

LA NOUVELLE ROUTE LITTORALE LA RÉUNION

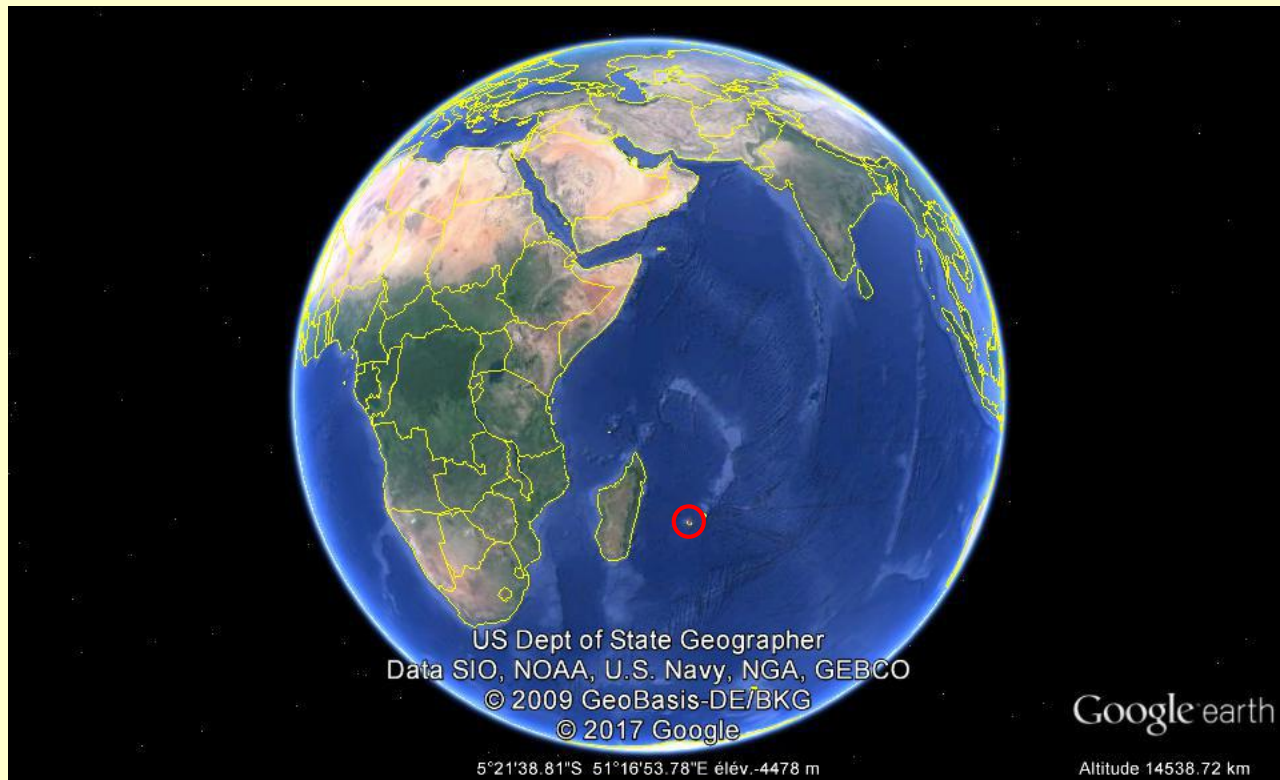
AG du 27 mars 2018

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

SOMMAIRE

1. localisation
2. Enjeux et risques généraux
3. Solutions envisagées
4. Le Programme de l'opération
5. Les Acteurs
6. Le Projet
 - 6.1 Enjeux Environnementaux
 - 6.2 Les échangeurs
 - 6.3 Les Viaducs et Ouvrages d'Art
 - 6.4 Quels enseignements?
- 7 Les Dignes

1 LOCALISATION



- **Au cœur de l'océan indien**
 - **700 km à l'est de Madagascar**
 - **2512 km²**
 - **850 000 habitants**
- (3 fois plus qu'en 1950)**

Saint-Denis

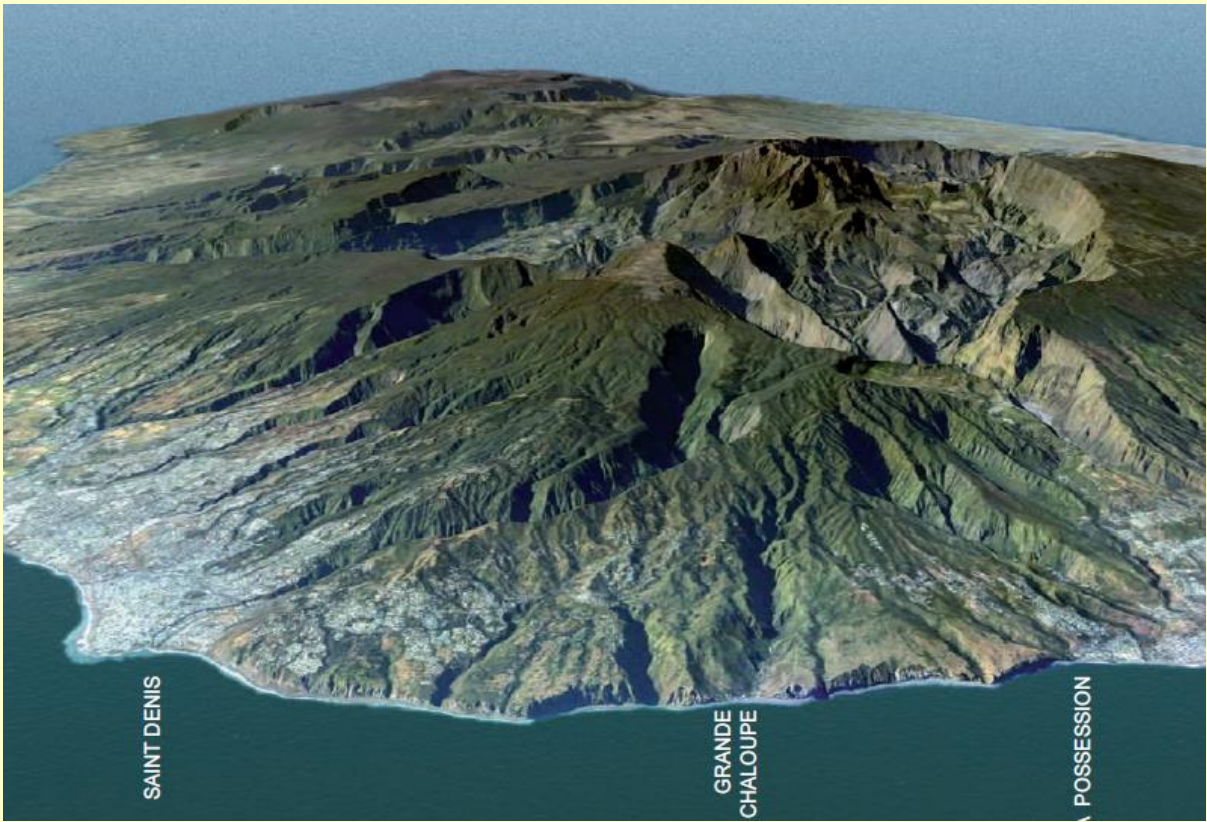


Réunion Réunion



Saint-Pierre





2 ENJEUX et RISQUES GENERAUX

la RN1 est l'infrastructure principale de l'île, qui relie les grandes villes qui se situent sur le littoral.

L'île fait environ 80 km de long pour 40 km de large.

La chute récurrente de blocs de la falaise entre St. Denis et Le Port, constitue un enjeu majeur pour la sécurité des usagers ainsi que pour l'économie de toute la région.

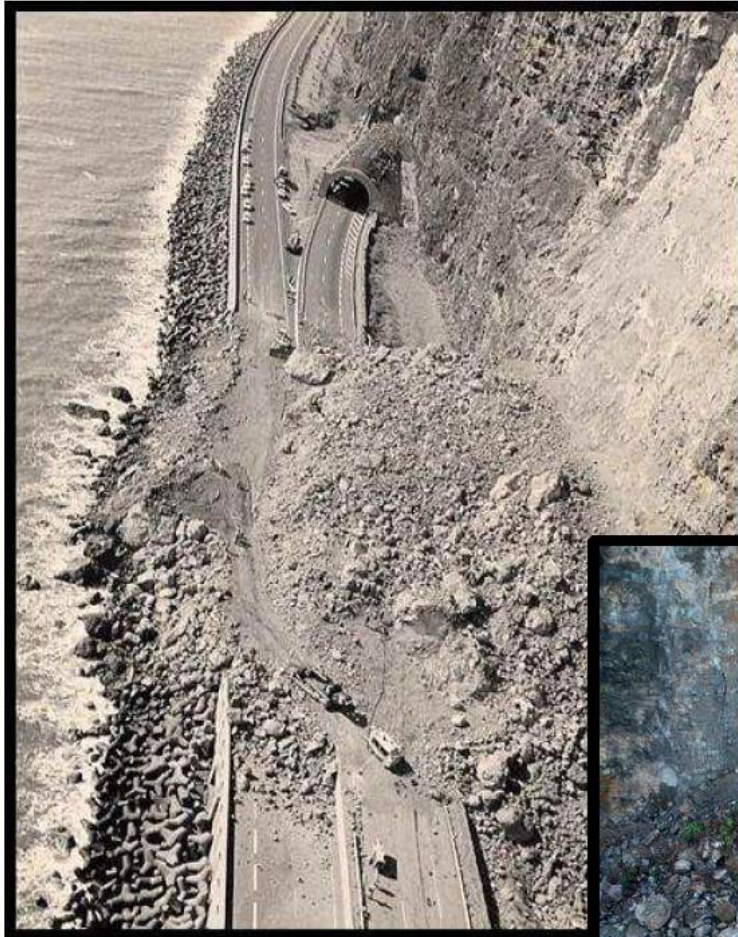
Les risques – la Falaise



Chutes de blocs



Les risques – la Falaise



Effondrements de grande ampleur



Les risques – l'océan



Les risques – l'exploitation de la RN1.



Trafic : 66 000 véh./jr.



Sécurisation : Coupures /
Encombres



Les enjeux

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 / ...



