

LA NOUVELLE ROUTE DU LITTORAL



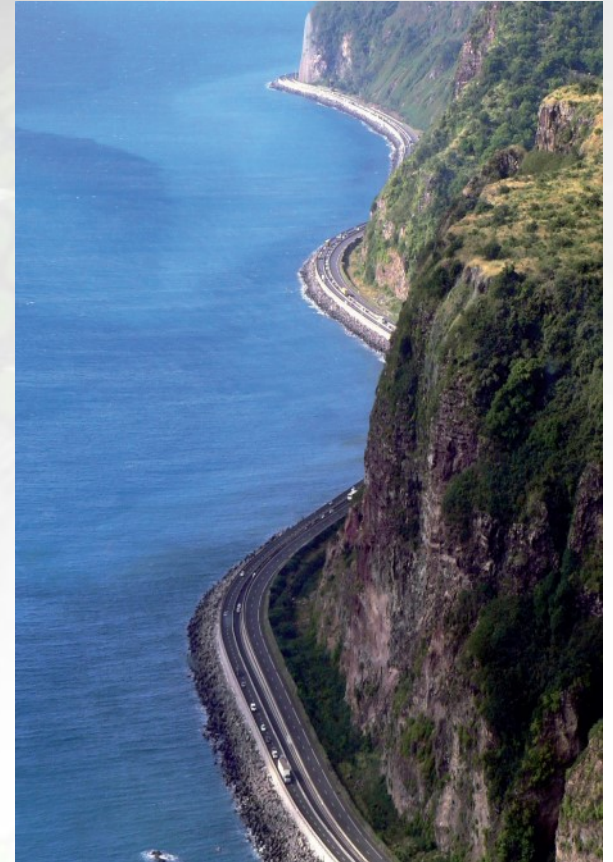
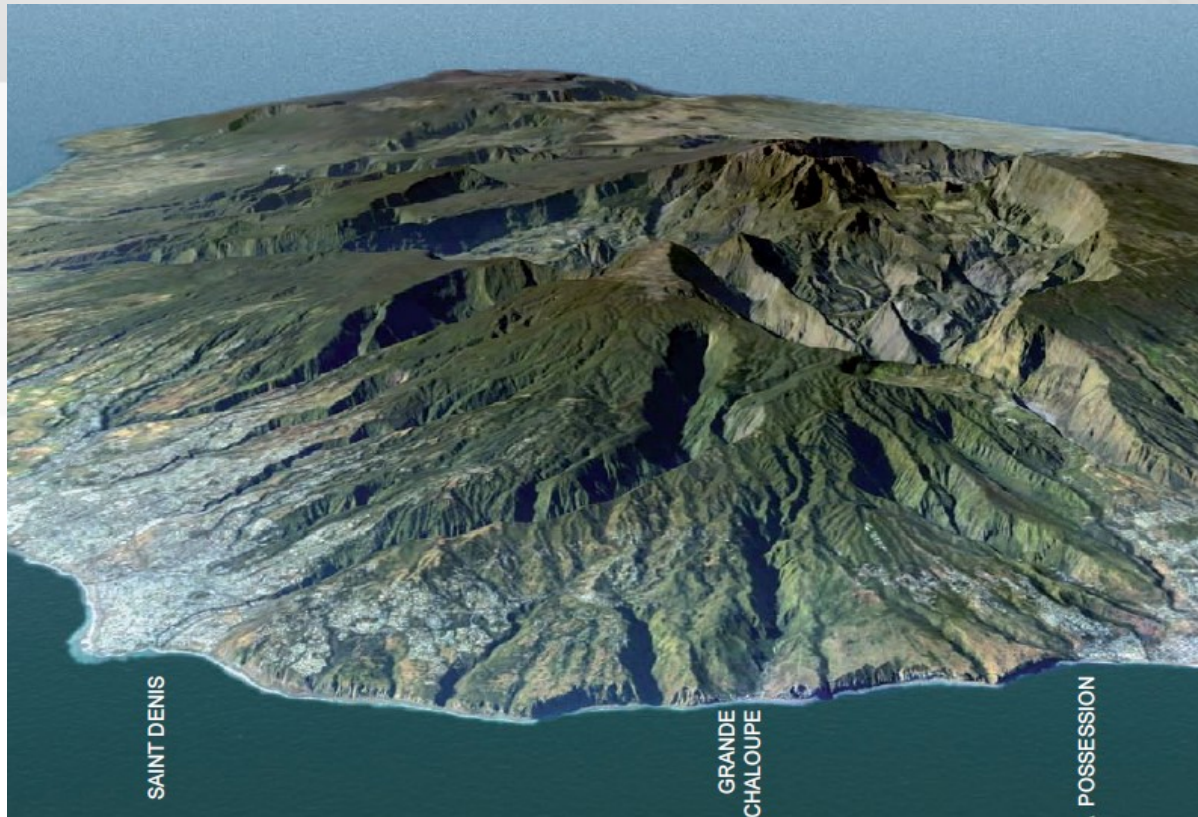
**Le Projet de la Conception
jusqu'à l'Exécution**

SOMMAIRE GENERAL

1. Présentation générale du Projet
2. Enjeux Environnementaux
3. Architecture et Intégration Paysagère
4. Les Viaducs et Ouvrages d'Art
5. Les Digues



Situation actuelle



Les risques - Falaise



Chutes de blocs



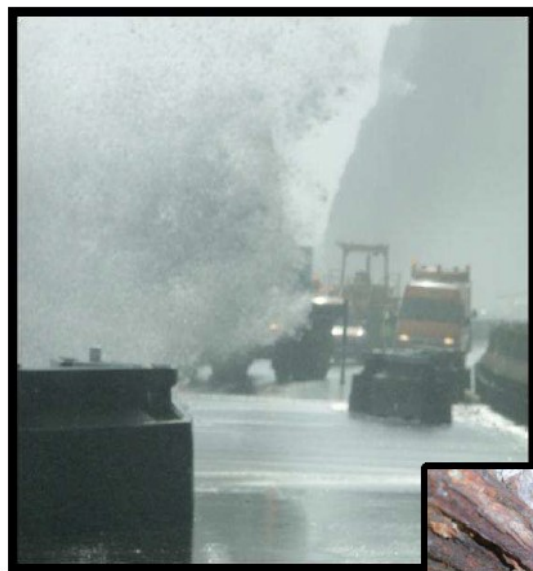
Les risques - Falaise



Effondrement de grande ampleur



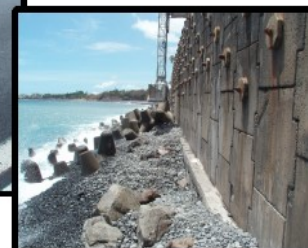
Les risques - Océan



Submersion



Dégradation



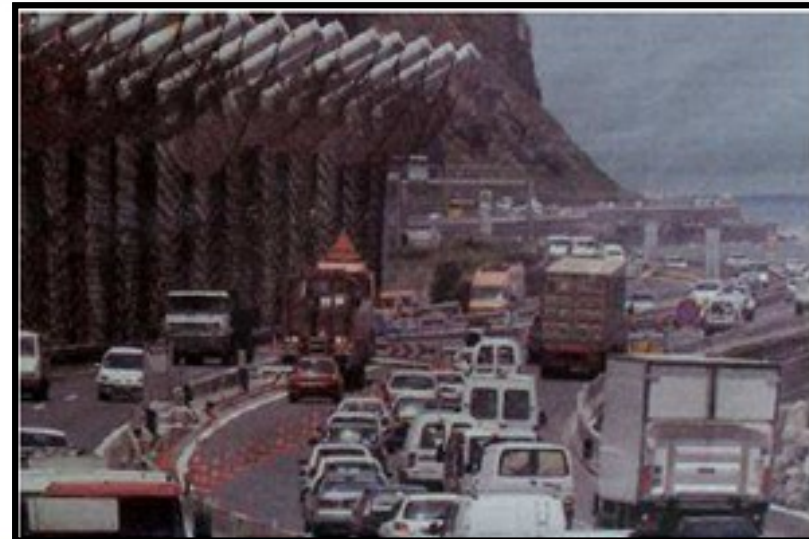
Les risques – Gestion actuelle



Trafic : 66 000 véh./jr.



**Sécurisation : Coupure /
Encombrement**



Un projet nécessaire

► Etat actuel de la RN1 dégradé et irréversible :

► Insécurité pour les usagers :

- Risques : d'éboulements, de submersions, de ruptures d'ouvrages

► Coupures et restrictions de trafics fréquentes → **≈ 30 jours/an** :

- Pertes de temps, surcoûts induits, stress des usagers, ...

► Coûts d'entretien et de réparations courantes → **≈ 6 M€/an** :

- Filets / Purges / Exploitation / Personnels / ...

► Dégâts environnementaux :

- Eaux polluées dans l'océan/ Développement des espèces exotiques envahissantes dans le PAC / Impacts directs sur la falaise (compléments de filet) et pour les riverains (bruit, coupure urbaine, ...)

Photo 5 : éboulements du 24 mars 2006



Le Programme du M O A

► Sécurité

- Itinéraire sécurisé entre Saint-Denis et La Possession,

► Développement des Infrastructures de Transport Collectif

- Voie dédiée permettant d'accueillir un site propre pour un TC,
- Possibilité dévolution vers TCSP guidé rail (cf. Profils en Travers ci-après ...)

► Développement Économique et Social

► Préservation du milieu naturel et patrimonial

► Service aux usagers

- Disponibilité de l'infrastructure en 2x2 voies 24h/24h, 365j/365j,
- Voie dédiée au modes doux sur tout le linéaire du projet

► Durée de vie des ouvrages

- Conception des ouvrages pour une durée de vie de 100 ans,

Le projet

Maître d'Ouvrage et Maître d'oeuvre

► Le Maître d'Ouvrage : la Région Réunion

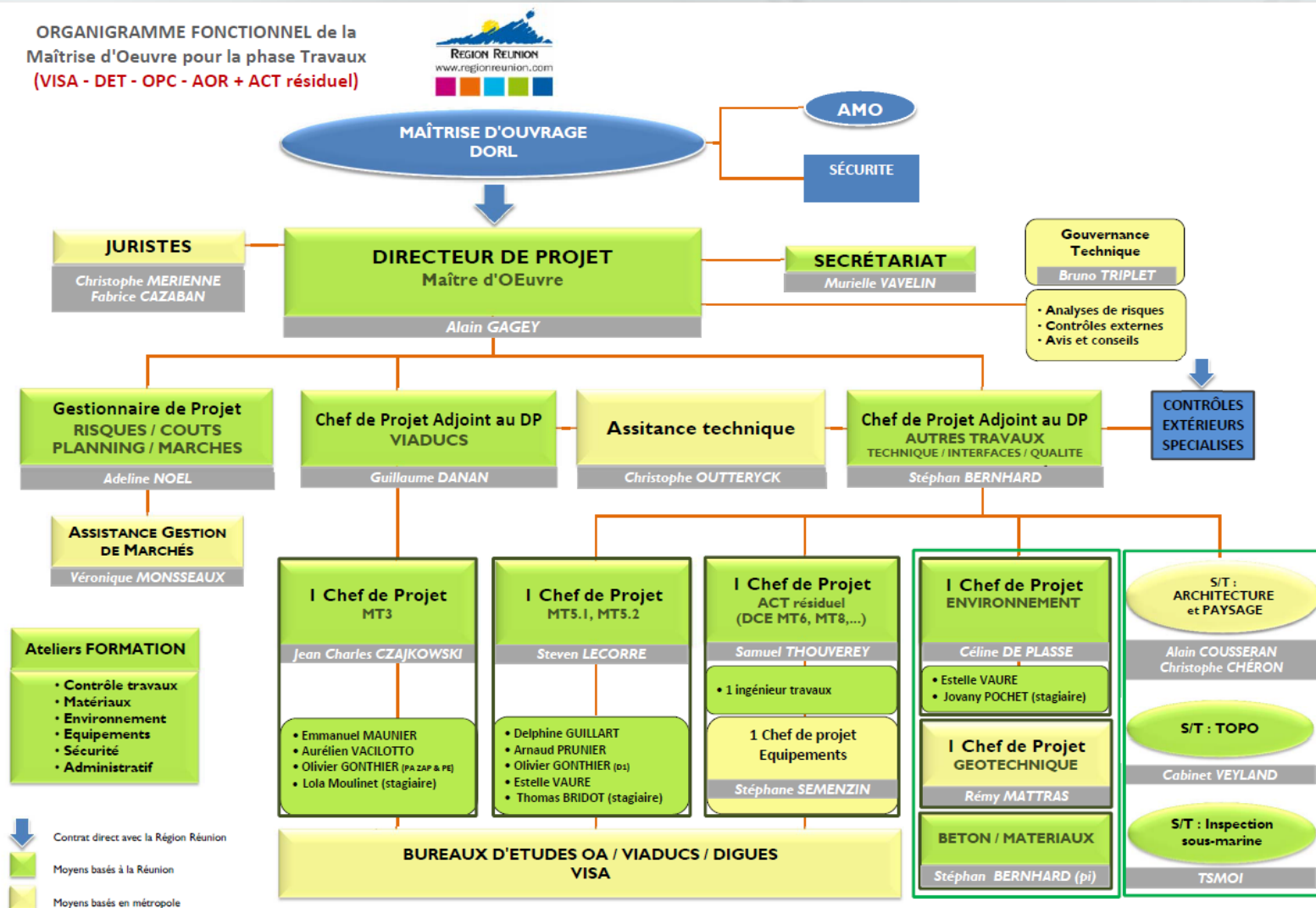
- Coût estimé (base janvier 2011) : 1.6 milliard d'Euros
- Financement : Région - Etat - FCTVA (16%) - Europe (FEDER)

► La Maitrise d'Œuvre complète EGIS

- Conception du projet :
 - AVP (fin 2011)
 - PRO (1^{er} semestre 2012)
- ACT :
 - Elaboration des DCE (2nd semestre 2012)
 - Analyse des offres et mise au point des marchés (2013)
- Missions DET – VISA – OPC - AOR depuis début 2014

Organisation de la Direction de Projet

Direction de projet dédiée au projet NRL



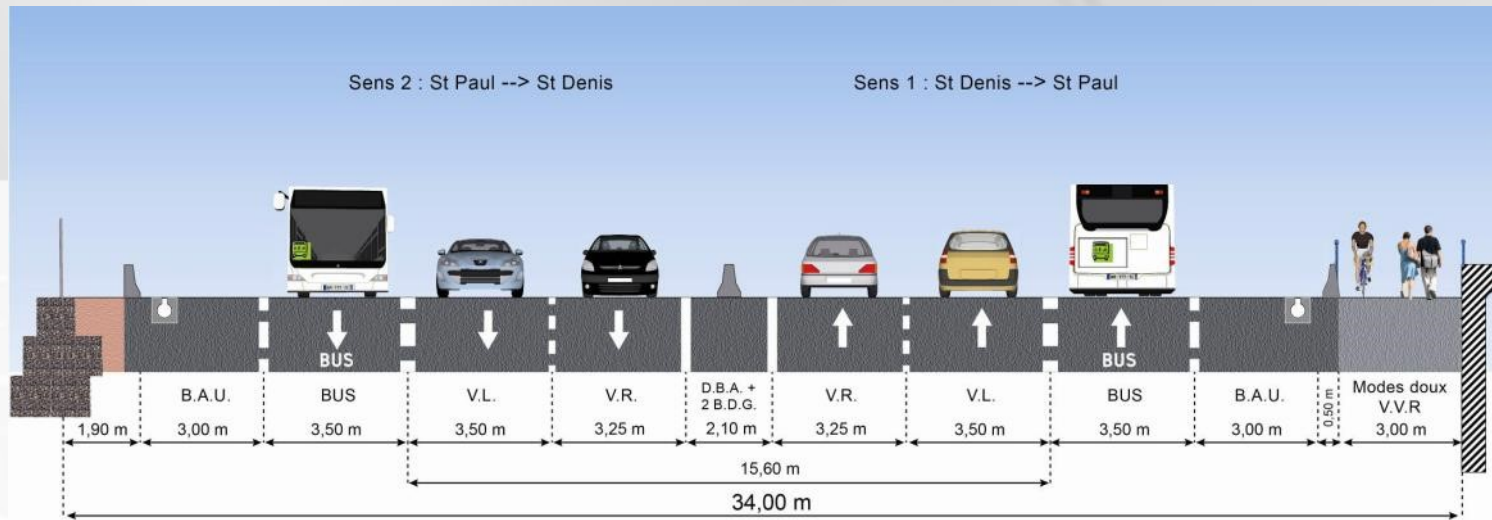
Le Projet

Vue en plan générale

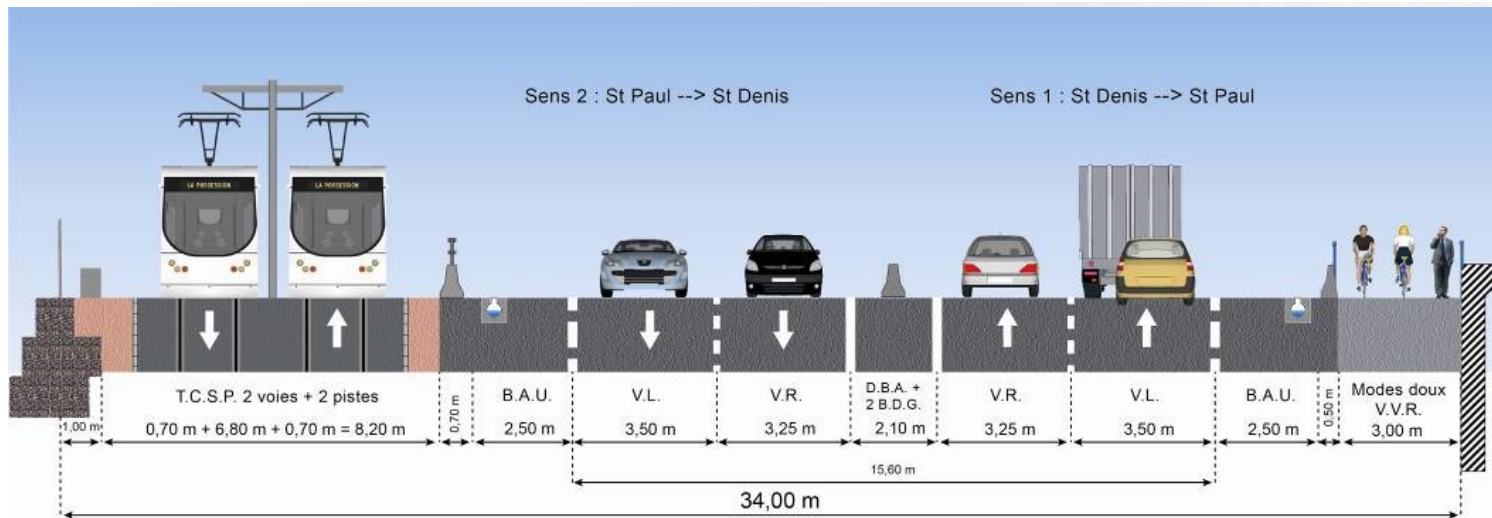


Le Projet

Profils en travers sur Digues



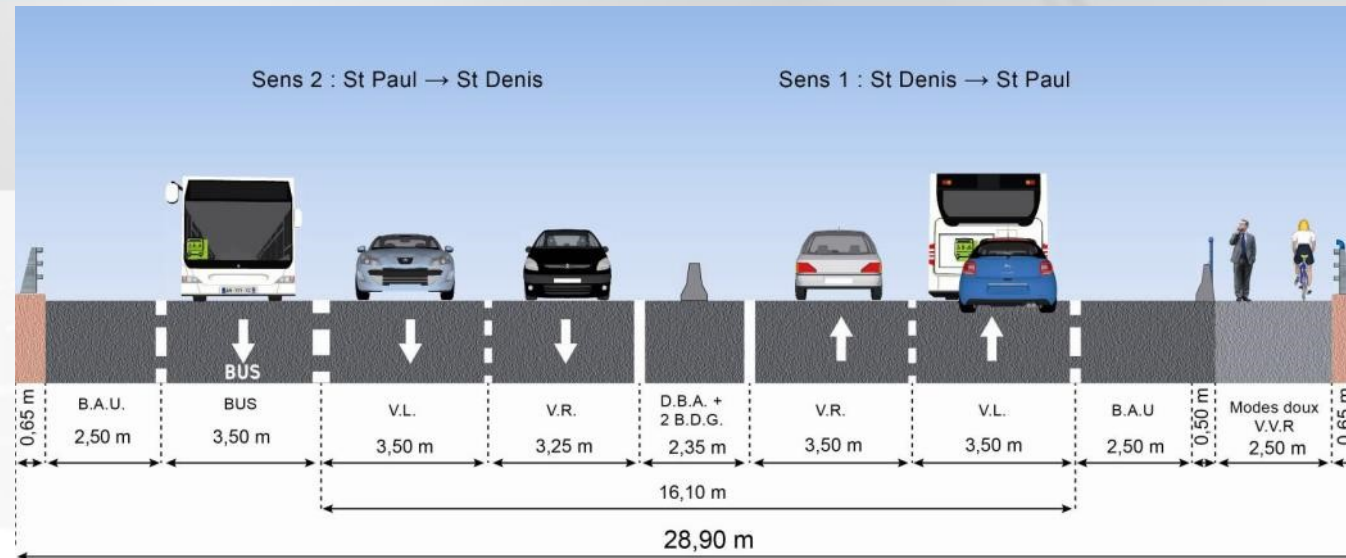
Mode 1



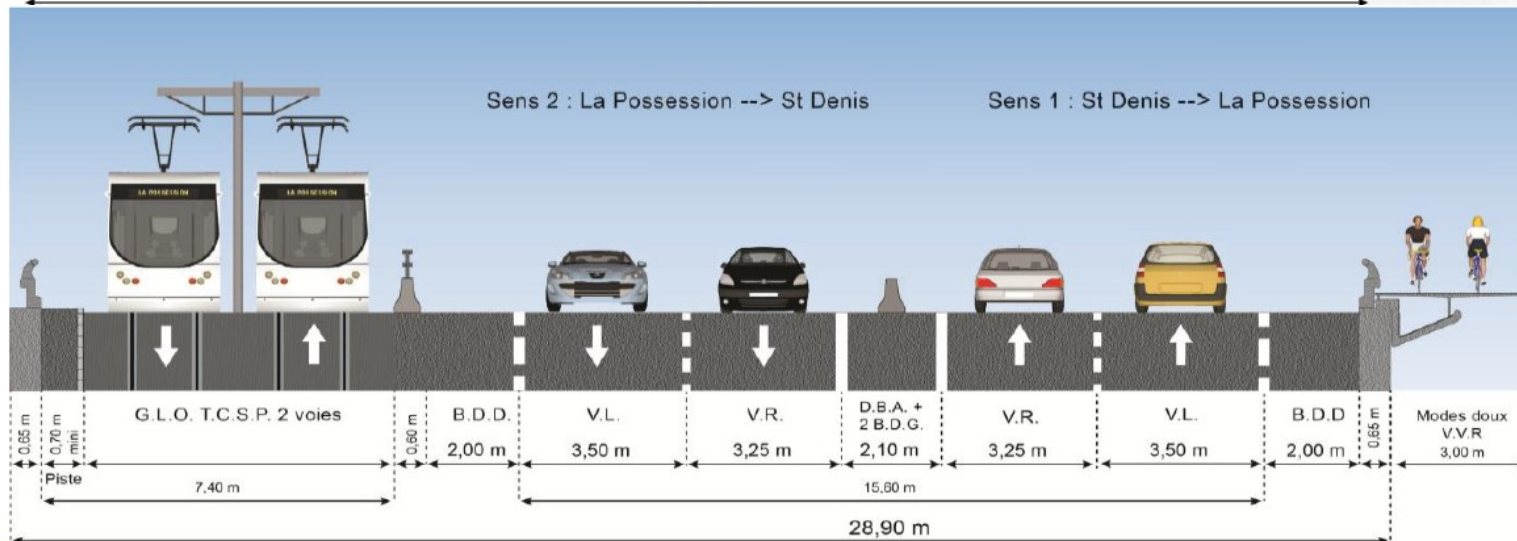
Mode 2
TCSP
Guidé rail

Le Projet

Profils en travers sur Viaduc



Mode 1



Mode 2
TCSP
Guidé rail

▶ Autoriser des circulations par tous les temps

- ▶ Résister à des sollicitations hydrodynamiques exceptionnelles (aucun dommage pour la houle cyclonique centennale)

- ▶ Maintien de la circulation routière
365 jours / an



Conception de l'infrastructure

► Loin de la falaise

- Capacité de stockage des éboulements en masse dans un piège à cailloux
- Route implantée au-delà des chutes de blocs

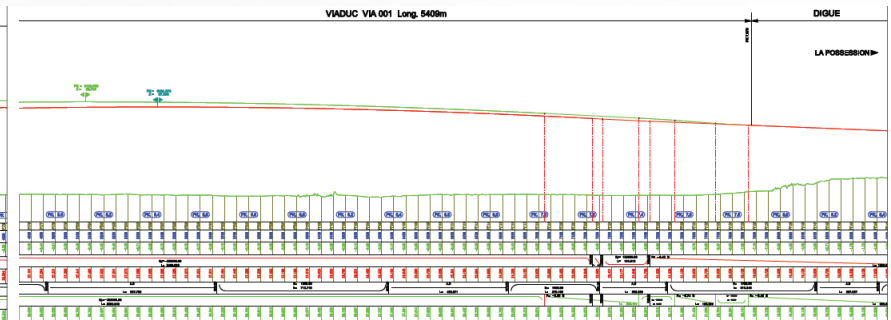
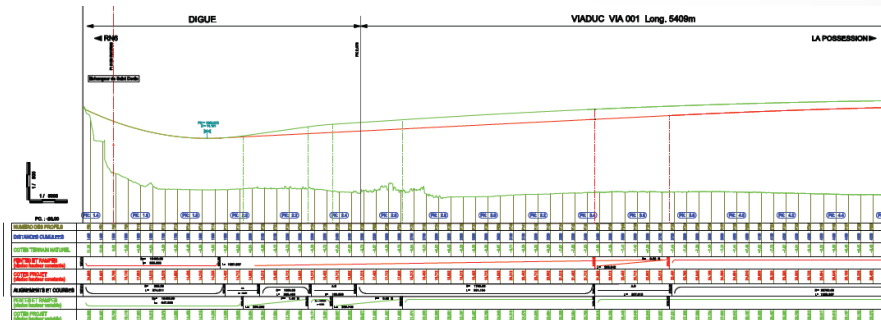
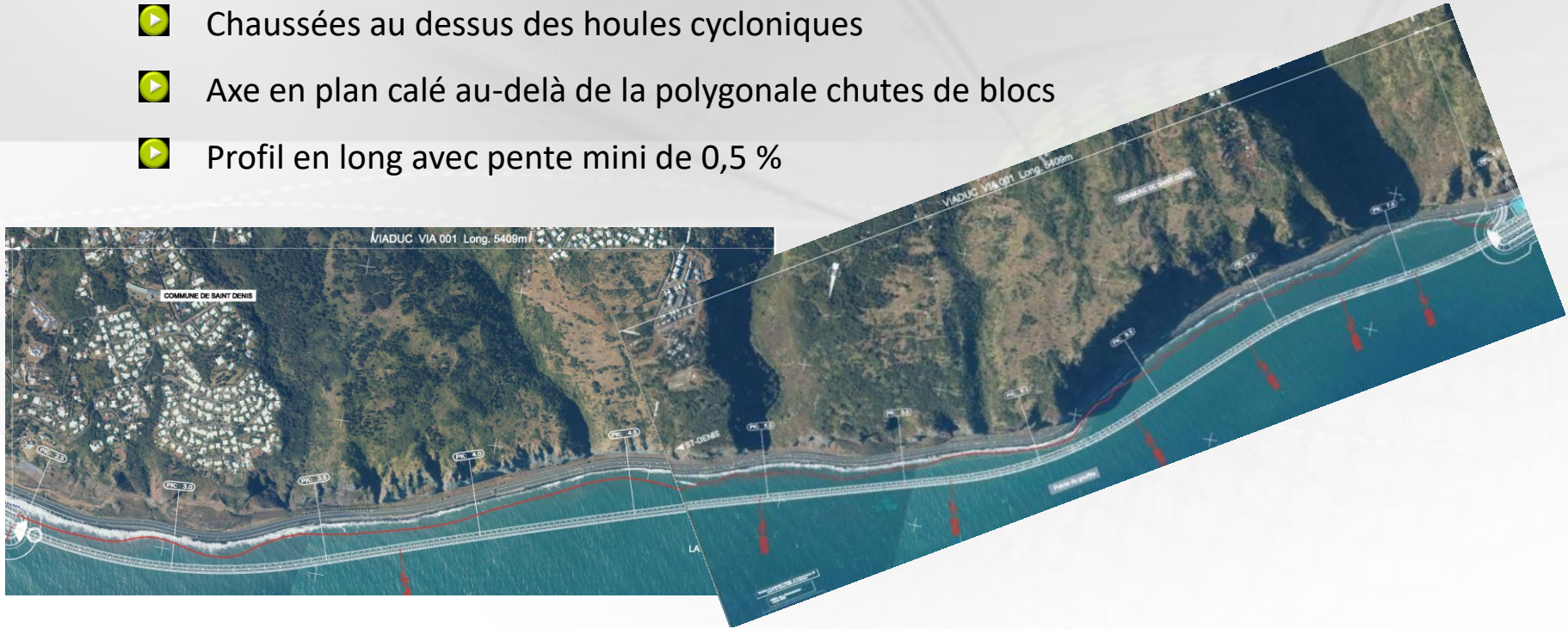
► Rétablir les écoulements naturels

Création d'Ouvrages Hydrauliques

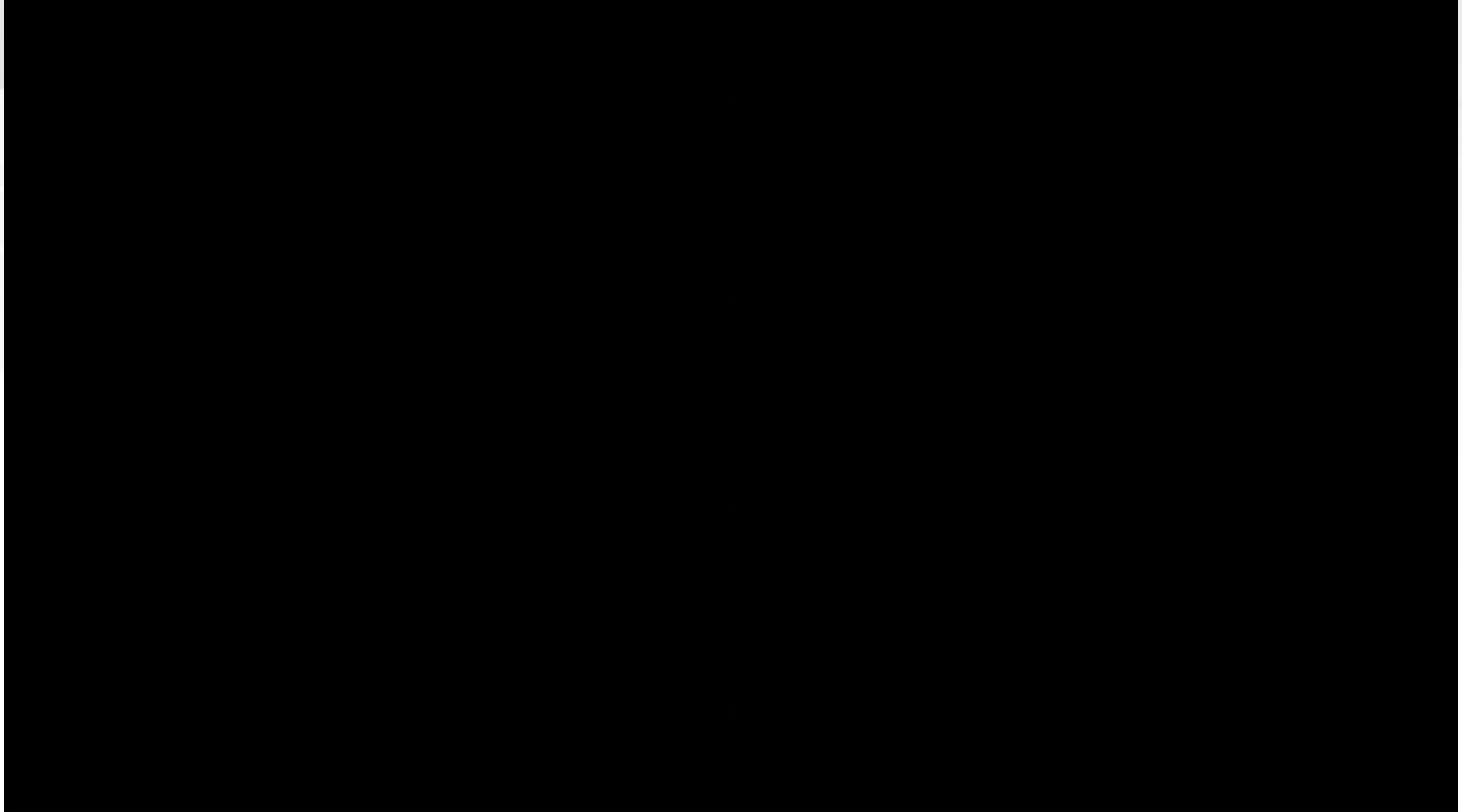


Conception de l'infrastructure

- ▶ Chaussées au dessus des houles cycloniques
- ▶ Axe en plan calé au-delà de la polygonale chutes de blocs
- ▶ Profil en long avec pente mini de 0,5 %



► Utilisation du BIM



Conception de l'infrastructure

Particularité du Projet

- ▶ Mobilisation de compétence de haut niveau chez EGIS :
 - JMI pour la conception et les Visas des viaducs et des ouvrages définitifs,
 - GEO pour le dimensionnement des fondations,
 - ENV pour la mise en place et le suivi des enjeux environnementaux,
 - Port pour les digues, la validation des tapis anti-affouillement, des assises des fondations et des expertises sur les travaux maritimes,
 - LCPC Expert pour certains sujets (durabilité des bétons avec approche performantielle),
 - Une gouvernance technique Egis,
- ▶ Mobilisation de compétence de haut niveau également dans les ENT (directions techniques de Vinci, Bouygues, Eiffage,...)

