

# Protection maritime d'un remblai ferroviaire en éléments modulaires renforcés par géotextiles, plage de Saint-Laurent-d'Eze

## *Maritime protection of railway backfill by modular blocks reinforced with geotextiles, Saint-Laurent-d'Eze beach*

D. Rossi<sup>1</sup>, O. Wyss<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Betoconcept, Nice, infos@betoconcept.com

### Résumé

La stabilisation des bords de mer est une opération délicate du fait de l'érosion permanente des matériaux en contact avec les courants marins. Cet article présente un ouvrage de protection maritime, en contrebas de la ligne reliant Marseille et Vintimille entre les gares d'Eze et de Cap d'Ail, au niveau de la plage de Saint Laurent d'Eze. Entre le PK 235.700 et le PK 235.752, le remblai sur lequel est établie la voie ferrée a été largement déstabilisé, réduisant de façon significative le pied de celui-ci. La longueur concernée par le confortement est de 45 ml, le but étant de protéger le talus ferroviaire contre l'érosion externe régressive.

Il convenait d'entreprendre des travaux d'urgence pour construire un nouveau mur capable de résister à l'action des vagues et protéger la base du talus. Un modèle de propagation de la houle a été mis en œuvre pour la zone de projet afin de définir les contraintes de houle au niveau de la plage. Étant donné l'inaccessibilité du site par les engins de travaux, et pour limiter autant que possible les impacts environnementaux sur cette zone naturelle, le chantier ne pouvait être approvisionné en matériaux directement que par un hélicoptère. C'est la solution Leromur® en éléments modulaires béton associés à un remblai renforcé par nappes de géosynthétique qui a été retenue par la SNCF, maître de l'ouvrage. Les travaux réalisés durant l'été 2017 ont consisté à venir conforter le pied de remblai au moyen d'un ouvrage qui devra : reconstituer une butée pour le remblai ferroviaire, résister aux coups de mer, et être stable vis-à-vis des usagers de la plage.

### Mots-Clés

géosynthétique – ouvrage maritime – soutènement – éléments modulaires – érosion

### Abstract

Coastal stabilisation is a delicate operation because of the permanent erosion of the materials in contact with the marine currents. This article presents a sea defence wall, below the line linking Marseille and Ventimiglia between the stations of Eze and Cap d'Ail, at the beach of Saint Laurent d'Eze. Between KP 235,700 and KP 235,752, the embankment on which the railway is established has been largely destabilised significantly reducing the base of embankment. The length concerned by the operation is 45 ml, the aim being to protect the embankment against progressive erosion. Urgent work was needed to build a new wall capable of resisting wave action and protecting the base of the embankment. A wave propagation model was implemented for the project area to define wave constraints at the beach level. Given the inaccessibility of the site by the construction equipment, and to limit as much as possible the environmental impacts on this natural area, the site could only be supplied with materials directly by a helicopter. This is the Leromur® solution in concrete modular elements combined with a backfill reinforced with geosynthetic layers selected by the client. The work carried out during the summer of 2017 consisted of reinforcing the base of embankment with a wall that reconstitutes a face for the embankment that is able to resist the sea erosion as well as being stable for users of the beach.

### Key Words

geosynthetic – sea wall – retaining wall – modular blocks – erosion

### Introduction

Depuis le début des années 2000, de nombreux indices de glissement sur le remblai ferroviaire ont été observés en contrebas de la ligne SNCF entre les gares d'Eze et de Cap d'Ail. Dès 2010 des désordres ont été constatés sur le talus

(figure 1), qui apparaît très instable avec des éboulements de gros blocs rocheux, accompagnés d'éboulis (figure 2). Le mur de protection détruit depuis de nombreuses années, et la largeur de plage très étroite (5 à 10 m) n'assurent plus, lors de tempêtes, la protection contre l'agression des houles issues des secteurs sud-sud-est à sud-sud-ouest.



FIGURE 1 : EBOULIS ET PHENOMENE D'EROSION

En mai 2012, une campagne de reconnaissance géotechnique et d'opérations topographiques et bathymétriques a été organisée par le gestionnaire de l'infrastructure ferroviaire. L'opération a commencé par un diagnostic, qui a conclu qu'un confortement était nécessaire, ce confortement a plusieurs objectifs :

- reconstituer une butée pour le remblai ferroviaire ;
- résister aux coups de mer ;
- être stable vis-à-vis des usagers de la plage.