Les enjeux

► Dégâts environnementaux :

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



3 SOLUTIONS ENVISAGEES

- **Une digue générale**
- **Un viaduc général**
- **Une combinaison des deux**



4 PROGRAMME de l'OPERATION

Sécurité

- ▶ Itinéraire sécurisé entre Saint-Denis et La Possession,

Développement des Infrastructures de Transport Collectif

- ▶ Voie dédiée permettant d'accueillir un TC en site propre ,
- ▶ Possibilité d'évolution vers TCSP guidé rail

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

- ▶ Durée de vie de 100 ans,

5 LES ACTEURS

Le Maître d'Ouvrage : la Région Réunion

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

Le Maître d'Œuvre 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

Les Entreprises

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

GTOI(mandataire) / SBTPC / VINCI Construction Terrassement

MT3/ Viaduc 5.4

**VINCI CGP (mandataire) / BOUYGUES TP / DODIN CAMPENON
BERNARD /DEMATHIEU et BARD**

MT4/ Viaduc de la Grande Chaloupe

EIFFAGE TP (mandataire)/ RAZEL BEC/ SAÏPEM / NGE/ GUINTOLI

MT5.1/ Digue 1^o Phase

GTOI (mandataire)/ SBTPC/ VINCI Construction Terrassement

6 LE PROJET



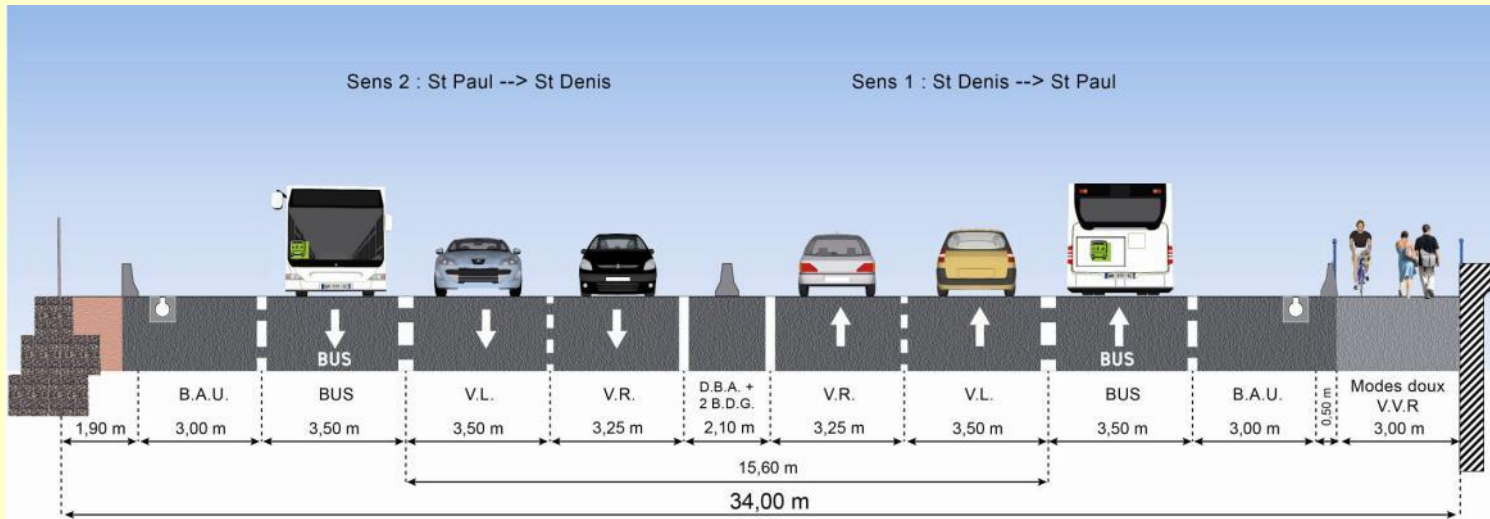
Présentation générale

- La longueur totale du projet est de 12209 m

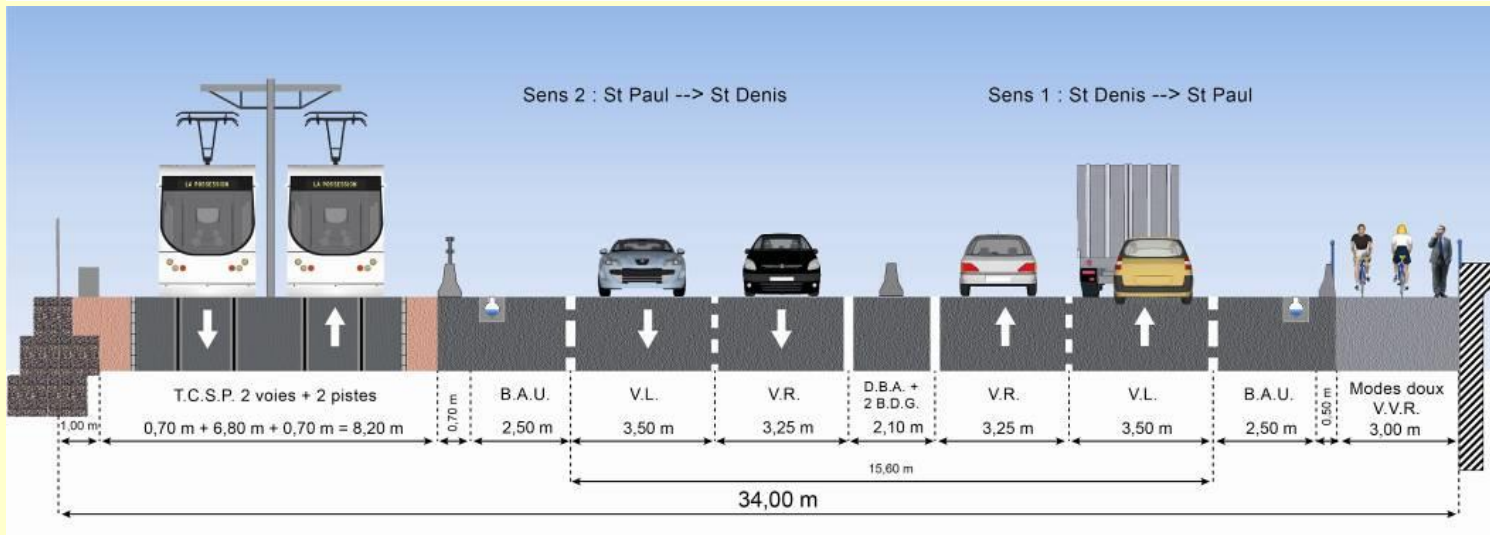
Se décomposant en:

- 3 échangeurs (2 aux extrémités et 1 intermédiaire)
- 5649 m de viaducs(dont le principal 5409m)
- et 6560m de digues.