Conception de l'infrastructure

Particularité du Projet

- ▶ Montants des travaux très importants (1 600 M€)
- ▶ Relations contractuelles entre les parties prenantes
- ▶ Démarche Risque et Opportunité mise en place par EGIS et suivie
- ▶ Des contraintes climatiques extrêmes :
 - Cyclones (vents et houles) avec les efforts associés
 - Fortes précipitations avec ravinement et inondations
 - Températures élevées (bétons)
- ▶ Des enjeux environnementaux très forts
 - En mer (présence de coraux, de tortues, de baleines,...)
 - Avifaune (espèces endémiques)

ENJEUX ENVIRONNEMENTAUX

Enjeux environnementaux

La prise en compte des enjeux environnementaux



Une démarche d'éco-conception intégrée
aux études de conception détaillée du projet et
à l'ensemble de la mission de maîtrise d'œuvre

Photo : Lise Provost

Enjeux environnementaux

La prise en compte des enjeux environnementaux

► **Des études environnementales très approfondies et innovantes** sur de nombreux sujets (écologie, acoustique marine, sédimentologie...) :

- Intégrées dans la conception détaillée du projet d'infrastructure
- Permettant d'alimenter les dossiers réglementaires type « loi sur l'eau », « espèces protégées », dans la définition :
 - des enjeux,
 - des impacts du projet en phase travaux et en phase d'exploitation,
 - des mesures pour **éviter**, **réduire** ou **compenser** les impacts environnementaux

Enjeux environnementaux

La prise en compte des enjeux environnementaux

▶ Les grandes étapes réglementaires :

- ▶ **Déclaration d'utilité publique / MECDU** > 7 mars 2012
- ▶ **Autorisation au titre des monuments historique** > 14 décembre 2012 (sites de la Grande Chaloupe et Saint-Denis)
- ▶ **Autorisation au titre de la police de l'eau** > 25 octobre 2013 (enjeux liés aux milieux aquatiques et à la faune et la flore associées)
- ▶ **Déroptions « espèces protégées »** > 19 et 20 décembre 2013 (enjeux liés à la faune et la flore protégée)

***Travail collaboratif : maître d'ouvrage et ses assistants,
maître d'œuvre, services administratifs, experts***

Intervention d'experts locaux et internationaux reconnus

Enjeux environnementaux

Les principaux enjeux pour le projet

Parmi les enjeux environnementaux pris en compte :



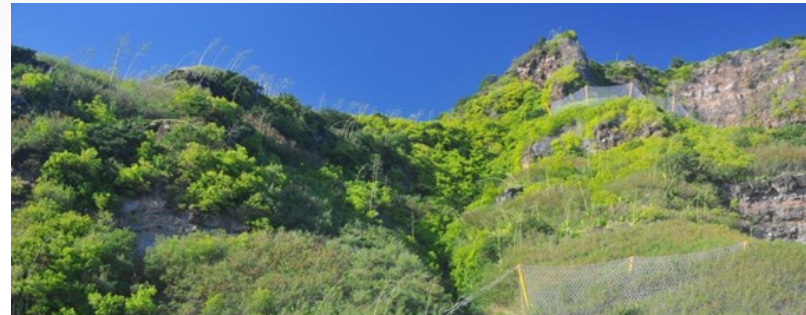
► Mammifères marins, tortues marines

► Faune et flore sous-marine (banques coralliennes...)



► Avifaune marine

► Faune et flore terrestre, y compris espèces exotiques envahissantes



Enjeux environnementaux

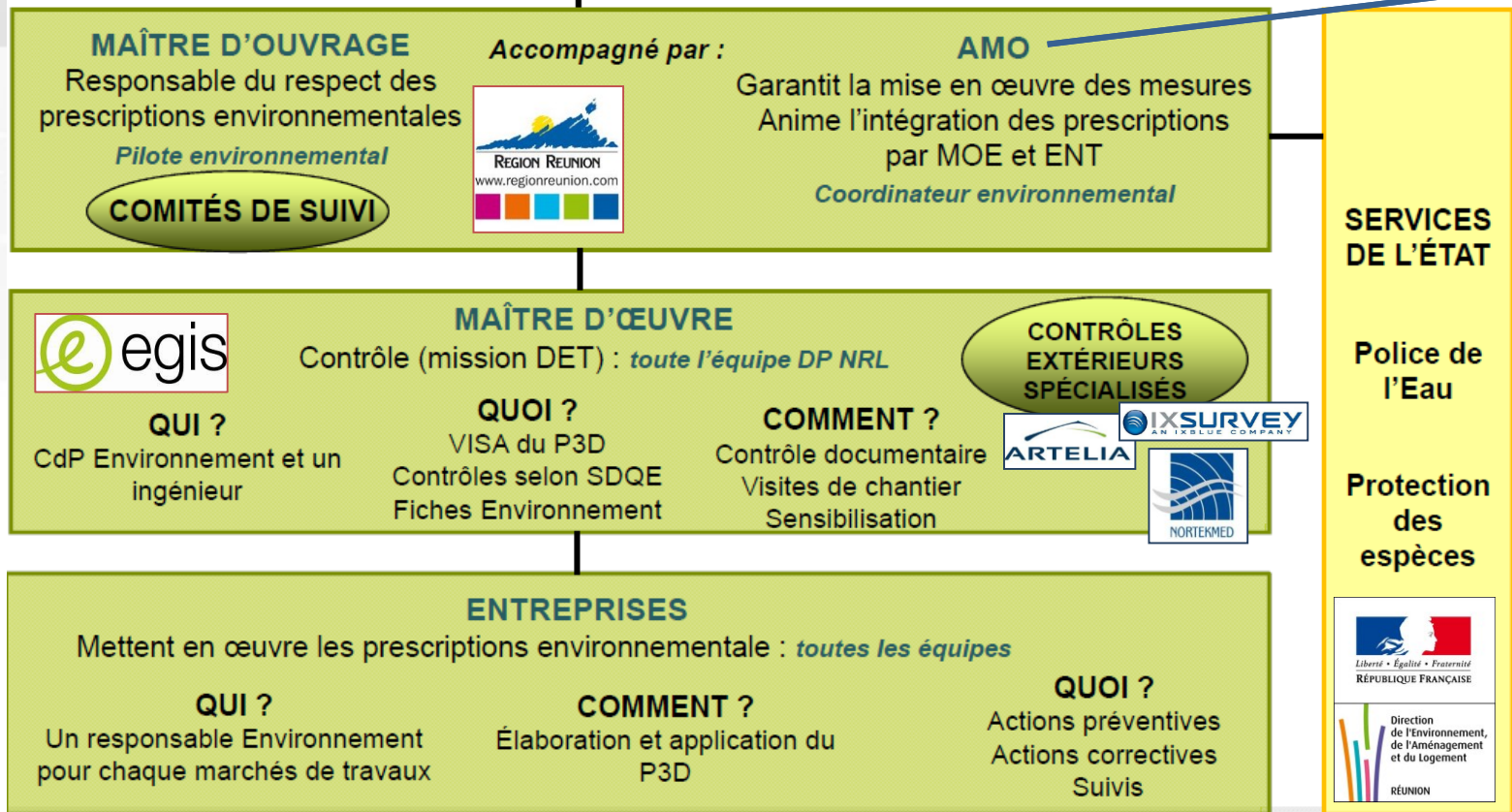
Traduction dans les marchés de travaux

► Prescriptions environnementales issues des études et des autorisations intégrées dans les marchés de travaux :

- Des obligations de résultats et de moyens pour les entreprises
- Mise en place d'un dispositif de contrôle et de suivi
- Une recherche continue pour **éviter**, **réduire** ou **compenser** les impacts environnementaux, y compris en phase travaux

SME travaux : acteurs et rôles

OBJECTIF : RESPECTER L'ENVIRONNEMENT ET LES PRESCRIPTIONS DES ARRÊTÉS



Nouvelle Route du Littoral – La Réunion – 20 au 24 novembre 2017

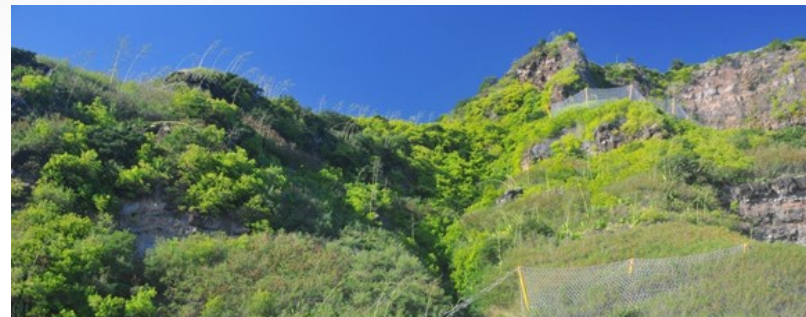
Enjeux environnementaux

Les principaux enjeux pour le projet



► **Mammifères marins**, tortues marines

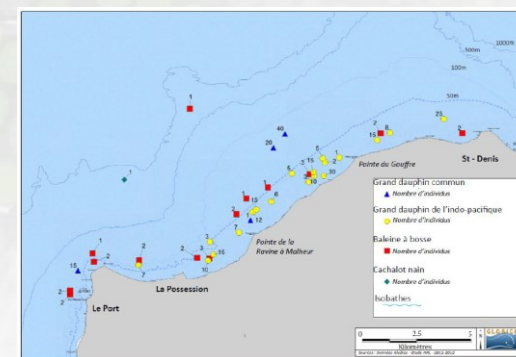
- Faune et flore sous-marine (bancs coralliens...)
- Avifaune marine
- Faune et flore terrestre, y compris espèces exotiques envahissantes



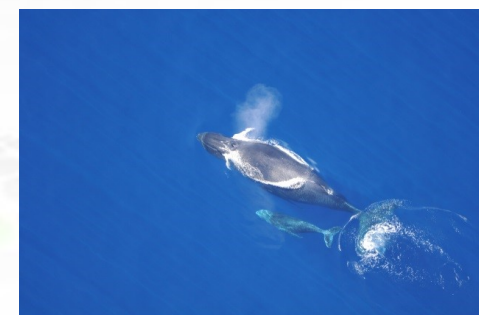
Mammifères marins

Etat des lieux

- ▶ Inventaires réalisés sur 2 cycles annuels 2011/2012 et 2013/2014 : prospections visuelles (ULM + bateau) / suivi acoustique en continu réalisés par Globice / Biotope / Quiet Océans ;
- ▶ Environ 20 espèces protégées de cétacés pouvant fréquenter les eaux réunionnaises ; 5 espèces observées
- ▶ 2 espèces plus particulièrement présentes :
Grand Dauphin de l'Indo-Pacifique (toute l'année)
et **Baleine à bosse** (hiver austral)
- ▶ Forte fréquentation de la zone du projet :
 - Dauphins : pour l'ensemble de ses activités vitales ;
 - Baleine à bosse : reproduction et mise bas, transit (Baie de la Possession favorable à l'élevage des jeunes)



Points d'observation mammifères marins (Globice - Biotope)



Baleine et baleineau (photo Biotope)

-> Fonctionnalité écologique de la zone

Mammifères marins

Les risques / l'évaluation des impacts

▶ Risques potentiels d'impacts liés aux nuisances sonores du chantier

Bruits de chantier = risques de perturbation et d'atteinte de l'appareil auditif

- **Effets sur l'individu** (impact physiologique) : modification du comportement et des facultés à communiquer, à chasser ou à se reproduire, jusqu'à la mort pour les effets les plus extrêmes
- **Effets sur les populations** : → modification des comportements → risques d'incidences sur les activités vitales pour la dynamique de l'espèce (reproduction et élevage des jeunes par exemple)
- **Perte d'habitats et de continuités écologiques** (« barrière de bruit »)

▶ Modélisation des bruits susceptibles d'être générés par le chantier

Des connaissances scientifiques limitées dans le domaine



Mammifères marins

Démarche de détermination des impacts acoustiques du chantier

1. Etat initial

- ⇒ Identification et localisation des espèces de mammifères marins
- ⇒ Caractérisation de l'ambiance sonore sous-marine initiale

Globice/Biotope/
Quiet Océans

2. Projet

- ⇒ Nuisances sonores lors des travaux sous-marins :
(travaux de clapage, dragage, battage, forage, minage, brise roche)
- ⇒ Scénarios de chantier :
(cumuls des sources de bruit de chantier)

Quiet Océans/Egis



3. Impacts sur les espèces

- ⇒ Quantification des impacts sonores
- ⇒ Quantification des pertes temporaires d'habitats en phase chantier

Quiet Océans

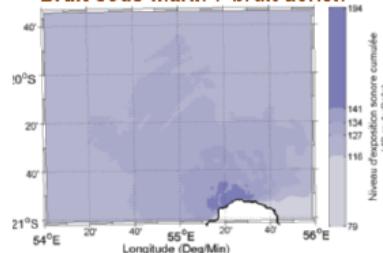
5 espèces fréquentant le site
+ 2 espèces recensées au large du site

Modélisation de la propagation du son

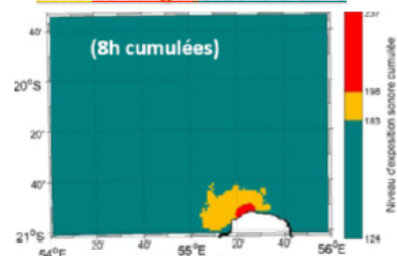
Cartographie spatiale du risque par classes de sensibilité d'espèces

Variables biologiques :
Espèce côtière/ de large
Espèces sensibles basses /hautes fréquences

Variables physiques :
Saisonnalité
Bathymétrie
Bruit impulsif/Bruit continu
Bruit sous-marin ≠ bruit aérien



Zone de danger et zone d'abris



Grand dauphin = sensible aux moyennes fréquences
Baleine à bosse = sensible aux basses fréquences

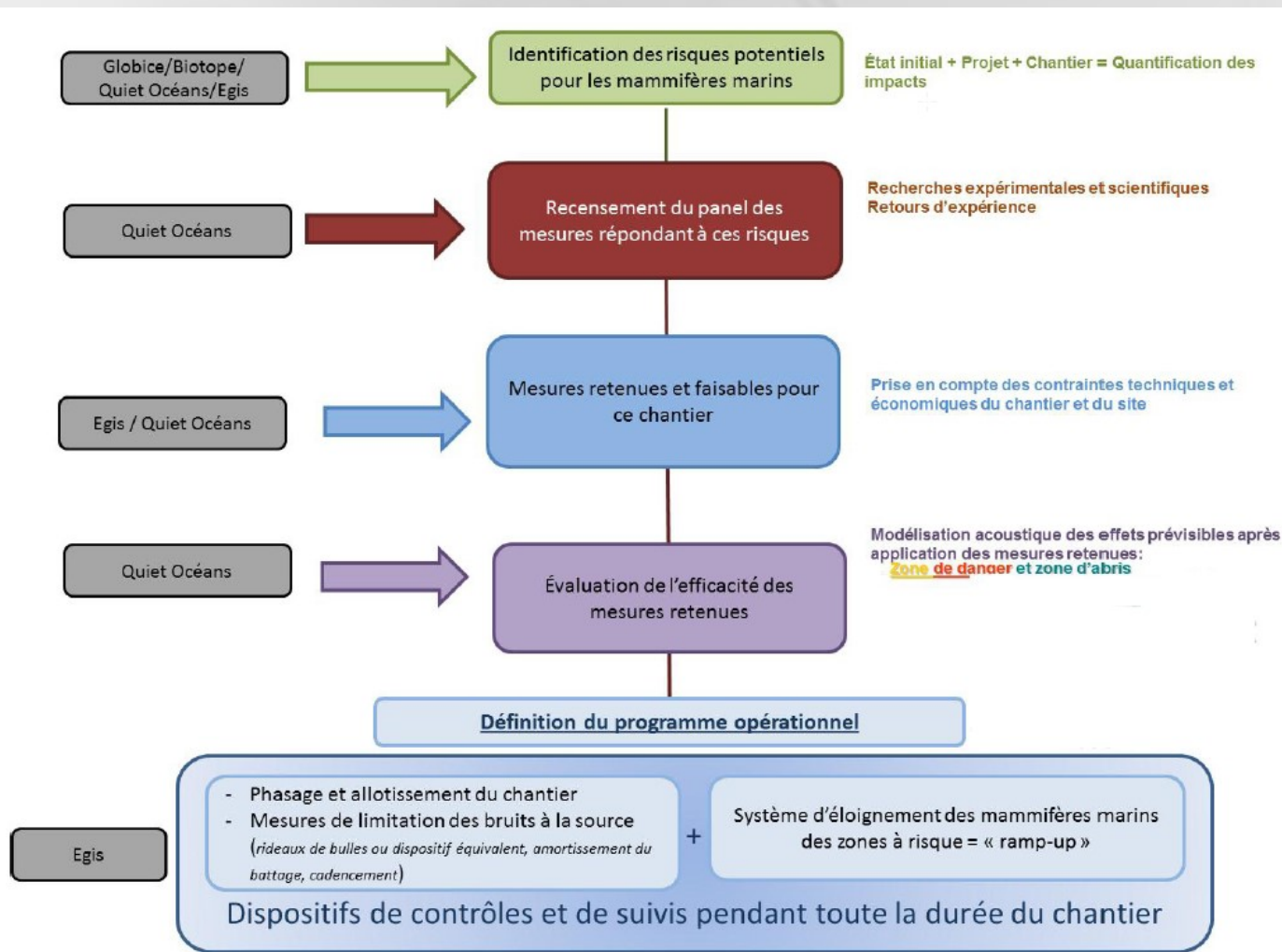
Effets de saisonnalité d'autant plus visibles que les fonds sont faibles (gradients de température plus importants en surface)

+ les fréquences sont basses,
+ les fonds sont profonds,
+ le bruit se propage loin

Résultats :
impacts acoustiques évalués comme très marqués (empreinte sonore sur plusieurs km) si aucune mesure n'était prise

Mammifères marins

Démarche de détermination des mesures d'atténuation des bruits



Mammifères marins

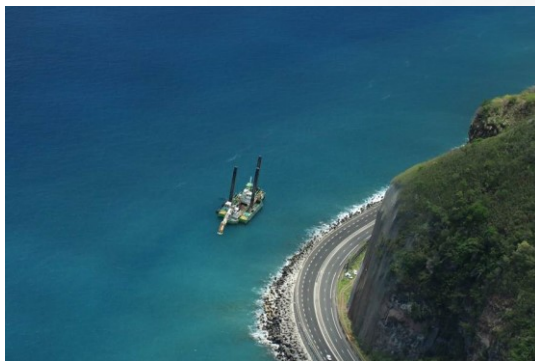
Les mesures

Objectifs de résultats

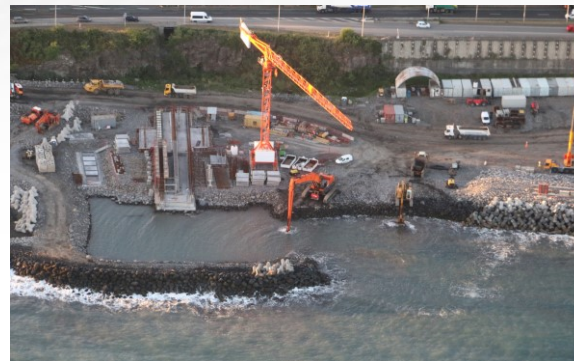
- ▶ Niveau d'exposition sonore (SEL ou « seuil moyen ») : **160 dB** (ref. $1\mu\text{Pa}^2$) à 750 m de la source de bruit et au-delà
- ▶ Niveau de pression sonore (PtP ou « seuil maximal ») : **190 dB** (ref. $1\mu\text{Pa}$)

Prescriptions de moyens

- ▶ Réduire les émissions sonores à la source
- ▶ Eloigner les individus des zones à risques



Dragage maritime (Pinocchio)



Travaux au BRH (digue D1)

Mammifères marins

Les mesures

Pour **éviter**, réduire ou compenser

▶ Adaptation des modalités constructives :

Proposition par le groupement Viaduc d'une solution avec préfabrication des piles à terre → pas de fondations profondes impliquant du battage → Evitement d'environ 12 mois de travaux bruyants



Préfabrication des piles au Port Est



Pose en mer depuis la barge Zourite

Mammifères marins

Les mesures

Pour éviter, réduire ou compenser :

- ▶ Contrôle visuel et acoustique de la présence de mammifères marins avant toute opération bruyante
- ▶ Ramp-up avant les opérations bruyantes (= augmentation progressive du bruit pour éloigner les mammifères marins)
- ▶ Mise en place de rideaux de bulles (= écrans acoustiques sous-marins)
- ▶ Adaptation des techniques : utilisation des techniques de fragmentation à la place du minage (cartouches non détonantes → réduction du bruit)



Monitoring acoustique



Rideau de bulle dans le cadre d'une opération de fragmentation (photo NortekMed)

Mammifères marins

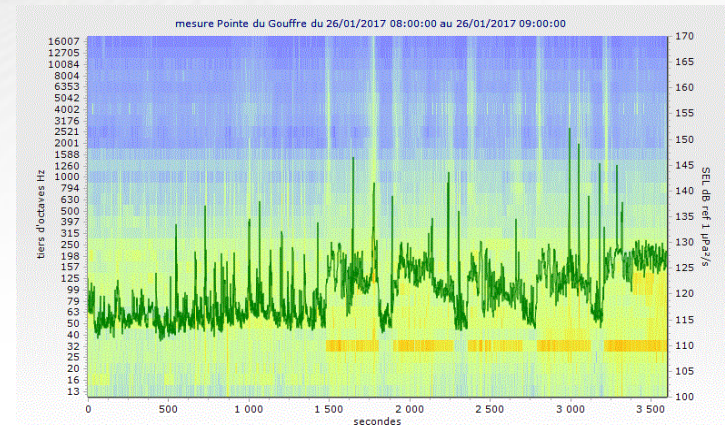
Les mesures

Mise en place d'un dispositif de contrôle et de suivi :

- ▶ 4 hydrophones fixes de contrôle du bruit en continu (NortekMed)
- ▶ Contrôles aléatoires réalisés par le contrôle extérieur (NortekMed), à 750 m et au-delà
- ▶ Contrôles hebdomadaires réalisés par les Entreprises



Position des 4 hydrophones fixes en novembre 2017



Suivi acoustique en continu

Mammifères marins

Les mesures

Pour **éviter, réduire** ou compenser :

Au vue des atteintes envisagées lors des études, des mesures compensatoires ont été proposées.

Même si les impacts observés sont bien moindres qu'estimés, maintien des mesures :

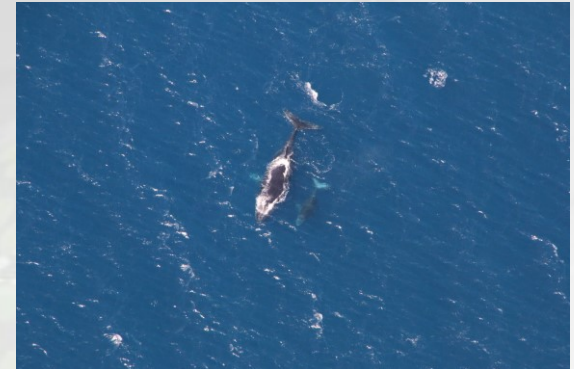
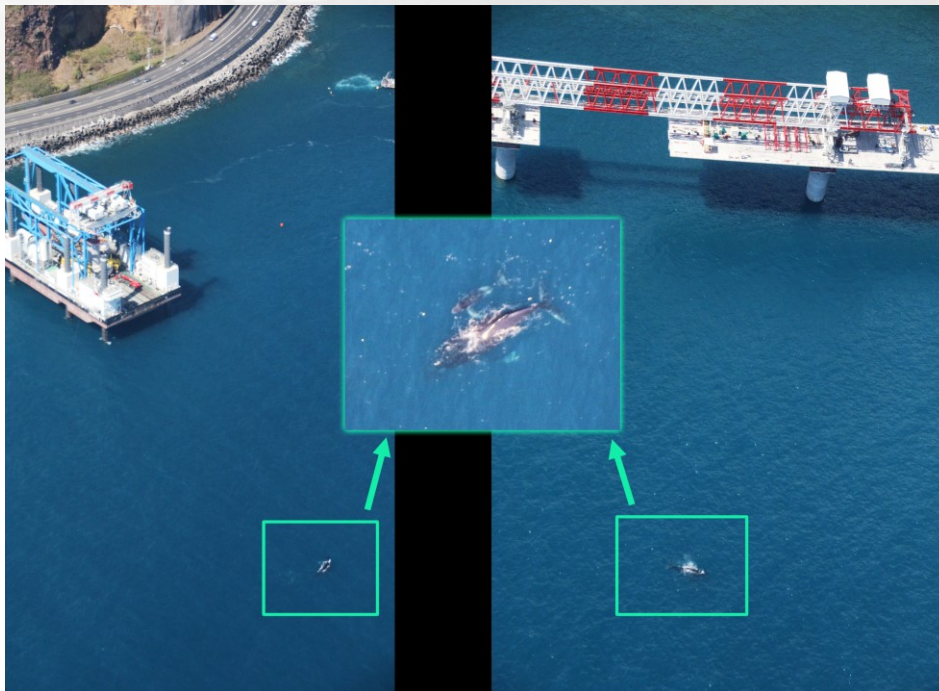
- ▶ Plans directeurs de Conservation pour la baleine à bosse et 4 espèces de dauphins : rédaction des plans et mise en œuvre d'actions de conservation
- ▶ Mise en place d'une mesure d'amélioration des conditions de quiétude pour les cétacés (sensibilisation au respect des chartes d'approches...)
- ▶ Thèse visant à l'amélioration des connaissances sur l'impact réel d'un chantier tel que la NRL sur les mammifères marins

Mammifères marins

Hiver austral 2017 (mi-juin à fin septembre 2017)

+ de 75 observations de baleines adultes et baleineaux aux abords des travaux

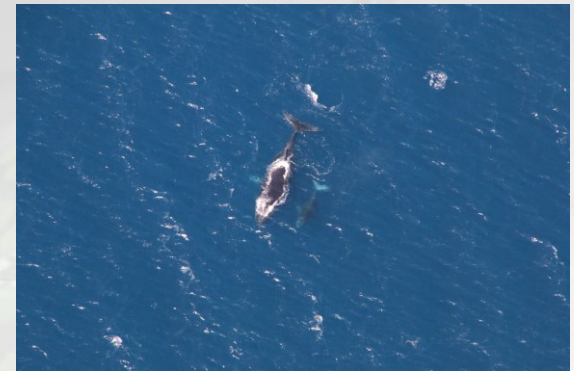
+ 1360 détections acoustiques de dauphins entre janvier et septembre 2017



Mammifères marins

Les suivis

Des suivis comportementaux ne mettant pas en évidence à ce jour, de modification significative des comportements et de la fréquentation des eaux proches du chantier



Enjeux environnementaux

Les principaux enjeux pour le projet



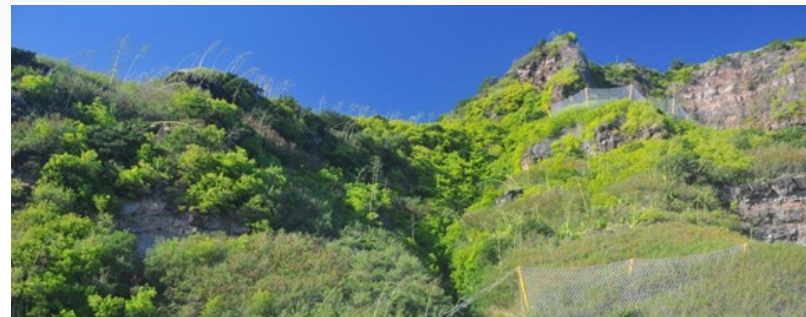
▶ Mammifères marins, tortues marines

▶ Faune et flore sous-marine (bancs coralliens...)



▶ Avifaune marine

▶ Faune et flore terrestre, y compris espèces exotiques envahissantes



Faune et flore sous-marine

Etat des lieux

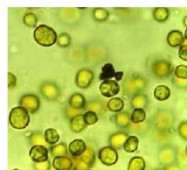
- ▶ Inventaires réalisés au cours de trois campagne 2008/2009/2012 par Equilibre Lagonia pour recenser les zones de substrat rocheux colonisées par des formations coralliennes et une faune associée (poissons, mollusques, crustacés ...)

- ▶ **4 zones d'intérêt écologique majeur** sur la zone concernée par le projet :
Pointe du Gouffre, Pointe Chaloupe , pointe de la Ravine à Malheur, banc récifal des Lataniers

Le corail :



polype
animal



micro-algue
végétal



squelette
calcaire



Faune et flore sous-marine

Etat des lieux



Site de la Pointe du Gouffre



Site du Banc des Lataniers

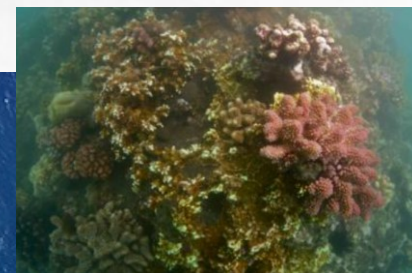
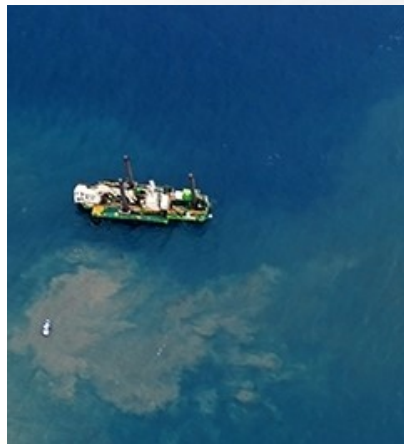


Faune et flore sous-marine

Les risques / l'évaluation des impacts

▶ Risques potentiels d'impacts : recouvrement des habitats naturels marins

- **Recouvrement directs (effet d'emprise)** des milieux coralliens et des substrats meubles / incidences sur la faune associée - pollution (MES, hydrocarbures ...)
- **Emprise accidentelle / destruction**
- **Modification du fonctionnement hydro-sédimentaire** (érosion/sédimentation et impact indirect biologique)



Faune et flore sous-marine

Les mesures

Objectifs de résultats

- ▶ Seuil 50 mg/l de MES au droit des zones sensibles à ne pas dépasser

Prescriptions de moyens

- ▶ Réduire les émissions de MES
- ▶ Mettre en place des dispositifs de protection type barrage au droit des zones sensibles, ou dispositifs équivalents en terme d'efficacité



Barrage anti-MES – Pointe du Gouffre

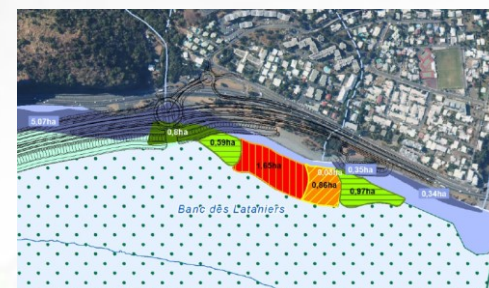
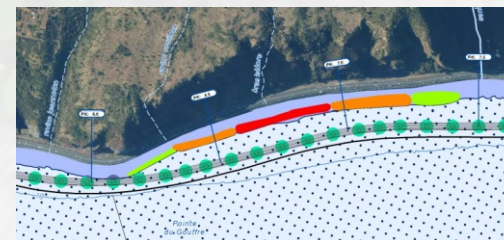
Faune et flore sous-marine

Les mesures

Pour **éviter**, réduire ou compenser

La conception même du projet permet d'éviter certaines zones sensibles identifiées parmi les 4 recensées :

- ▶ Passage en viaduc au niveau de la Pointe du Gouffre
- ▶ Réduction des emprises sur le banc des Lataniers : en se rapprochant le plus possible de la polygonale projet et en minimisant les emprises de l'échangeur de La Possession ; 1 zone impactée (zone de sensibilité faible)



Faune et flore sous-marine

Les mesures

Pour éviter, réduire ou compenser :

- ▶ Balisage des zones sensibles pour réduire les risques d'impact direct liés à la navigation
- ▶ Réduction à la source des MES : contrôle des matériaux extérieurs mis en œuvre (matériaux propres, exempts de fines)
- ▶ Mise en place de dispositifs filtrants ;

exemple au niveau de la zone sensible de la pointe du Gouffre :



→ Barrage composé de jupes géotextile lestées

Faune et flore sous-marine

Les mesures

Pour éviter, réduire ou compenser :

- ▶ Mise en place de dispositifs filtrants

exemple au niveau des digues :



- Barrage en enrochement (1-500 kg)
- Réalisation de casiers fermés pour mise en œuvre des matériaux plus fins (0-300 mm)

Faune et flore sous-marine

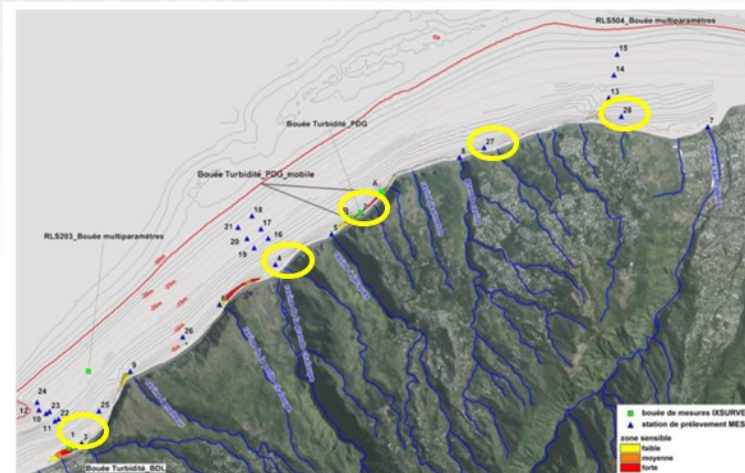
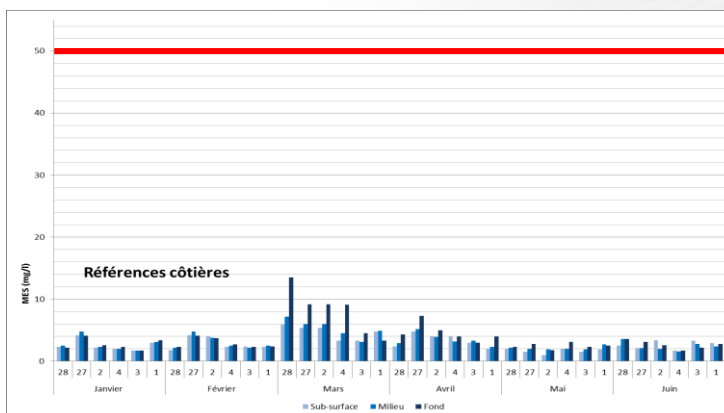
Les mesures

Mise en place d'un dispositif de contrôle et de suivi :

- ▶ Mesure de la turbidité en continu
- ▶ Contrôles mensuels et aléatoires réalisés par le contrôle extérieur (Artélia)
- ▶ Contrôles tri-hebdomadaires réalisés par les entreprises



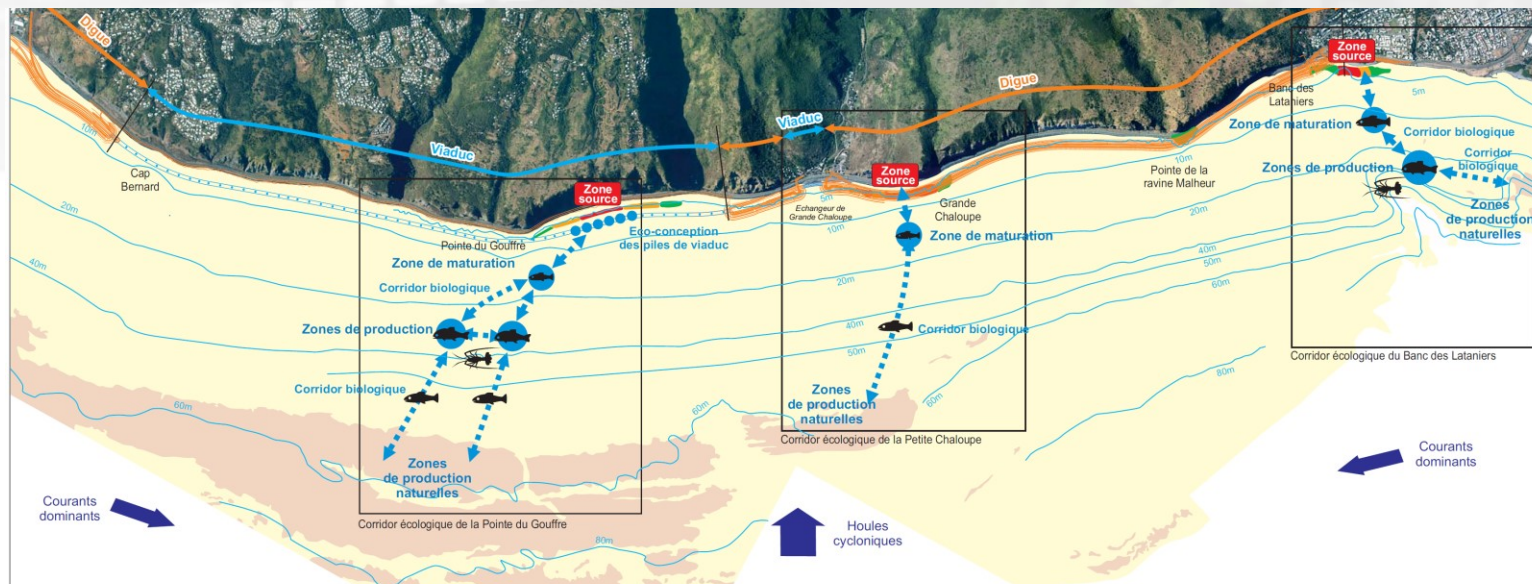
Bouée de suivi



Les mesures

Pour **éviter**, **réduire** ou **compenser** : mise en place d'une trame bleue, marine :