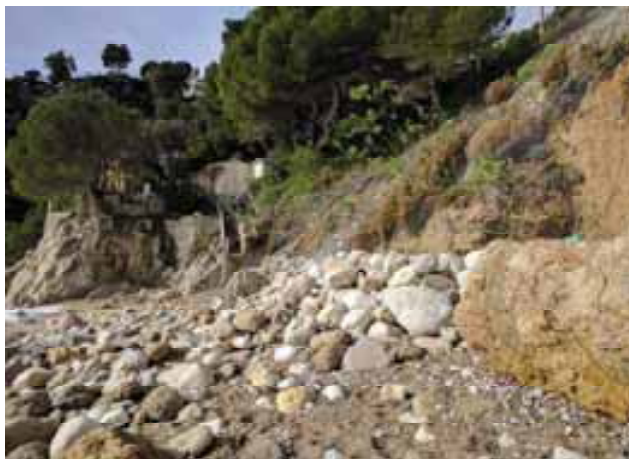


FIGURE 2 : PRESENCE DE NOMBREUX BLOCS

Un dossier d'avant-projet avait été bâti à la suite de ces investigations de terrain proposant différents procédés de confortements :

- Un ouvrage souple qui consiste à liasonner au moyen d'un lien souple et continu un parement en treillis soudés à une nappe en treillis soudés ;
- Un ouvrage en éléments modulaires consistant en un mur en éléments de béton associé à un remblai minéral armé de géotextile ;
- Un ouvrage souple de type enrochement ;
- Un ouvrage en béton préfabriqué de type mur en « L » ;
- Un ouvrage rigide de type poids béton ;

À ce stade du projet, il a été choisi la solution type LEROMUR [1] (figure 3). En plus d'être efficace sur du long terme, cette solution présente l'avantage de posséder une faible emprise au sol, ce qui est opportun au vu de la situation dans laquelle s'inscrit le projet (plage étroite). Étant donné l'inaccessibilité du site, l'approvisionnement en matériels et matériaux ne pouvait être réalisé que par voie aérienne. Le conditionnement des modules sur palettes facilitait les opérations d'héliportage en raison d'un tonnage limité. De plus cette solution présente l'avantage de pouvoir mettre en œuvre manuellement les éléments sans engin de levage.

### Description de la solution en éléments modulaires

Depuis plusieurs décennies, les géotextiles peuvent apporter des solutions originales, notamment aux problèmes d'érosion, causés par l'action des vagues, marées, courants etc. [2]. La solution retenue par le maître d'ouvrage a été celle associant l'utilisation de géotextiles de renforcement à des éléments modulaires béton. Une semelle en béton armé sert à fixer et à positionner précisément dans le béton la première rangée de blocs. Les rangées supérieures sont facilement mises en place. Les nappes de géotextile sont pincées entre deux rangées d'éléments (figure 4). Pour assurer le monolithisme du mur, les blocs possèdent des ergots, ce qui les rend solidaires.



