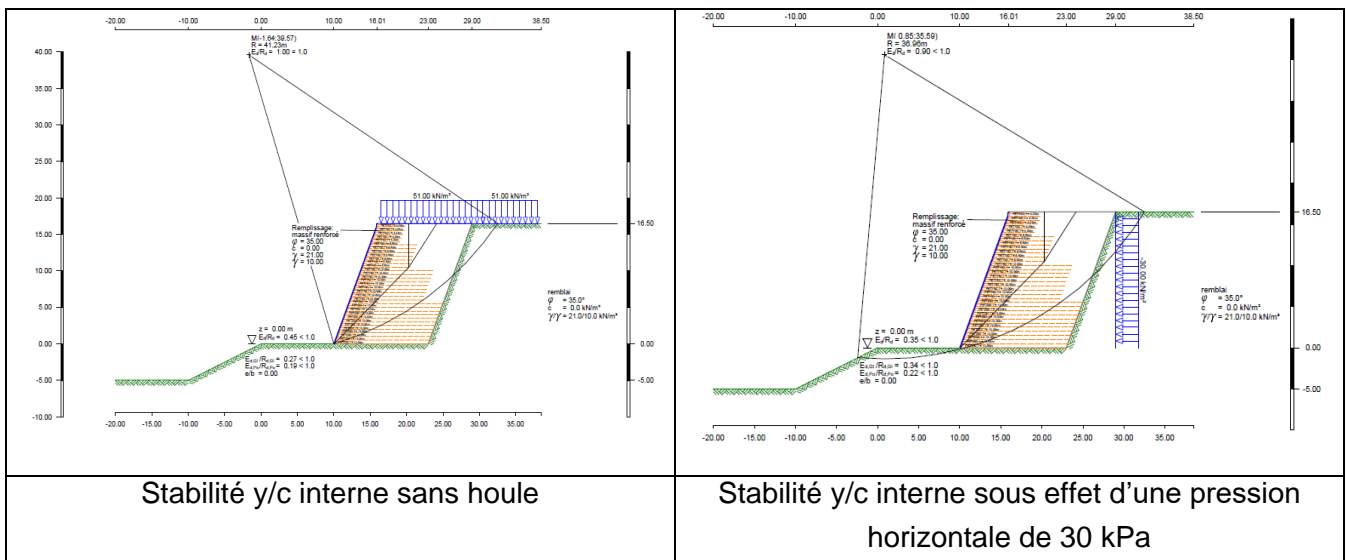


Figure 8. Exemple de vérification de la stabilité

3.2 Planche d'essai d'endommagement des GTX de renfort

Compte tenu de la taille des granulats choisis pour construire le remblai, des planches d'essais ont été réalisées lors de la phase de préparation des travaux pour valider le coefficient de réduction lié à l'endommagement. Les géosynthétiques tissés TenCate Geolon PET ayant une résistance de 100 à 400 kN/m ont été installés entre deux couches de 50cm d'épaisseur constituées du matériau de remblai 0/300 (figure 8). Les planches d'essais se sont déroulées contradictoirement entre le groupement et le fournisseur et selon le protocole d'essai décrit dans les normes en vigueur (NFP 94-270, NF G38064).

La valeur du coefficient de réduction de 1,9 a été retenue sur la base des planches d'essai réalisées. Cette valeur se situe entre les valeurs de 1,5 et 2,5, correspondant aux conditions de mise en œuvre « sévère » et « très sévère » au sens de la norme NF G38064.



Figure 9. Planche d'essai d'endommagement

3.3 Les études d'exécution

Le bureau d'étude Structure Geotechnics a eu en charge les études d'exécution. Elles ont consisté à détailler les calculs de prédimensionnement dans les différentes configurations de l'ouvrage. À l'instar du prédimensionnement, la justification des talus raidi en exécution est réalisée dans le cadre des Eurocodes (7 et 8) et des normes NFP94-270 et XPG 38064 pour les états limites suivants :

- ELU fondamental, suivant les houles de dimensionnement de période de retour 25 à 50 ans ;
- ELU accidentel pour la houle cyclonique ;
- ELU sismique.

L'objectif des études d'exécution des talus raidis est d'adapter la gamme, la longueur et le nombre de nappes de renforcement prévue au prédimensionnement, dans des conditions de géométrie, de chargement et d'équipement (y compris à titre conservatoire) en phase d'exploitation de l'ouvrage.

Ces études comprennent les vérifications usuelles de stabilité externe (stabilité du « mur poids équivalent »), stabilité interne (glissement local des nappes), stabilité générale (grand glissement englobant le talus raidi) et stabilité mixte (rupture partielle du talus raidi). Les stabilités mixte et générale ont été vérifiées à l'aide du logiciel TALREN édité par TERRASOL.

Les études d'exécution ont également intéressé et justifié les points de détail de l'exécution : largeur de recouvrement, retours d'ancrage, connexion des gabions au talus par une géogridde et calcul du renforcement de la nappe de tête pour reprise d'un choc routier sur la DBA.

Ces études ont permis la production des plans de calepinage des nappes de renfort, qui définissent les longueurs, espacement vertical, et résistance des géotextiles.