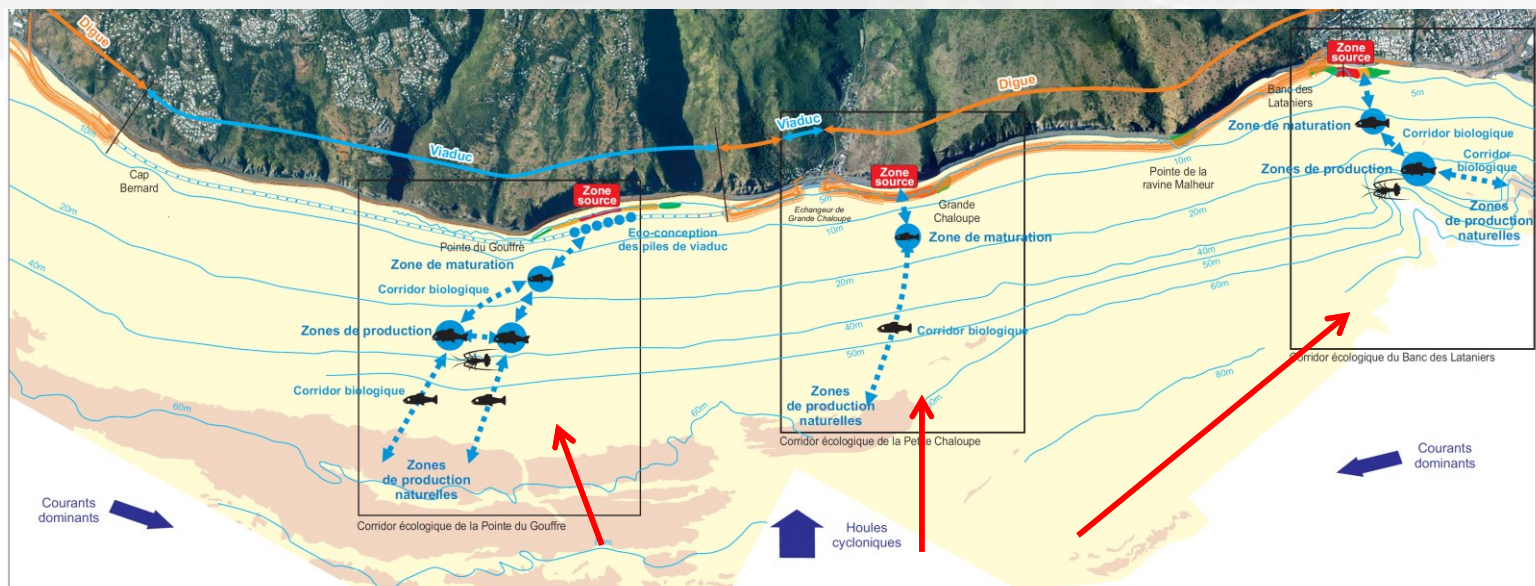
Objectif : favoriser la maturation migratoire des individus du stade juvénile depuis la côte jusqu'à leur habitat refuge d'adulte au large



Faune et flore sous-marine

Les mesures

- ▶ Corridor longitudinal situé sur les petits fonds : carapaces de digues, enrochements naturels des tapis anti-affouillement des piles et des digues et **modules artificiels intégrés aux piles**
- ▶ Création de trois corridors transversaux face aux « zones sources » ou « de recrutement » : récifs artificiels disposés perpendiculairement à la côte : **ECO-récifs**

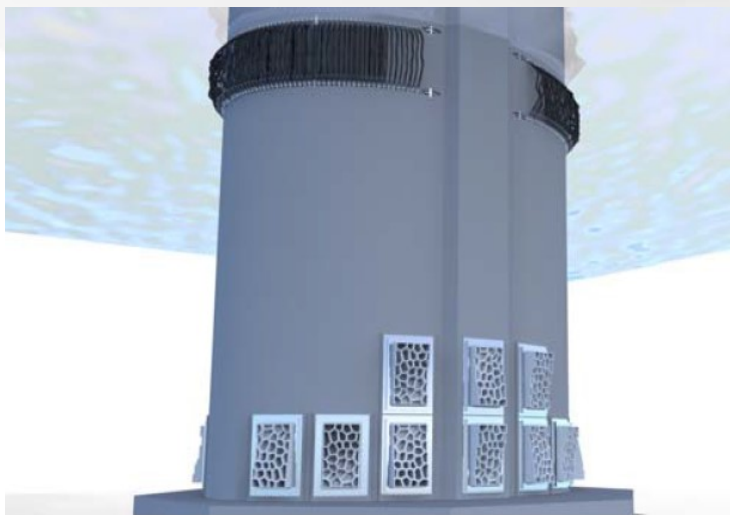


3 corridors transversaux (perpendiculaires à la côte)
Lien entre les petits fonds et le large

Faune et flore sous-marine

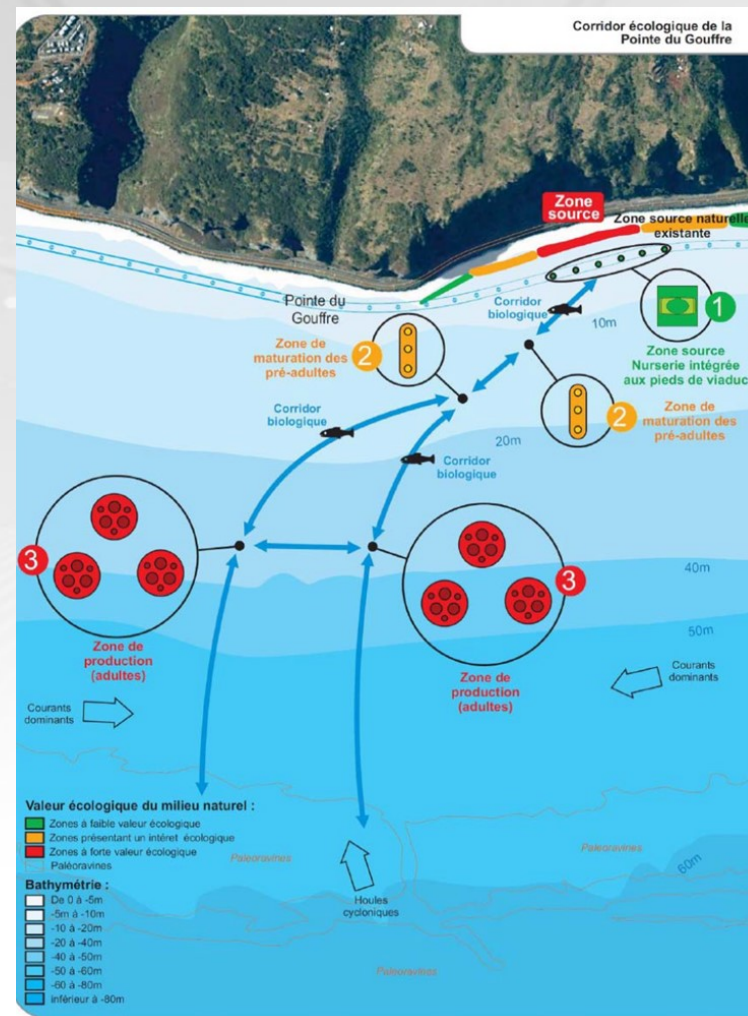
Les mesures

- ▶ **Ecoconception des piles du viaduc :**
6 piles équipées face à la Pointe du Gouffre (= zone de recrutement)
avec des modules type « plateaux coralliens » au fond pour
l'installation de juvéniles



Les mesures

- ▶ récifs de maturation de « pré-adultes » :
6 modules entre 10 et 20 m de profondeur au niveau du corridor écologique de la Pointe du Gouffre
- ▶ récifs de production (accueil d'individus adultes) :
36 modules sur des fonds de 25 m de profondeur au niveau du corridor écologique de la Pointe du Gouffre



Enjeux environnementaux

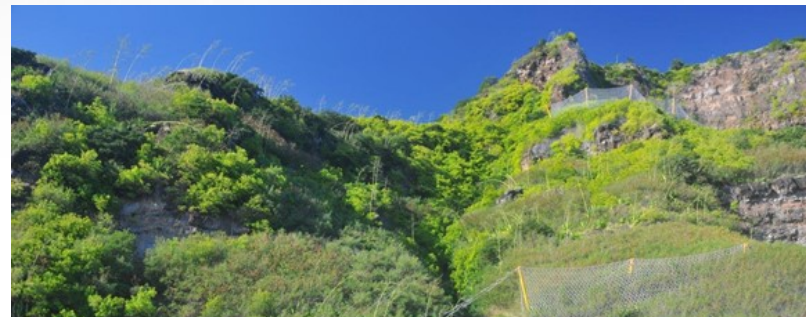
Les principaux enjeux pour le projet



- ▶ Mammifères marins, tortues marines
- ▶ Faune et flore sous-marine (bancs coralliens...)

▶ **Avifaune marine**

- ▶ Faune et flore terrestre, y compris espèces exotiques envahissantes



► Inventaires

► 6 espèces, toutes protégées

- Espèces nocturnes : Pétrel de Barau, Pétrel noir Paille-en queue, Puffin du Pacifique, Puffin de Baillon
- Espèces diurnes : Noddi brun, Paille-en-queue



Avifaune marine

Etat des lieux

► Les puffins

- Espèces non endémiques
- Nichent dans cavités (falaise et remparts des ravines)

Le Puffin de Baillon / Puffin tropical

- 3 000 à 5 000 couples RUN et 50 à 150 couples sur falaise NRL et ravines
- 1 œuf par ponte (envol de novembre à février)
- se rend au nid après la nuit tombée et repart avant l'aube



Le Puffin du Pacifique

- 100 à 1 000 ind. RUN et 20 couples sur falaise NRL et ravine GC
- 1 œuf en janvier et envol en mai
- S'alimente en mer la journée et revient aux colonies le soir



Avifaune marine

Etat des lieux

► Le Pétrel de Barrau

- Endémique
- Niche dans remparts et plateaux du Piton des Neiges et Grand Bénard
- 6 000 à 8500 couples RUN
- Repro entre sept et avril > 1 œuf (nov.) > envol (pic en avril) – se repère par rapport à la lune et aux étoiles > 3 ans en mer > retour aux colonies

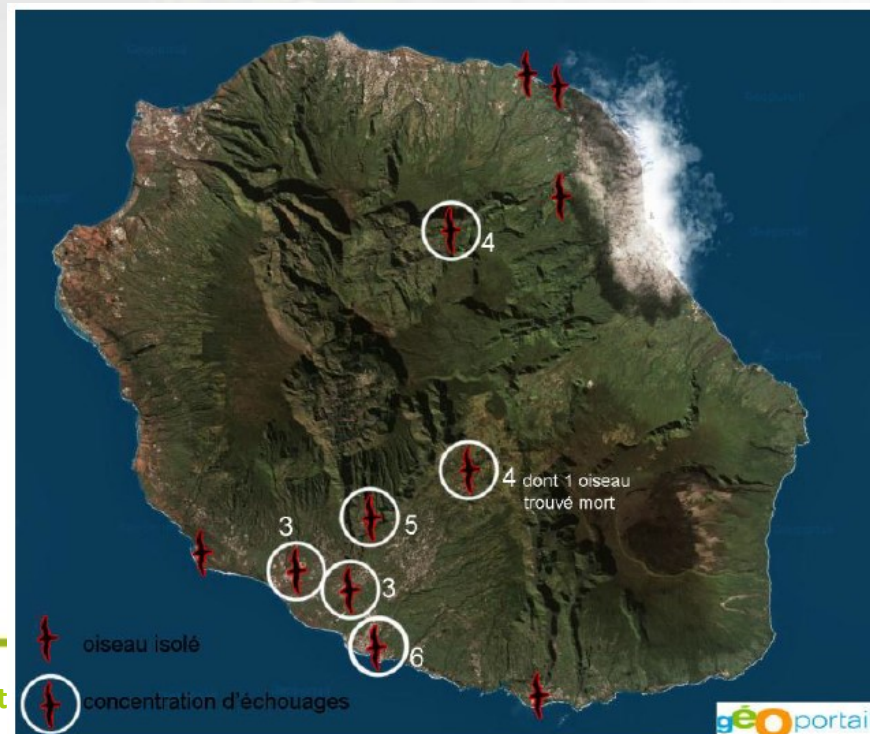


Avifaune marine

Etat des lieux

► Le pétrel noir

- Endémique
- Quelques dizaine d'ind. > Un des oiseaux les plus rares au monde
- En danger critique d'extinction
- Localisation des colonies peu connue (attestée dans les hauts de l'Entre-Deux et Dimitile)
- Biologie similaire au Pétrel de Barau (reproduction / envol des jeunes)
- Axe de migration différent, non axé sur NRL



Les risques / l'évaluation des impacts

▶ Risques potentiels d'impacts : perturbations de l'avifaune marine

- Éclairages nocturnes des travaux
- Risques de collisions, risques d'échouage



▶ En cas d'échouage sur le chantier :

- Prise en charge de l'oiseau : dépose dans un carton puis auprès du référent environnement
- Alerte téléphonique de la SEOR (Société d'Etude Ornithologique de la Réunion)
- Dépôt de l'oiseau dans un poste relais ou au centre de soin SEOR
- Prise en charge par la SEOR (soins le cas échéant) avant relâche

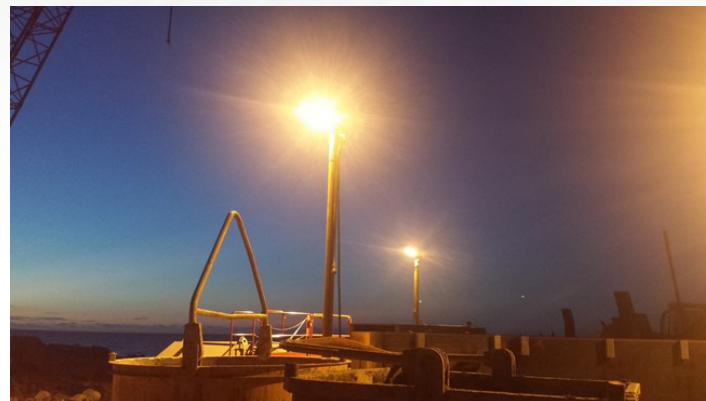
Avifaune marine

Les mesures

Pour éviter, réduire ou compenser :

► Adaptation des éclairages :

- Orientation des rayons lumineux vers le sol
- Éclairages ne générant pas d'UV
- Utilisant des lampes à sodium de faible intensité ou équivalent en termes de spectres lumineux
- Pas d'éclairage de couleur blanche (forte attractivité sur les oiseaux)



Avifaune marine

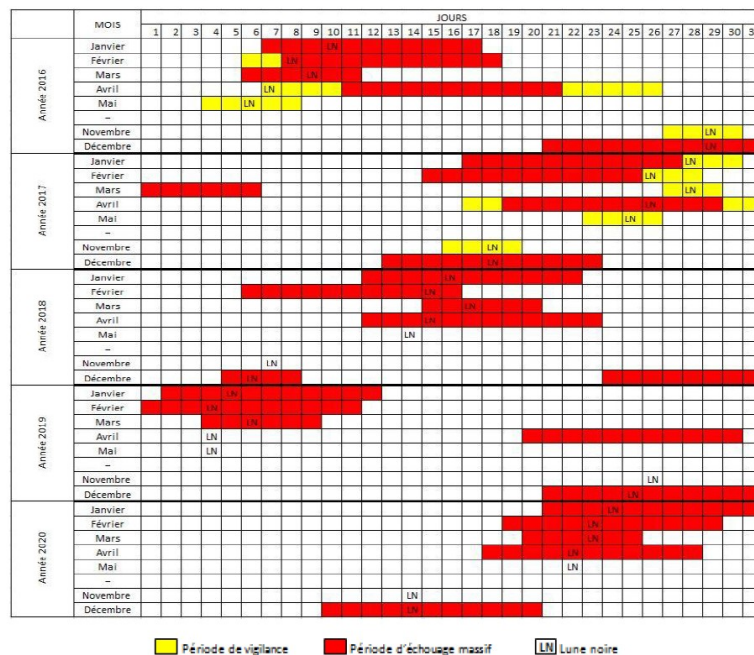
Les mesures

Pour **éviter**, réduire ou **compenser** :

- ▶ Eclairage interdit sauf dérogation lors des nuits les plus sensibles
→ calendrier spécifique des nuits d'interdiction établi par la SEOR – pour 5 ans



Prévisionnels des périodes d'échouage massif des pétrels de 2016 à 2020



- Analyse sur 2 années identiques (dates des lunes noires identiques)
- Identification sur ces 2 années, des périodes de pic d'échouage d'oiseaux marins
- Détermination d'une période de 11 jours englobant ces pics

Sur l'année 2016 : 467 jeunes pétrels de Barau récupérés et pris en charge par la SEOR entre le 31 mars et le 25 mai 2016 (soit sur ~60 jours), dont 327 entre le 5 et le 24 avril (=70% du nombre total d'oiseaux échoués pendant cette saison d'envol)

379 ont pu être sauvés et relâchés (81%)

88 oiseaux morts suite à des symptômes sévères (luxation, fracture, brûlure,...).

Sur l'année 2017 : 4 pétrels de Barau récupérés sur le chantier de la NRL

Les mesures

Pour éviter, réduire ou compenser :

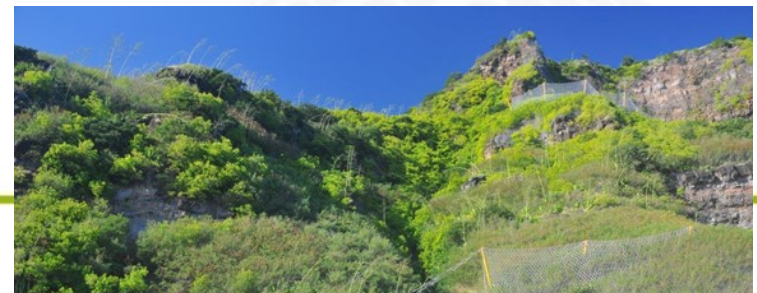
- ▶ Participation à l'élaboration des Plans Directeurs de Conservation et mise en œuvre d'actions prévues aux Plans en faveur du Pétrel de Bureau, du Puffin de Baillon et du Puffin du Pacifique ;
- ▶ Participation à l'effort de soin de l'avifaune sensible impactée ;
- ▶ Participation financière à des programmes d'amélioration des connaissances sur les oiseaux marins, d'étude sur les gîtes artificiels ...

Et aussi ...

Les mesures

Pour **éviter**, **réduire** ou **compenser** :

- ▶ Lutte contre les espèces exotiques envahissantes
- ▶ Mesures concernant la navigation (réduction des vitesses ...)
- ▶ Collecte, tri, revalorisation autant que possible des déchets ; vigilance particulière concernant les déchets à risque d'envol (risques tortues notamment)
- ▶ Lutte contre les pollutions



PROJET ARCHITECTURAL ET INTEGRATION PAYSAGERE

VIADUCS & OUVRAGES D'ART

Viaducs et Ouvrages d'Art

Les échangeurs

Saint Denis

Grande Chaloupe

La Possession

Viaduc de 5400m en mer

Fonds marins plus

importants

Présence d'une

zone sensible



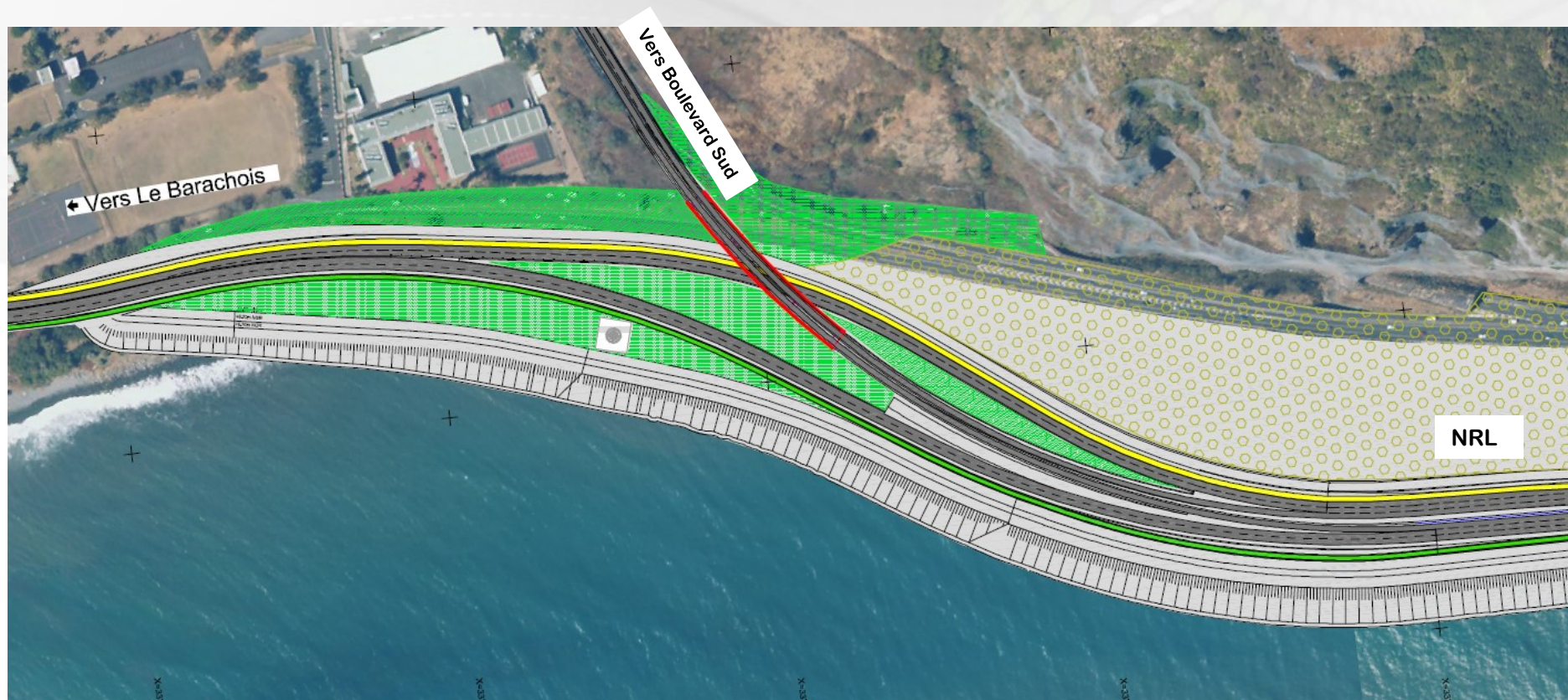
LES ECHANGEURS



Ouvrages des échangeurs

Echangeur de Saint Denis

- Echangeur complet avec le Barchois et le Boulevard Sud



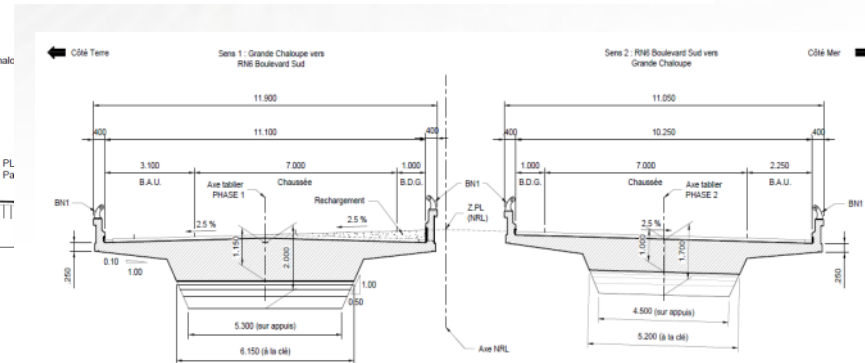
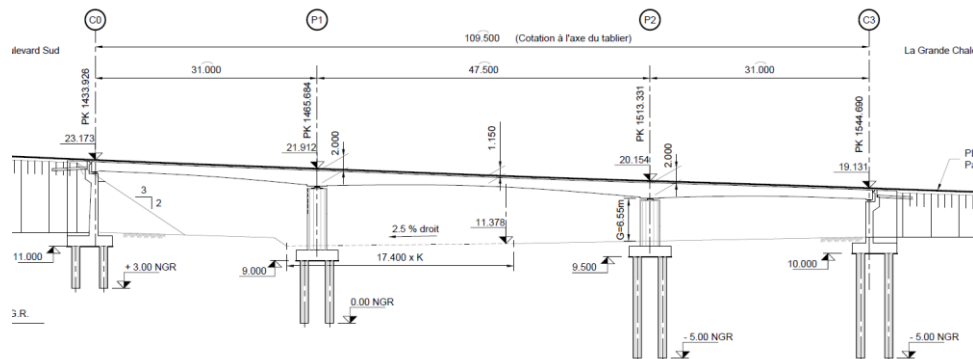
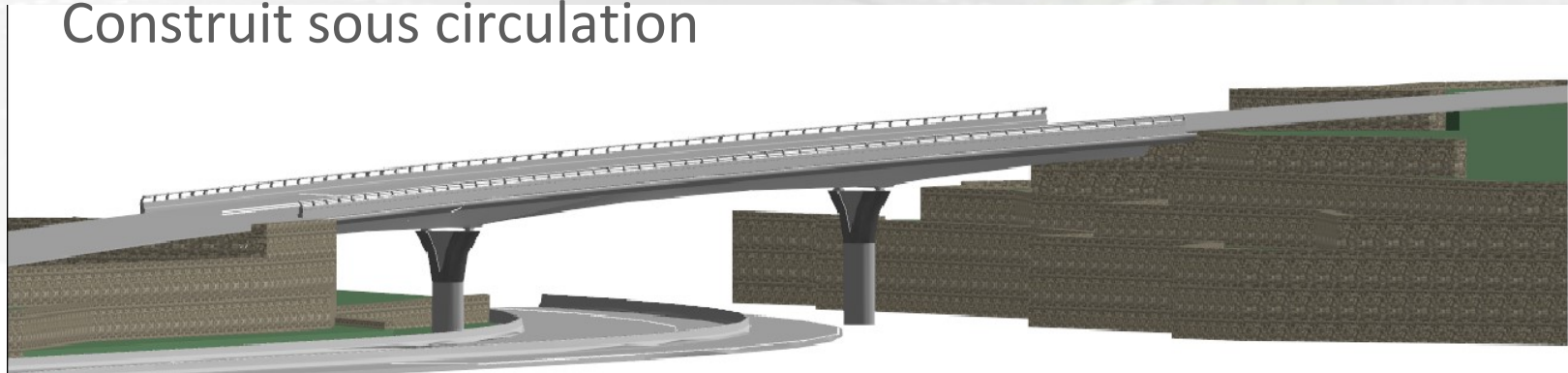
Ouvrages des échangeurs

Echangeur de Saint Denis

Dalle nervurée 3 travées en BP de hauteur var. de 1,15 à 2,0m

Portées : 31,0 – 47,50 – 31,0

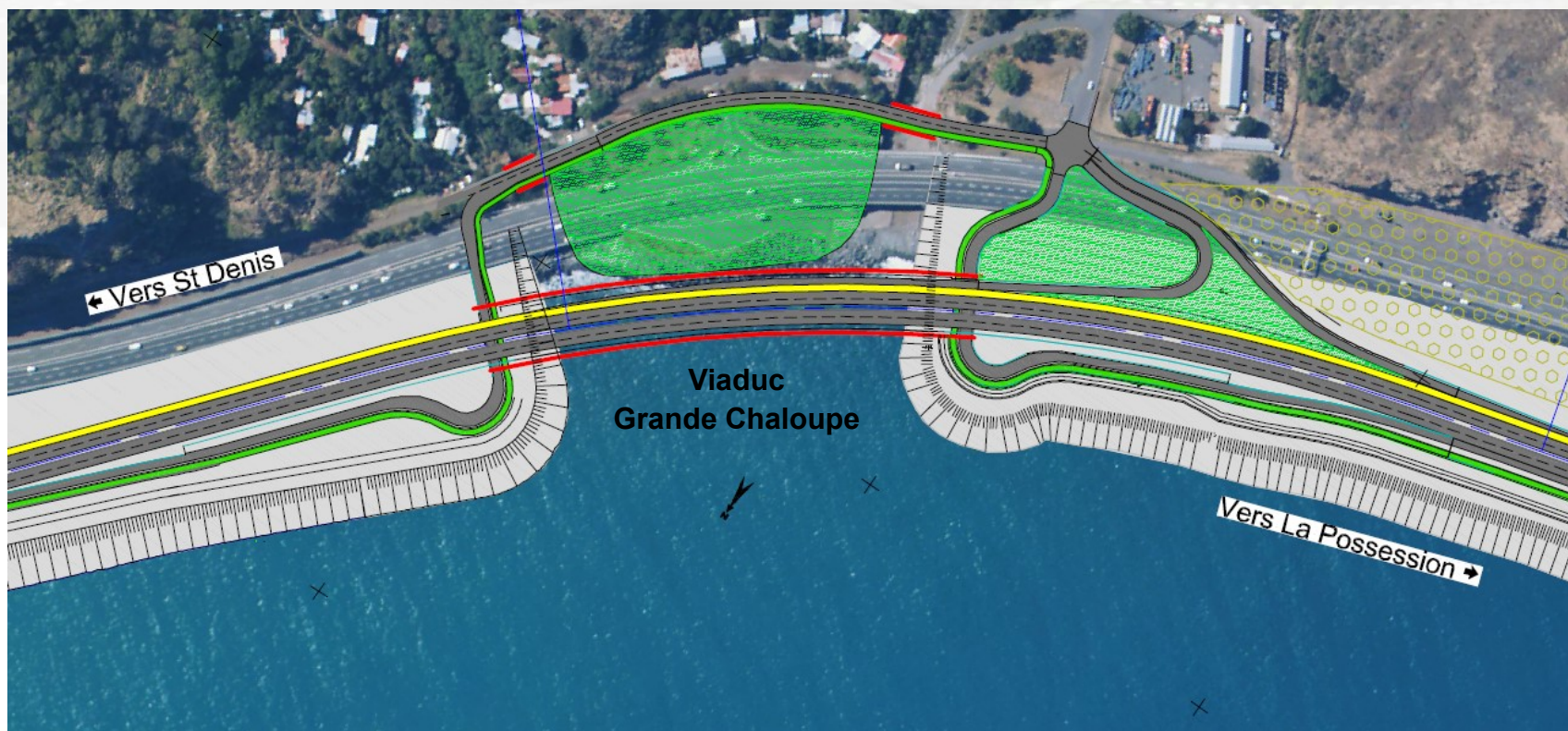
Construit sous circulation



Ouvrages des échangeurs

Desserte de Grande Chaloupe

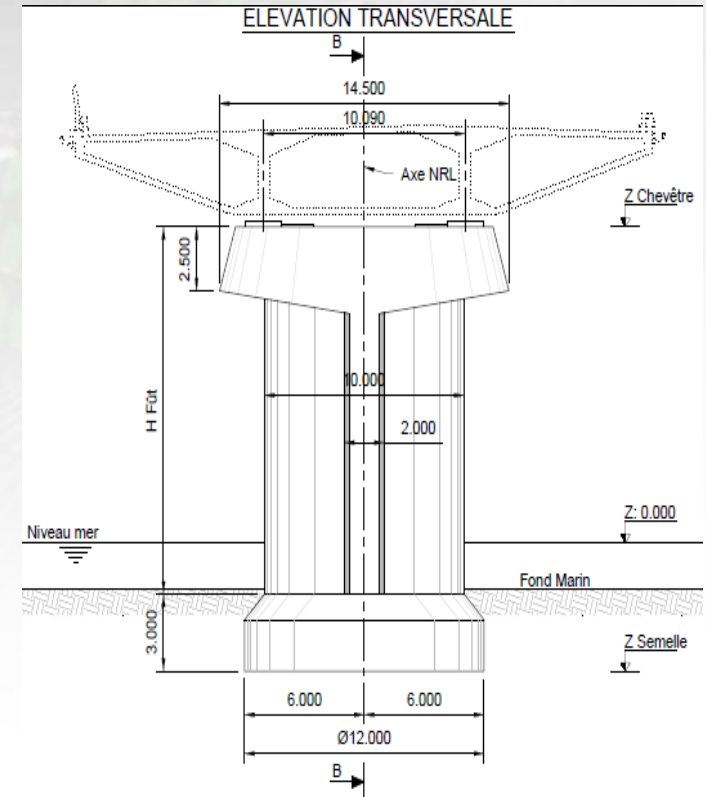
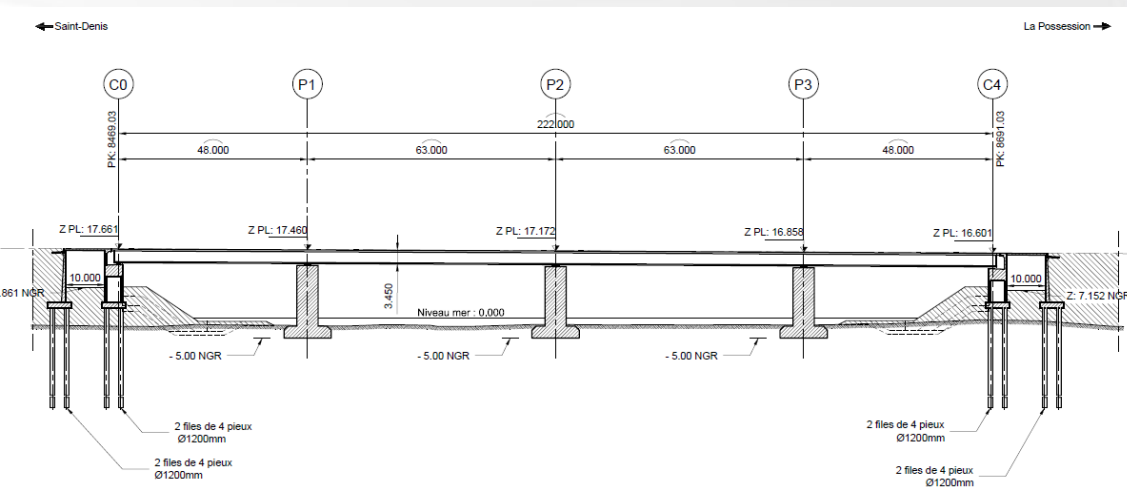
- ▶ Echangeur complet entre la NRL et le secteur de Grande Chaloupe
- ▶ Franchissement de 2 ravines (Grande Chaloupe et Tamarin)



Ouvrages des échangeurs

Viaduc de la Grande Chaloupe

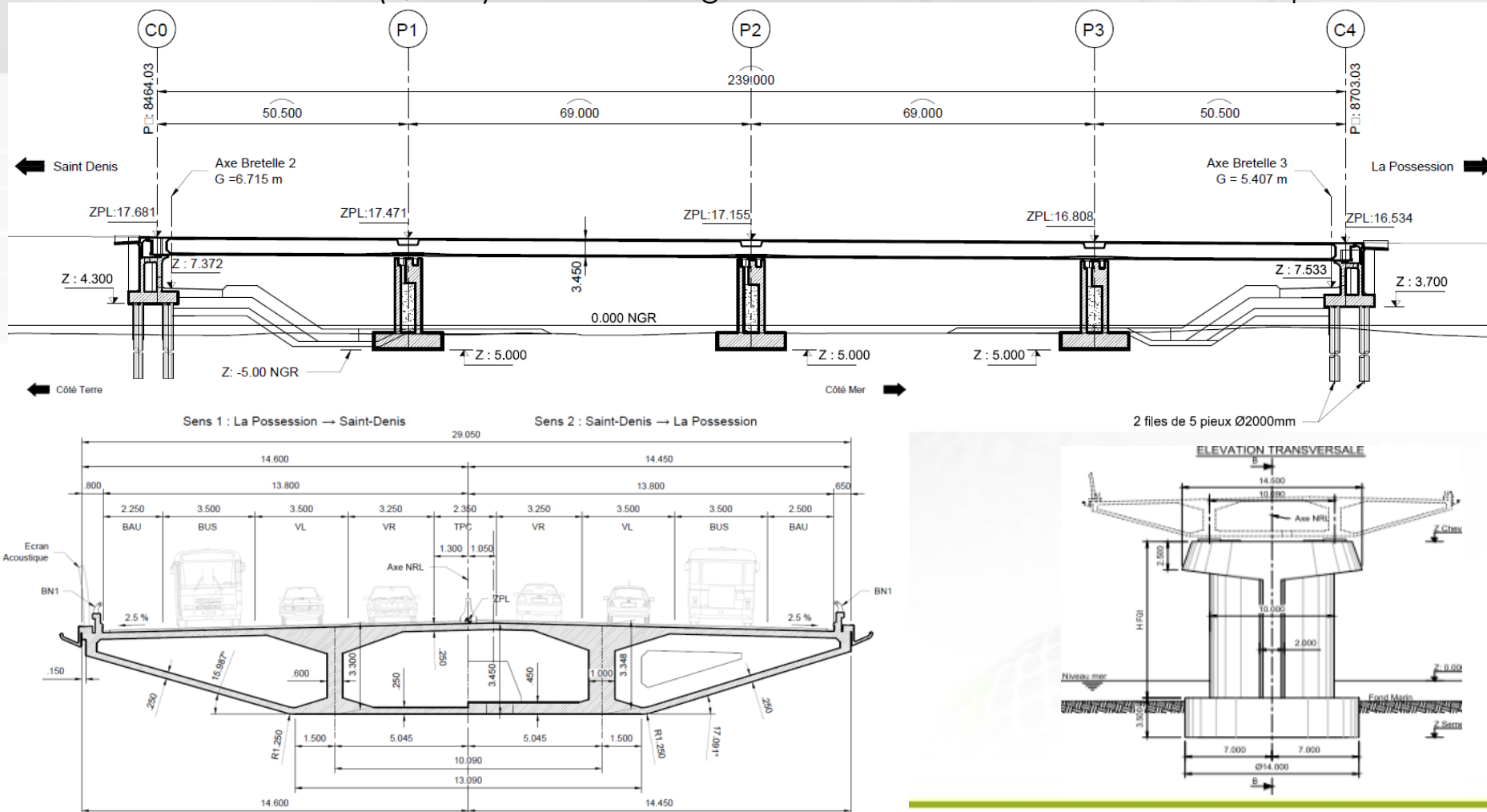
► AVP : BP 4 travées 48 – 63 – 63 – 48 avec culées creuses



Ouvrages des échangeurs

Viaduc de la Grande Chaloupe

Viaduc en mer de 240 m de longueur totale. Tablier à 4 travées, mono-caisson 4 âmes de hauteur constante (3,45 m) et 29 m de largeur. Encorbellement successif coulé en place.