FIGURE 3 : MODULES LEROMUR

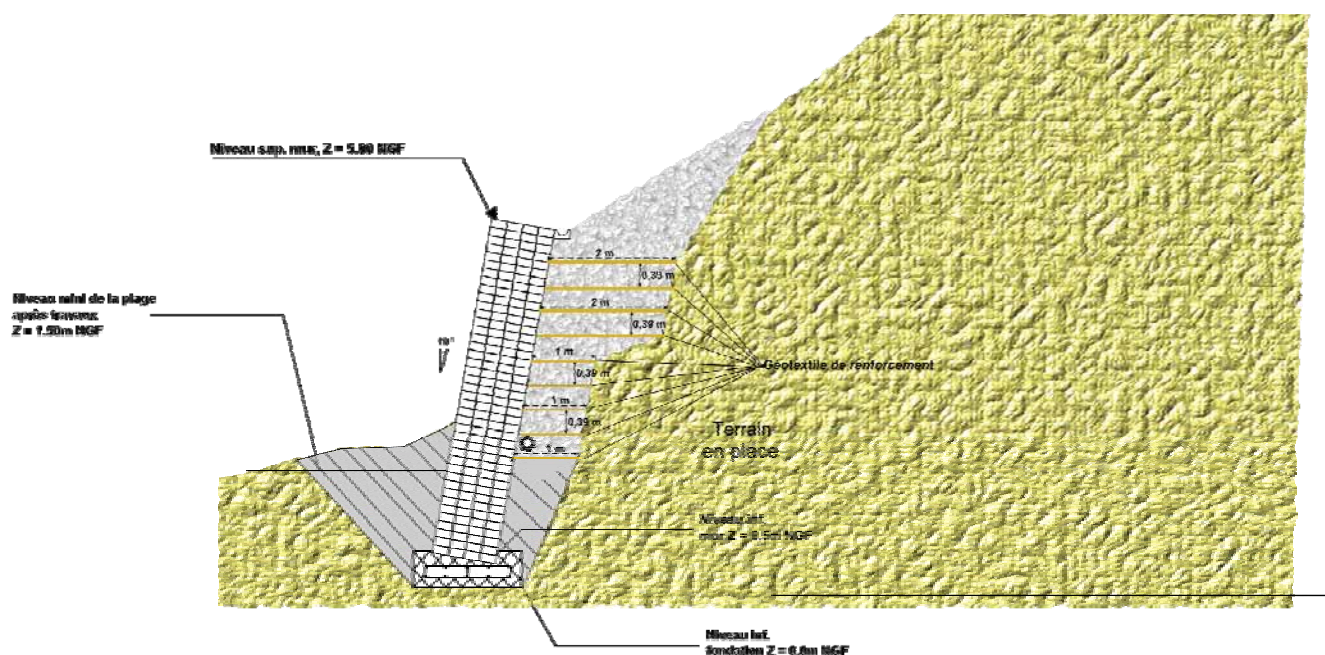


FIGURE 4 : COUPE DE PRINCIPE DU MUR A REALISER

Les éléments ont une surface de contact maximale entre eux, sans arête vive, ce qui permet de minimiser les contraintes sur les interfaces et d'éviter les épaufures et ruptures des blocs.

Ils sont en béton plein fabriqués à la presse, posé sans vide intermédiaire. Ils sont destinés à des murs de grandes hauteurs et garantissent une protection efficace contre les chocs, comme c'est le cas pour les murs de rives ou de berges.

### Méthode de dimensionnement

La justification conduit au choix du géotextile, du nombre, de la longueur et de la position de chaque nappe, du type de sol, et de l'espacement des blocs. Cela nécessite la connaissance des blocs par des essais en compression et au cisaillement des géotextiles, de leur comportement au sein du sol, de leur accroche au parement ainsi que du comportement des géotextiles dans le temps (fluage, vieillissement).

La conception d'un tel ouvrage se justifie par une approche à la rupture qui comprend :

- La justification de la stabilité externe en considérant un mur poids défini par le mur cellulaire et les nappes de géotextile : renversement, glissement, poinçonnement ;
- La justification de la stabilité interne selon la norme NF 94270 et l'EUROCODE 7, notamment en ce qui concerne les coefficients de sécurité partiels. Les calculs sont réalisés selon la méthode de BISHOP ;
- La vérification de la stabilité globale du talus ;

### Efforts de la houle

L'étude hydraulique a été réalisée par un bureau d'études spécialisé. Un modèle de propagation de la houle a été mis en œuvre pour la zone de projet afin de définir les contraintes de houle au niveau de la plage de Saint-Laurent d'Eze. Les houles de secteurs sud-sud-est et sud-sud-ouest ont été sélectionnées car elles semblent être celles qui impactent le plus le projet. Les résultats du modèle de houle ont souligné des variations spatiales dans les distributions des hauteurs de houle dues à une morphologie et à une bathymétrie complexes.

Les calculs probabilistes ont été réalisés pour les houles centennales de secteur sud-sud-ouest et sud-sud-est.