Le Projet

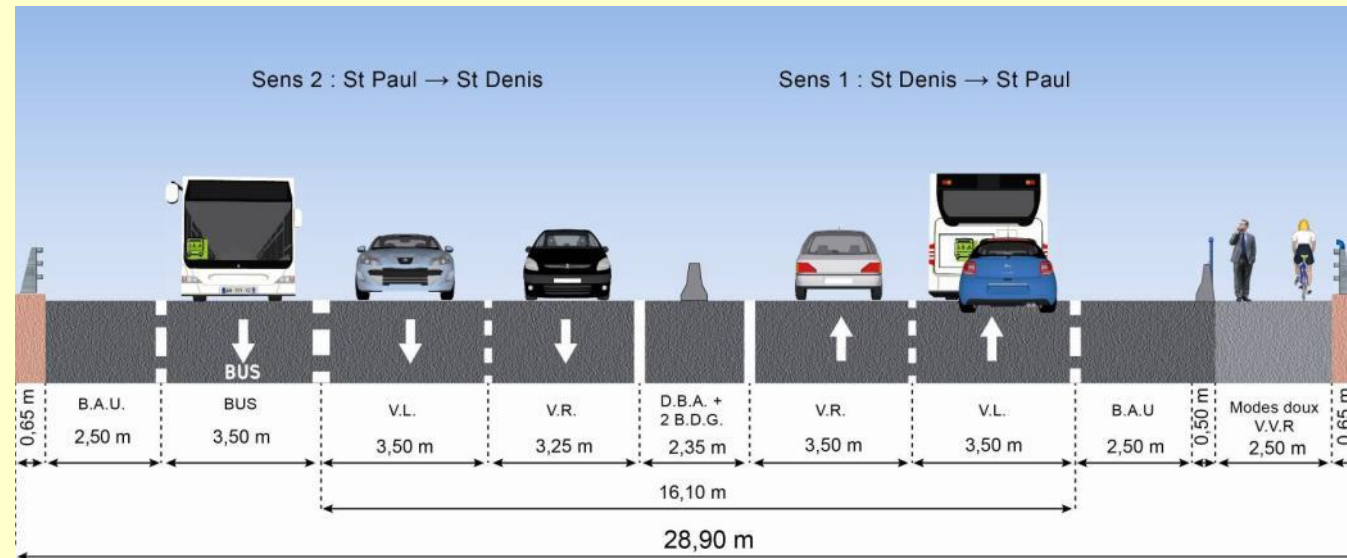


Mode 1

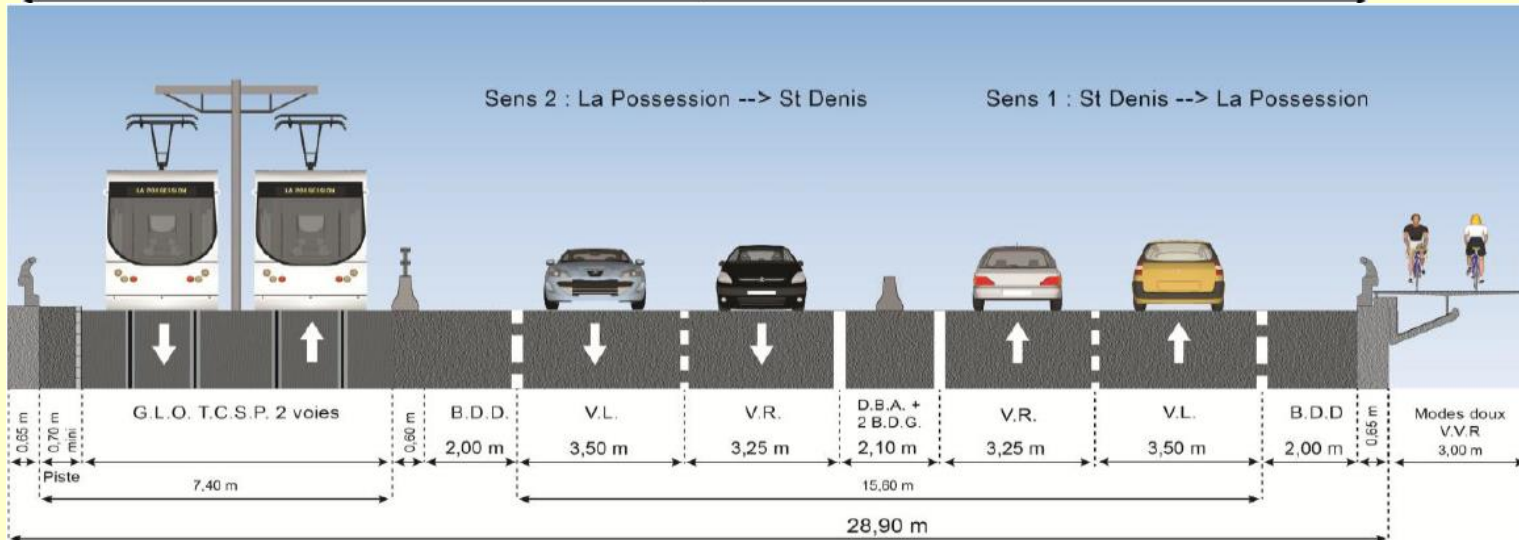


Mode 2
TCSP
Guidé rail

Le Projet



Mode 1

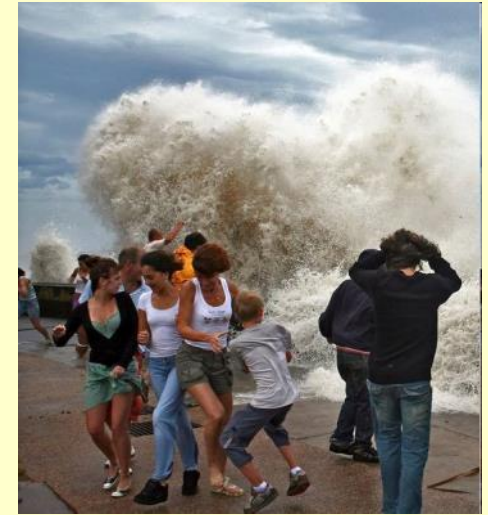


Mode 2
TCSP
Guidé rail

Conception de l'infrastructure

Autoriser les 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 et 24H / 24H



Conception de l'infrastructure

Loin de la falaise

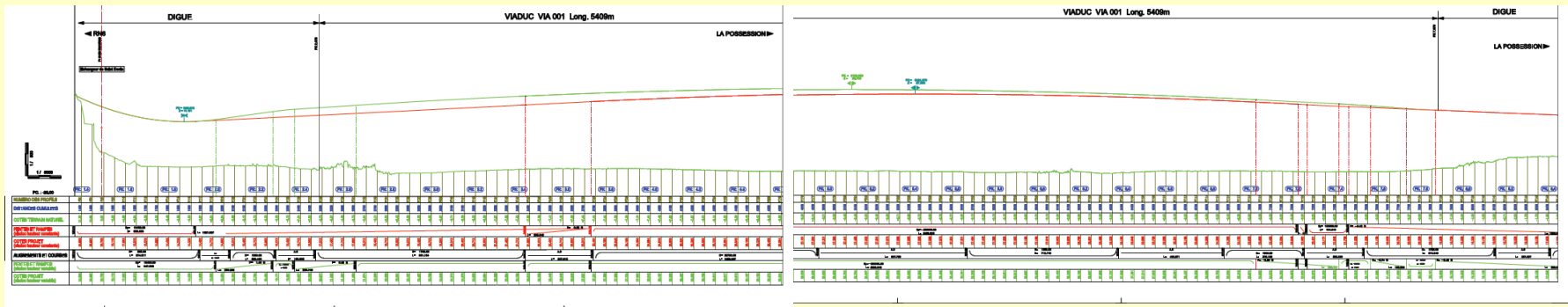
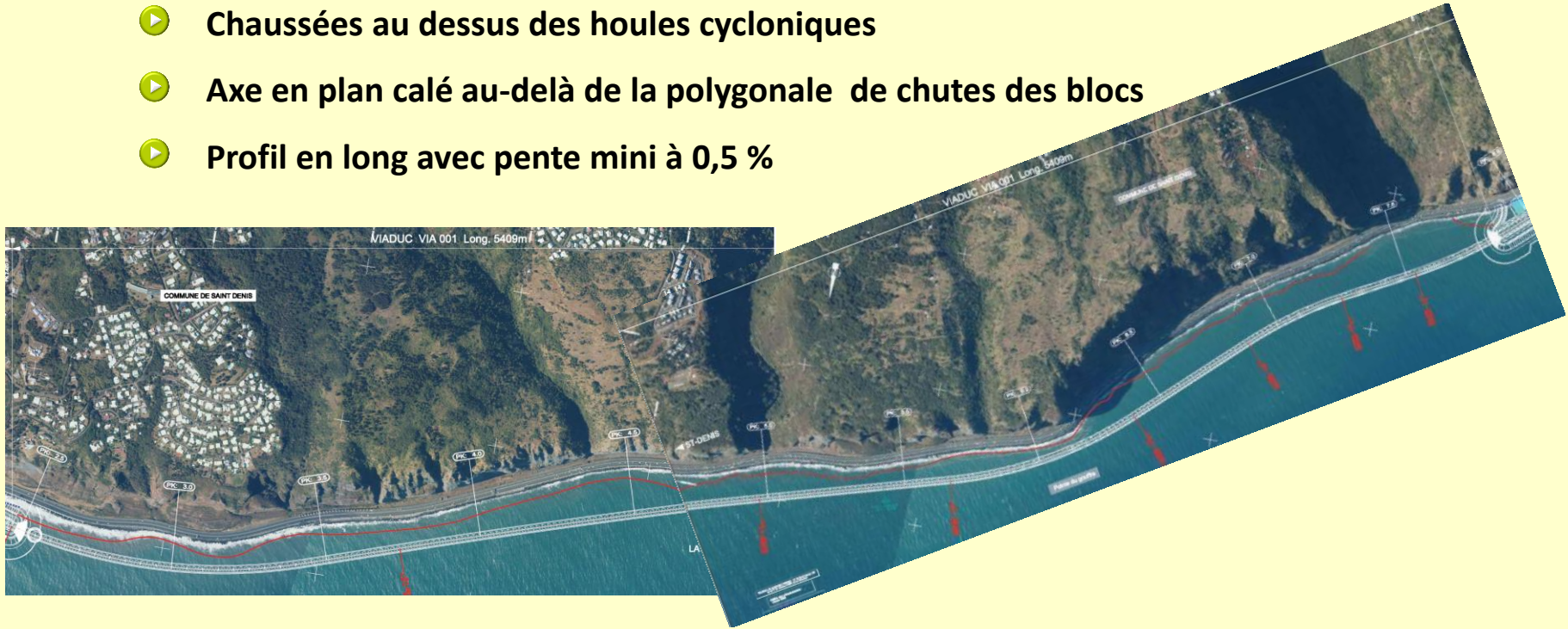
- ▶ Capacité de stockage des éboulements en masse dans un piège à cailloux
- ▶ Route implantée au-delà des chutes de blocs

Rétablir les écoulements naturels Création d'Ouvrages Hydrauliques

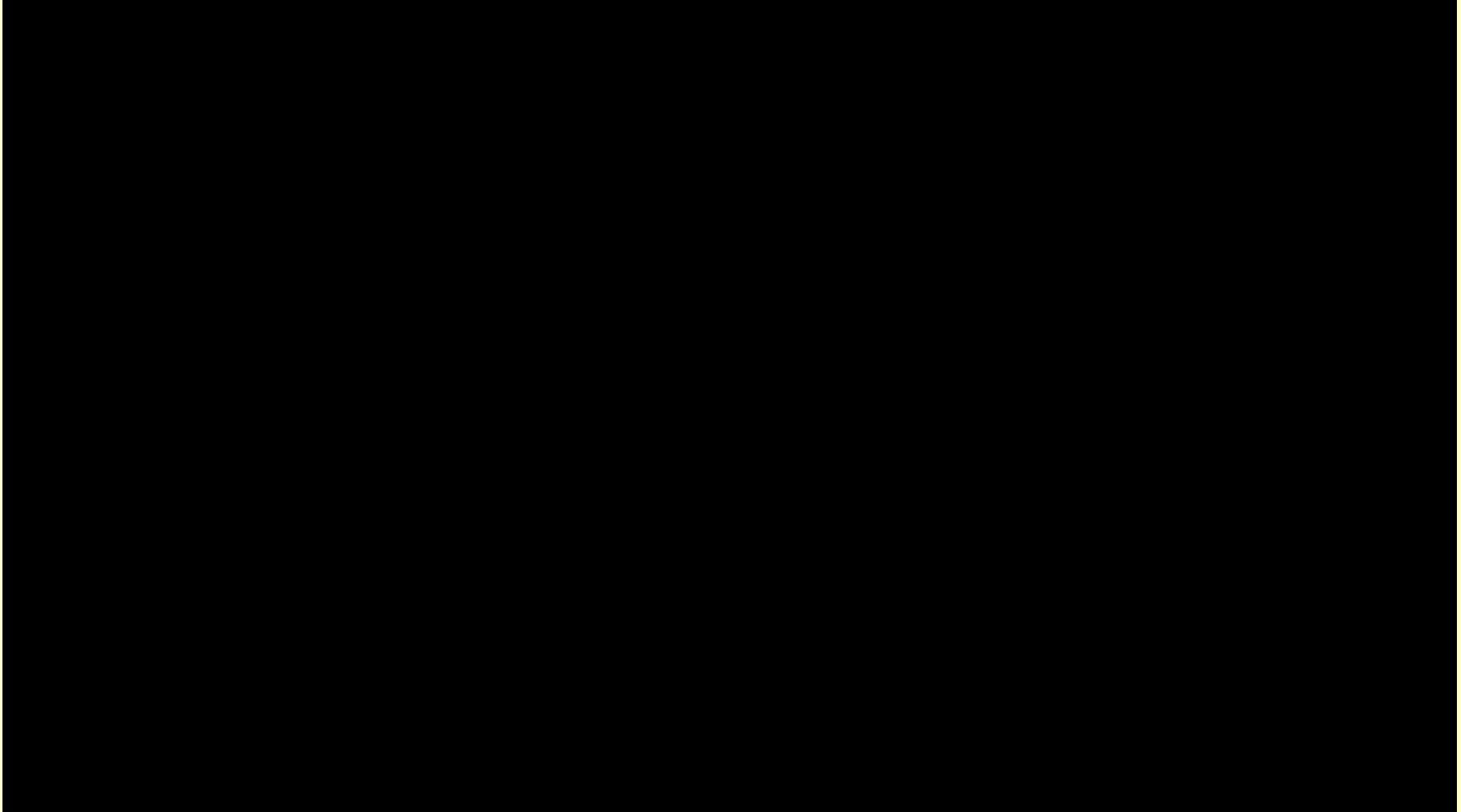


Conception de l'infrastructure

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



Conception de l'infrastructure



Conception de l'infrastructure

Montants des travaux très importants (1 600 M€ HT base janv. 2011)

Démarche Risque et Opportunité mise en place 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)**

6.1

Enjeux environnementaux

Enjeux environnementaux

La prise en compte des enjeux environnementaux



Une démarche d'éco-conception intégrée
aux études de conception et aux études
détaillées du projet