Ouvrages des échangeurs

Viaduc de la Grande Chaloupe

MT4 – Viaduc de la Grande Chaloupe

► Groupement : EIFFAGE TP (mandataire) / RAZEL-BEC / SAIPEM / NGE / GUINTOLI



► Travaux réalisés de 2014 à 2017 : terminés

► Montant du marché : 34,6 M € HT



Ouvrages des échangeurs

Echangeur de La Possession

Echanges complets entre la NRL et La Possession

Franchissement de la ravine Lafleur

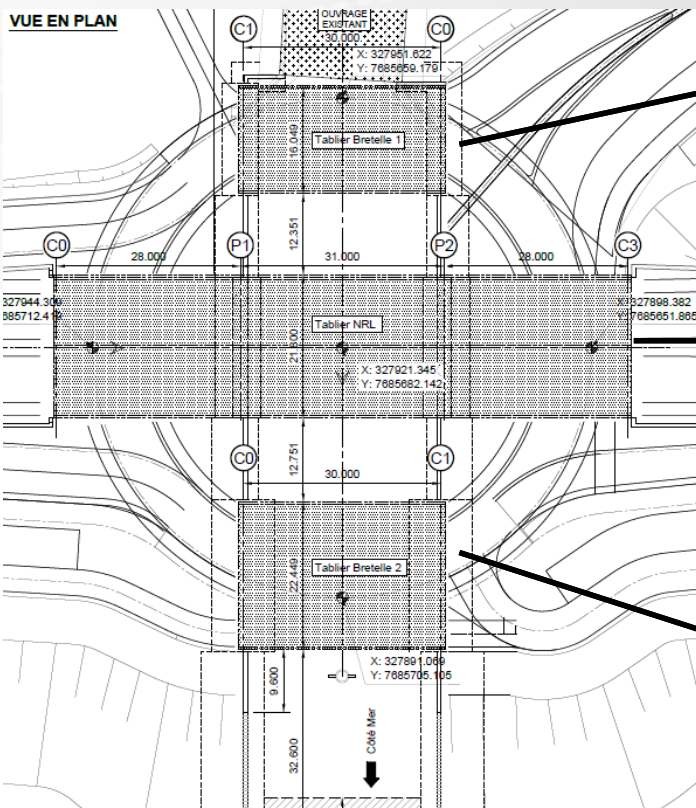


Ouvrages des échangeurs

Echangeur de La Possession

► Echangeur composé de 3 ouvrages et de soutènements

VUE EN PLAN

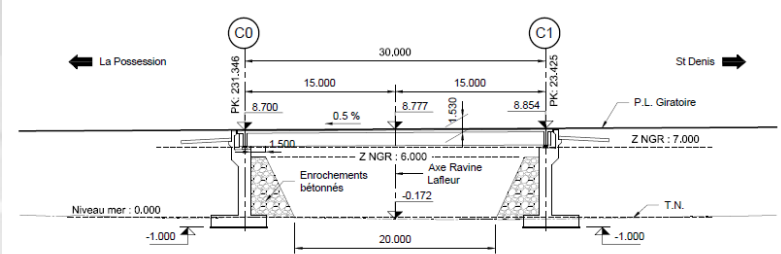


OA H

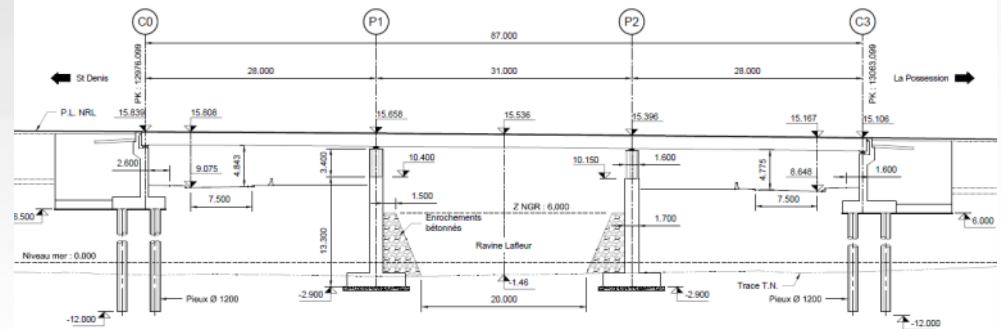
PI

OA H

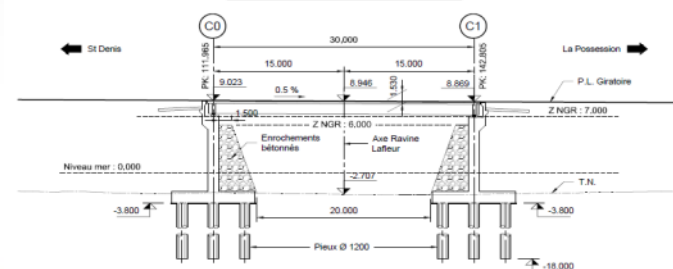
COUPE LONGITUDINALE BRETELLE 1



COUPE LONGITUDINALE NRL



COUPE LONGITUDINALE BRETELLE 2



Ouvrages des échangeurs

Echangeur de La Possession

MT2– Échangeur de La Possession – 1^{ère} phase

► Groupement titulaire du marché :



► Travaux réalisés de 2014 à 2016 : terminés

► Montant des travaux : 54,7 M€ TTC



VIADUC DE 5400m EN MER



Viaduc 5400m en mer

Sommaire

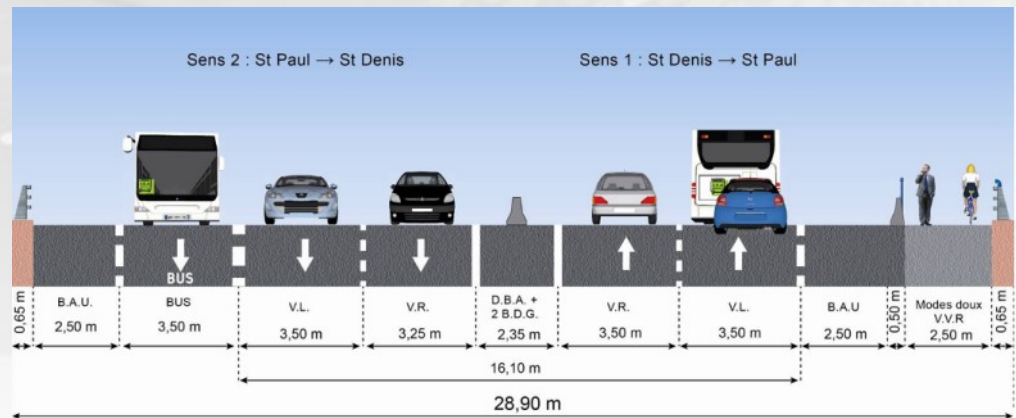
- ▶ I – Hypothèses et contraintes du programme
- ▶ II – Solutions étudiées
 - ▶ Phase APS
 - ▶ Phase AVP
 - ▶ Phase PRO
 - Viaduc hauteur variable de portée principale 120m
 - Viaduc hauteur constante de portée principale 100m
- ▶ III – Particularités du dimensionnement de l'ouvrage
 - ▶ Choc de bateau
 - ▶ Efforts de houle
 - ▶ Etudes du tablier
- ▶ IV - Principes constructifs

Viaduc 5400m en mer

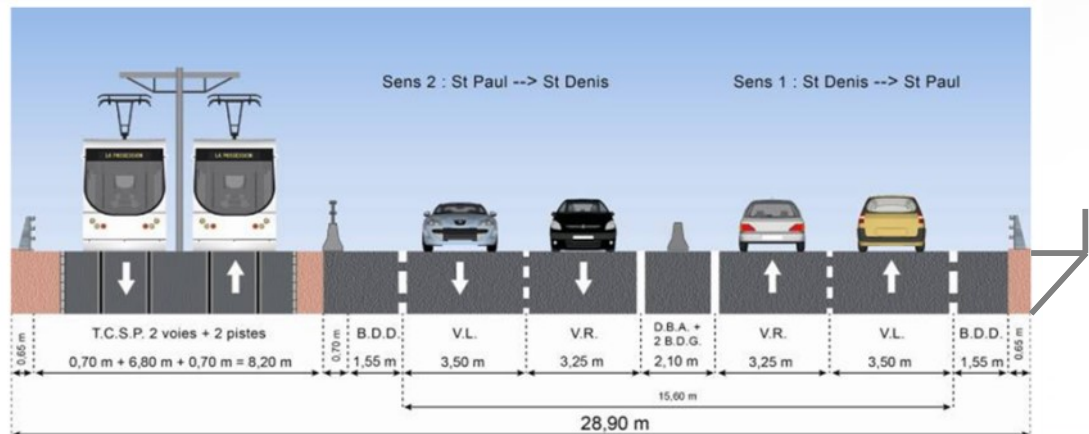
Hypothèses du programme

- ▶ Largeur tablier = 28,90 m
- ▶ Profil en travers « évolutif »

▶ Mode 1 :
Mise en service



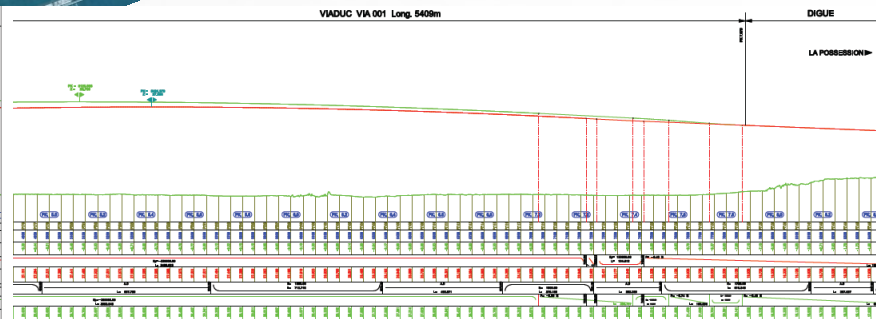
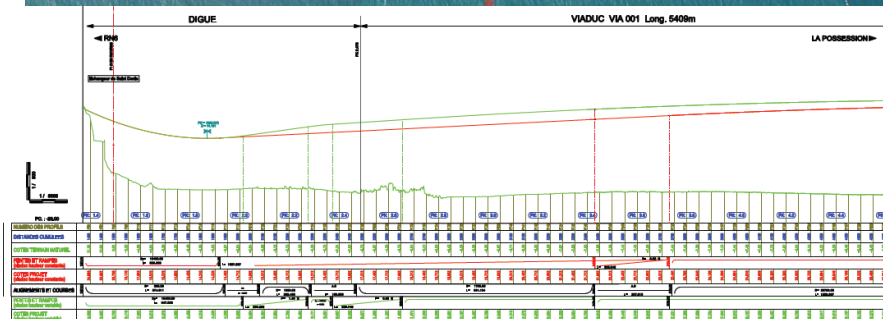
▶ Mode 2 : TCSP guidé
+ passerelle mode doux



Viaduc 5400m en mer

Hypothèses du programme - Tracé

- ▶ Axe en plan calé au-delà de la polygonale des chutes de blocs
- ▶ Evacuation des eaux aux extrémités de l'ouvrage
- ▶ Appareils d'appuis au-dessus des houles cycloniques centennales

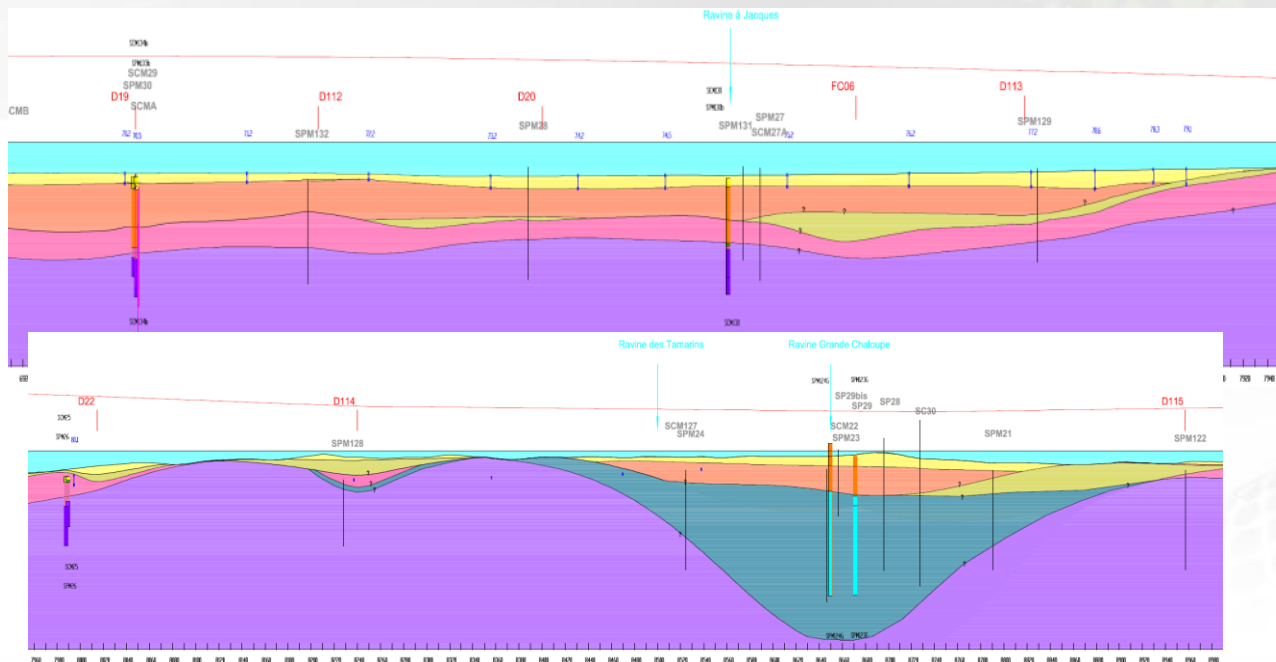


Viaduc 5400m en mer

Contexte géotechnique

► Contexte géotechnique complexe:

- Profondeur du basalte et épaisseur des couches supérieures variables
- Définition d'un modèle géotechnique avec des incertitudes.

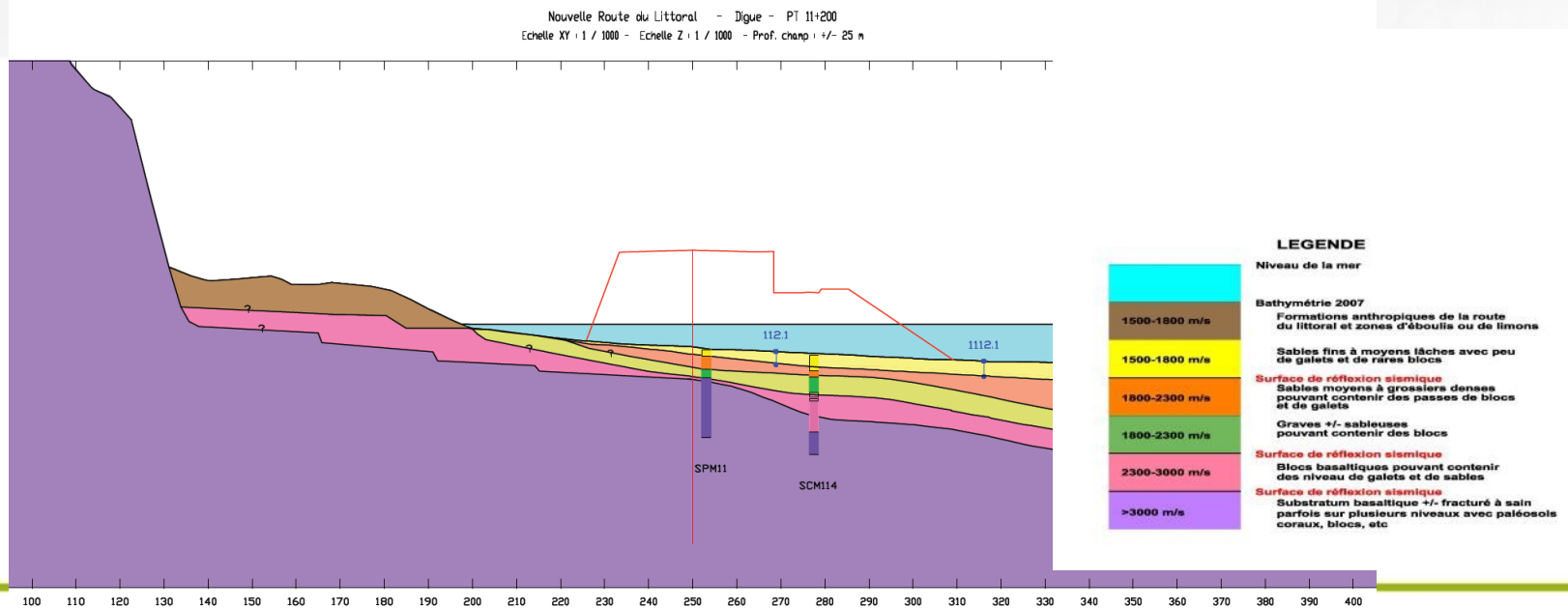


Viaduc 5400m en mer

Contexte géotechnique

► Lithologie:

- Sables lâches : en surface, plus compacts en dessous,
- Graves et galets de compacité moyenne à forte,
- Blocs basaltiques à matrice sablo-graveleuse,
- Substratum basaltique : hétérogène et solide, alternance de bancs de basalte compact et de niveaux scoriacés



Viaduc 5400m en mer

Contexte géotechnique

- ▶ Caractérisation des sols de fondation des appuis:
 - ▶ Avec un logigramme de décision pour décider du choix sécurisé semelle/pieu
 - ▶ En favorisant les fondations sur semelle chaque fois que possible
 - ▶ Qualification des sols:
 - Par approche locale si les analyses des données sont fiables
 - Par approche globale si les analyses des données sont imprécises (raisonnement par moyenne sur la couche considérée)
 - ▶ Campagne complémentaire géotechnique réalisée pendant la période de préparation des marchés

Viaduc 5400m en mer

Logigramme décisionnel

- ▶ Choix des fondations: démarche selon un logigramme décisionnel et l'application de critères de choix
 - ▶ Critère 1 de faisabilité des fondations semelle (épaisseur des sables)
 - ▶ Critères 2 et 3 de caractéristiques mécaniques des sols (p_l et E_m)
 - ▶ Critère 4 « aléa géologique » d'incertitude géologique et de représentativité des données
- ▶ En cas d'incertitude (critère 4), le choix d'une fondation profonde est retenu.



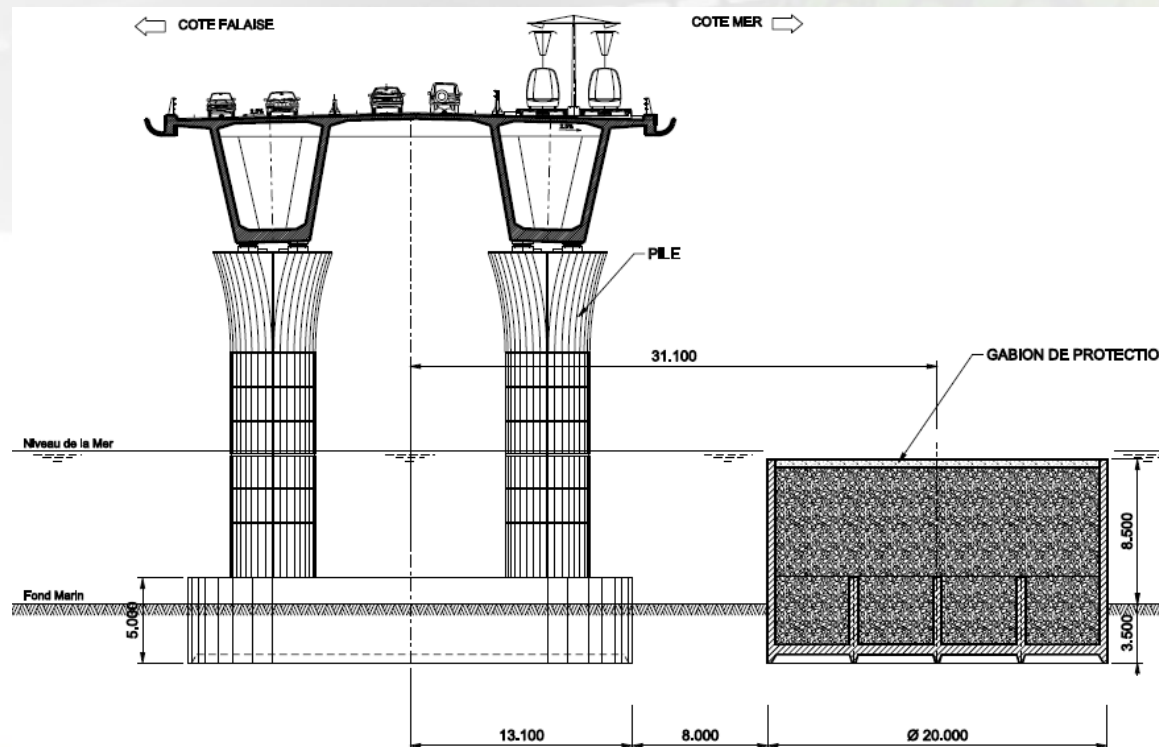
Solutions étudiées

Viaduc 5400m en mer

Phase APS

► Viaduc défini à l'APS

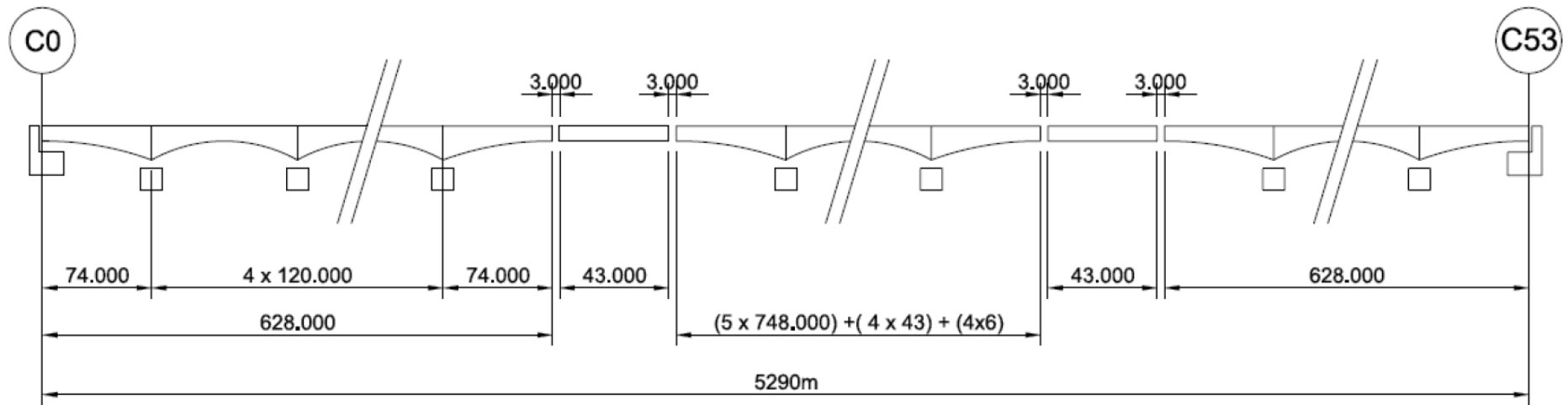
- Bi-caisson béton précontraint à hauteur variable
- Pile à double fûts et fondation unique
- Pile protégée par gabion immergé de grande dimension



Phase APS

► Viaduc défini à l'APS

- ▶ Travée principale de 120 m
- ▶ Sept tabliers séparés par des travées isostatiques



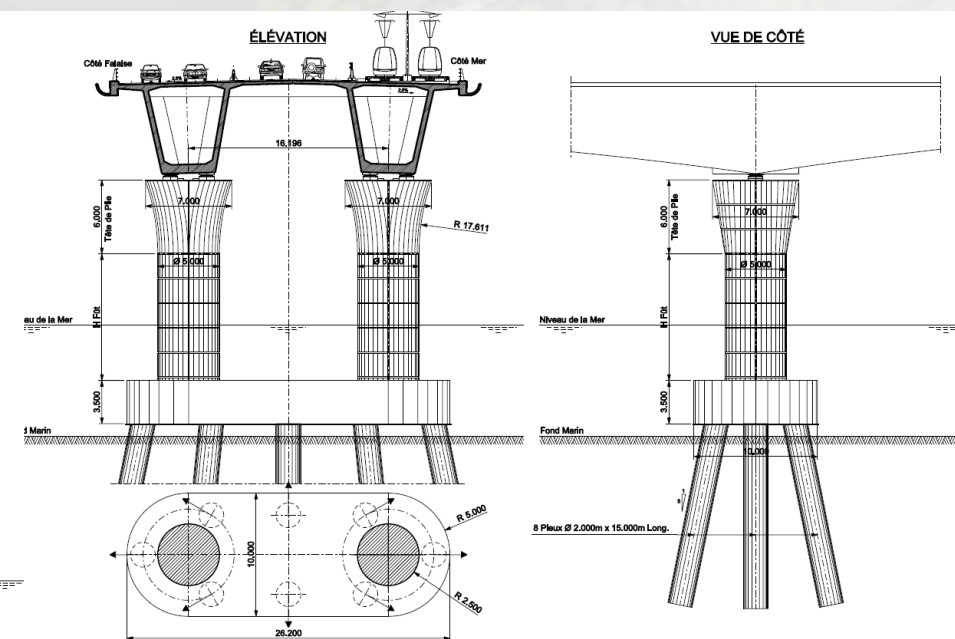
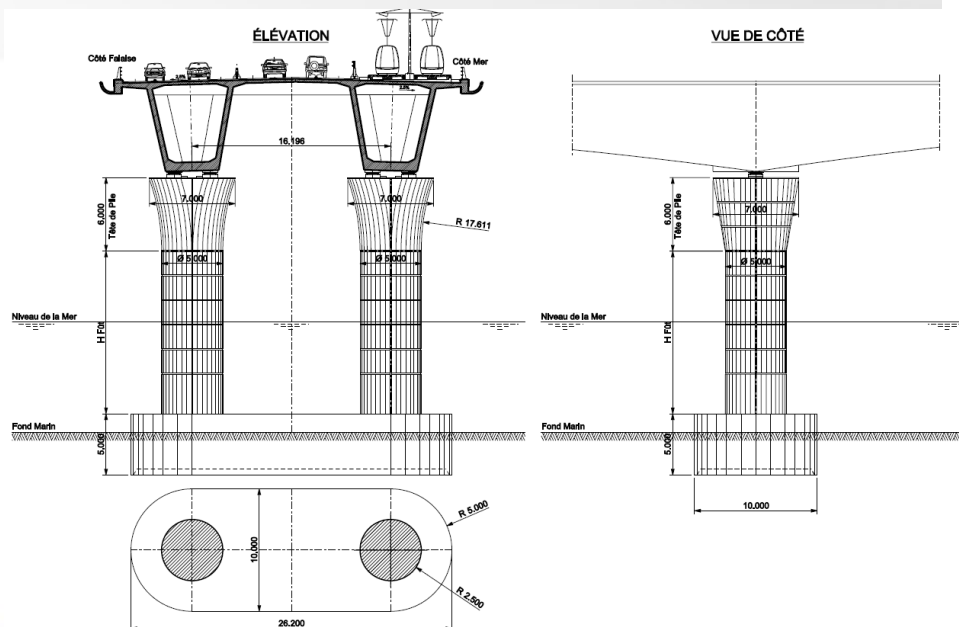
Viaduc 5400m en mer

Phase APS

► Viaduc défini à l'APS

► Fondations superficielles 26,20m * 10,00

► Fondations profondes
par 8 pieux 2000



Viaduc 5400m en mer

Phase AVP

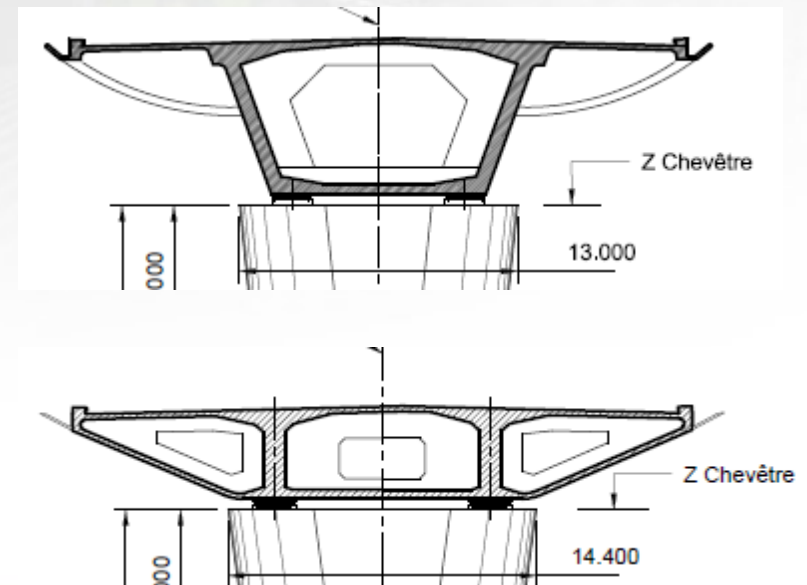
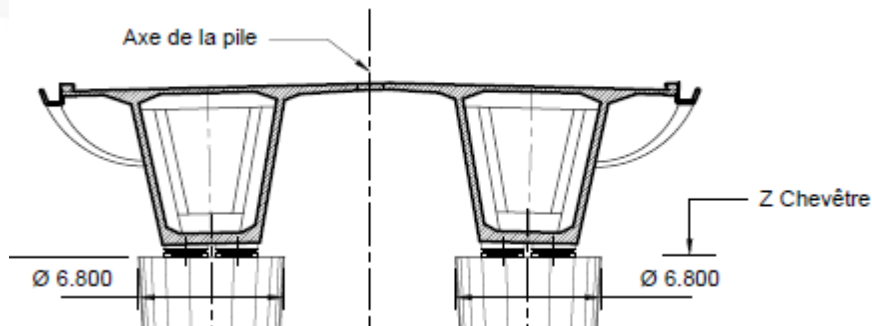
- ▶ Délai = 2,5 mois (de mi sept. à fin nov. 2011) :
→ Ingénierie concourante
- ▶ Étude du type de structure
- ▶ Étude des travures
- ▶ Étude des sections transversales
- ▶ Étude schéma fonctionnel ferroviaire
- ▶ Étude probabilité de choc de bateau

Viaduc 5400m en mer

Phase AVP

► Étude du type de structure

- Solutions écartées après études : haubans, mixte acier-béton, métal, tablier à deux niveaux;
- Bi-caisson béton précontraint à hauteur variable
- Mono-caisson à 2 âmes béton précontraint à hauteur variable
- Mono caisson à 4 âmes béton précontraint à hauteur constante



Viaduc 5400m en mer

Phase AVP

► Étude des travures : optimum économique

- ▶ 2 structures de tablier : bi-caisson / mono caisson;
- ▶ 3 schémas :
 - Tablier à hauteur constante avec travées isostatiques et portées allant de 50 à 90 m – construit par pose de travée entière
 - Tablier à hauteur constante avec travée continue et portées allant de 80 à 110 m – construit par encorbellements successifs
 - Tablier à hauteur variable avec travées continues et portées allant de 90 à 140 m – construit par encorbellements successifs
- ▶ 2 modes de fondation : superficielle / profonde pieux 2000
- ▶ 2 configurations : avec et sans choc de bateau

➔ 128 solutions étudiées

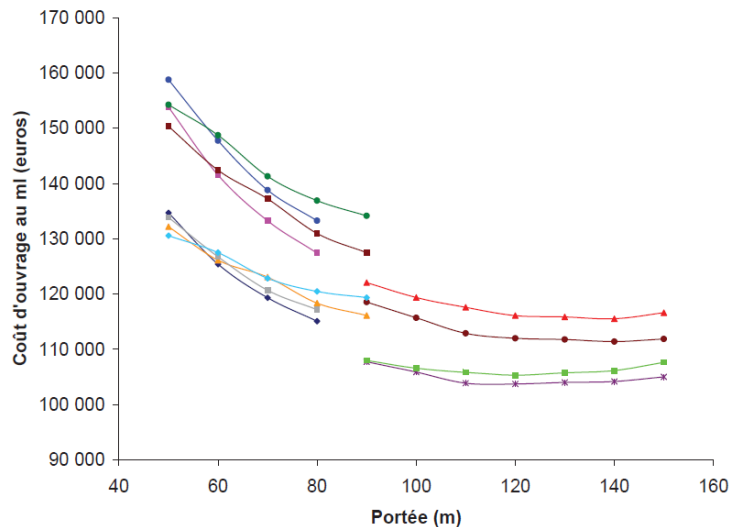
Viaduc 5400m en mer

Phase AVP

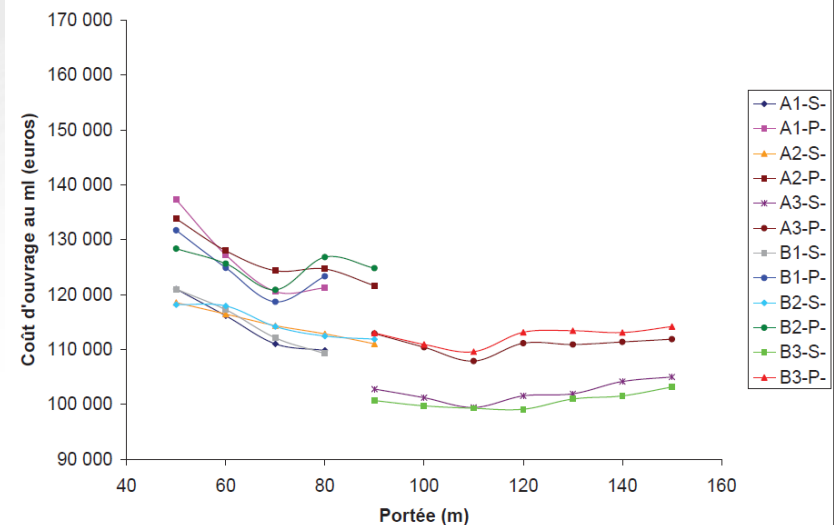
► Étude des travures : conclusion de l'étude paramétrique

- tabliers à hauteur variable construits par encorbellement moins chers que les tabliers à hauteur constante;
- ouvrages bi-caisson en général moins chers que les ouvrages mono-caisson
- tablier à hauteur variable : gamme de portée optimale vers 120m
- tablier à hauteur constante : gamme de portée optimale vers 90m – 100m.