Avec les différents facteurs, un run-up ( $R_a = R_{u2\%}$ ) a été estimé équivalent à environ 7,08 m pour une houle centennale de sud-sud-est. Ceci implique que les 2 % des plus fortes vagues arriveraient à une hauteur de 7,08 m, si elles n'étaient pas arrêtées par un mur, en considérant la plage avec la pente définie. À partir de ce run-up général, a été déduite la hauteur du run-up sur le mur ( $H_{w2\%}$ ) en fonction de sa position sur la plage. Ceci signifie que les 2 % des vagues les plus importantes s'abattent directement sur cette hauteur de mur, calculée à 0,94 m. En conséquence, les vagues engendrent un effort de 40 kN/ml au niveau de la plage soit environ 42.6 kN/m<sup>2</sup> de mur. De plus, il a été préconisé dans l'étude hydraulique, de garder un coefficient de sécurité sur les efforts vis-à-vis des incertitudes qui peuvent survenir. Un coefficient majorateur de 1.15 a été appliqué, ce qui implique de dimensionner le mur pour des

efforts de 49 kN/m<sup>2</sup>. L'ouvrage a donc été dimensionné pour qu'il puisse résister à un effort de 50 kN/m<sup>2</sup> de mur.

Le niveau de la plage peut légèrement varier en plus ou en moins suivant les phases des tempêtes (apport ou retrait de matériaux). Une vague peut apporter du matériau en pied d'ouvrage ou éroder le pied (retour de la vague). Cette variation de niveau altimétrique de plage conduit à prévoir que la force des vagues s'applique sur plusieurs altimétries du mur donc sur sa superficie totale et particulièrement en partie basse. Afin d'éviter de déstabiliser le mur, il a été nécessaire d'ancrer le mur sur une profondeur suffisante afin d'éviter tout affouillement. La position envisagée du mur indique une plage à une hauteur de 1,50 m NGF en pied de mur. Le niveau de plage pouvant varier d'environ 1 m au minimum avec de fortes tempêtes, il a donc été préconisé d'ancrer le mur suffisamment profondément tout en gardant également une marge de sécurité de 50 cm. Il a alors été défini un ancrage du mur (niveau de fondation) à une hauteur inférieure définie à 0,00 m NGF afin d'éviter tout affouillement. Le pied du mur sera par la suite remblayé avec les matériaux du site pour que la plage retrouve sa côte de +1,50 m NGF. Concernant la géométrie du mur de soutènement, du point de vue des franchissements, ce dernier devrait atteindre la côte +4,50 m NGF au minimum afin de limiter ses franchissements. Cette côte n'est valable que pour un mur vertical. En prenant une inclinaison du mur de 10°, l'arase se situe à la côte +5,00 m NGF.

### Hypothèses de calculs

Les hypothèses géologiques et géotechniques sont déduites du rapport d'étude de sol, et sont résumées dans le tableau 1. Les différents sondages ont permis de mettre en évidence la présence des formations suivantes de haut en bas.

–Des éboulis constitués de sables, graves, et blocs (dont le diamètre peut dépasser 1,50 m) reconnus jusqu'à la base des sondages, jusqu'à 16,50 m de profondeur ;

–Des calcaires plus ou moins fracturés ;

Les géotextiles retenus sont en polyester haute technicité, tissé, tricoté, tramé, à mise en tension immédiate, certifié ASQUAL, présentant le marquage CE, avec une résistance à la rupture en traction de 200 kN/ml (tableau 2). La tension prise en compte dans les calculs est définie par la tension ultime, à laquelle sont appliqués des coefficients partiels pour la prise en compte de la durabilité, et du vieillissement des géotextiles (tableau 3). Pour cet ouvrage, le géotextile joue le rôle de renfort. Il doit assurer impérativement deux fonctions pendant toute la durée de service de l'ouvrage : le maintien de la résistance mécanique, et la tenue vis-à-vis de l'altération physico-chimique. Le géotextile Betonap a été testé suivant les normes en vigueur, et présente d'excellentes résistances (tableau 2).

TABLEAU 1 : CARACTERISTIQUES DES MATERIAUX

	$\phi$ (°)	C (kPa)	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )
Remblais	35	0	20
Modules béton	35	100	21

TABLEAU 2 : CARACTERISTIQUES TECHNIQUES DES GEOTEXTILES

Caractéristiques	Norme	Unité	Valeur
Masse surfacique	NF ISO 9864	g/m <sup>2</sup>	20
Épaisseur sous 2kPa	NF 964-1	mm	20
Résistance à la rupture en traction	NF ISO 10319	kN/m	SP : 200 ST : 50
Résistance en traction à 2 % de déformation		kN/m	35
Résistance en traction à 3% de déformation		kN/m	48
Résistance en traction à 5 % de déformation		kN/m	78

TABLEAU 3 : COEFFICIENTS PARTIELS DE DURABILITE ET VIEILLISSEMENT DES GEOTEXTILES

	Coefficients
Vieillissement 8 < pH < 9 (guide ISO 20432)	1,3
Endommagement à la mise en œuvre (guide ISO 20432)	1.15
Fluage à 100 ans (guide ISO 20432)	1,56
Coefficient global (NF XPG 38064)	1,25

Ces armatures de renforcement sont fabriquées dans une technologie textile différente des non-tissés et des tissés conventionnels et définies comme tissé-tricotés-tramés (figure 5).