Photo : Lise Provost

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

Les grandes étapes réglementaires :

- ▶ **Déclaration d'utilité publique / MECDU > 7 mars 2012**
- ▶ **Autorisation au titre des monuments et sites historiques > 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, à la faune et à la flore)**
- ▶ **Déroptions « espèces protégées » > 19 et 20 décembre 2013 (enjeux liés à la faune et à la flore protégée)**

Enjeux environnementaux

Parmi les enjeux environnementaux pris en compte :



► Mammifères marins, tortues marines

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



► Avifaune marine

► Faune et flore terrestre, y compris espèces exotiques envahissantes

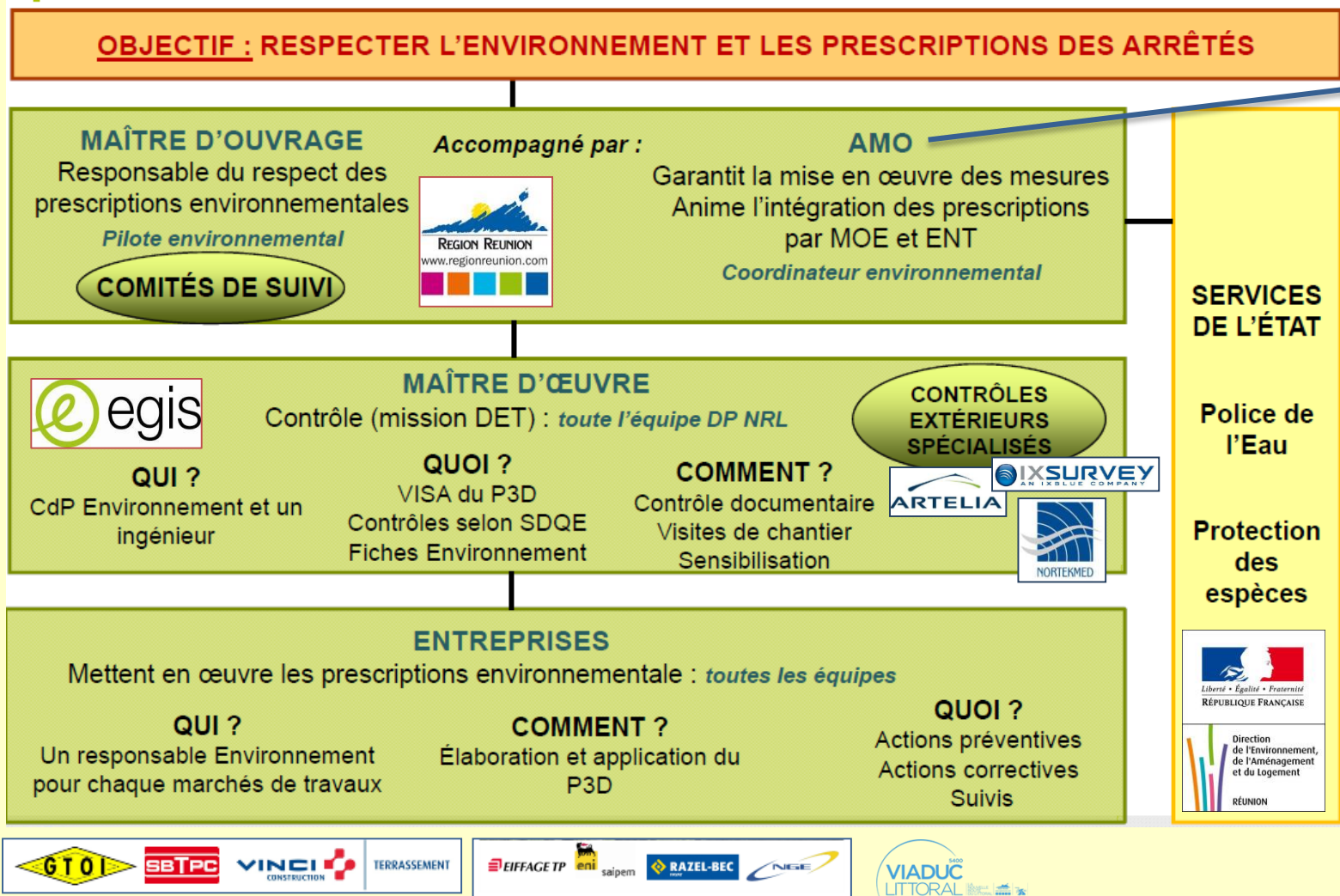


Enjeux environnementaux

Prescriptions environnementales issues des études et 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



Mammifères marins

- ▶ 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)

-> Fonctionnalité écologique de la zone



Baleine et baleineau (photo Biotope)

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

1. Etat initial

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

Globice/Biotope/
Quiet Océans



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

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



Modélisation de la propagation du son

3. Impacts sur les espèces

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

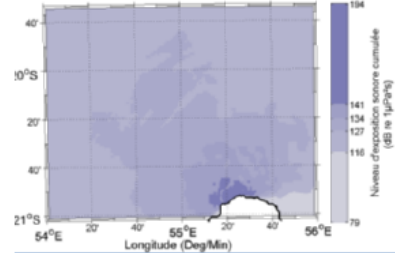
Quiet Océans



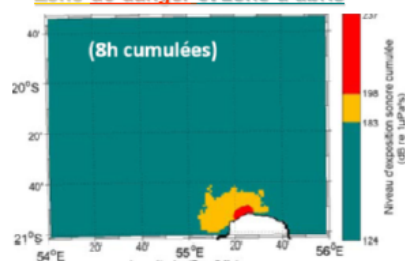
Cartographie spatiale du risque par classes de sensibilité d'espèces

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



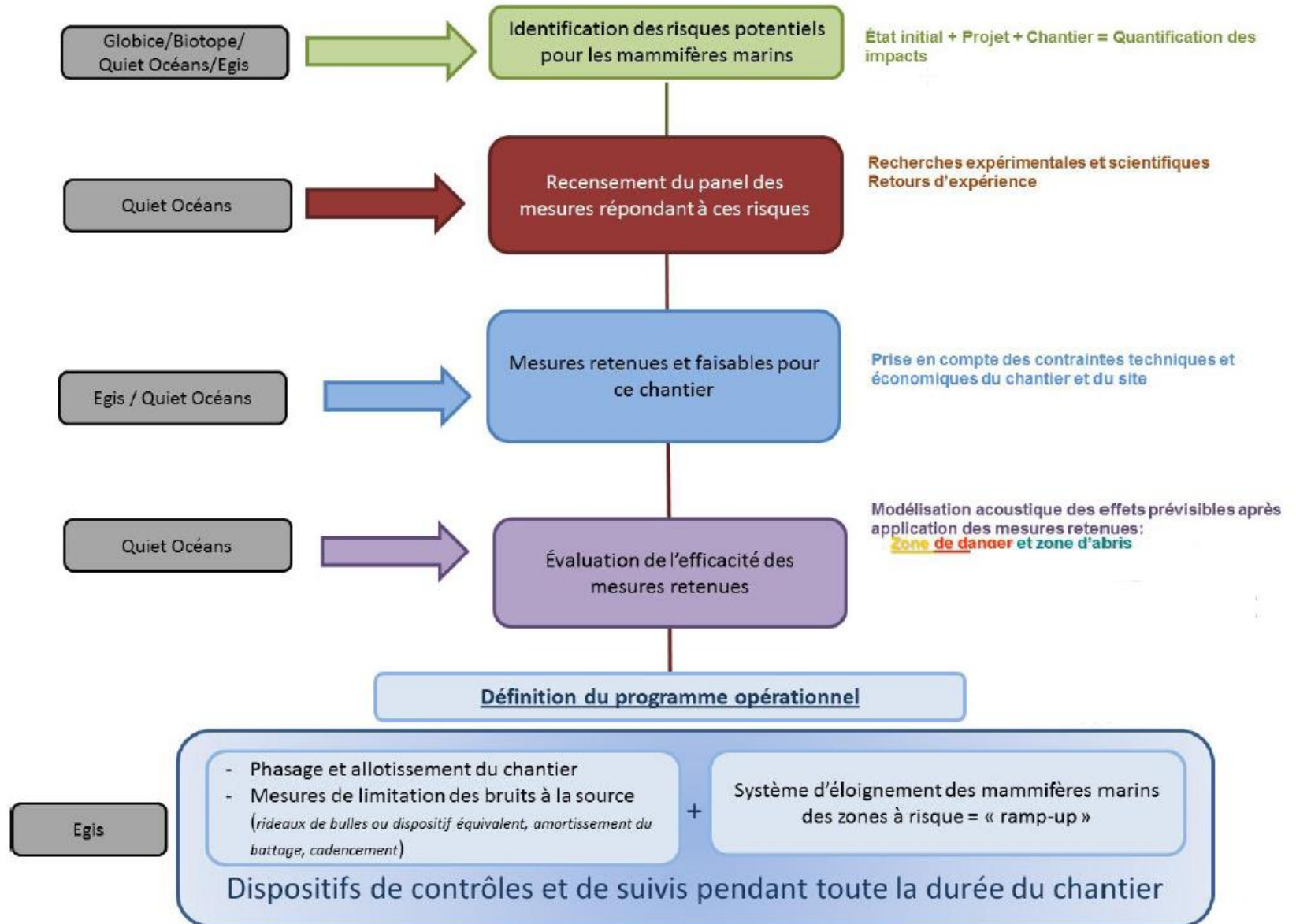
Grand dauphin = sensible aux moyennes fréquences
Baleine à bosse = sensible aux basses fréquences

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



Mammifères marins

Objectifs

- ▶ Niveau d'exposition sonore (seuil moyen) : 160 dB à 750 m de la source de bruit et au-delà
- ▶ Niveau de pression sonore (seuil maximal) : 190 dB

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)

La Baleine à bosse

Mammifères marins

Pour **éviter**, réduire ou compenser

▶ Adaptation des modalités constructives :

Proposition par le groupement Viaduc d'une solution sans 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

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)

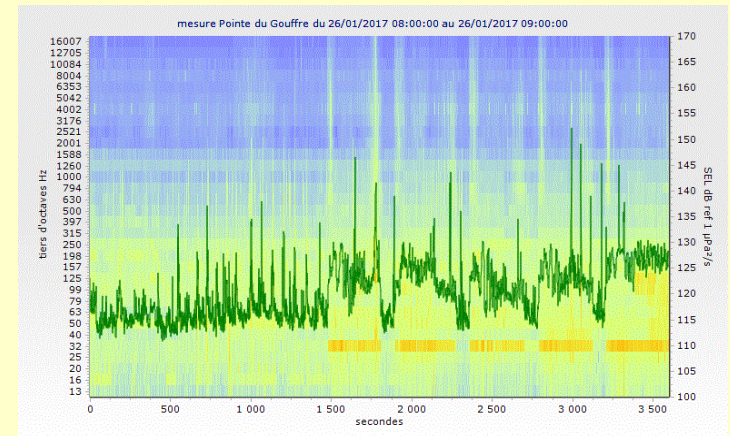
Mammifères marins

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

- ▶ 4 hydrophones fixes de contrôle du bruit en continu
- ▶ Contrôles aléatoires réalisés 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