Comparatif du coût des ouvrages dimensionnés avec choc



Comparatif du coût des ouvrages dimensionnés sans choc

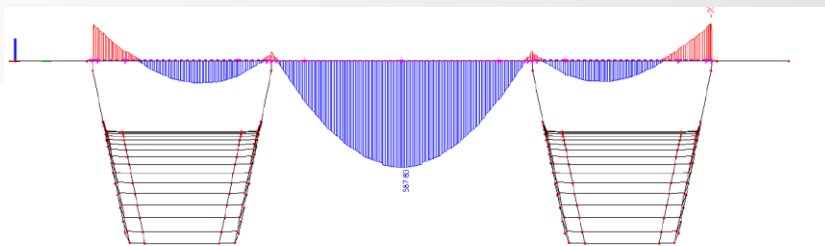


Viaduc 5400m en mer

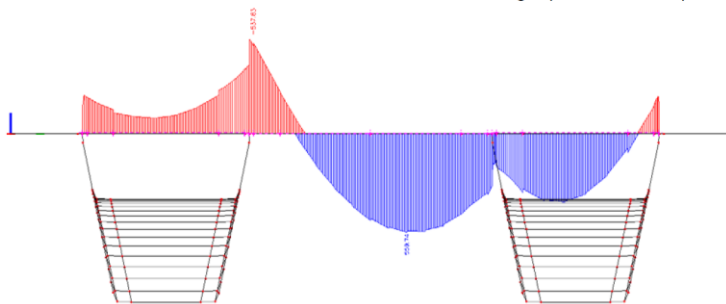
Phase AVP

► Études des sections transversales

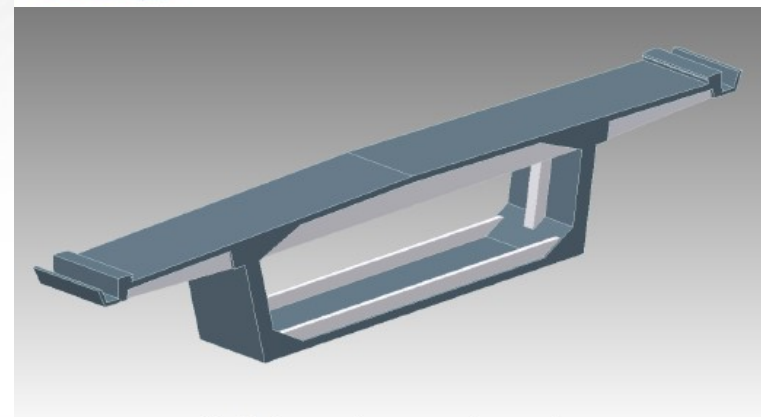
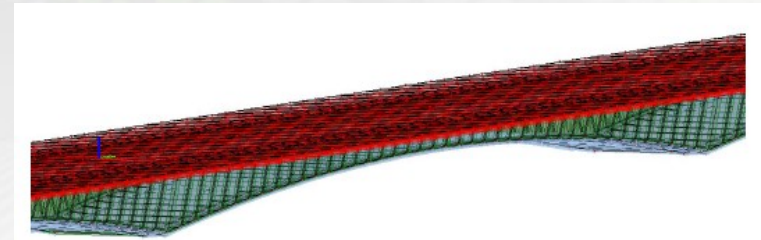
- Mono-caisson ou bi-caisson / nervuré ou pas / précontraint transversalement ou pas : 8 études aux éléments finis.
- Tablier bi-caisson : mal adapté à la reprise des surcharges ferroviaires
- Pas de grande différence entre tablier précontraint transversalement et tablier nervuré.



Courbe des moments transversaux à la clef de la travée sous charges permanentes de phase 1



Courbe des moments transversaux à la clef de la travée sous charges permanentes de phase 2



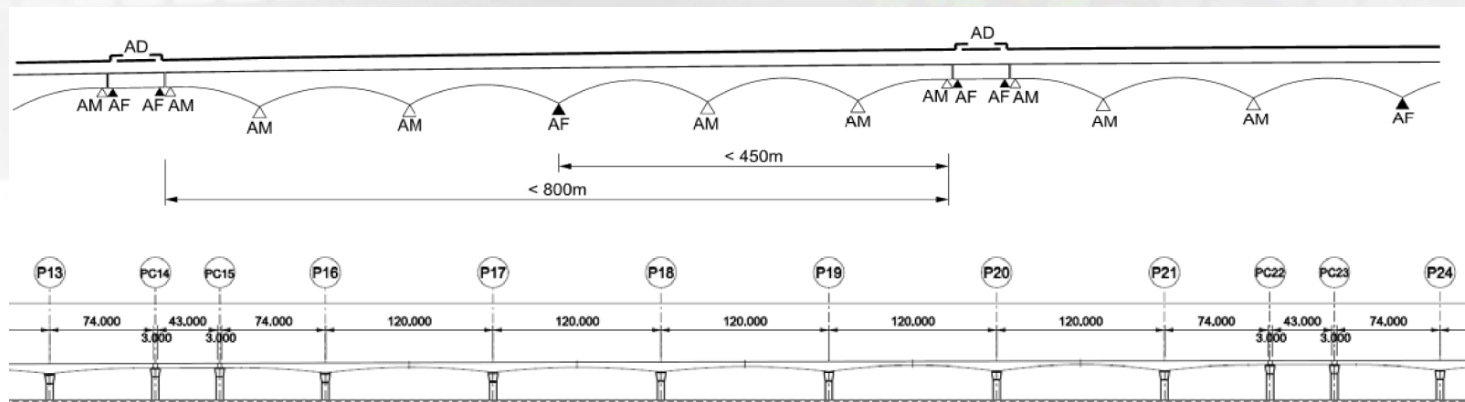
Vue 3D d'un voussoir avec nervures transversales

Viaduc 5400m en mer

Phase AVP

► Phase 2 : schéma fonctionnel – solutions étudiées

- Travées indépendantes de longueur dilatable < 90 m.
→ économiquement non rentable (étude paramétrique)
- Travées inertes indépendantes (solution APS)



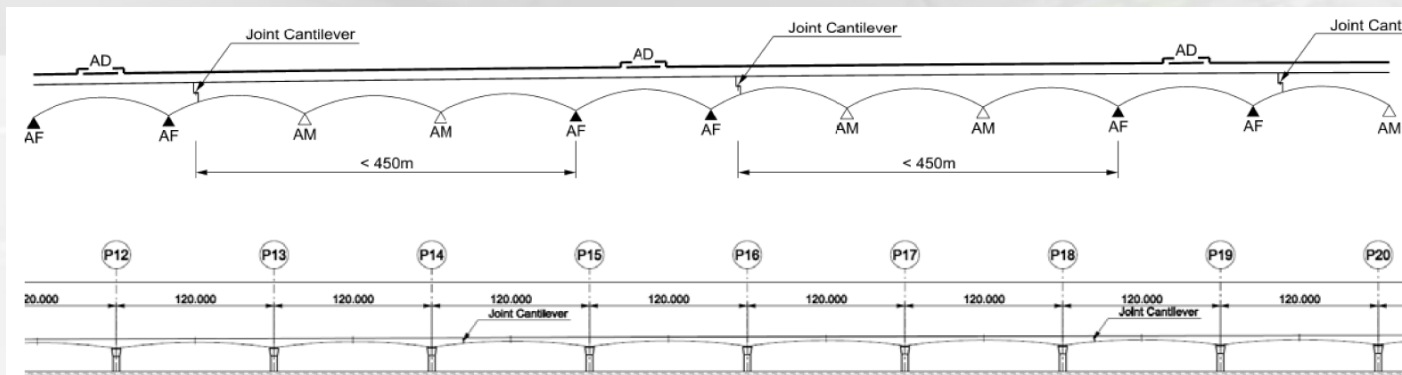
- Nombre d'appuis importants
- Esthétique pas terrible
- Méthode de construction de la travée inerte complexe

Viaduc 5400m en mer

Phase AVP

► Phase 2 : schéma fonctionnel – solutions étudiées

► Travées courantes inertes.



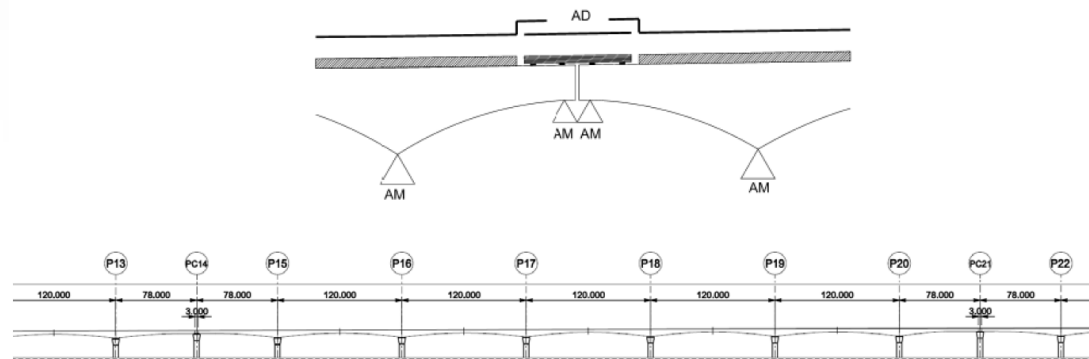
→ Voussoir d'articulation complexe

→ Méthode de construction complexe

► Structures inertes.



Viaduc du Storbelt



Viaduc 5400m en mer

Phase AVP

► Étude probabilité de choc de bateau

► Etude du trafic maritime.

► Risque d'impact :

Probabilité d'impact totale = $2 \cdot 10^{-7}$ /an

► Critère d'acceptation :

- Règlement AASHTO : fréquence admise d'effondrement de pont :

1 10^{-4} /an Ponts critiques - 1 10^{-3} /an Ponts classiques

- Eurocode 1 partie 1-7 : Pas de valeur explicite

Exemple d'un diagramme possible :

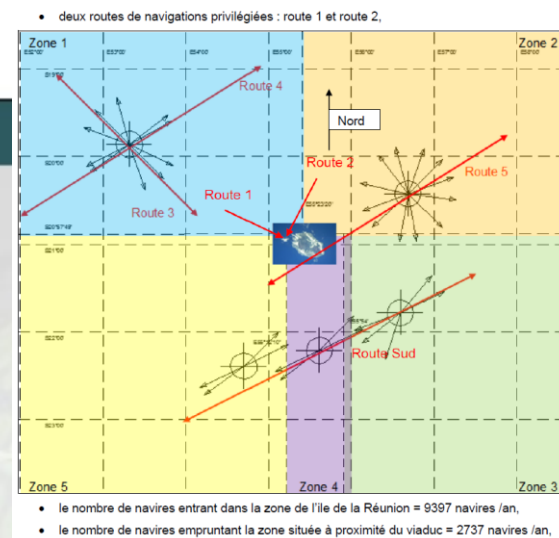
pour une conséquence élevée

ou très élevée : 1 10^{-5} /an

► Niveau de $2 \cdot 10^{-7}$ /an pour NRL :

Niveau résiduel, hors de l'appréhension humaine
et très inférieur aux différents niveaux acceptables

→ **décision de non prise en compte de l'aléa de collision des bateaux
(classe moyen, gros ou très gros selon l'Eurocode)**



Très élevée	X				
Élevée	X				
Moyenne		X			
Faible			X		
Très faible				X	
▲ Conséquence					
→ Probabilité	0,00001	0,0001	0,001	0,01	> 0,1

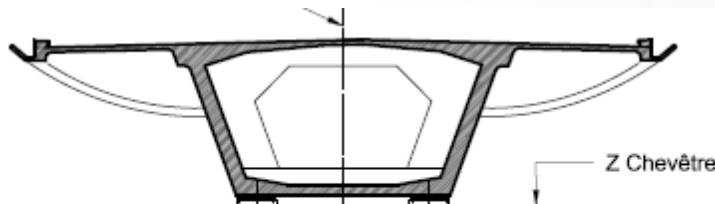
Les X représentent des exemples de niveaux maximaux de risque acceptables

Viaduc 5400m en mer

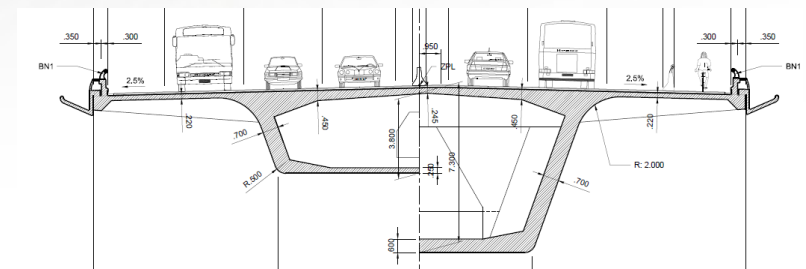
Phase AVP

► Conclusion AVP :

- Tablier mono-caisson en béton précontraint à 2 âmes de hauteur variable avec des portées principales de 120 m,
- Tablier mono-caisson en béton précontraint à 4 âmes de hauteur constante avec des portées principales de 100 m
- Les deux systèmes de fondation superficielle et profondes sont conservées
- Reprise de l'architecture du tablier, les hautes nervures sous les encorbellements pas adaptées au site et engendrant des efforts localisés assez défavorables dans le plan de l'âme



AVP



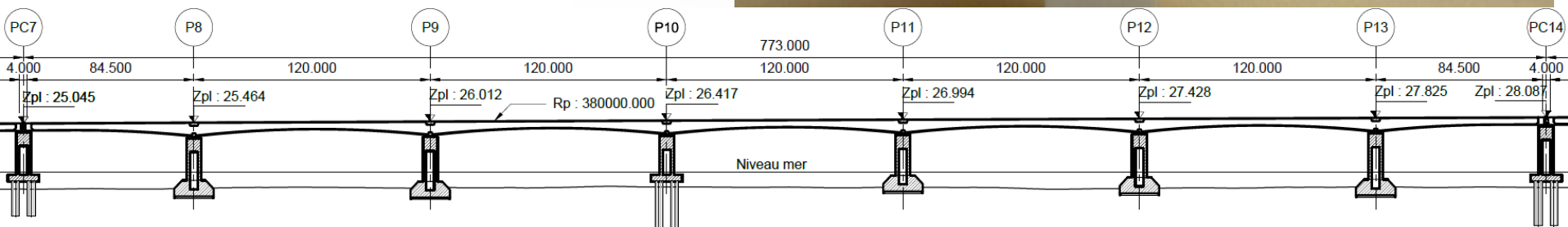
PRO

Viaduc 5400m en mer

Phase PRO

► Tablier de hauteur variable – 2 âmes

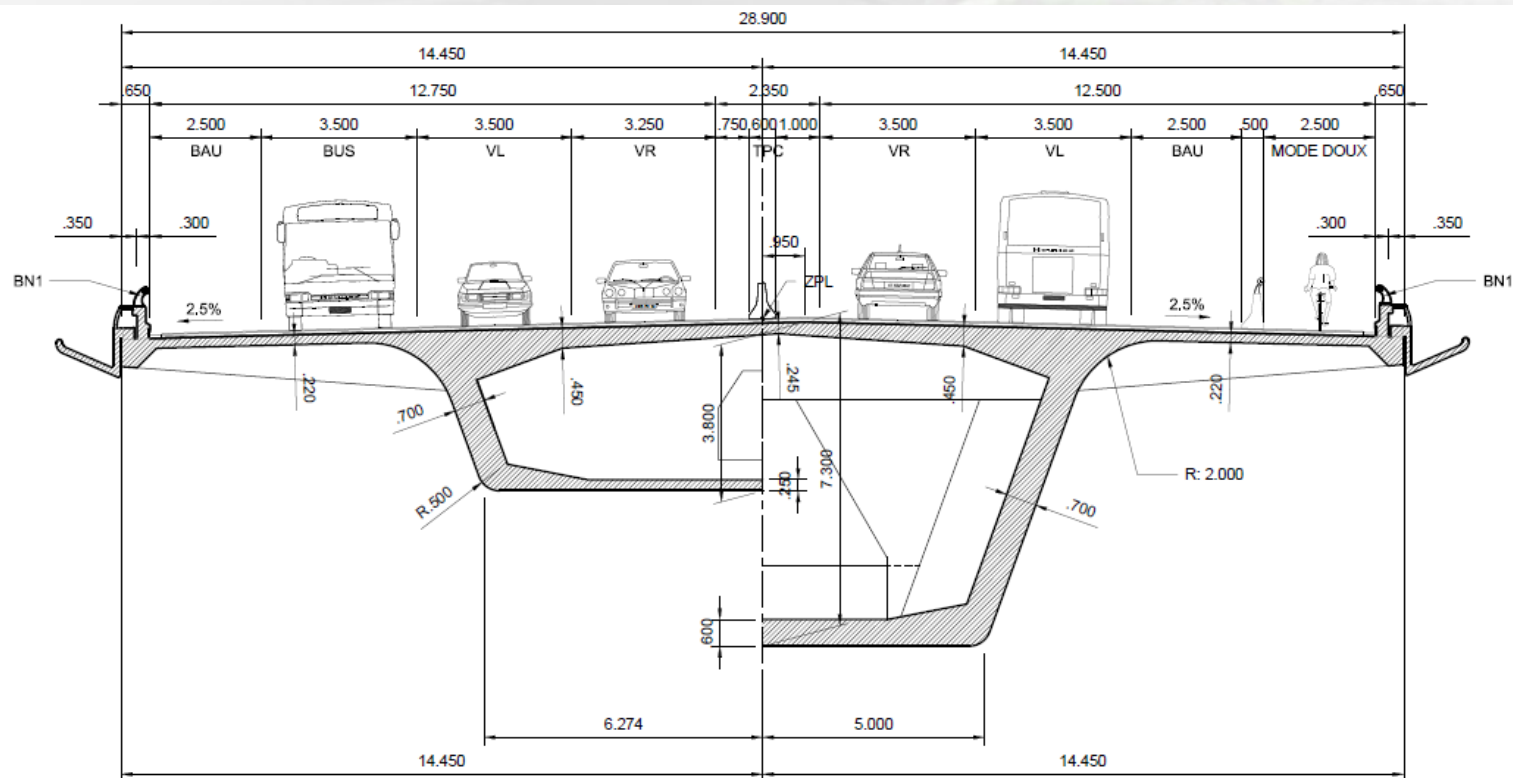
- Mono-caisson béton précontraint
- Travée principale de 120 m
- Hauteur variable de 3.8 à 7.3m,
- Découpage en tronçons de 770 m de longueur environ (contrainte ferroviaire),
- Point fixe au centre et pile-culées aux extrémités,
- Voussoirs préfabriqués, construction par encorbellements successifs



Viaduc 5400m en mer

Phase PRO – 2 âmes hauteur variable

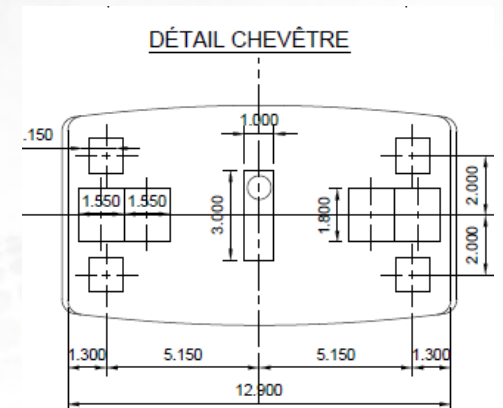
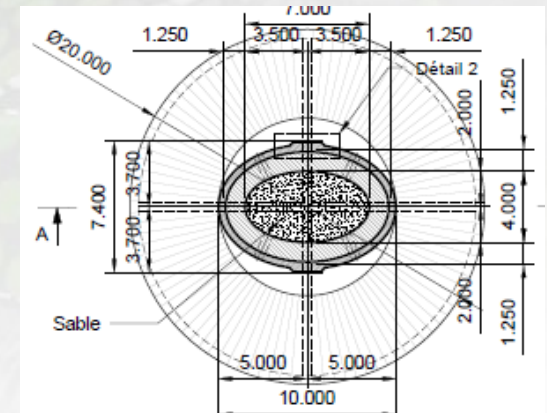
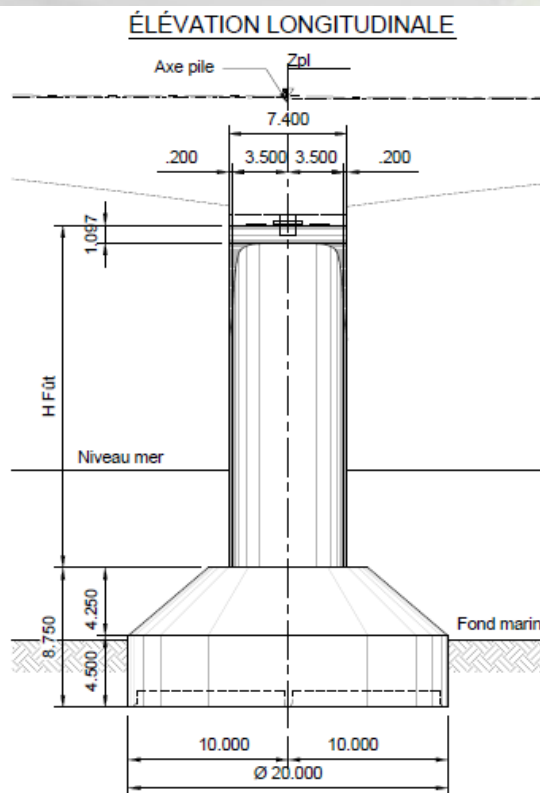
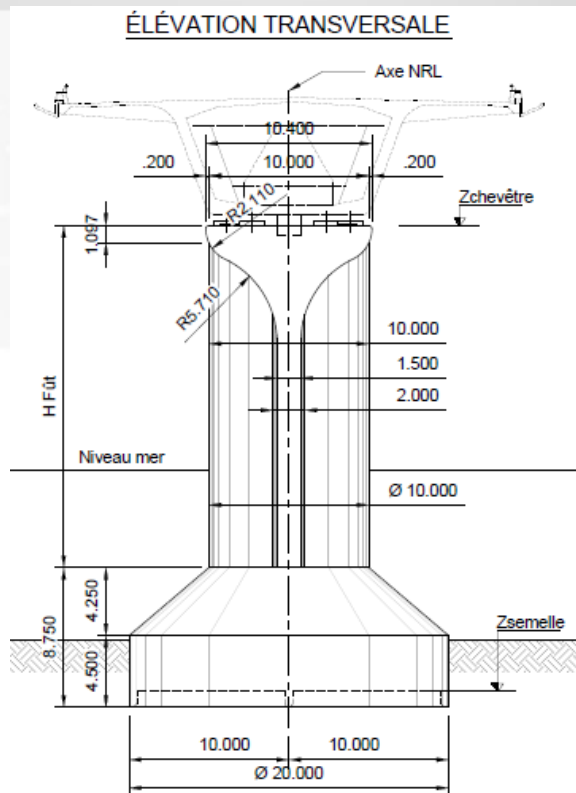
- ▶ Tablier 2 âmes de hauteur variable de 3,8 m à la clé à 7,3 m sur appui
- ▶ Hourdis supérieur nervuré transversalement
- ▶ Solution économique (inertie du tablier adaptée aux efforts → optimisation de la matière)
- ▶ Portée économique dans la plage 100 / 150 m



Viaduc 5400m en mer

Phase PRO – 2 âmes hauteur variable

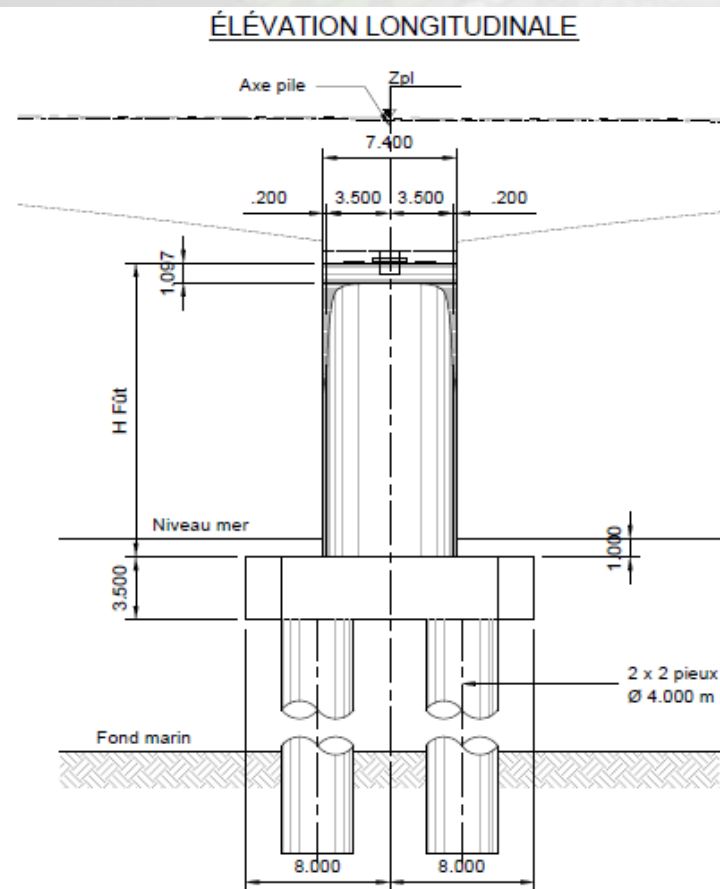
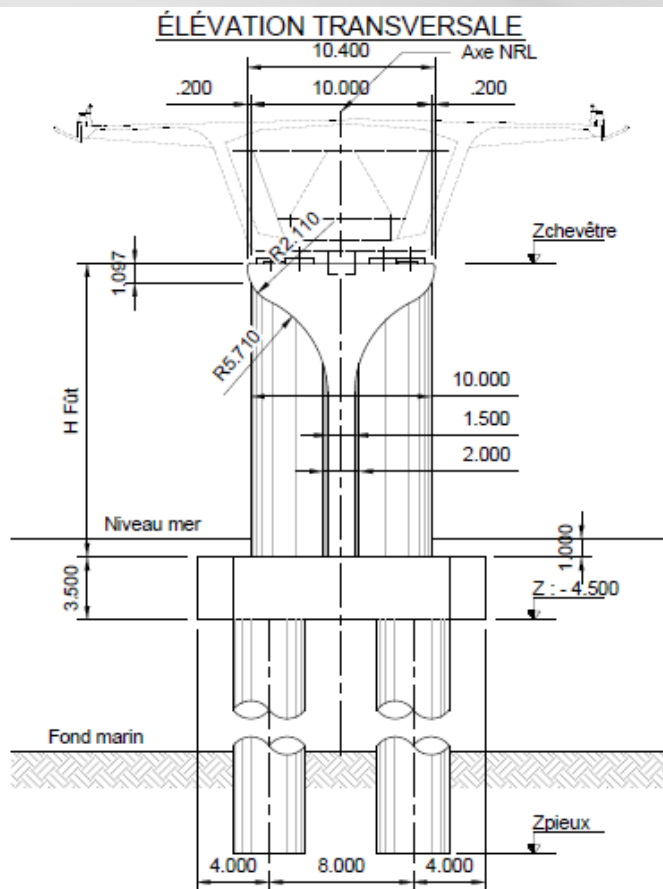
- 48 Piles en mer dont 25 sur semelles : 1 fût simple et profilé



Viaduc 5400m en mer

Phase PRO – 2 âmes hauteur variable

► 48 Piles en mer dont 23 sur pieux



Viaduc 5400m en mer

Phase PRO – 2 âmes hauteur variable

► Solution hauteur variable – Architecture

- Tracé en plan avec courbes et contre-courbes afin de « suivre » la falaise
- Affirmation d'un caractère maritime aux formes douces et carénées
- Pile avec chevêtre d'inspiration quille de navire

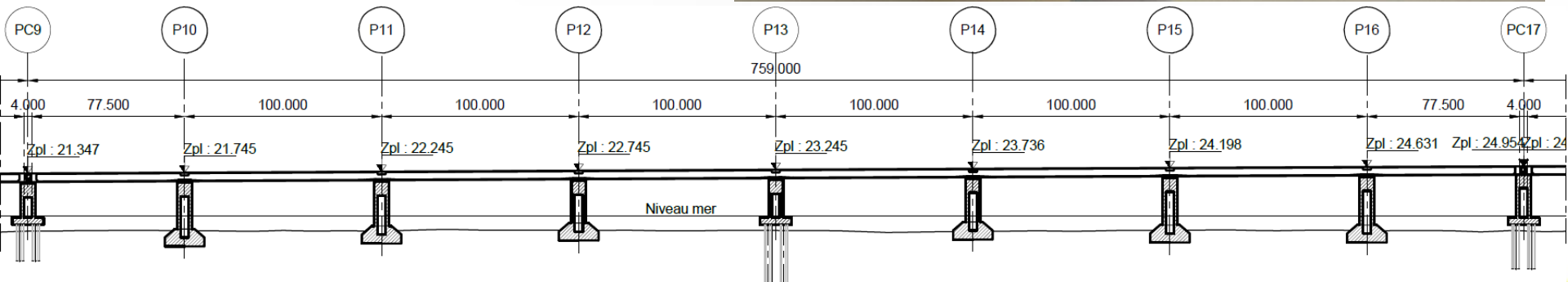


Viaduc 5400m en mer

Phase PRO

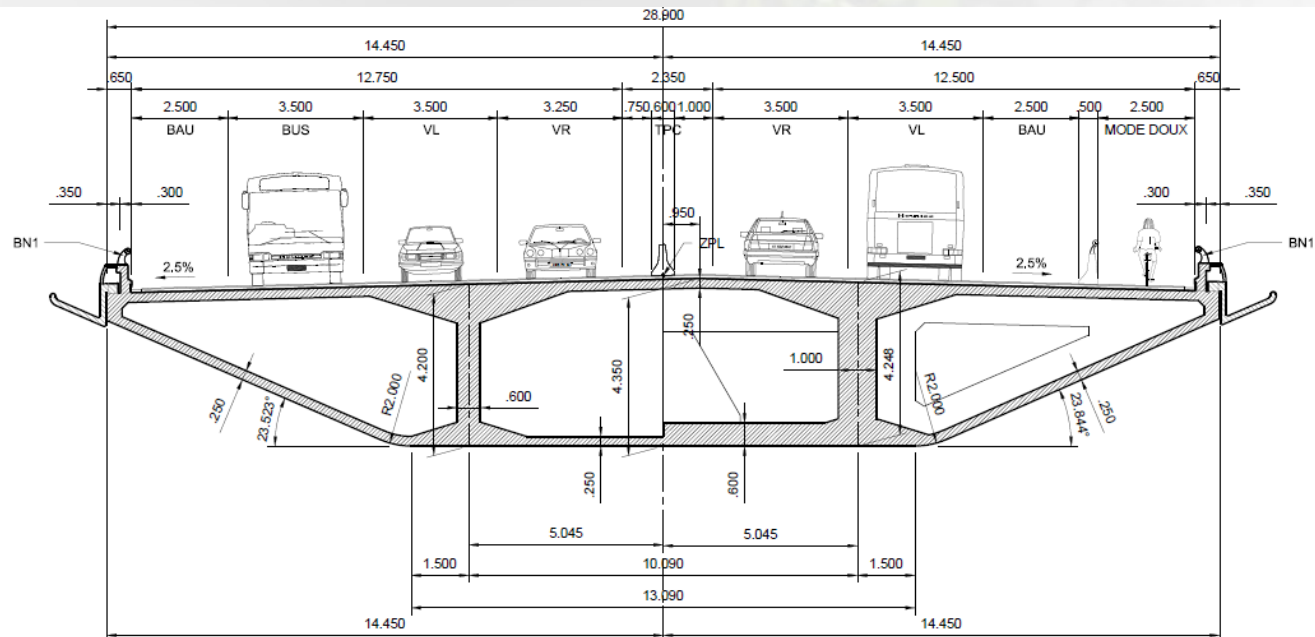
► Tablier 4 âmes de hauteur constante

- Mono-caisson béton précontraint
- Travée principale de 100 m
- Hauteur constante de 4.35 m,
- Découpage en tronçons de 770 m de longueur environ (contrainte ferroviaire),
- Point fixe au centre et pile-culées aux extrémités
- Voussoirs préfabriqués, construction par encorbellements successifs



Phase PRO – 4 âmes hauteur constante

- ▶ Tablier 4 âmes de hauteur constante 4,35 m
 - ▶ Epaississement des âmes et du hourdis inférieur sur appuis
 - ▶ Enveloppe extérieure identique => simplicité des coffrages et armatures
 - ▶ Solution compacte et fermée avec meilleure protection des structures résistantes