La disposition des fils techniques ne comporte aucune ondulation ou embuvage dans la structure textile. Il n'y a donc pas d'effet de cisaillement et de contrainte interne. Cette

construction a également pour conséquence de permettre une mise en tension immédiate du géosynthétique sur le chantier, sans nécessité de défroissement ou dépliage qui prend du temps, et qui détériore les effets techniques importants du géotextile de renforcement. La raideur naturelle de ce matériau permet un étalement des rouleaux très rapide. La structure ajourée sous forme de petite grille permet un excellent comportement du géosynthétique. Le réseau de liaison des fils réalisés avec le principe de mailles lui confèrera une tenue particulière qui empêche les fils de glisser et de se déplacer, et s'oppose en conséquence au démaillage et à la déchirure. Ceci est très important pour la mise en œuvre sur chantier d'une part, et également dans le comportement à plus long terme dans l'ouvrage d'autre part.

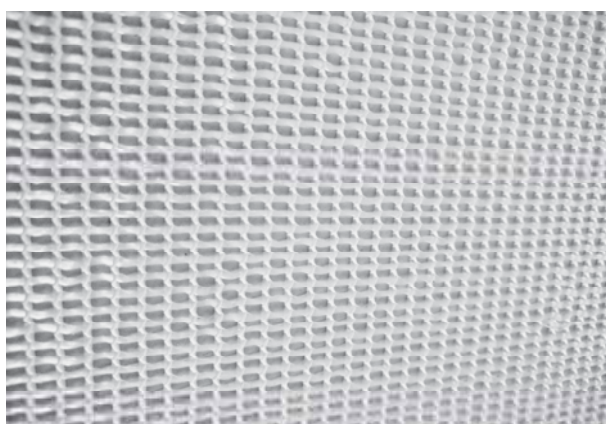


FIGURE 5 : ILLUSTRATION DU GEOTEXTILE

### Aléa vis-à-vis du risque sismique

Selon le décret du 22 octobre 2010, la commune d'Eze est en zone sismique 4, avec  $a_{g1}=1.6$ . La catégorie d'importance de l'ouvrage est 2. La classe de sol prise en compte est E, avec un coefficient d'amplification  $S_t$  de 1,40. La prise en compte des séismes se fait en pseudo-statique. On modélise l'effet d'un séisme par une force horizontale supplémentaire qui entre dans le calcul du coefficient de sécurité global du massif. La valeur de la force horizontale dépend de la masse du sol et de l'accélération nominale de pesanteur du séisme. L'accélération nominale dépend de la situation géographique. La prise en compte de cette force supplémentaire permet de modifier le funiculaire des forces de chacune des tranches de sol nécessaires à la méthode de calculs de stabilité. La nouvelle contrainte est calculée pour chaque tranche de sol le long de la surface de rupture. Comme elle est orientée dans le sens des  $x$  croissants, elle induit un moment de déstabilisation qui diminue le coefficient de sécurité. En cas de séisme, les blocs de béton assemblés à sec sont aussi soumis aux effets sismiques. Il peut exister un risque de glissement de la nappe de géotextile entre les deux blocs. Nous savons que pour arracher la nappe de géotextile du mur fait de blocs, il faut fournir un effort égal au poids du mur qui

coince la nappe. Cette limitation a été prise en compte dans la méthode de calculs. En cas de séisme on diminue donc le poids du mur en supposant que l'accélération sismique est défavorable et dirigée vers le haut. Donc plus le séisme est important et plus le poids du mur fait de blocs est diminué pour évaluer la possibilité d'arrachement de la nappe.