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

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

Même si les impacts observés sont bien moindres que ceux estimés, maintien des mesures :

- ▶ **Plans directeurs de Conservation pour la baleine à bosse et 4 espèces de dauphins .**

- ▶ **Mise en place d'une mesure d'amélioration des conditions de quiétude pour les cétacés (sensibilisation au respect des chartes d'approches...)**

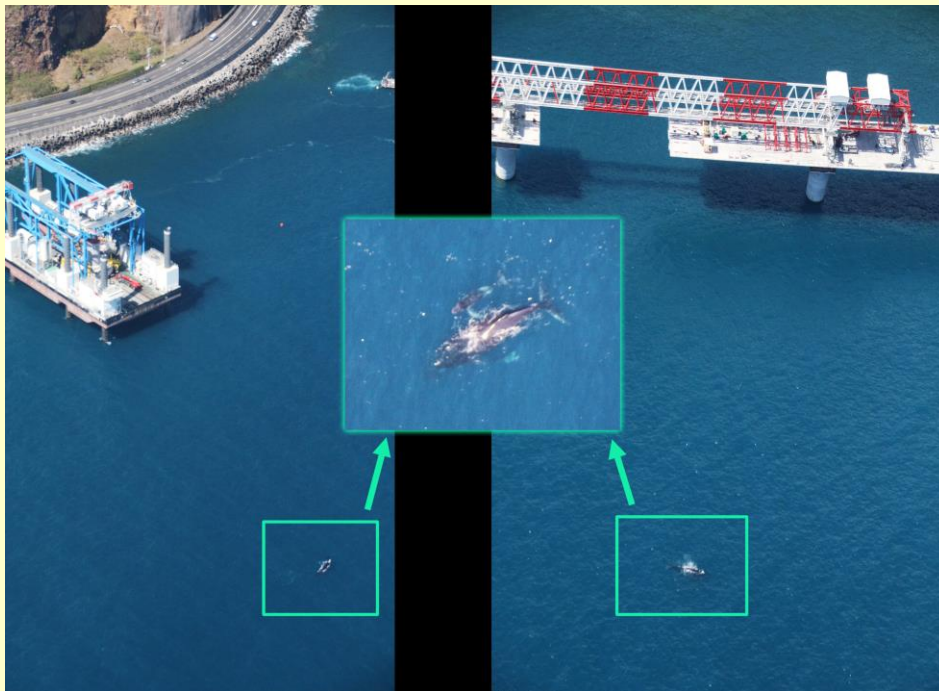
- ▶ **Thèse visant à l'amélioration des connaissances sur l'impact réel d'un chantier tel que la NRL sur les mammifères marins**

La Baleine à bosse

Mammifères marins

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

+ 1360 détections acoustiques de dauphins entre janvier et septembre 2017



Mammifères marins

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



► Mammifères marins, tortues marines

► **Faune et flore sous-marine**
(banco coralliens...)



► Avifaune marine

► Faune et flore terrestre, y compris espèces exotiques envahissantes



Faune et flore sous-marine

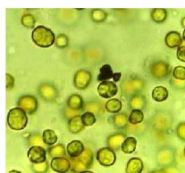
Inventaires réalisés au cours de trois campagnes 2008/2009/2012 par Equilibre Lagonia pour recenser les zones de substrat rocheux colonisées par des formations coralliennes et une faune associée (poissons, mollusques, crustacés ...)

- ▶ **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



Site de la Pointe du Gouffre



Site du Banc des Lataniers



Faune et flore sous-marine

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

Objectifs

- ▶ Seuil 50 mg/l de MES au droit des zones sensibles à ne pas dépasser
- ▶ Réduire les émissions de MES
- ▶ Mettre en place des dispositifs de protection type barrage au droit des zones sensibles, ou dispositifs équivalents



Barrage anti-MES – Pointe du Gouffre

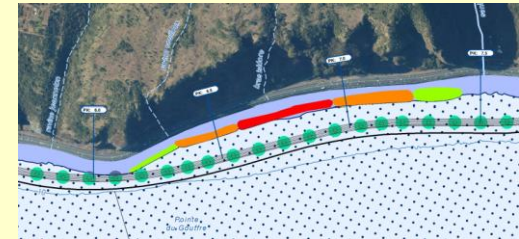
La Baleine à bosse

Faune et flore sous-marine

Pour **éviter**, réduire ou compenser

La conception 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)**



La Baleine à bosse

Faune et flore sous-marine

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 :



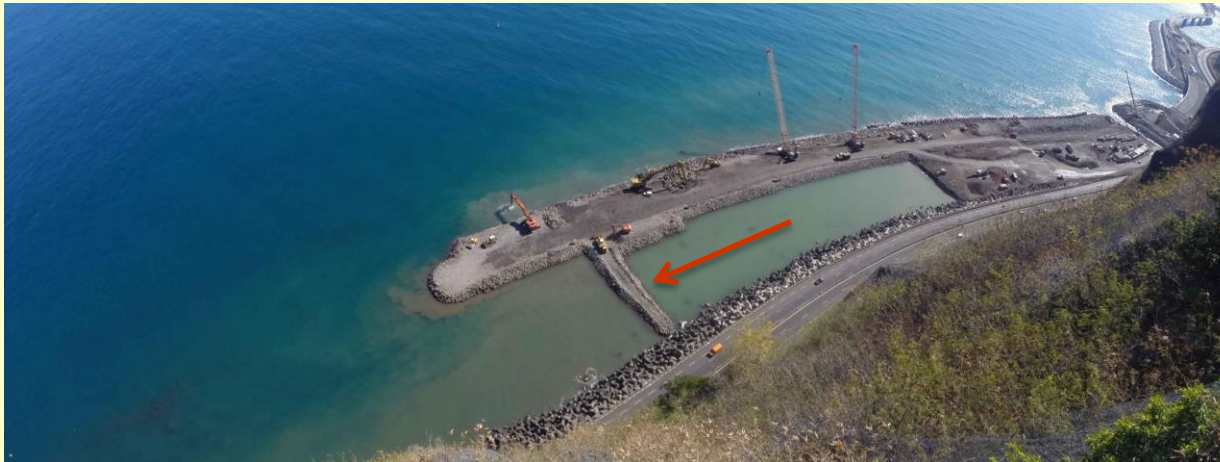
Barrage composé de jupes géotextile lestées

Faune et flore sous-marine

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)

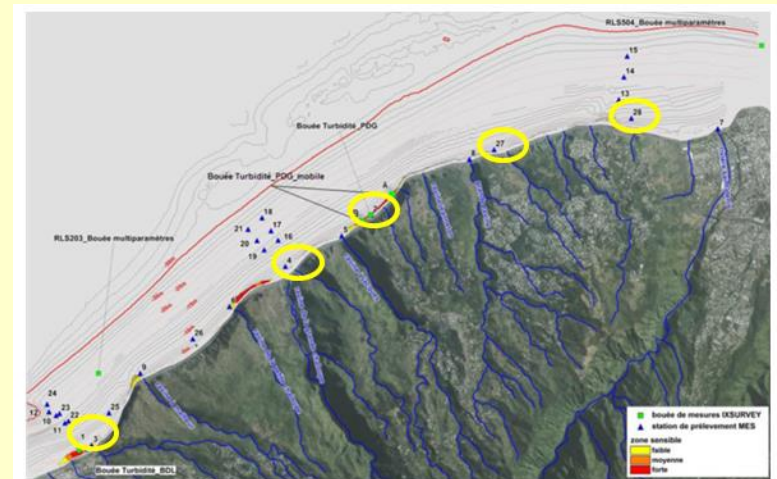
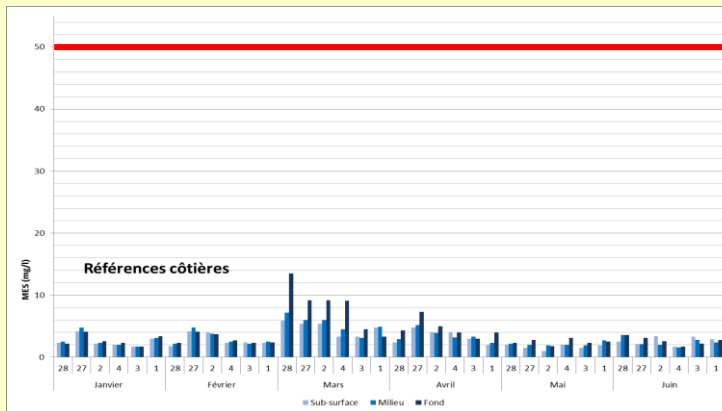
Faune et flore sous-marine