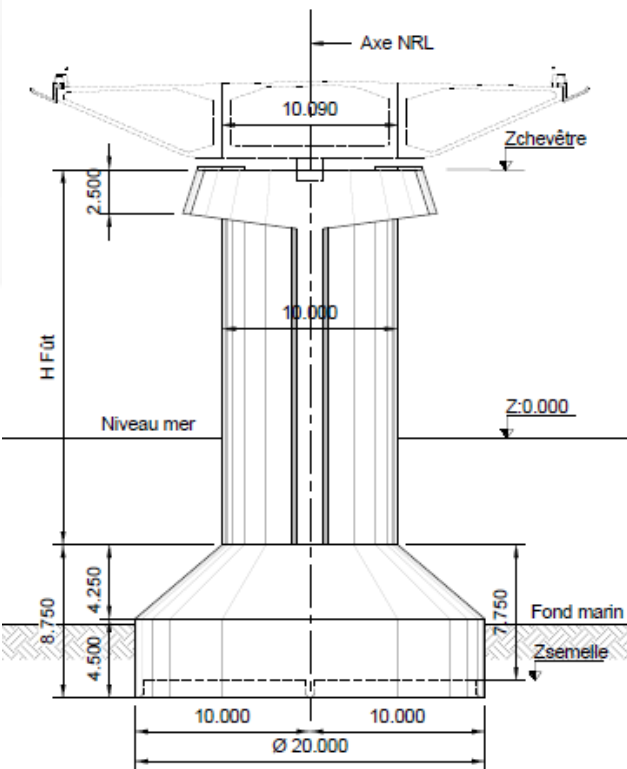


Viaduc 5400m en mer

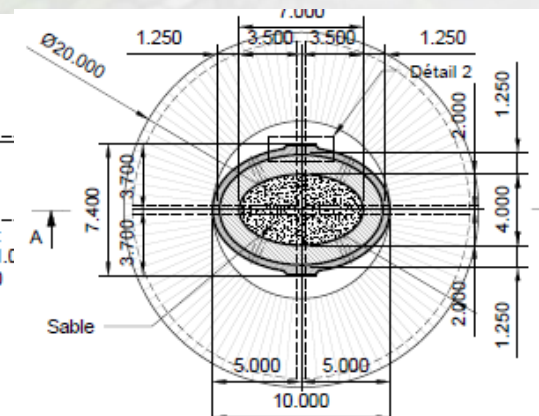
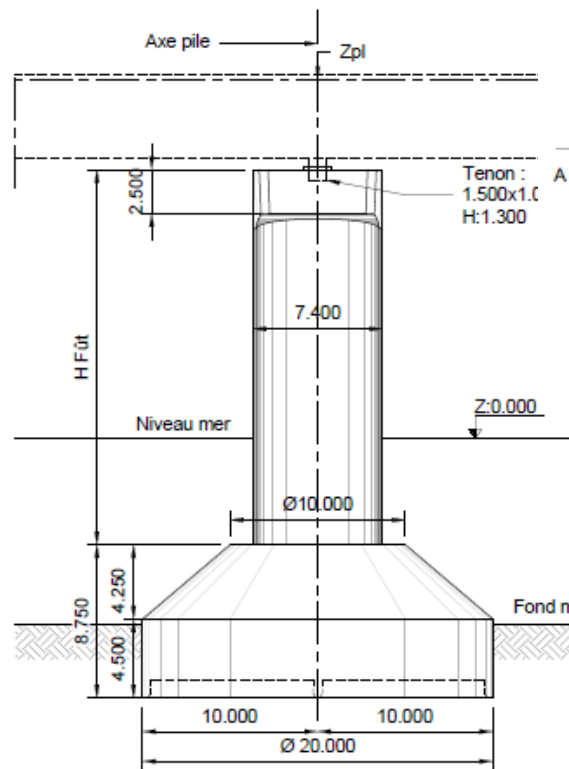
Phase PRO – 4 âmes hauteur constante

► 56 Piles en mer dont 31 sur semelles

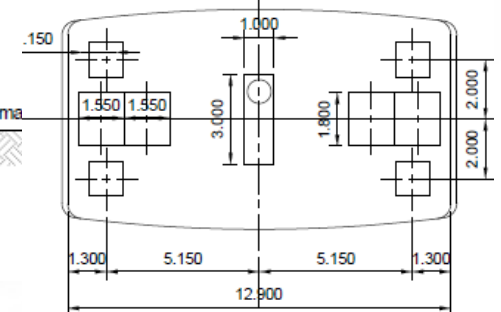
ÉLÉVATION TRANSVERSALE



ÉLÉVATION LONGITUDINALE



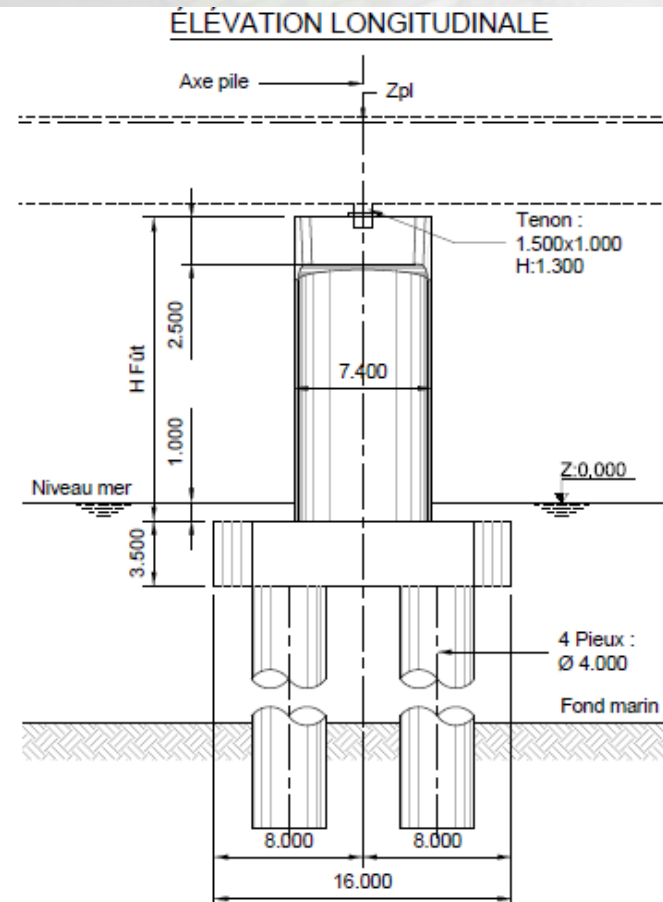
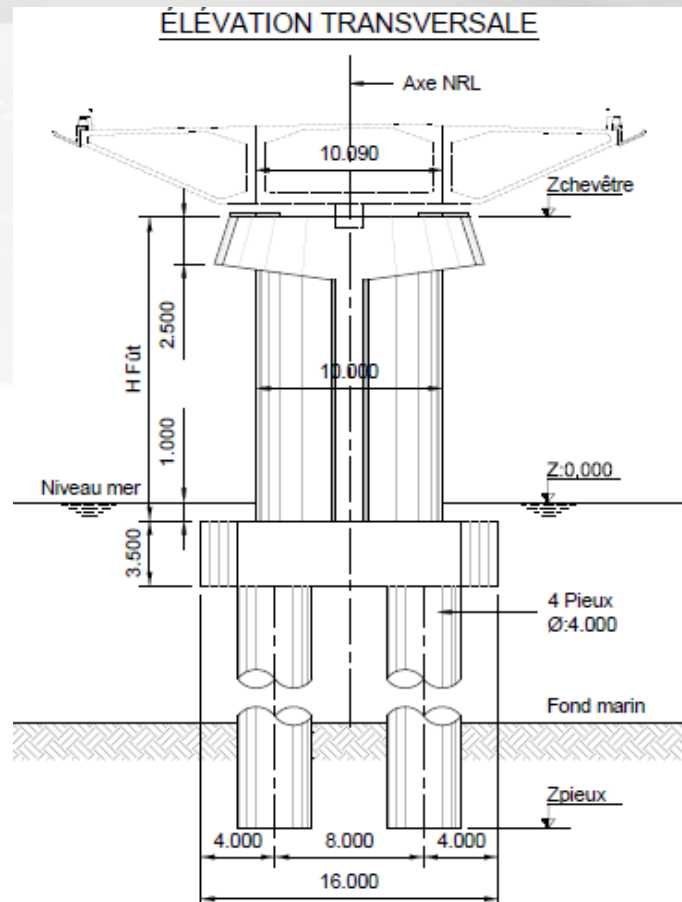
DÉTAIL CHEVÊTRE



Viaduc 5400m en mer

Phase PRO – 4 âmes hauteur constante

- 56 Piles en mer dont 25 sur pieux



Viaduc 5400m en mer

Phase PRO – 4 âmes hauteur constante

► Solution hauteur constante – Architecture

- Tracé en plan avec courbes et contre-courbes afin de « suivre » la falaise
- Evocation d'un bateau avec âmes latérales très inclinées
- Formes arrondies pour insister sur le côté maritime
- Tablier caractérisé par des lignes filantes

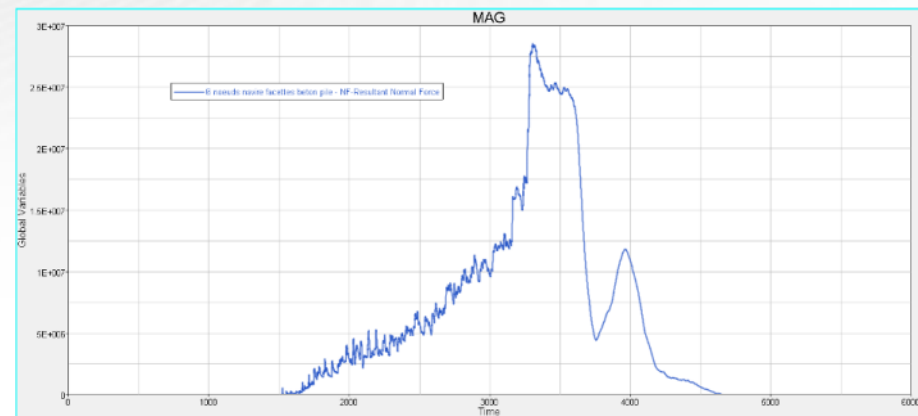
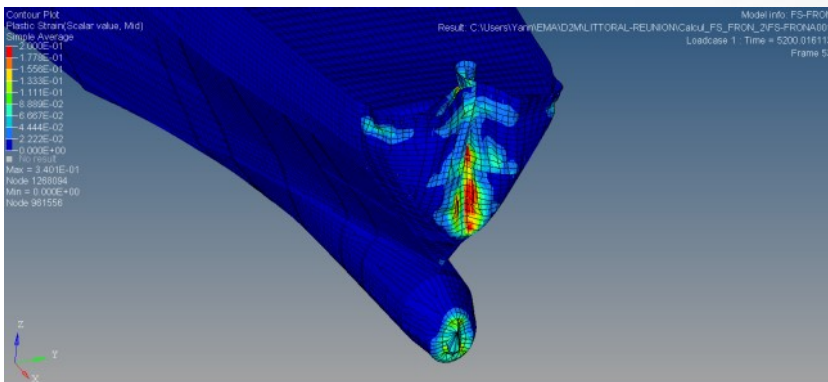
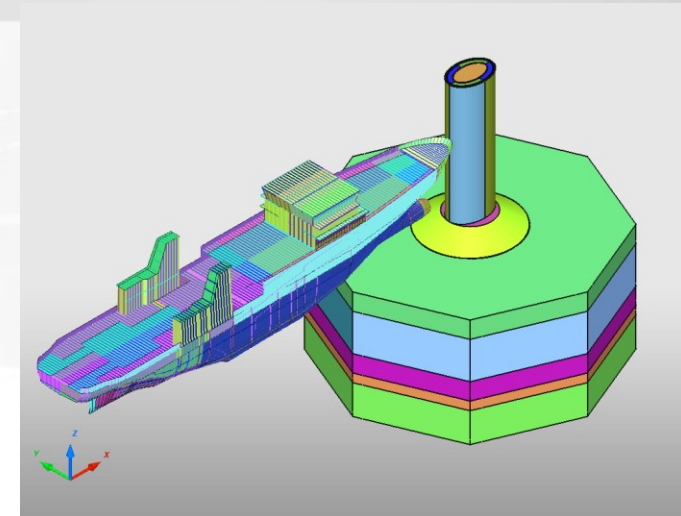
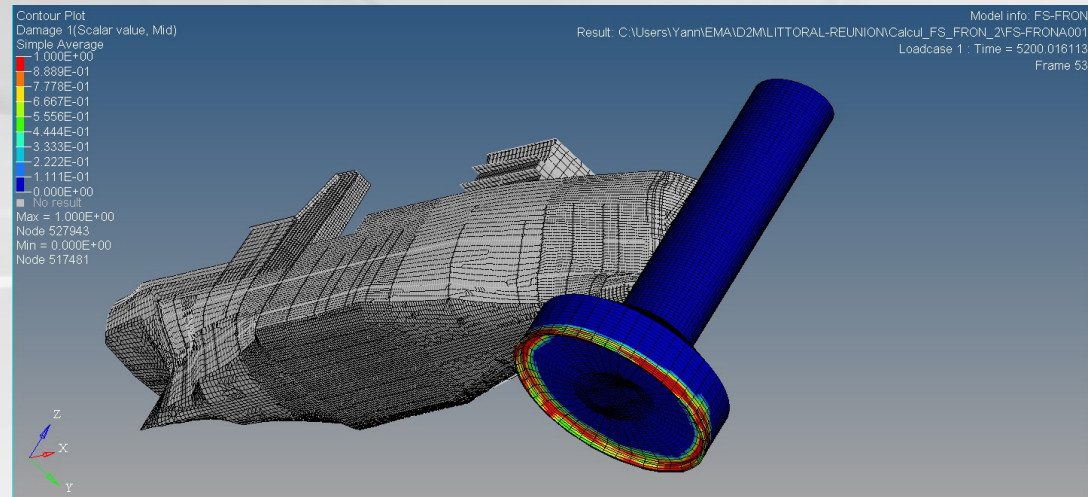


Viaduc 5400m en mer

Phase PRO – Cas de charges particuliers

► Choc de bateau

► METHODE ENEGETIQUE



30 MN en valeur maxi

Viaduc 5400m en mer

Phase PRO – Cas de charges particuliers

► Efforts de houle

- Non définies dans la réglementation
- Efforts déterminés analytiquement, puis par des modèles numériques et mesurés en cuve à houle

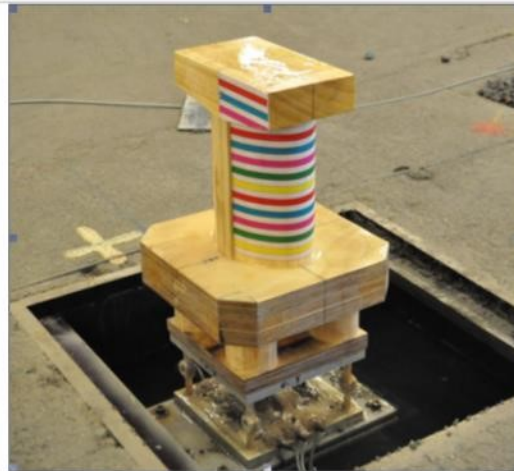
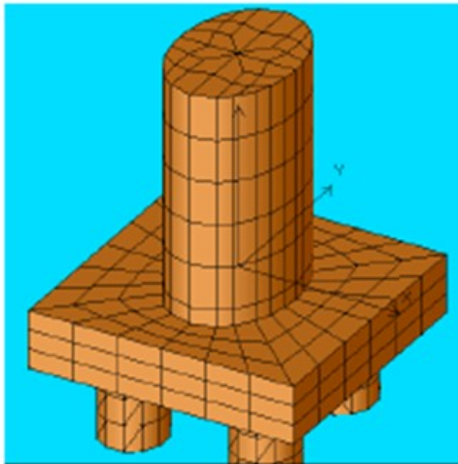


Figure 7 : Pile n°55 équipée d'une balance pour mesurer les efforts



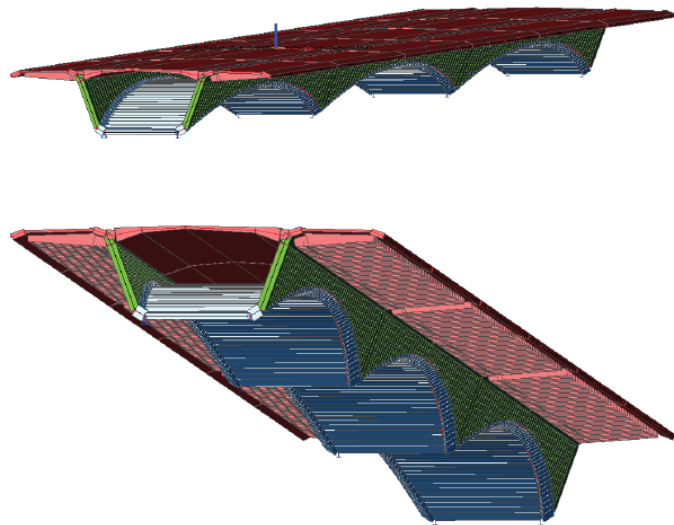
Figure 8 : Mesure du niveau d'eau (sonde de niveau) et des efforts de houle sur la pile n°55

Viaduc 5400m en mer

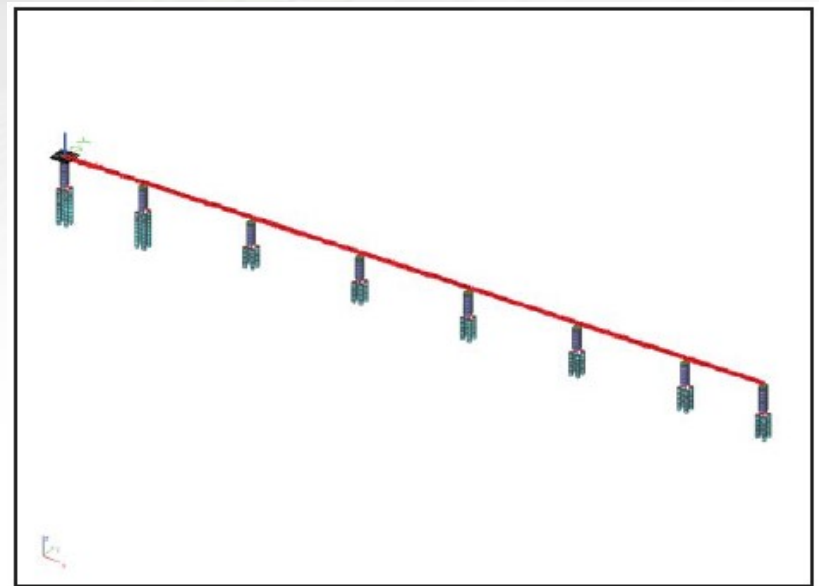
Phase PRO – Tablier

► Etude du tablier

- Tablier très large (28,90m) sollicité par des charges routières et ferroviaires
- Modélisation 3D aux éléments finis
- Modèle complet intégrant le tablier, les appuis et le sol
- Calcul dynamique pour le séisme avec prise en compte de l'arrêté de 2011



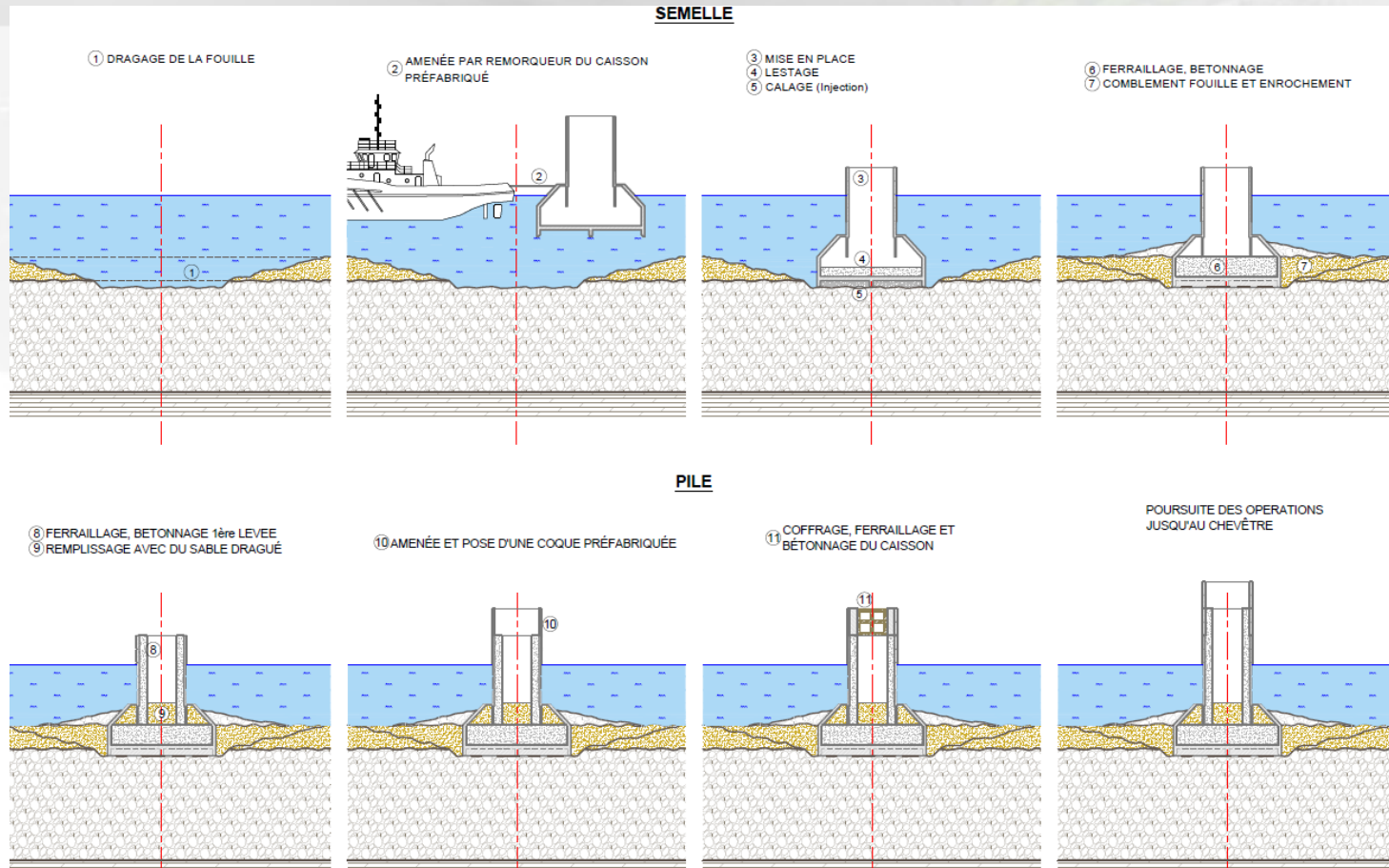
Vues du modèle sur le logiciel SCIA



Viaduc 5400m en mer

Phase PRO – Méthode

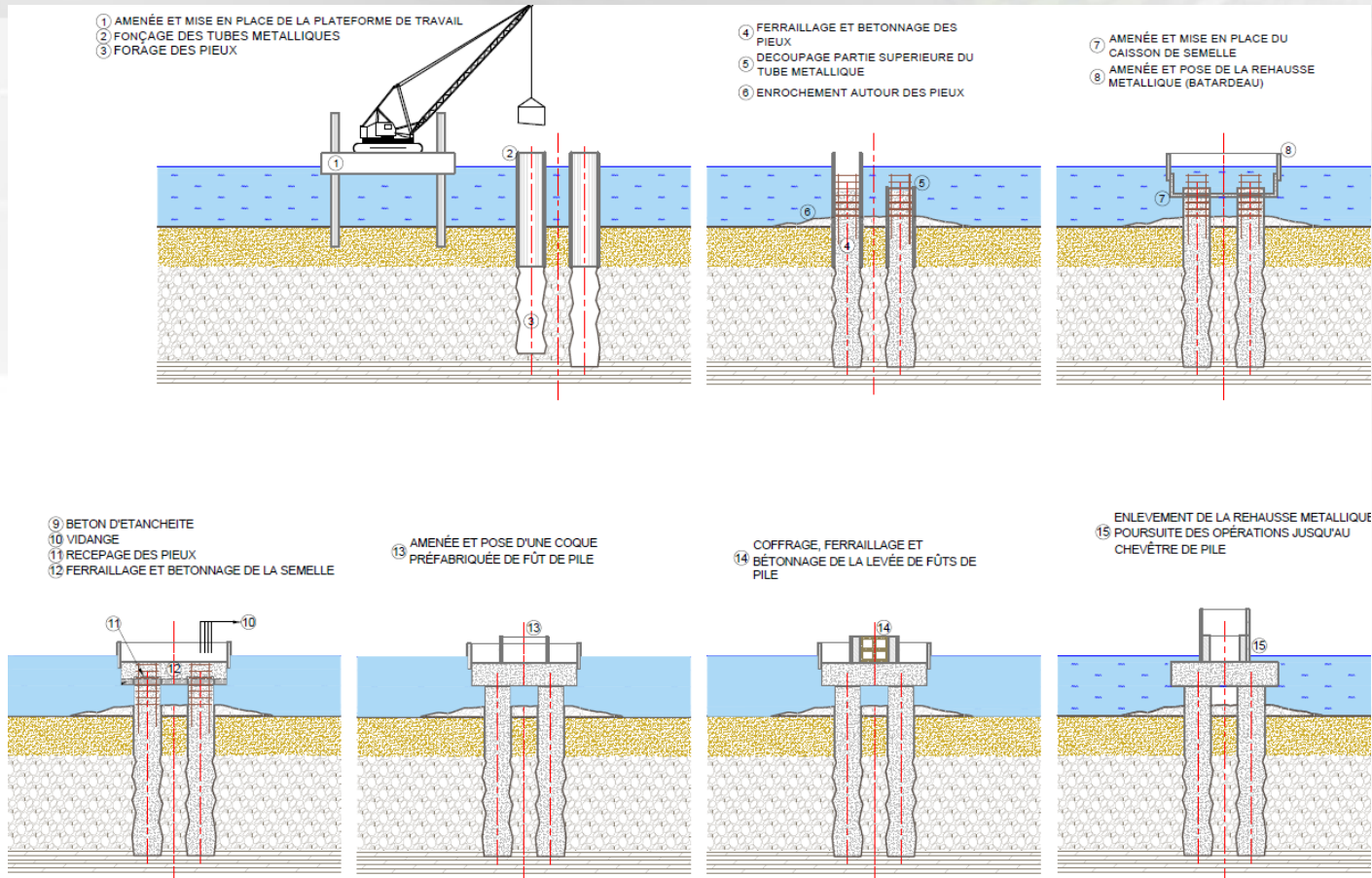
► Méthodes de construction des appuis sur semelles



Viaduc 5400m en mer

Phase PRO – Méthode

► Méthodes de construction des appuis sur pieux



Viaduc 5400m en mer

Phase PRO – Méthode

► Matériels pour la construction des appuis



Viaduc 5400m en mer

Phase PRO – Méthode

► Méthodes de construction du tablier



Viaduc 5400m en mer

Phase PRO - Synthèse des principales quantités

VIADUC / OA	
Béton (m3)	339.000
Acier (T)	48.000
Acier HR (T)	9.900
Enrochements (T)	390.000

Viaduc 5400m en mer

Phase travaux

▶ MT3 – Viaduc de 5 400 m :

▶ Groupement titulaire du marché :



▶ Délai global : 54 mois (dont 12 mois de préparation) à partir du 27/01/14

▶ Montant des travaux : **715,7 M€ TTC**



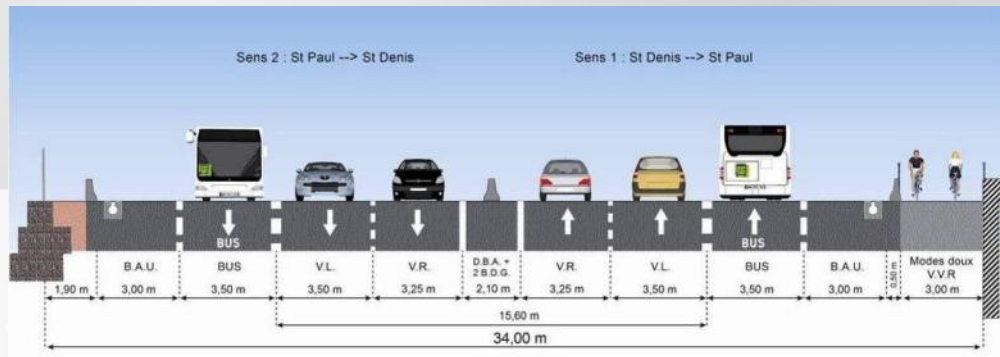
LES DIGUES

Digue – Les hypothèses du programme

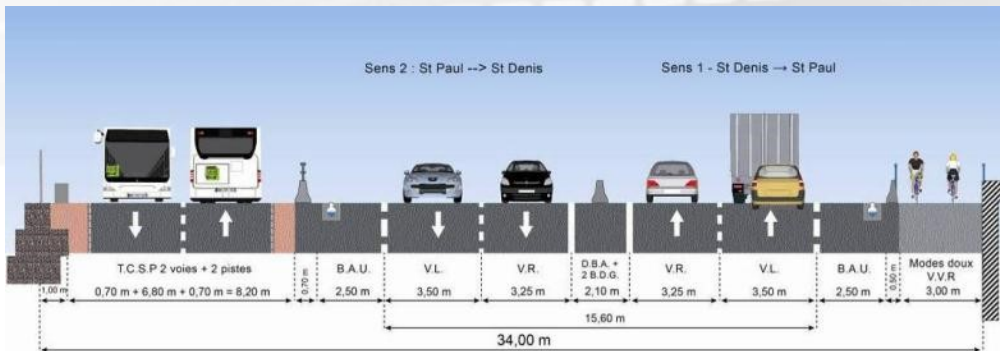
▶ RAPPEL :

- ▶ Résister à des houles exceptionnelles, associées à un niveau d'eau « dans 100 ans » (réchauffement climatique)
- ▶ Protéger la NRL de la falaise (chutes de blocs et précipitations)
- ▶ Pérennité de 100 ans sans réparation lourde des ouvrages :
 - Qualité des bétons, enrobage des aciers,
 - Sollicitations maritimes,
- ▶ Circulation routière 365 jours / an ➔ peu de franchissements (résidus de vagues) admissible sur le tracé routier
- ▶ Profil en Travers fonctionnel ci après :

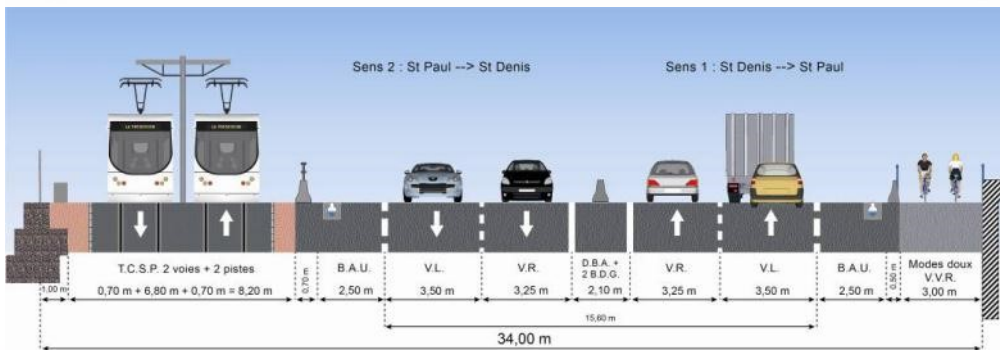
Digue – Les hypothèses du programme



Mode 1

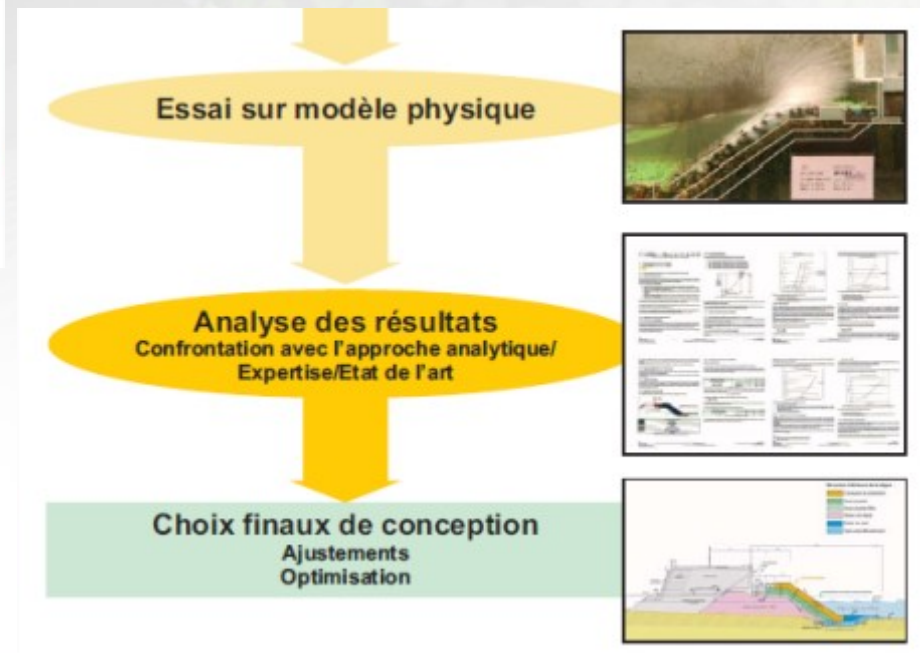
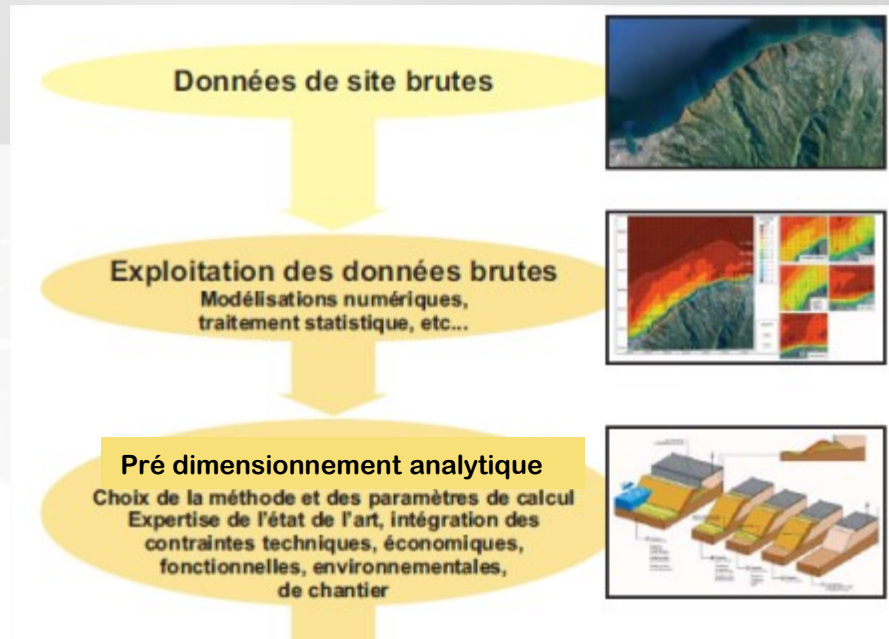


Mode 2a



Mode 2b

Digue – Démarche générale de conception



Digue – Des experts de niveau international

En complément des experts d'EGIS, nous avons mobilisé :