### Vérification de la stabilité externe

Les calculs ont été réalisés à partir du logiciel Betocalcul (développé en interne). Les murs ont fait l'objet de calcul au glissement, renversement et poinçonnement. La stabilité de l'ouvrage est justifiée en considérant un mur poids défini par les éléments associés aux nappes de géotextile.

Le coefficient de poussée est calculé grâce à la formule de Coulomb généralisée. Les résultats des calculs présentés dans le tableau 4 montrent que la vérification de la stabilité externe est garantie. Avec une contrainte de rupture  $q'_u$  de 1.0 MPa et une contrainte aux états limites ultimes de 0.5 MPa, la vérification du critère de portance de l'ouvrage sur sa base (pour le cas le plus défavorable), donne un coefficient  $F_s$  de 1,62 ( $> 1$ ).

TABLEAU 4 : RESULTATS DES CALCULS

Cas	Situation	Facteur de sécurité
Statique	Glissement	$F_s = 6,71 > 1$
Statique	Renversement	$F_s = 5,43 > 1$
Sismique allégeant	Glissement	$F_s = 2,15 > 1$
Sismique allégeant	Renversement	$F_s = 2,09 > 1$
Sismique pesant	Glissement	$F_s = 3,37 > 1$
Sismique Pesant	Renversement	$F_s = 2,67 > 1$
Effort de houle	Glissement	$F_s = 2,45 > 1$
Effort de houle	Renversement	$F_s = 2,87 > 1$

### Vérification de la stabilité interne, mixte et générale

Les stabilités internes (figure 6), mixtes (figure 7 stabilité au glissement le long de surfaces qui recoupent ou longent au moins une nappe de renforcement), et générales (figure 8) sont vérifiées. Les résultats des calculs sont résumés dans le tableau 5. Il s'agit de rechercher la surface de rupture potentielle ayant la plus grande probabilité de rupture.

L'effort mobilisable stabilisateur des géotextiles est pris en compte comme un effort tangentiel résistant.

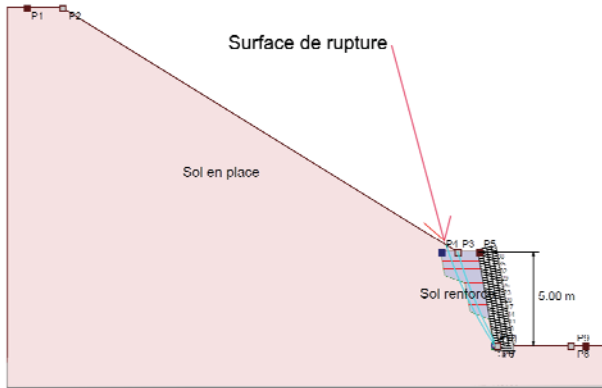


FIGURE 6 : COUPE DE CALCULS, STABILITE INTERNE

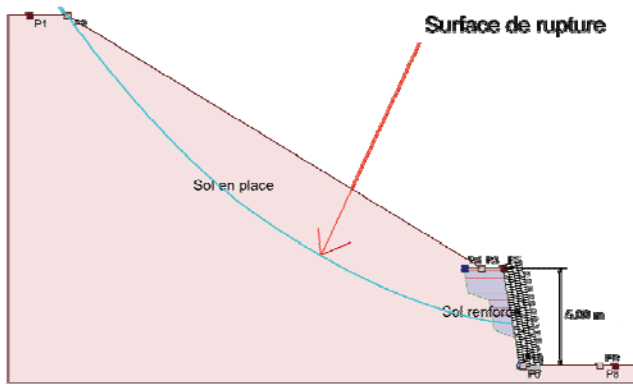


FIGURE 7 : COUPE DE CALCULS, STABILITE MIXTE

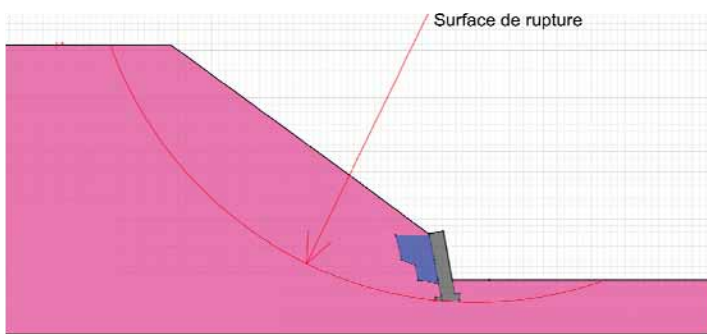


FIGURE 8 : COUPE DE CALCULS, STABILITE GLOBALE

Il s'ajoute à l'effort tangentiel mobilisable à la rupture pour le calcul du coefficient de sécurité, selon la méthode des tranches. La méthode consiste en un découpage du massif en un nombre fini de tranches, le long de la surface de rupture. L'équilibre de chaque tranche est évalué et l'on somme sur le nombre de tranche pour déterminer l'équilibre global du massif et le coefficient de sécurité qui lui incombe. Il existe