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



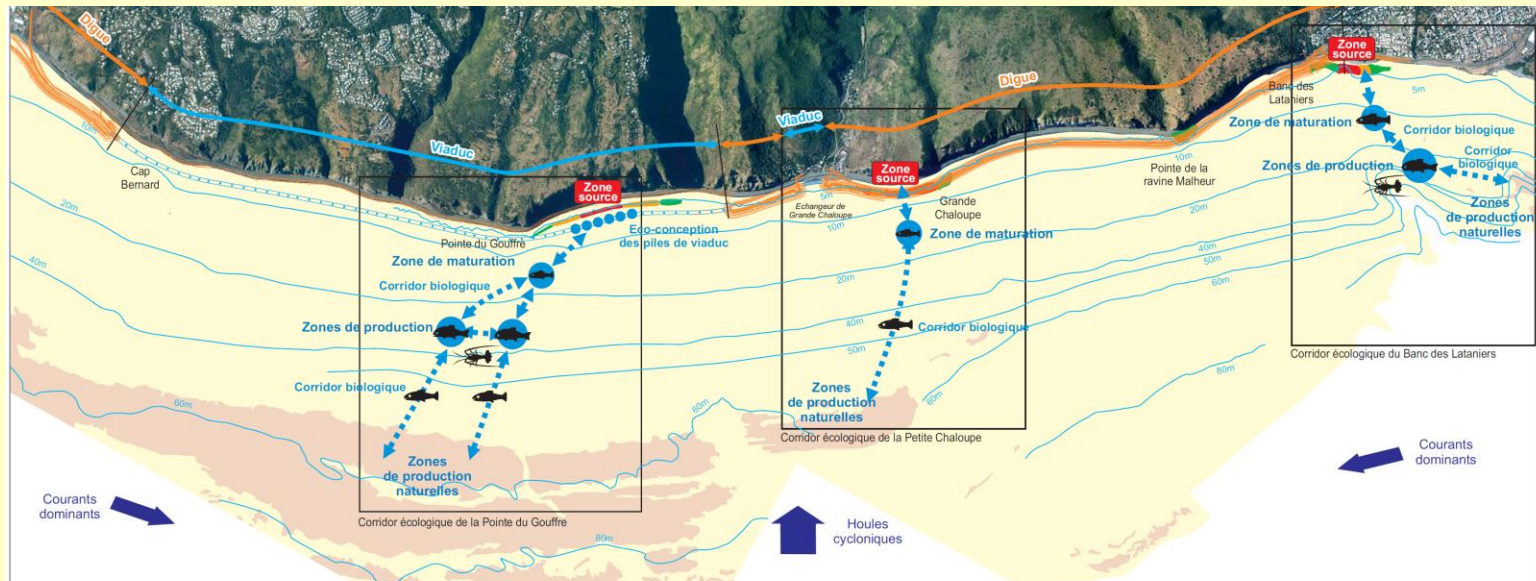
Bouée de suivi



Faune et flore sous-marine

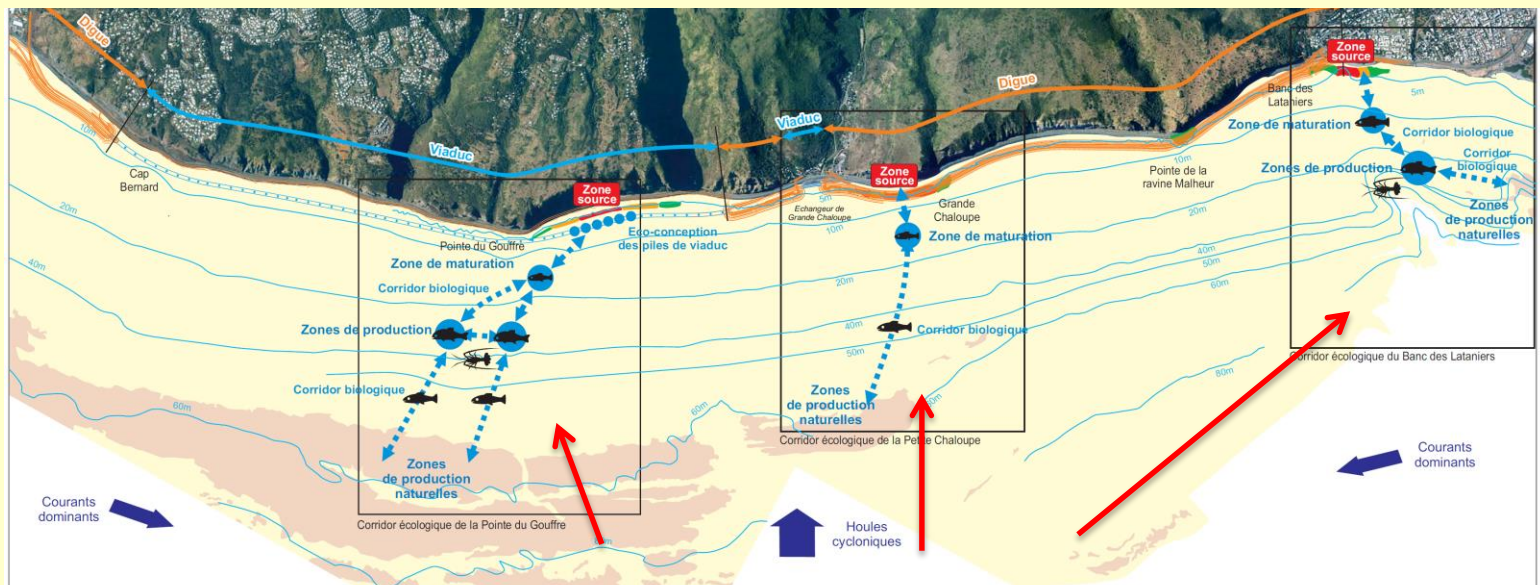
Pour éviter, réduire ou compenser : mise en place d'une trame bleue, marine :

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

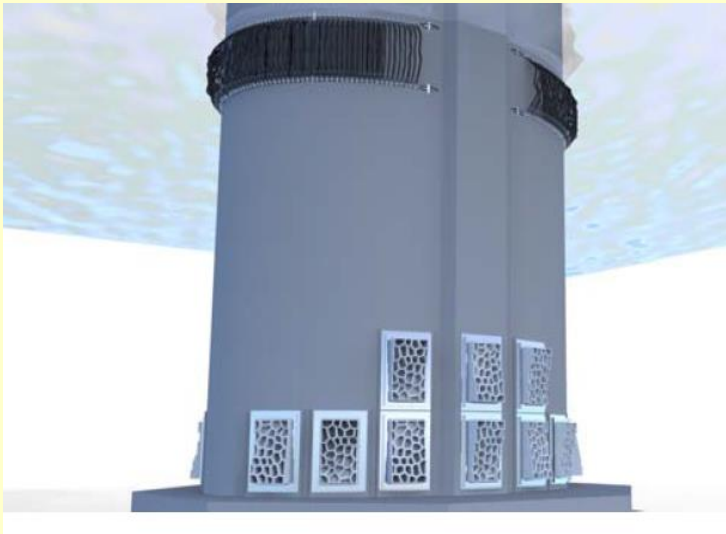
- ▶ Corridor longitudinal situé sur les petits fonds : carapaces de digues, enrochements naturels des tapis anti-affouillement des piles et des digues et modules artificiels intégrés aux piles
- ▶ Création de trois corridors transversaux face aux « zones sources » ou « de recrutement » : récifs artificiels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

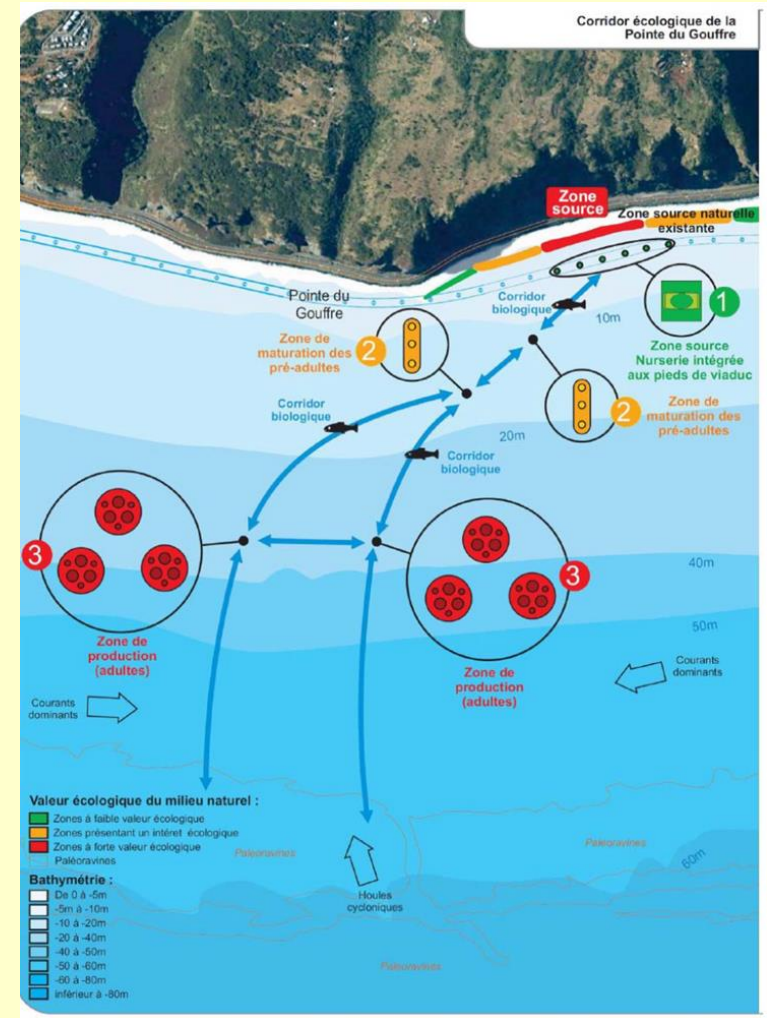
- ▶ **Ecoconception des piles du viaduc : 6 piles équipées face à la Pointe du Gouffre avec des modules type « plateaux coralliens » au fond pour l'installation de juvéniles**



Faune et flore sous-marine

Mise en place d'éco - récifs au niveau de chaque corridors :

- ▶ 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



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

▶ Avifaune marine

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



Avifaune marine

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

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

Le Pétrel de Barrau

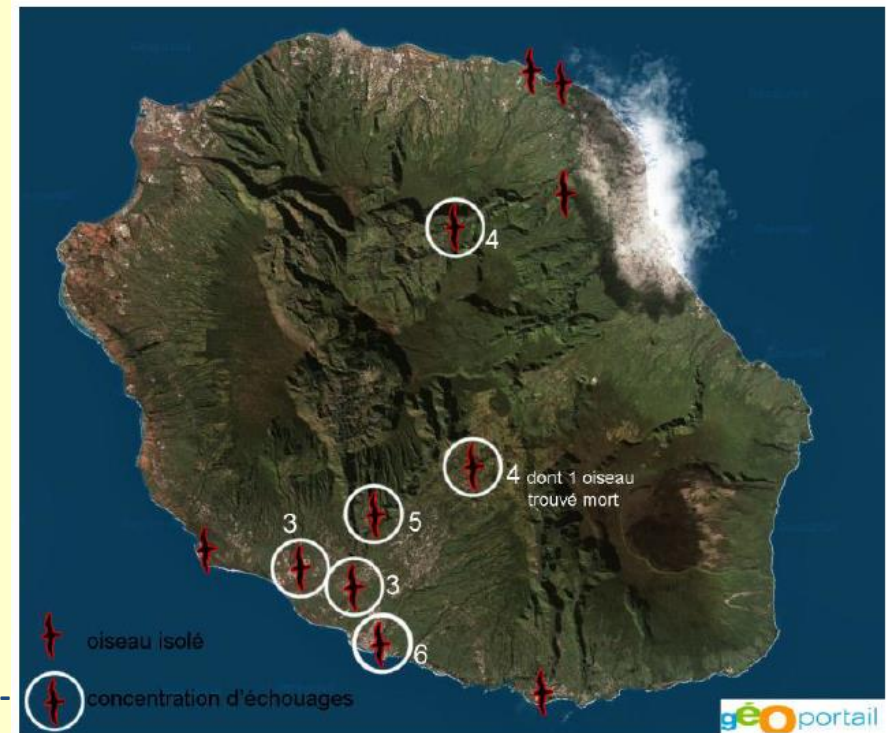
- Endémique
- Niche dans remparts et plateaux du Piton des Neiges et Grand Bénard
- 6 000 à 8500 couples RUN
- Repro entre sept et avril > 1 œuf (nov.) > envol (pic en avril) – se repère par rapport à la lune et aux étoiles > 3 ans en mer > retour aux colonies