Dr. Jentsje VAN DER MEER : Expert hollandais en digue à talus



BMT ARGOSS : Cabinet hollandais spécialisé en hydraulique maritime offshore



Dr. William VAN IMPE : Expert géotechnique belge en infrastructure maritime



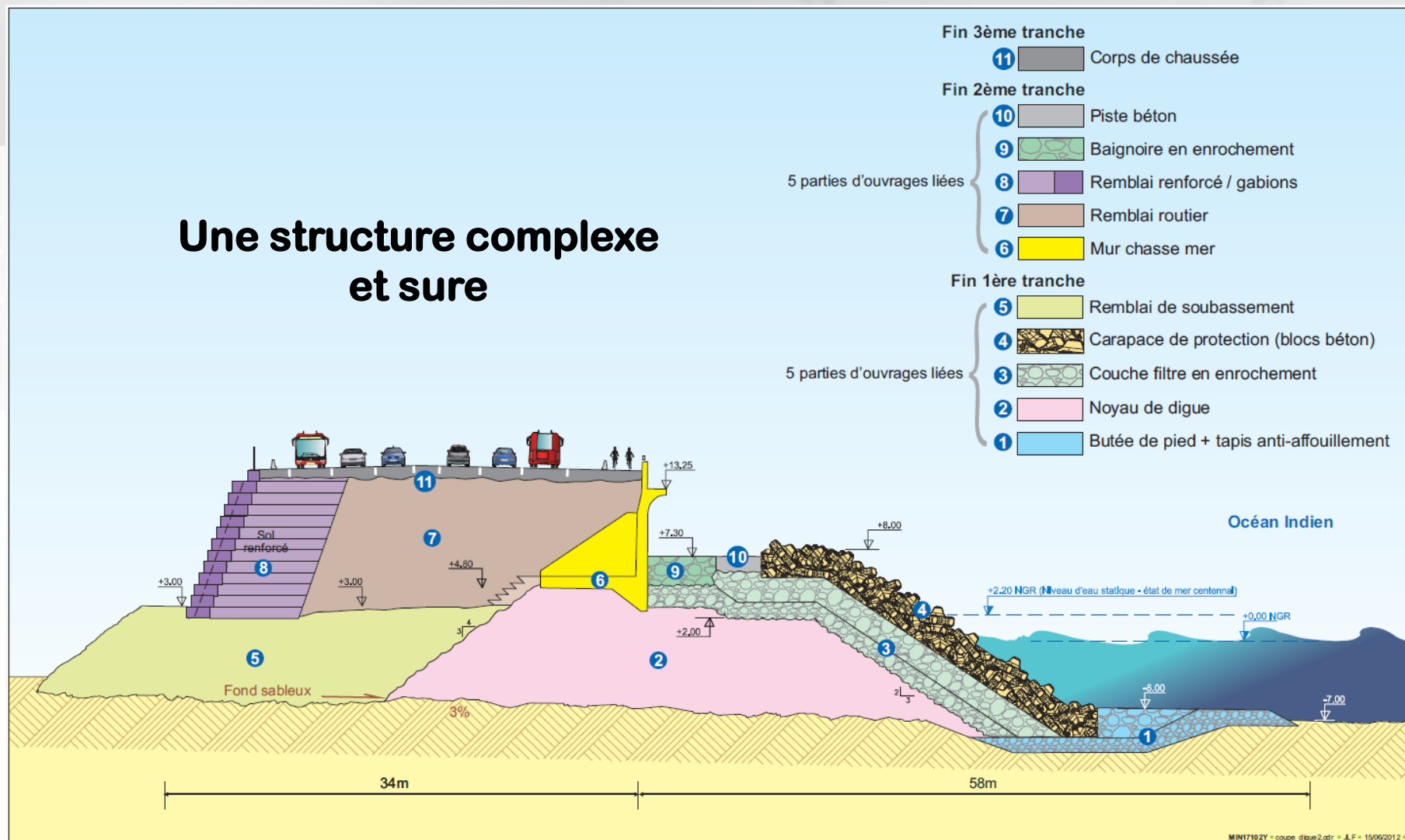
J. FREDSOE : Expert danois notamment pour le tapis anti-affouillement



Dr. Jean BOUGIS : Expert en hydrodynamique et traitement du signal

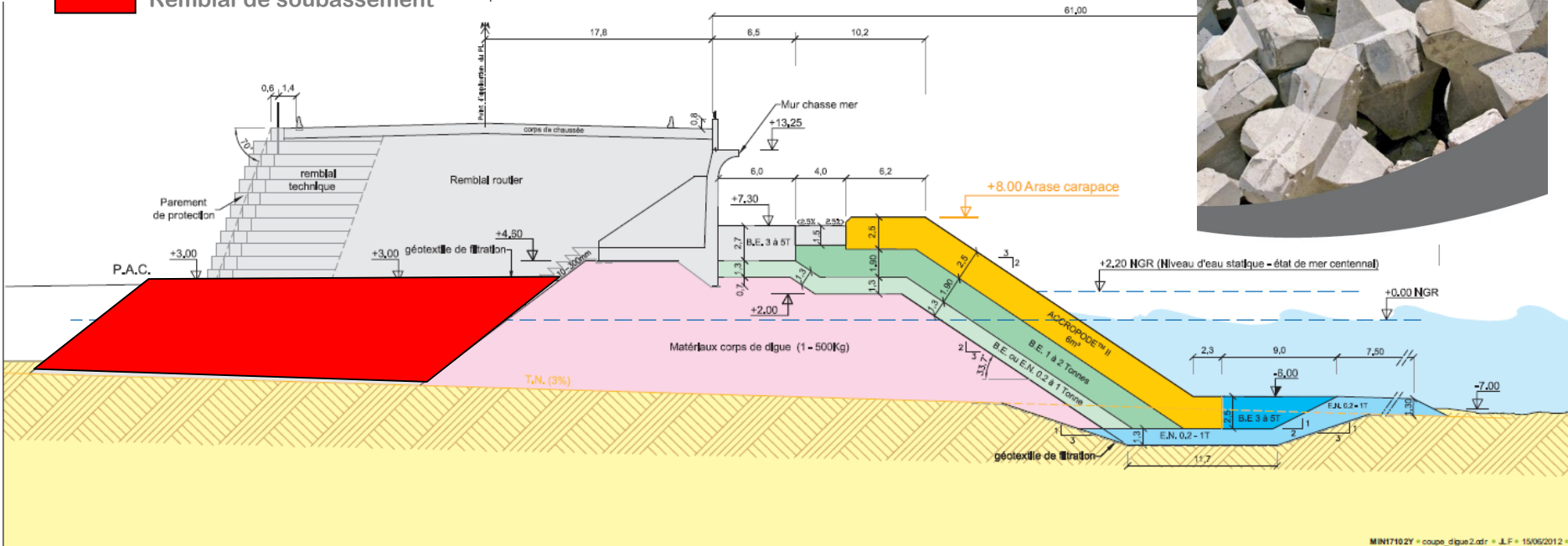
Digue – La solution étudiée en détails

Une structure complexe et sure

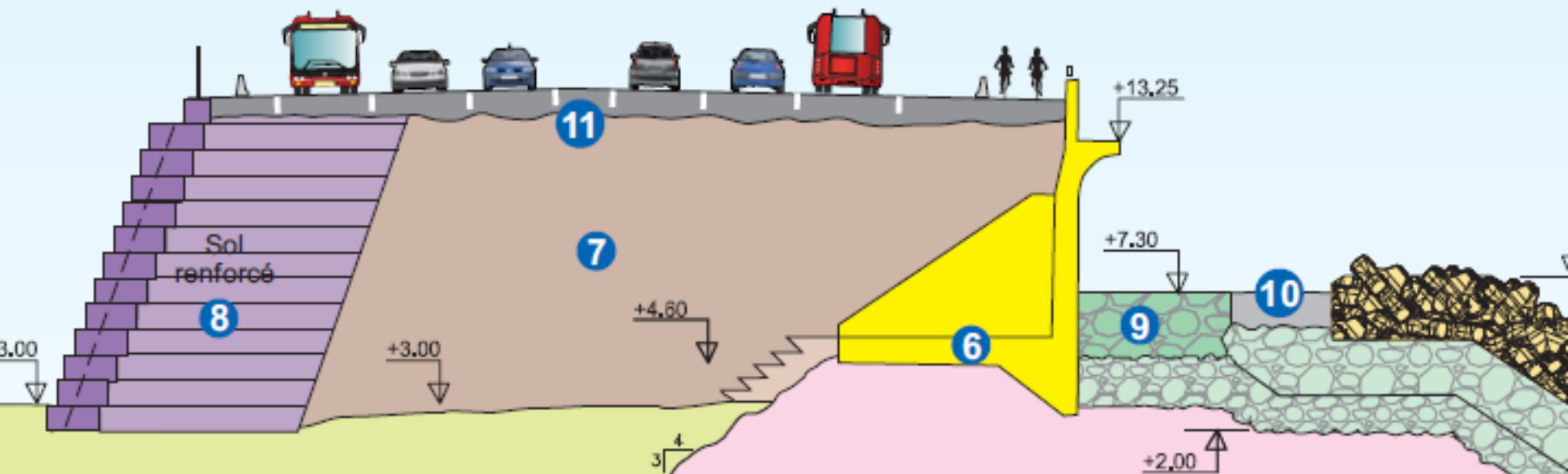


A long row of large, white, geometric concrete structures, possibly for coastal defense or erosion control, arranged in a field under a blue sky with clouds. A yellow crane is visible on the right.

	Carapace de protection
	Sous couche
	Sous couche filtre
	Noyau de digue
	Butée de pied
	Tapis anti-affouillement
	Remblai de soubassement



Digue – La structure supérieure



Digue – Partie inférieure

- Pré-dimensionnement analytique très vite complété par des modèles physique 2D (canal à houles) à l'AVP puis 3D (cuve à houles) au PRO

- Objectifs de performance traduits en critères :

- De stabilité de la protection maritime (carapace, butée de pied...)

- De franchissements

- Définition des hypothèses de calculs

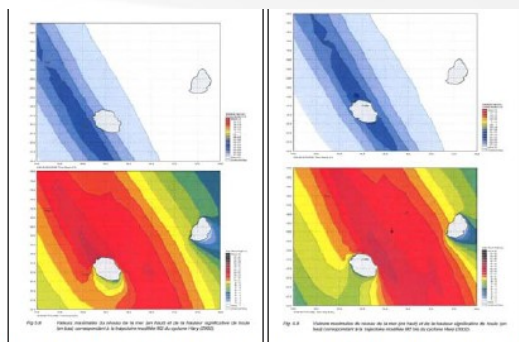
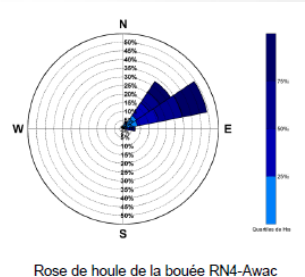
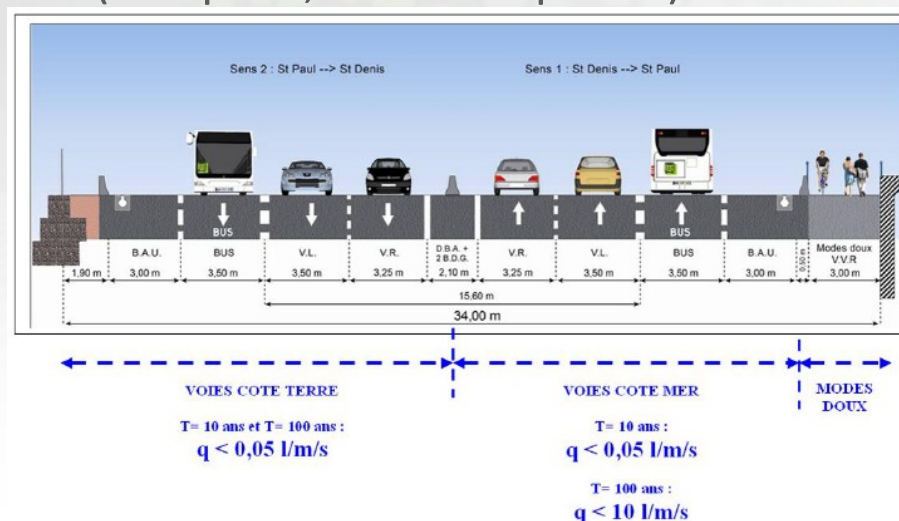


Figure 3.2 : Valeurs maximales du niveau de la mer (en haut) et hauteur significative (en bas) pour quatre trajectoires paramétriques correspondant au cyclone Hary (2002) [L6].



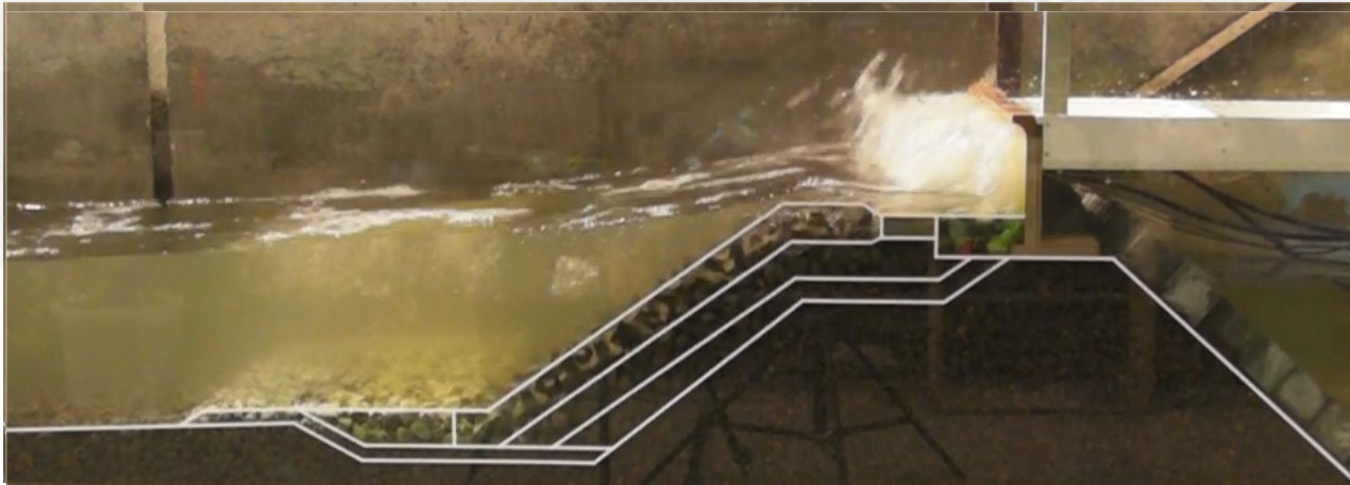
Rose de houle de la bouée RN4-Awac



- Détermination des durées de retour des houles et des niveaux d'eau puis des durées de retour conjointes des 2 phénomènes.

Digue – Modèles physiques

Cinématique démontrant l'efficacité du mur chasse-mer



Digue – Modèles physiques

Exemple de modèle 3D : Digue D1 (Saint-Denis)

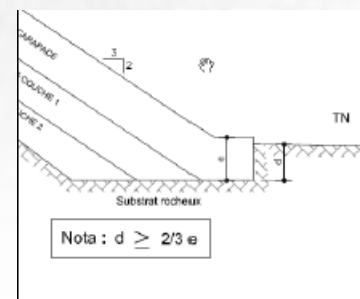
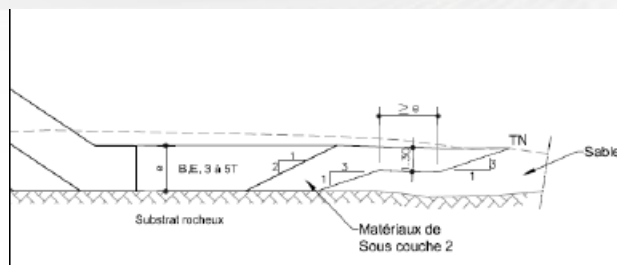
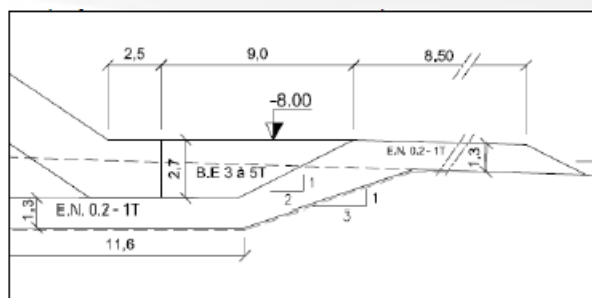


Digue – Partie inférieure

► Différentes tailles de blocs de carapace en fonction de la profondeur :

Type de blocs	Bloc tranche de profondeur inférieure	Profondeur de transition ht Cote TN pied de digue (m NGR)
Blocs non coffrés (EN ou BE)	Talus existant	variable
Xbloc® de 4 m ³	Blocs non coffrés (EN ou BE)	0
ACCROPODE™II de 6 m ³	Xbloc® de 4 m ³	-5
ACCROPODE™II de 8 m ³	ACCROPODE™II de 6 m ³	-7
ACCROPODE™II de 11 m ³	ACCROPODE™II de 8 m ³	-9

► Différents types de butées de pied en fonction du contexte géotechnique :



► Différentes longueurs de tapis anti-affouillements selon le risque d'affouillements :

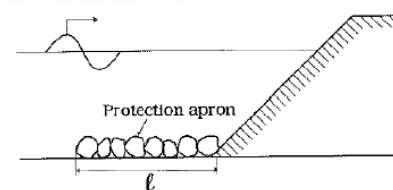
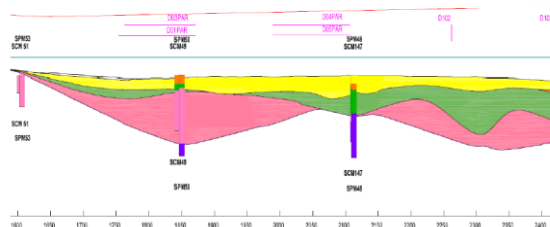
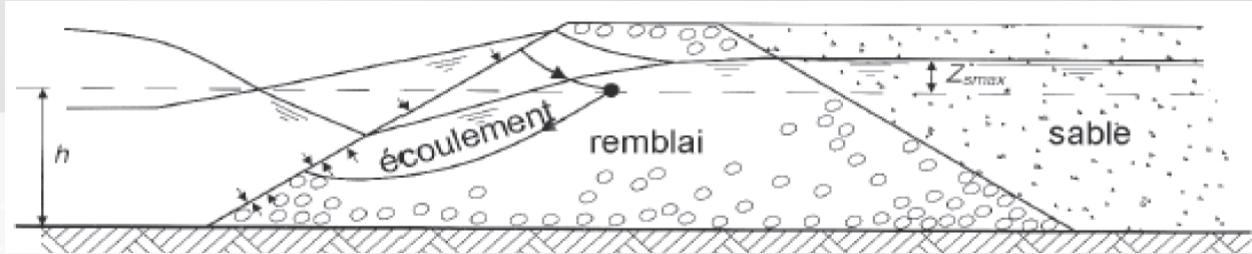


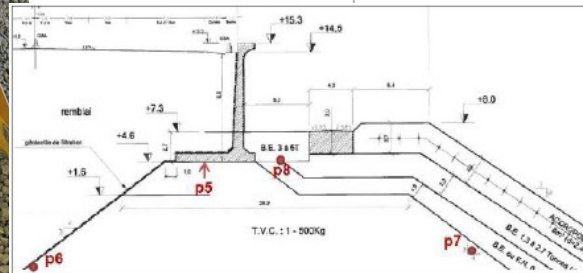
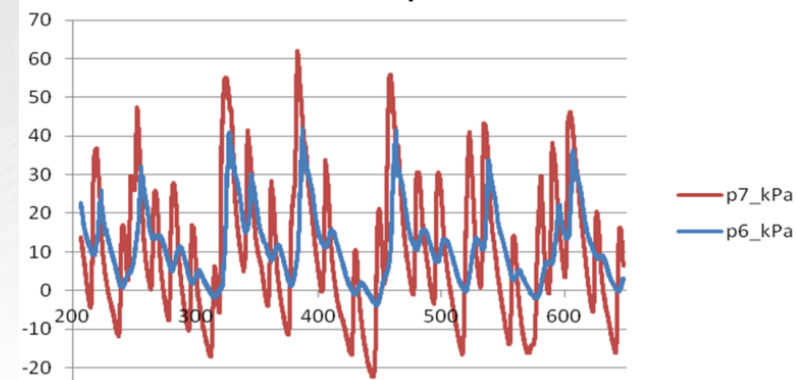
Figure 5 : Largeur de la protection anti-affouillement (depuis le pied du talus)
(Source Sumer & Fredsoe -2002)

Digue – Partie inférieure

► Détermination du niveau d'eau interne par la méthode du Rock Manual

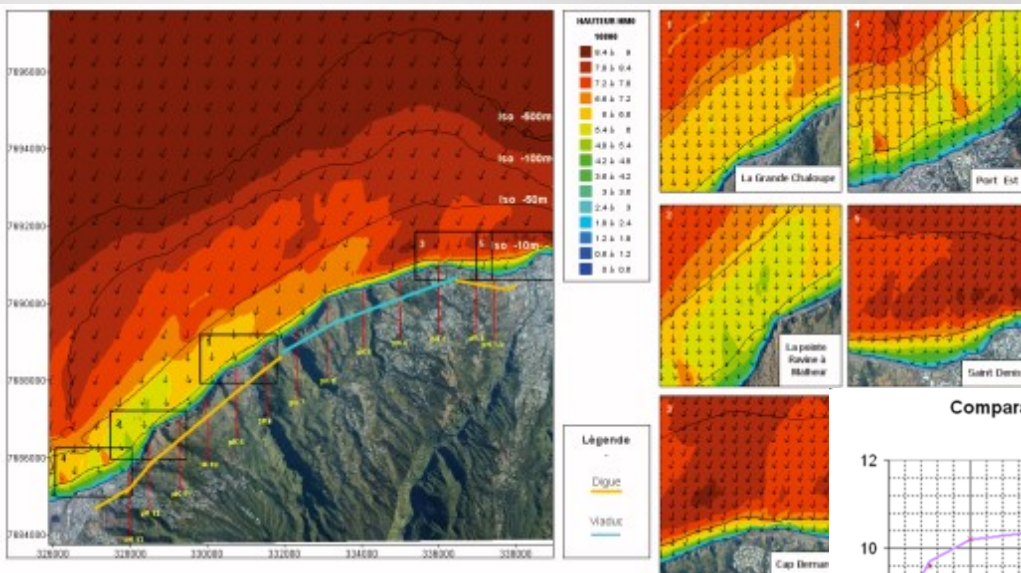


Corrélation par l'analyse des enregistrements des sondes en modèle physique

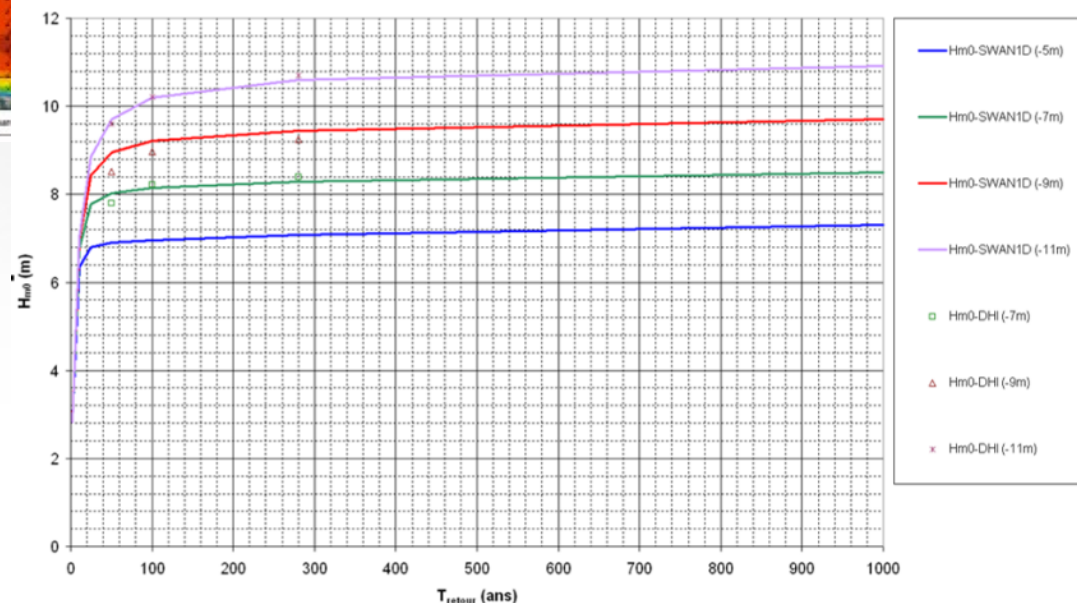


Digue – Partie inférieure

Etude de sensibilité des fonds marins sur les houles



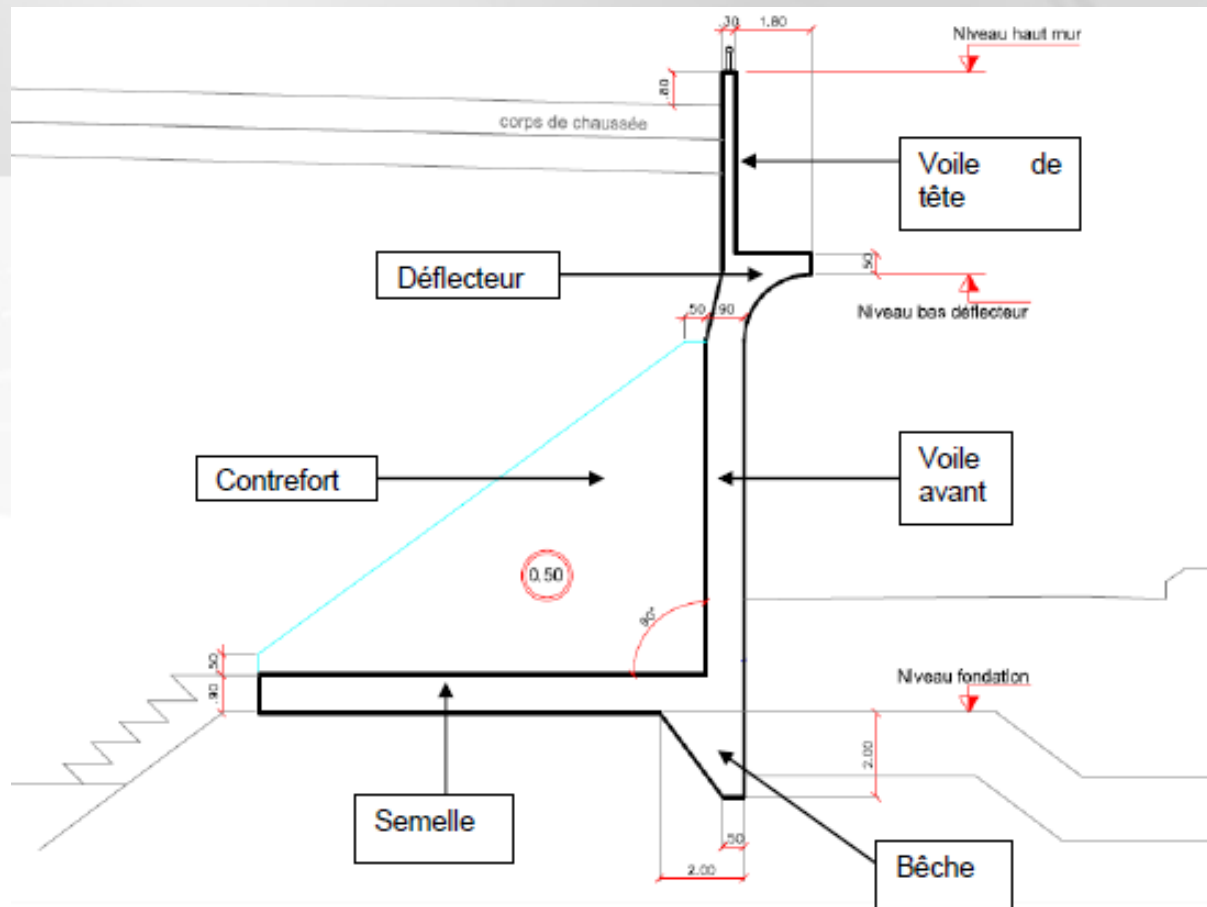
Comparaison des houles modélisées avec SWAN1D et des houles mesurées en canal à houle par DHI



► Les houles de conception sont les houles les plus fortes physiquement possibles du fait de la configuration bathymétrique

→ **garantie sur la pérennité**

Digue - Le mur chasse mer



Fonction soutènement

Fonction chasse-mer

Digue - Le mur chasse mer

► Pré-dimensionnement

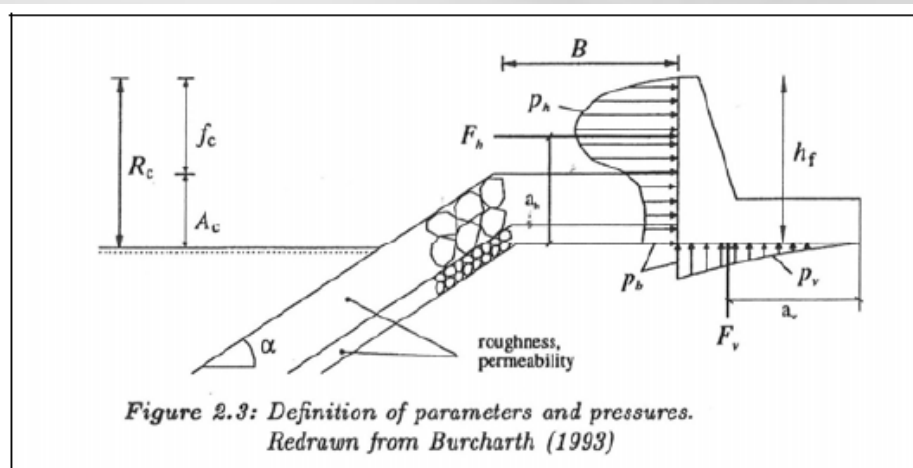


Figure 5.3.1 : Paramètres géométriques de la formule de Pedersen [G8].

$$f_{h,0.1\%} = 0.21 \sqrt{\frac{\lambda_{0m}}{B}} \left(1.6 y_{eff} + \frac{1}{2} A h' \right) p_m$$

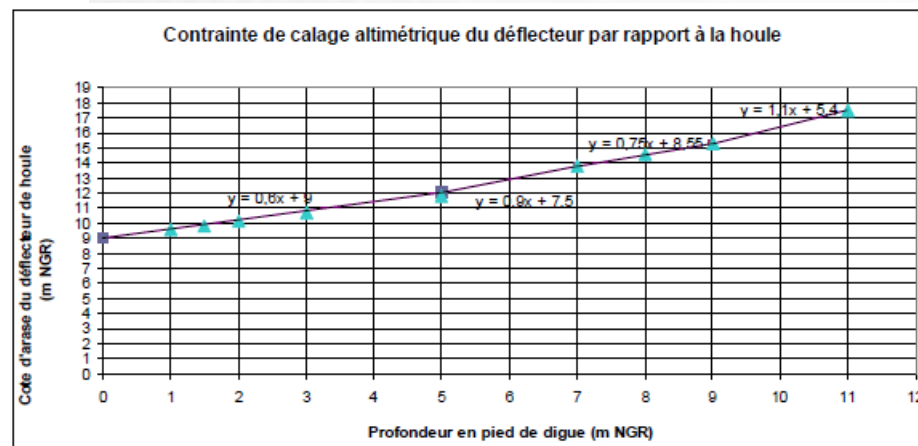
$$m_{h,0.1\%} = a f_{h,0.1\%}$$

$$a = 0.55 (y_{eff} + h')$$

$$p_{b,0.1\%} = 1.00 A p_m$$

► Calage altimétrique du déflecteur

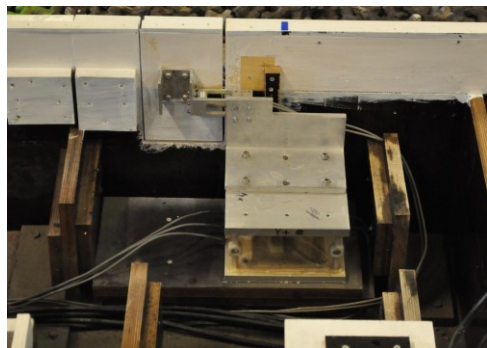
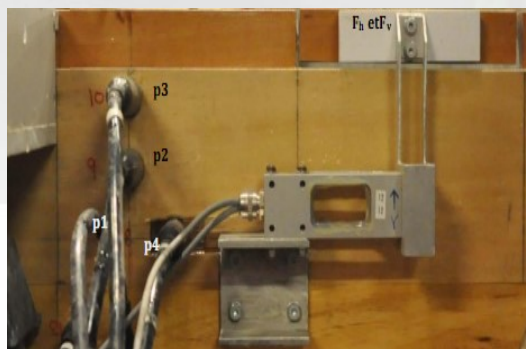
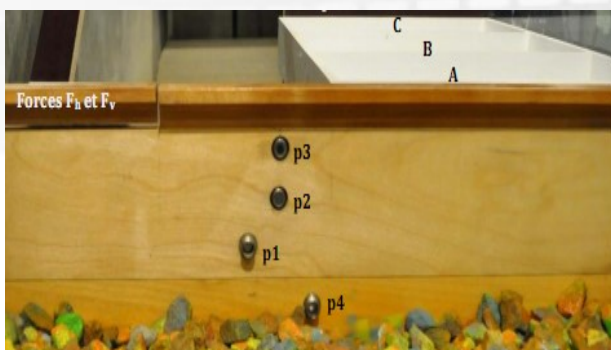
- 4 niveaux selon les 4 coupes types de digue testées en modèle 2D à 4 profondeurs différentes
- Interpolations entre ces 4 niveaux pour obtenir le profil en long



Digue - Le mur chasse mer

Définition des efforts hydrodynamiques en modèle

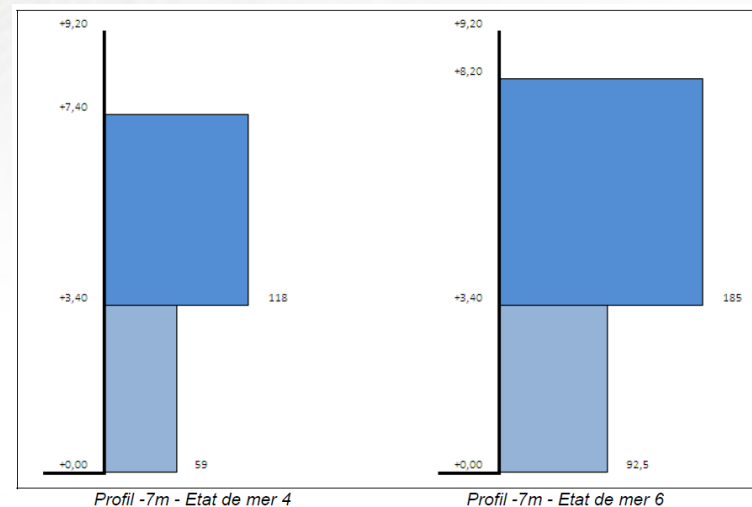
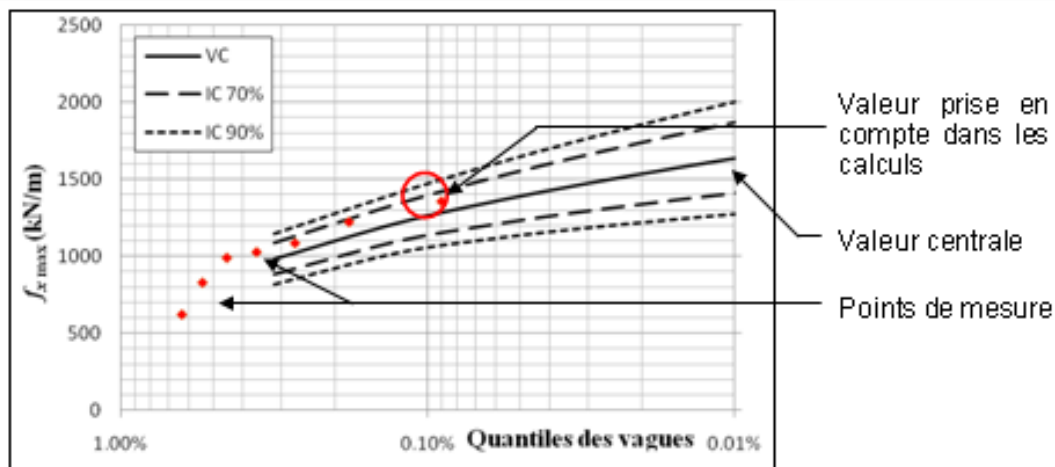
- ▶ Enregistrements des efforts et pressions en modèles physiques 2D et 3D
 - ▶ Efforts : capteur de force à jauges de contraintes. Echantillonnage à 140Hz.
 - ▶ Pressions : capteurs de pression à membrane élastique. Echantillonnage à 70Hz.
 - ▶ Echantillonnage choisi en fonction des fréquences propre du montage.
- ▶ Plusieurs centaines de mesures pour couvrir tous les cas de figures