donc une très forte influence des armatures géotextiles sur la stabilité du massif et sur le coefficient de sécurité obtenu. Le géotextile se retrouve « coincé » par la contrainte exercée par le poids des terres situées au-dessus de lui. Les coefficients de sécurité pour la stabilité, ont respectivement pour valeurs  $F_s = 2,11$ ,  $F_s = 1,67$  et  $F_s = 1,71$ , pour les cas fondamental, accidentelle (séisme) et accidentelle (houle).

TABLEAU 5 : RÉSULTATS

Phase	Situation	Facteur de sécurité
Définitive	Générale	$F_s = 1,22 > 1$
Définitive	Mixte	$F_s = 1,03 > 1$
Accidentelle (séisme pesant)	Générale	$F_s = 1,03 > 1$
Accidentelle (séisme pesant)	Mixte	$F_s = 1,00 \sim 1$
Accidentelle (séisme allégeant)	Générale	$F_s = 1,07 > 1$
Accidentelle (séisme allégeant)	Mixte	$F_s = 1,00 \sim 1$
Accidentelle (effet de houle)	Générale	$F_s = 1,17 > 1$
Accidentelle (effet de houle)	Mixte	$F_s = 1,08 > 1$

### Conditions de réalisation

La plage de Saint-Laurent étant relativement étroite et pour limiter autant que possible les impacts environnementaux sur cette zone naturelle, les installations de chantier et la zone de stockage principale ont été implantées à l'écart de la zone de travaux. Elles ont été installées à environ 500 mètres à vol d'oiseau au nord-est du site, sur un terrain inoccupé, au droit de l'avenue De Lattre de Tassigny. Pour le transport du matériel et des matériaux sur site, trois choix se sont présentés au maître d'ouvrage : la voie aérienne (hélicoptère), la voie ferroviaire (grue) et la voie maritime (barge). Le remblai ferroviaire étant relativement haut, la solution par grue ferroviaire s'est avérée rapidement inexploitable. Au vu du risque d'impact sur le milieu aquatique protégé qu'engendrerait le transport de matériaux par barge, et notamment vis-à-vis des herbiers de posidonies, il a été privilégié la solution par hélicoptère.

Aussi, le chantier fut approvisionné en matériaux directement par un hélicoptère qui effectua les allers-retours depuis le site de stockage amont, à Eze village. La partie ouest de la plage (foncier SNCF) a été privilégiée pour le dépôt des matériaux avant leur mise en œuvre. À la demande du maître d'ouvrage la géométrie générale du talus devait être modifiée le moins possible en phase définitive.



FIGURE 9 : PHOTO DE L'OUVRAGE EN SERVICE

Ce qui sous-entendait que l'objectif était de reprofiler à minima la pente du talus afin d'éviter de toucher aux espèces protégées et de détériorer la pente naturelle du talus qui est actuellement stable. Les terrassements se sont limités dans la mesure du possible uniquement à la réalisation de la semelle, et du remblai technique du futur mur, en pied de talus. Les terrassements ont été effectués par petites parties de largeurs limitées à 5 mètres.

## Conclusion

L'ouvrage (figure 9), en service depuis le mois de juillet 2017, a parfaitement joué son rôle, notamment lors des violentes intempéries du mois de décembre 2017, suivi du passage de la tempête Eleanor en janvier 2018. Un ouvrage similaire avait déjà été réalisé proche du port de Hartlepool (Royaume Uni) [5]. Avec un retour d'expérience de plus de 15 ans, ce dernier a résisté à l'assaut agressif des coups de mer et des marées, de la mer du Nord. Le mur a été suivi régulièrement sans qu'aucun mouvement de glissement ou autre n'ait été constaté.