Axe : AXE PO8 BRET1-2
 Fil : 407.977m
 N° profil : 369
 X Profil : 328179.771
 Y Profil : 7686026.815
 Gls : 134.831
 Z Projet : 14.032
 Z Tn : -5.167

COUPE TYPE - Section n° 15
 Nappes de renfort

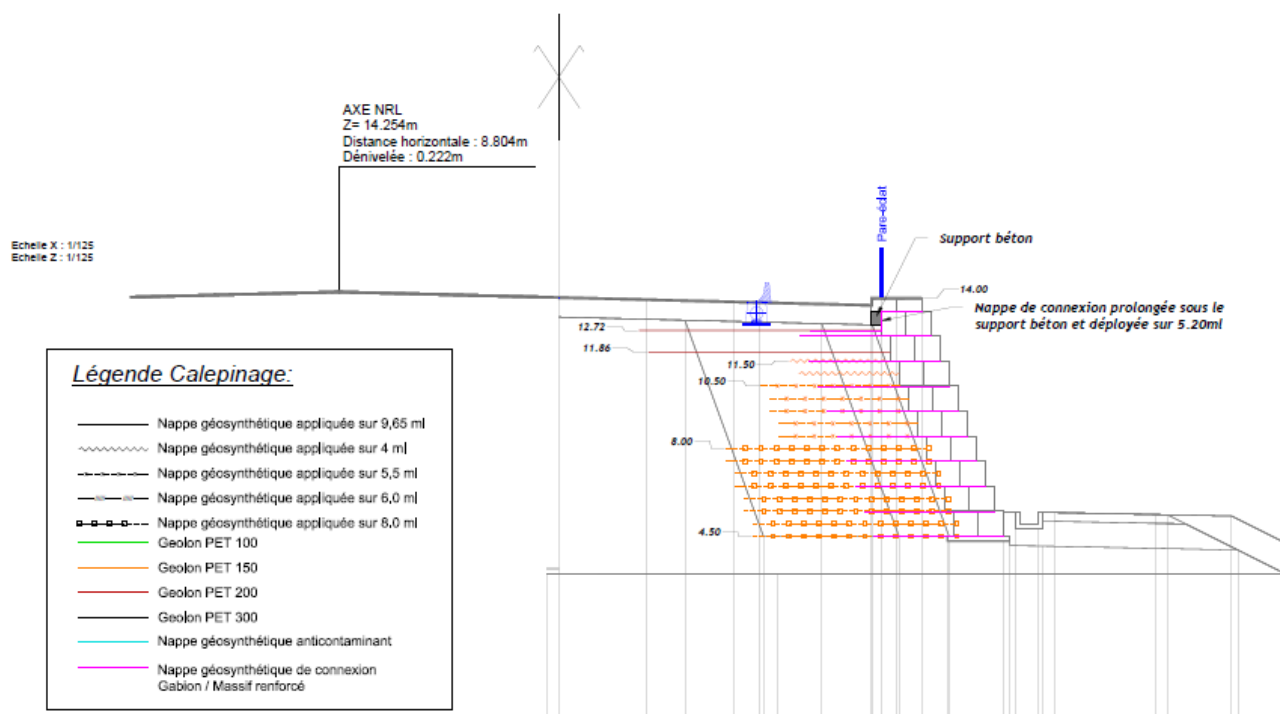


Figure 10. Coupe d'exécution en section courante

4. Les travaux

On présente ci-après quelques photos du chantier actuellement en cours sur le tronçon de digue D1, sur la partie Est du tracé.

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.



Figure 11. Vue générale des travaux de la partie supérieure de la digue



Figure 12. Talus raidi - Mise en œuvre du géotextile de renfort et compactage du remblai structurel



Figure 13. Mise en œuvre du géotextile filtrant à l'interface noyau / remblai 0/300

5. Conclusion

La question de la sécurisation de la route du littoral est ancienne et récurrente. Elle est intrinsèquement liée à la conception et 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.

Les sections de digues, qui comptent un linéaire cumulé de plus de 6 km, font appel à de nombreuses solutions géosynthétiques pour la réalisation de filtres internes entre couches de granulométries très différentes, ainsi que pour la réalisation du soutènement de plateforme côté terre.

L'emploi de la technique de sol renforcé par nappes géosynthétiques pour la réalisation de ce soutènement aux dimensions peu communes permet ainsi la construction d'un ouvrage de soutènement de grande hauteur alliant fiabilité et rapidité de mise en œuvre, respectant les exigences de durabilité et de budget du projet.

6. Références bibliographiques

CETMEF (2009). *Guide Enrochement – Version française du Rock Manual*

DC-GEOTEX DC-Software Doster & Christmann GmbH, D-80997 Muenchen

NF EN 1997-1/NA (2005). Eurocode 7 — Calcul géotechnique — Partie 1: Règles générales - Annexe Nationale à la NF EN 1997-1:2005, Association Française de Normalisation, La Plaine Saint-Denis, France.

NF P 94-270 (2009). Calcul géotechnique - Ouvrages de soutènement - Remblais renforcés et massifs en sol cloué, Association Française de Normalisation, La Plaine Saint-Denis, France.

ReSSA 3.0, 2012. Reinforced Slope Stability Analysis. ADAMA Engineering. Inc USA

XP G 38-064 (2010) Utilisation des géotextiles et produits apparentés - Murs inclinés et talus raidis en sols renforcés par nappes géosynthétiques- Justification du dimensionnement et éléments de conception, Association Française de Normalisation, La Plaine Saint-Denis, France.