Digue - Le mur chasse mer

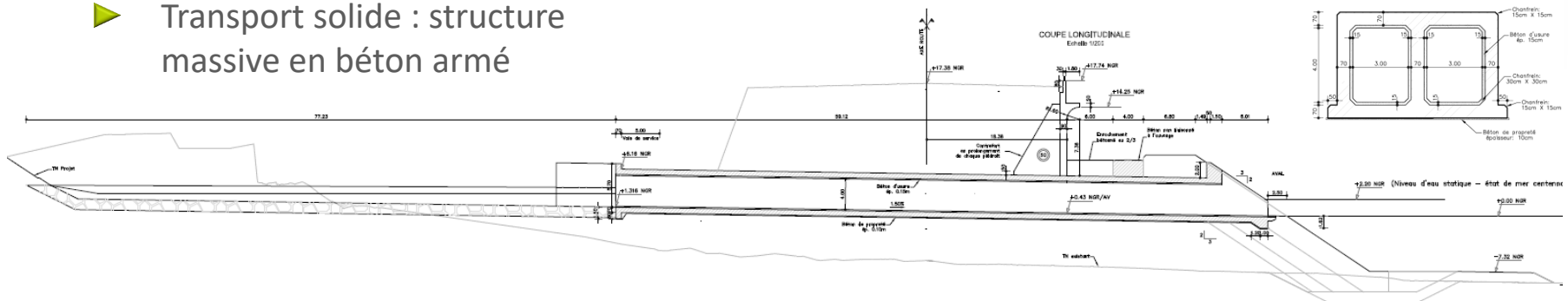
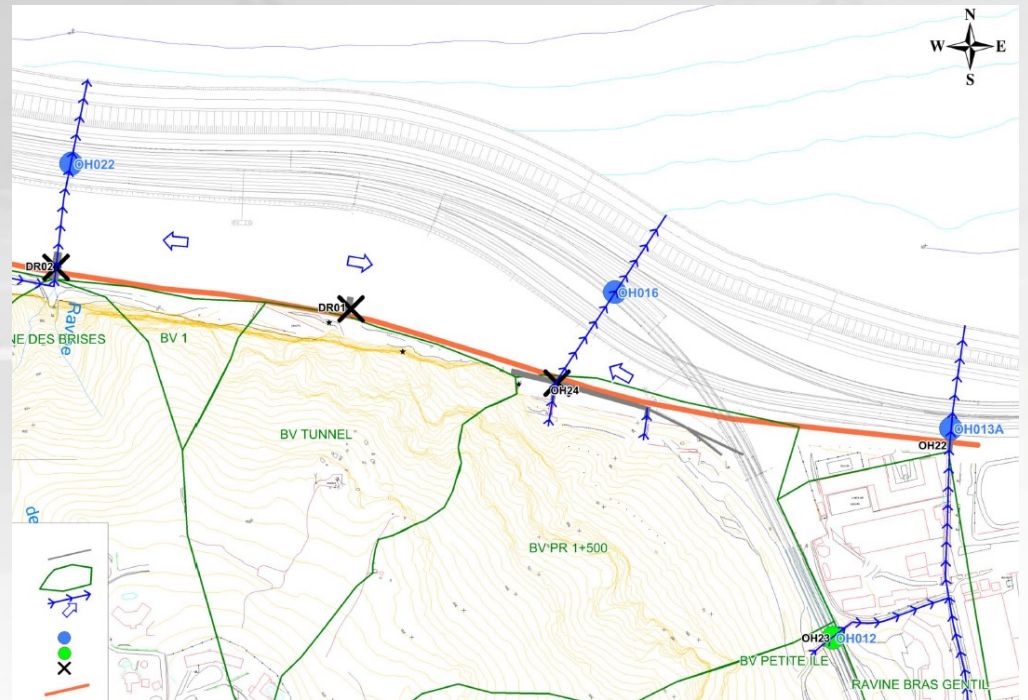
Définition des efforts hydrodynamiques

- ▶ **Traitement des signaux: filtrage des efforts et des pressions**
- ▶ **Séparation des pressions basses et hautes fréquences :**
 - Basses fréquence = pression hydrodynamique. Représentatives car loi de similitude de Froude respectée.
 - Hautes fréquences = pics de pressions acoustiques très brefs (lame d'air emprisonnée). Non représentatives sans l'application d'un facteur de correction.
- ▶ **Pic d'efforts isolés, classés selon l'occurrence de dépassement du % vagues**
- ▶ **Comportement logarithmique des efforts et moments mesurés**

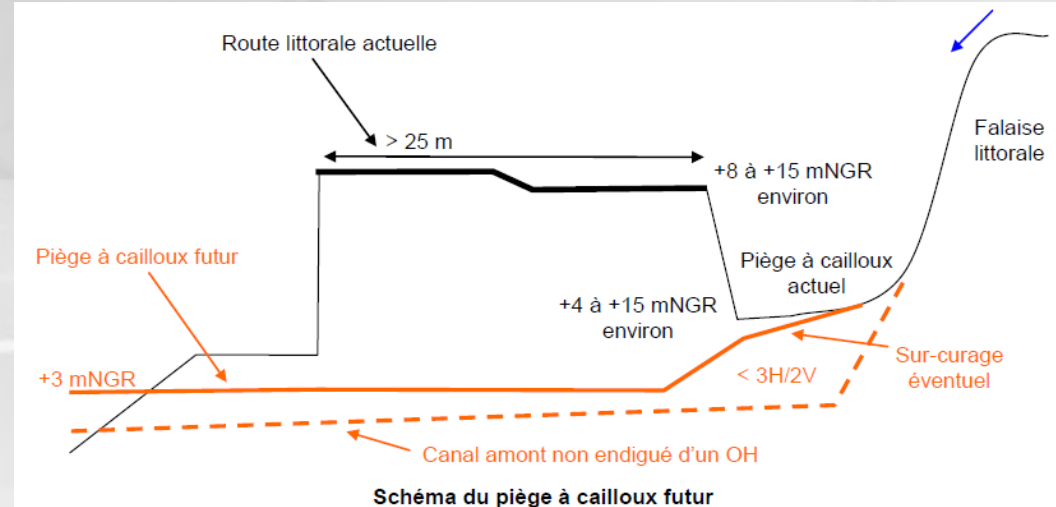


Digue – Ouvrages hydrauliques (OH)

- ## Assurer une transparence hydraulique de la digue vis-à-vis des eaux des ravines et des bassins versants amont :
-  Crue de dimensionnement de l'OH : 100 ans
 -  Fonctionnement hydraulique évitant toute altération de la digue, toute inondation amont
 -  Tirant d'air suffisant : testé en modèle physique (absence de mise en charge longue)
 -  Transport solide : structure massive en béton armé



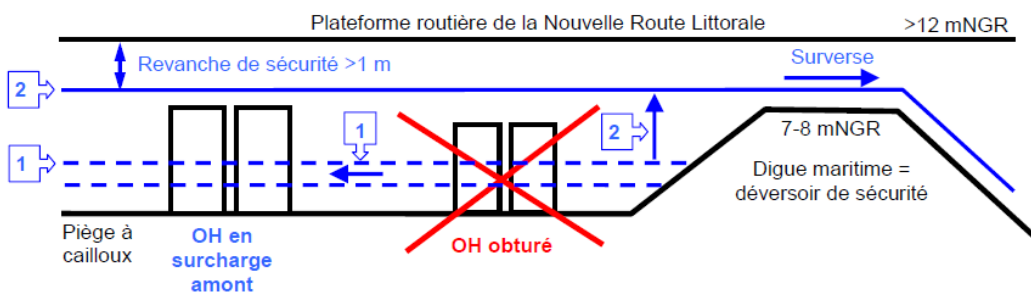
Digue – OH et Piège à cailloux (PAC)



► Apports diffus des ravines + falaise :

- Cheminent en pied de falaise puis dans le PAC
- Rejoignent le canal amont de l'OH
- Traversent la NRL via les OH
- Se rejettent dans la mer

► Entretien des OH à prévoir vis-à-vis du transport solide, afin de conserver la section hydraulique



Fonctionnement hydraulique type en cas de dysfonctionnement d'un OH

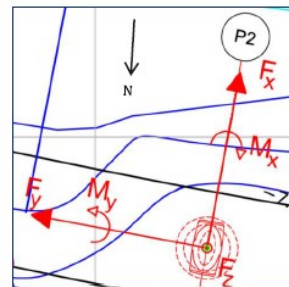
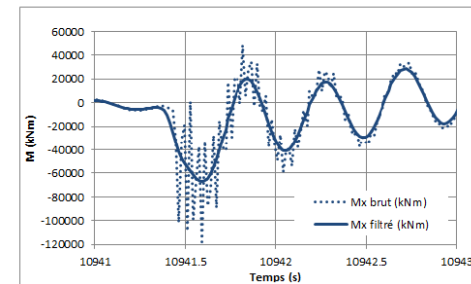
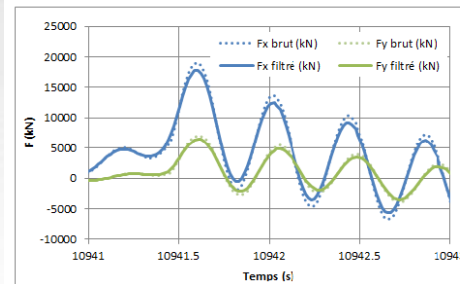
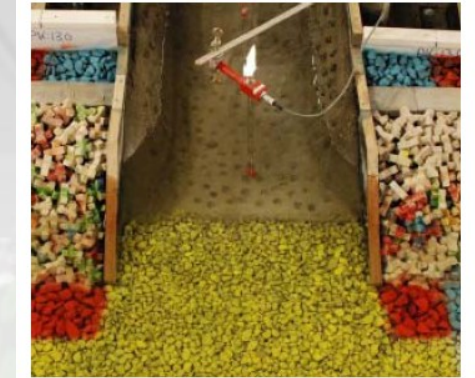
Digue - Modèles physiques

- ▶ Etudier la stabilité des éléments de la digue et vérifier les critères fixés en fonction les objectifs du programme :
 - ▶ Des blocs de la carapace,
 - ▶ Des enrochements de la berme ou « baignoire » en pied de mur,
 - ▶ Des enrochements de la butée de pied,
 - ▶ Des enrochements du tapis anti-affouillements,
 - ▶ Des plots de voie de service,
- ▶ Mesurer les franchissements au-delà du mur chasse-mer
- ▶ Mesurer les niveaux atteints par les crêtes des vagues pour caler l'altimétrie des viaducs



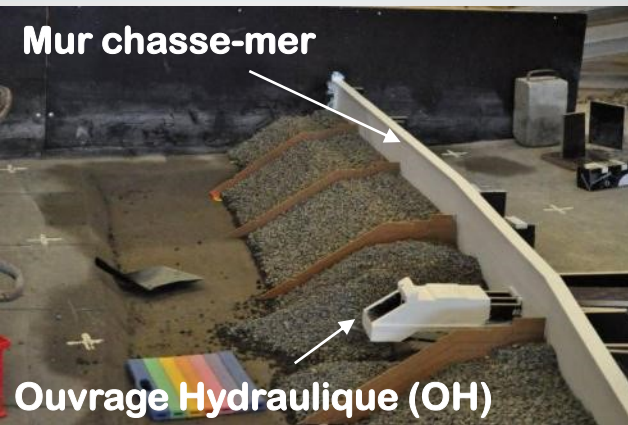
Digue - Modèles physiques

- ▶ Mesurer les niveaux d'eau dans les Ouvrages Hydraulique pour vérifier l'écoulement lors de la concomitance houle 100 ans / niveau mer haut / crue 100 ans
- ▶ Mesurer les efforts et pressions sur le mur chasse-mer et les piles des viaducs
- ▶ Mesurer les pressions dans la digue, notamment sous le mur chasse-mer
- ▶ Mesurer les vitesses des courants de houles sur les fonds marins (écoconception)
- ▶ Analyser les essais en direct, puis à partir des enregistrements (mesures et vidéos) pour optimiser la conception puis la valider définitivement



Digue - Modèles physiques

Maquette 3D (ech 1/ 65 ème)



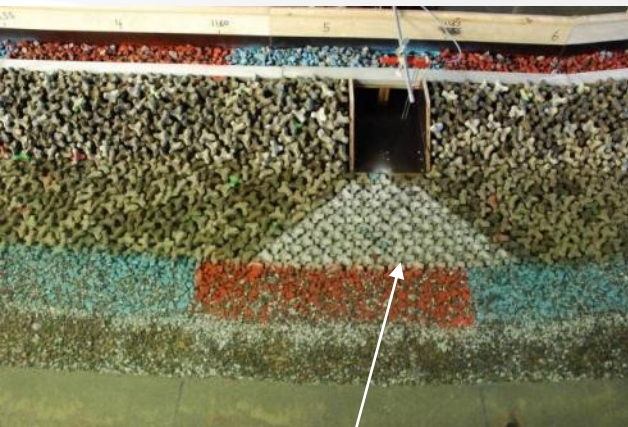
Mise en place du noyau sur gabarit



Mise en place des blocs autour de l'OH



Noyau autour du musoir



Blocs densifiés au droit de l'OH

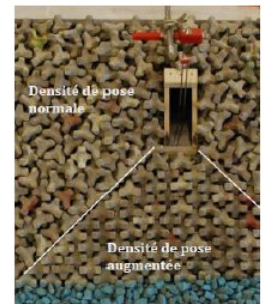
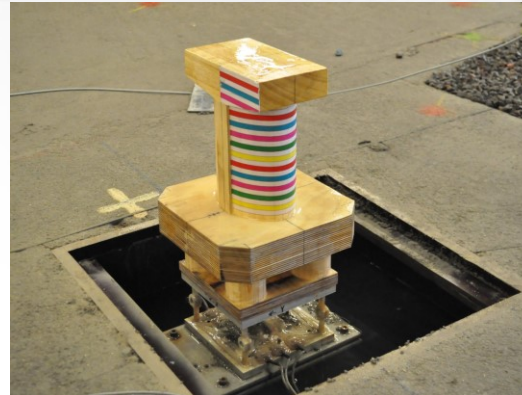


Construction terminée

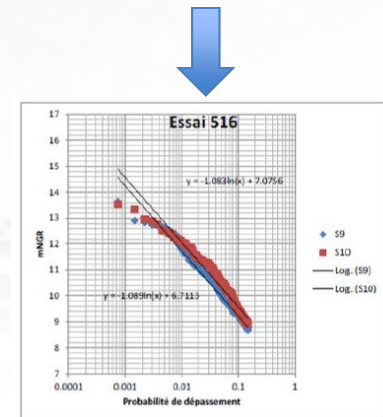


Génération de la houle incidente

Digue - Modèles physiques



Digue - Modèles physiques

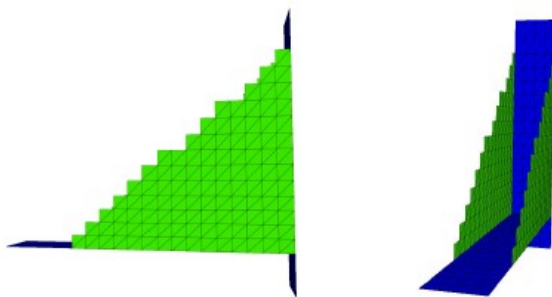
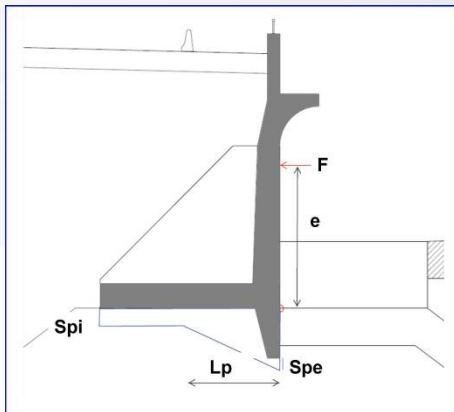


Modélisation de la Digue

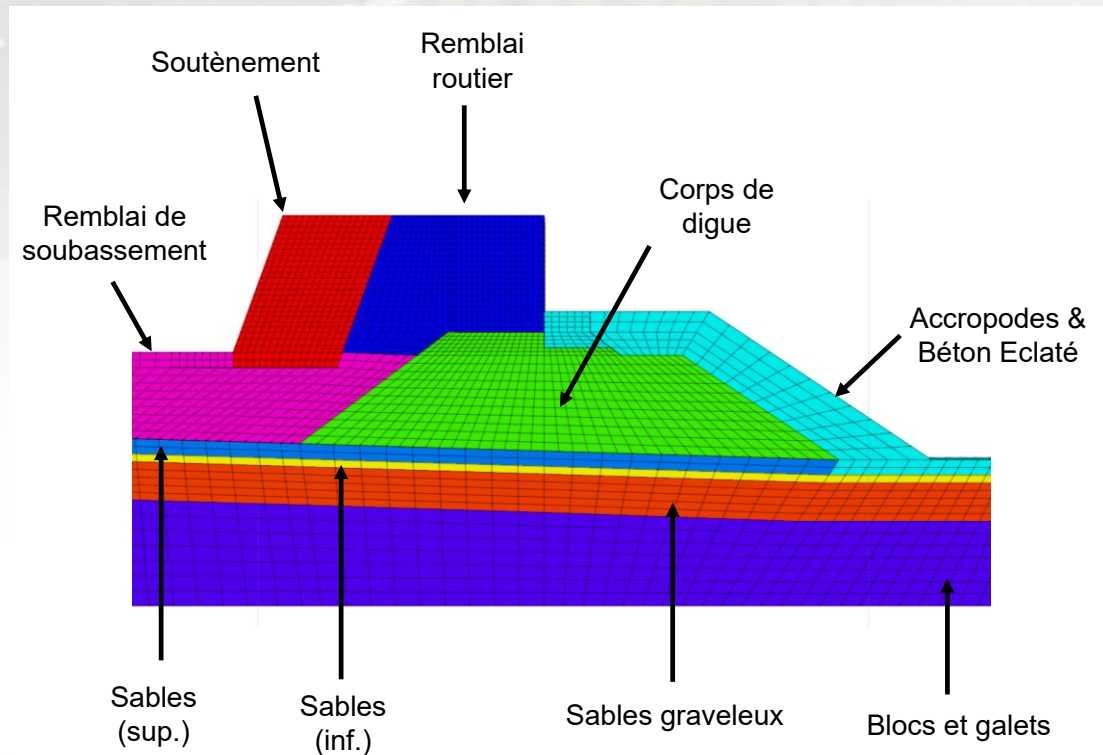
Modèle global de la digue aux éléments finis

Calculs des déplacements de la digue sous l'impact de la houle centennale avec un logiciel aux éléments finis

Sollicitations : effort horizontale F sur le parement du mur + Sous-pressions S_p sous la semelle du mur



Modèle du mur en L et des contreforts.



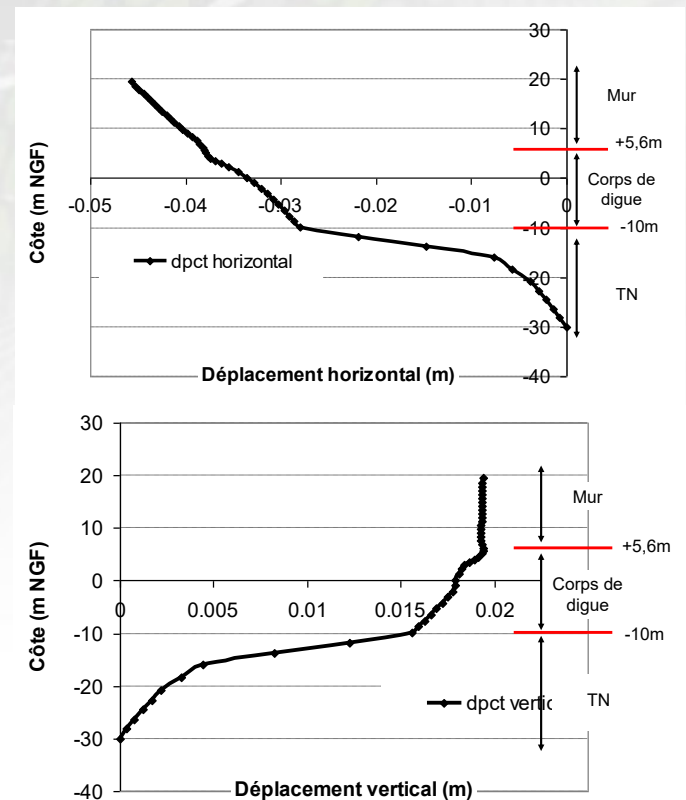
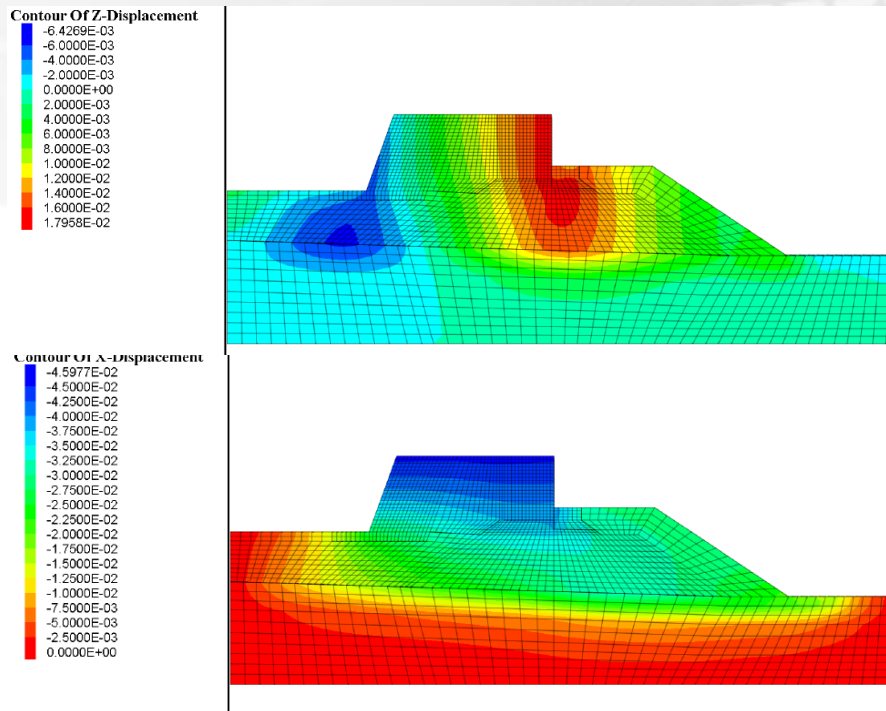
Modélisation de la Digue

Modèle global de la digue aux éléments finis

► Résultats:

► Déplacements extrêmes cumulés : 4,5cm en horizontal, 2cm en vertical : principalement localisés dans le terrain naturel

► Comportement élastique



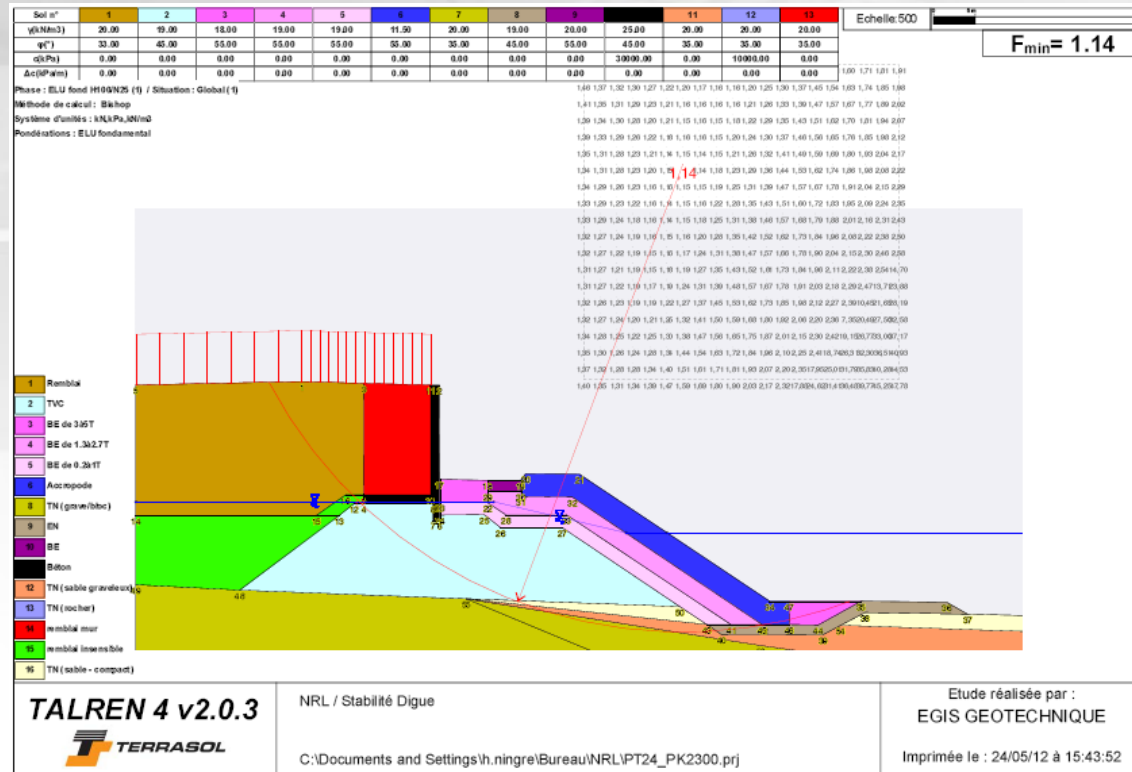
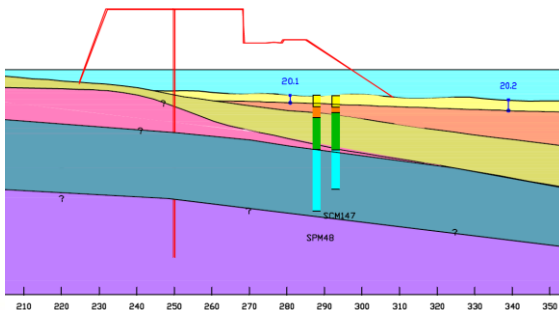
Géotechnique – modélisation de la Digue

Stabilité générale

- Coefficient de sécurité satisfaisant au grand glissement

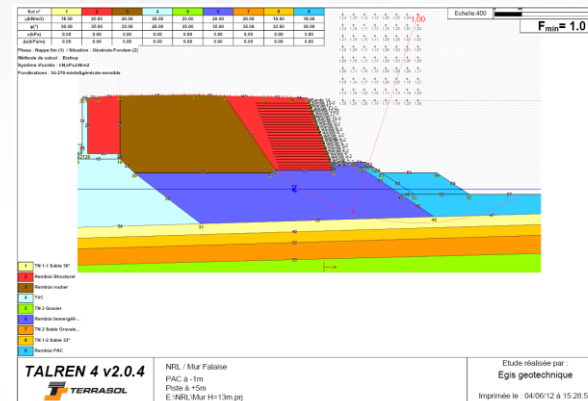
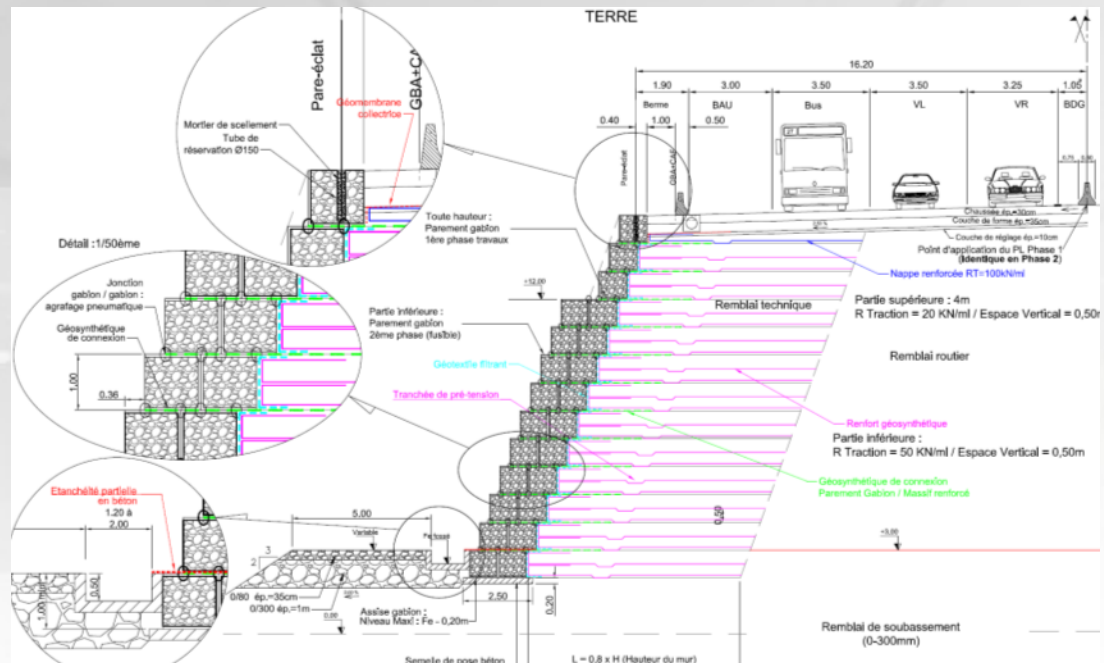
► Résultats probants $F > 1$ sous conditions accidentelles (houle centennale et séisme)

► Résultats très probants $F \gg 1$ sous conditions fondamentales



Talus raidi

- Talus raidi avec remblai renforcé par géotextiles
- Parement double fonction:
 - ▶ Gabions de confinement du remblai renforcé
 - ▶ Gabions de façade dissipateurs d'énergie (en cas de chocs de blocs)



Marché de travaux – Digues

MT2– Échangeur de La Possession – 1^{ère} phase

Montant des travaux réceptionnés en juillet 2016 : **45 M€ HT ;**

Groupe titulaire du marché :



Marché de travaux – Digues

▶ MT5.1 – Digue – 1^{ère} phase :

▶ Montant des travaux : **438 M€ HT** ;

▶ Délais global : 57 mois (dont 8 mois de préparation) à partir du 27 janvier 2014;

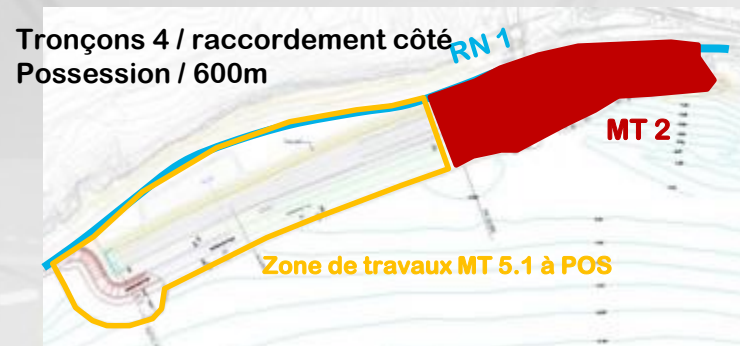
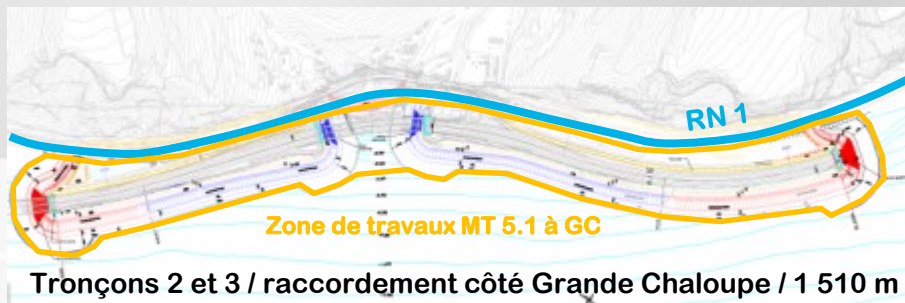
▶ Groupement titulaire du marché :



Tronçon 1 / raccordement côté Saint-Denis / 1 460 m



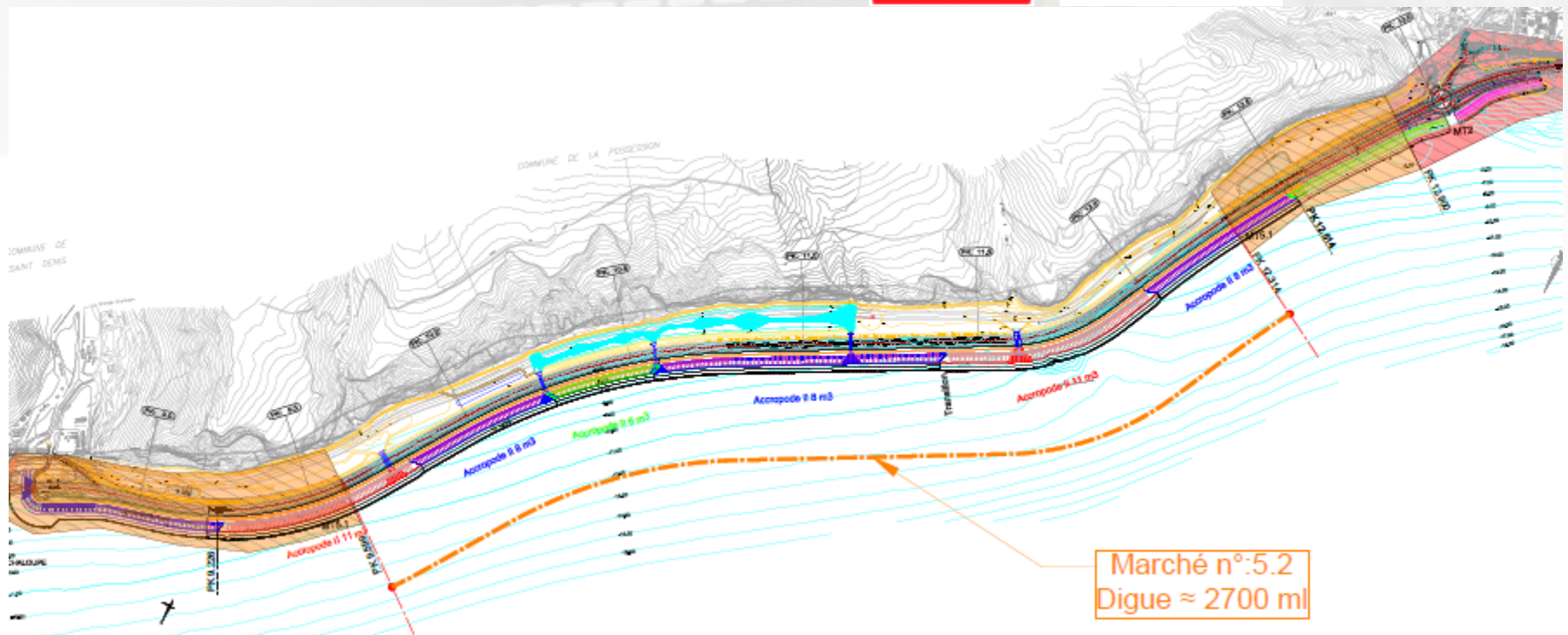
Marché de travaux – Digues



Marché de travaux – Dignes

▶ MT5.2 – DIGUE 2^{ème} phase

- ▶ Montant des travaux : **298 M€ HT** ;
- ▶ Notifié en novembre 2014 ;
- ▶ Groupement titulaire du marché :



Quelques chiffres

Synthèse des principales quantités des digues

Blocs de carapace :	38 000 u
Béton de structure:	240 000 m3
Armatures :	25 000 t
Enrochements :	8.5 Mt
Remblais :	9.5 Mt

Merci de votre attention