Avifaune marine

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



Avifaune marine

▶ 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

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)



ds dauphins
do-Pacifique

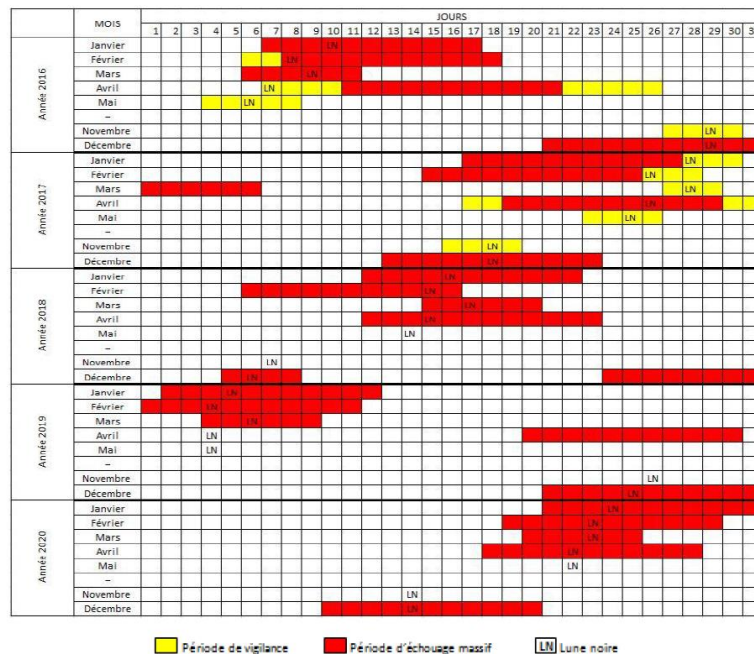
Avifaune marine

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

Avifaune marine

- ▶ **Sur l'année 2016 : 467 jeunes pétrels de Barau récupérés et pris en charge par la SEOR entre mars et mai 2016 (~60 jours), dont 327 en 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**
- Grands dauphins de l'Indo-Pacifique

La Baleine à bosse

Avifaune marine

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 au 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 ...**

La Baleine à bosse

Et aussi ...

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
- ▶ Lutte contre les pollutions



La Baleine à boss



6.2

PROJET ARCHITECTURAL ET INTEGRATION PAYSAGERE

Th. Lavigne & Ch. Chéron

6.3 VIADUCS & OUVRAGES D'ART

Viaducs et Ouvrages d'Art

Les échangeurs

- ▶ Saint Denis
- ▶ Grande Chaloupe
- ▶ La Possession

Viaduc de 5400m en mer

- ▶ Fonds marins
- ▶ zone sensible



LES ECHANGEURS



Echangeur St. Denis

Echangeur complet avec le Barchois et le Boulevard Sud

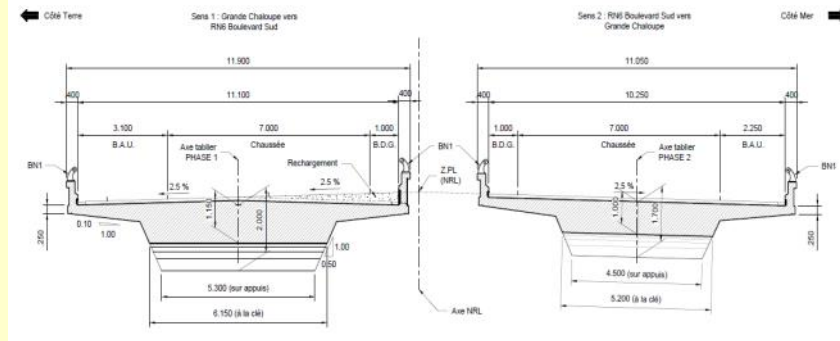
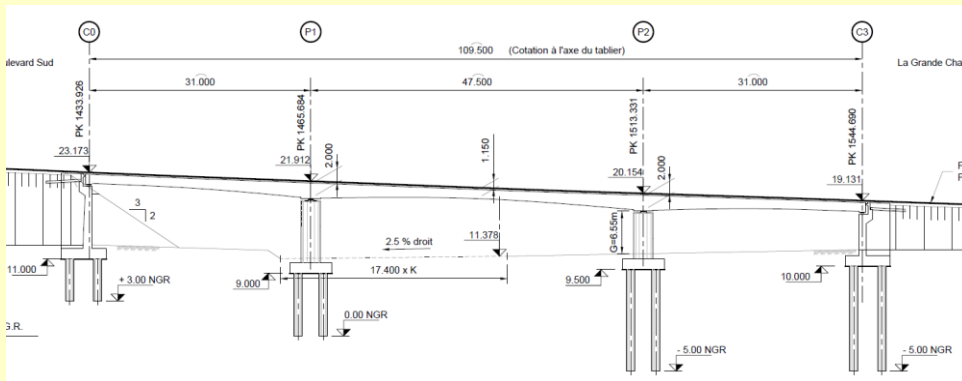
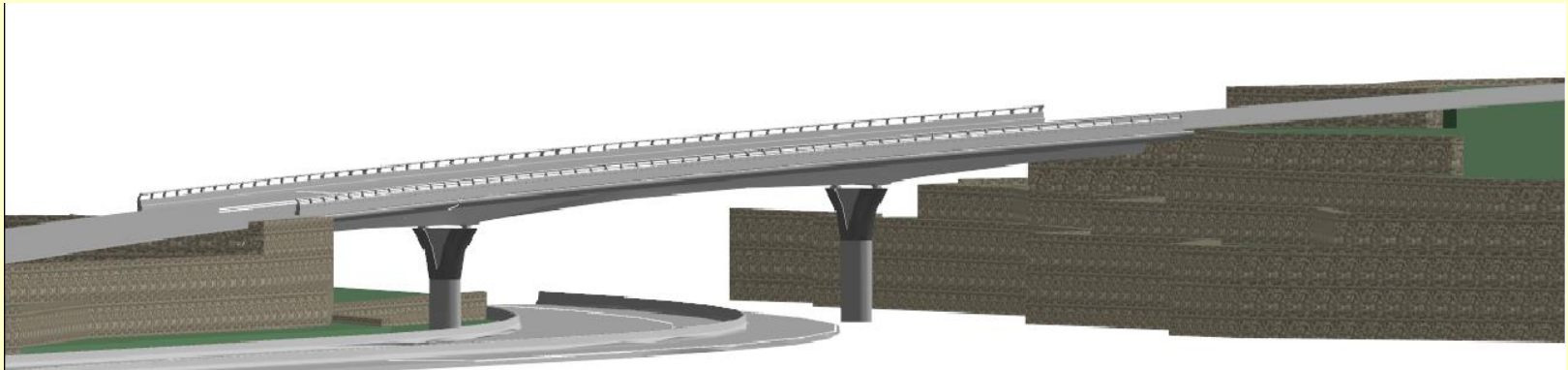


Ouvrages des échangeurs

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

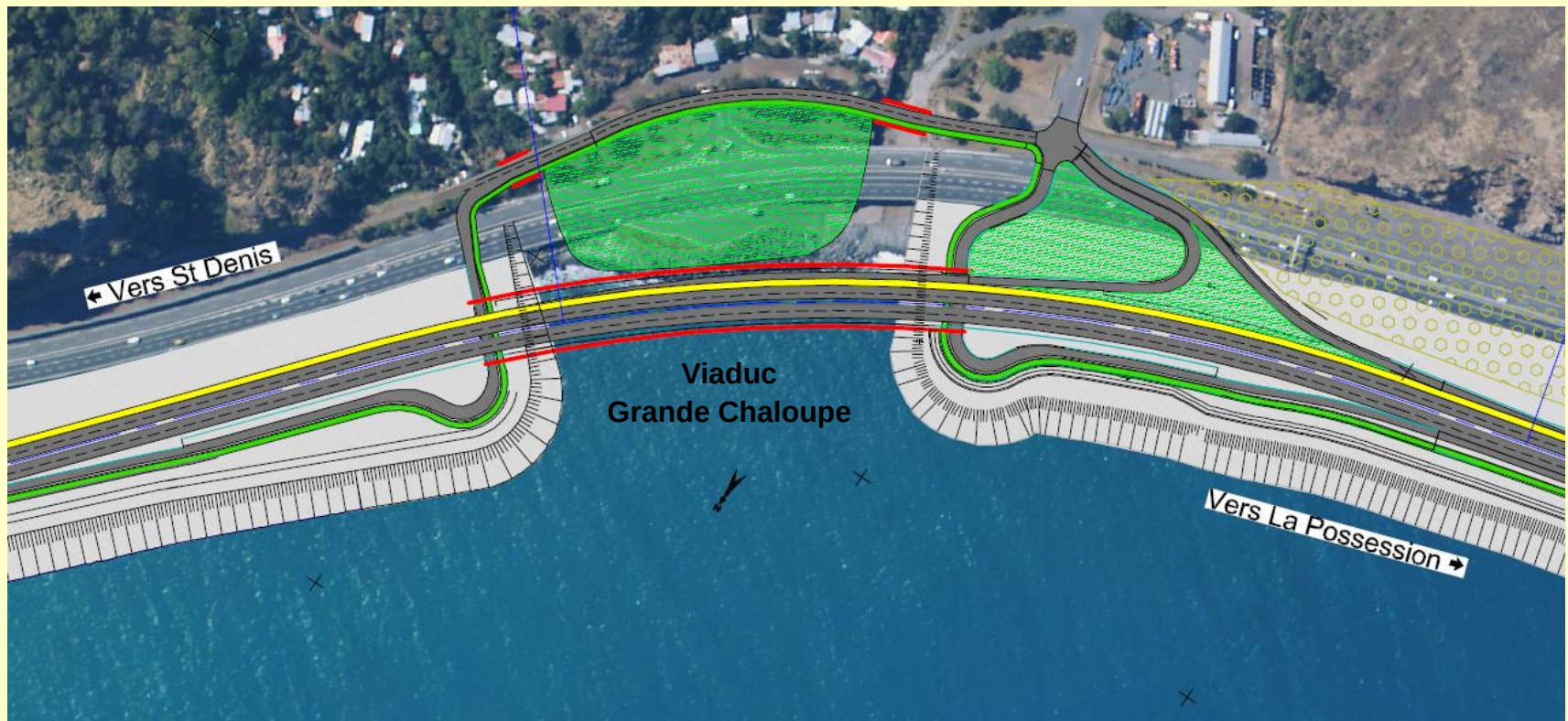
Portées : 31,0 – 47,50 – 31,0

Construit sous circulation



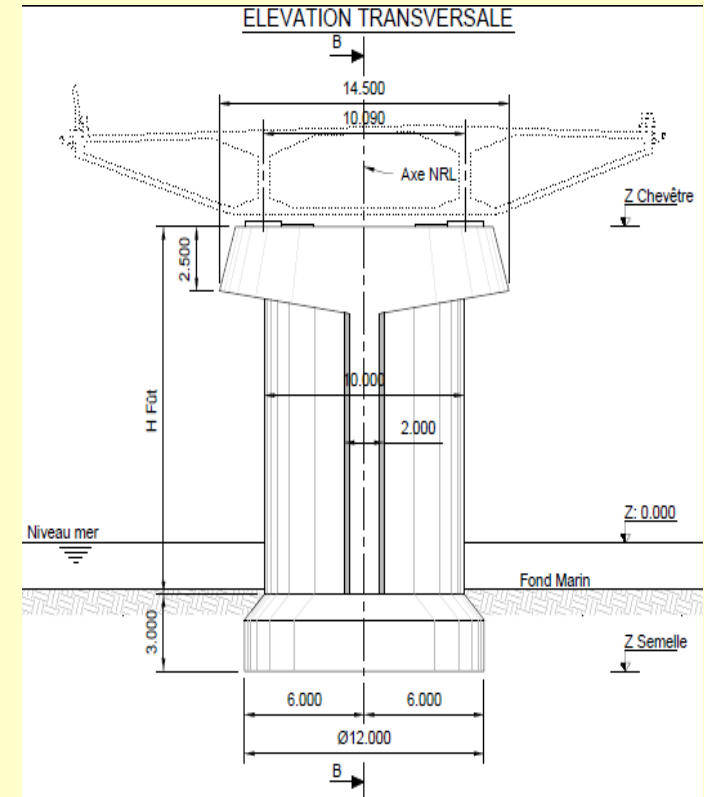
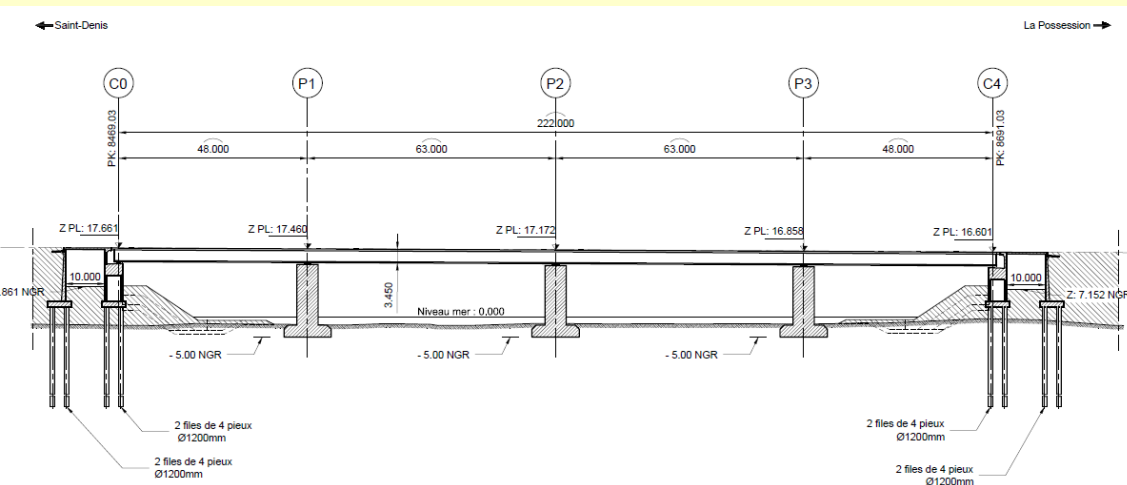
Echangeur Grande Chaloupe

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

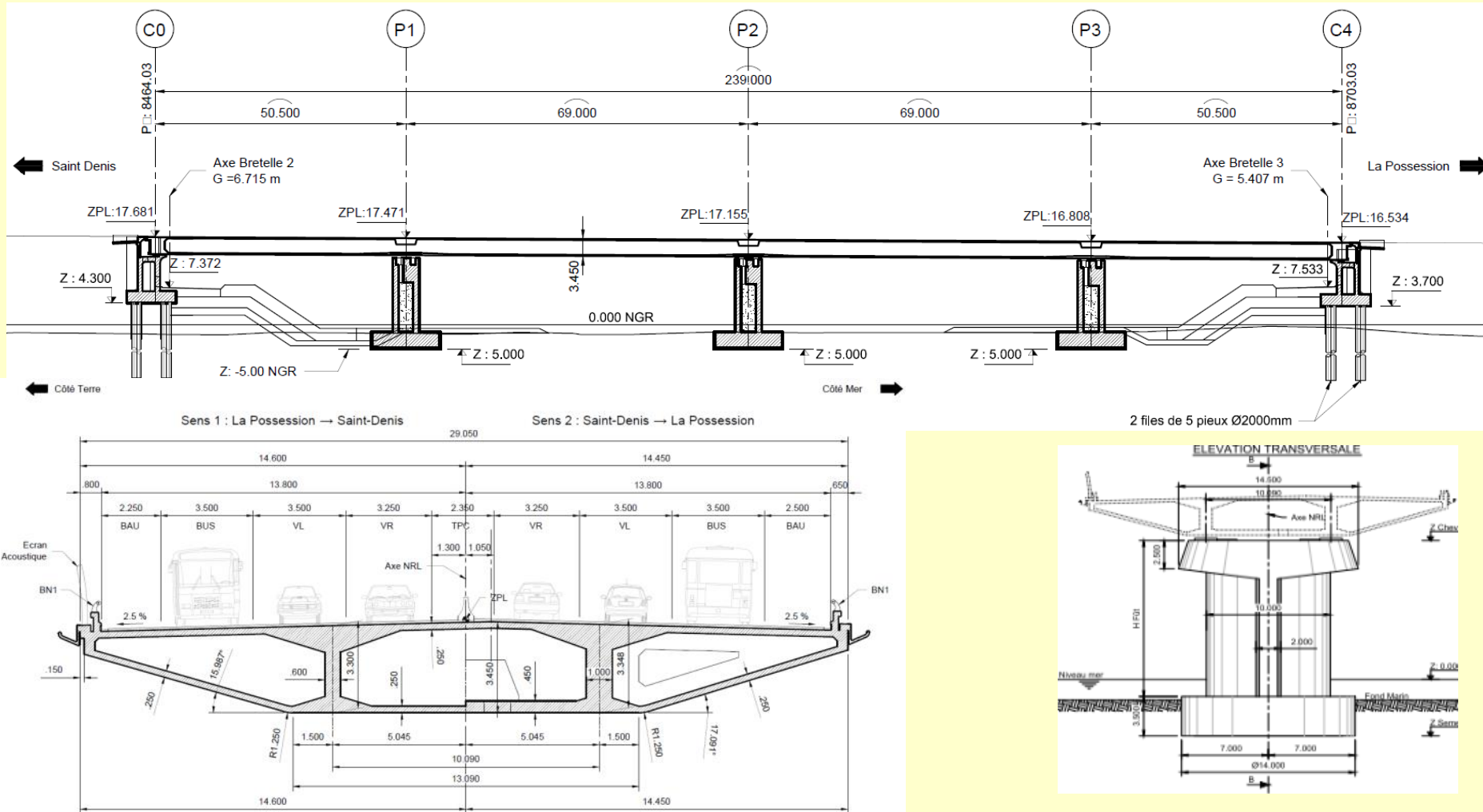


Ouvrages des échangeurs

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



240 m de long. 4 travées, mono-caisson 4 âmes de hauteur constante (3,45 m) et 29 m de largeur. Encorbellement coulé en place.



Viaduc de la Grande Chaloupe

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



Travaux réalisés de 2014 à 2017 .
Montant du marché : 34,6 M € HT



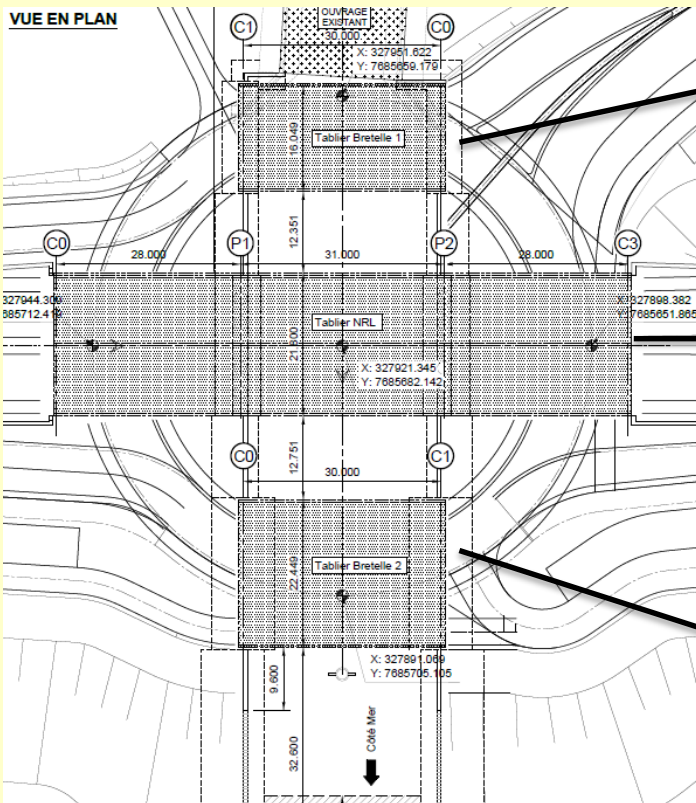
Echangeur de la Possession.

- Echanges complets entre la NRL et La Possession
- Franchissement de la ravine Lafleur



Echangeur composé de 3 ouvrages et de soutènements

VUE EN PLAN

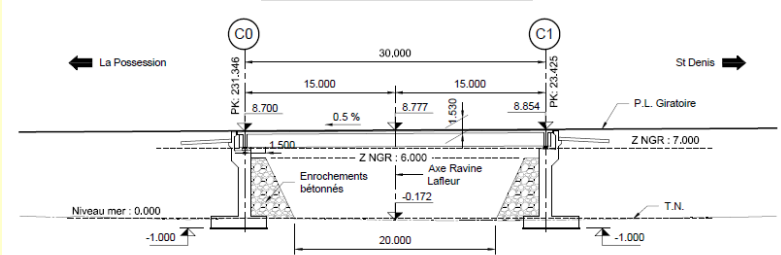


OA H

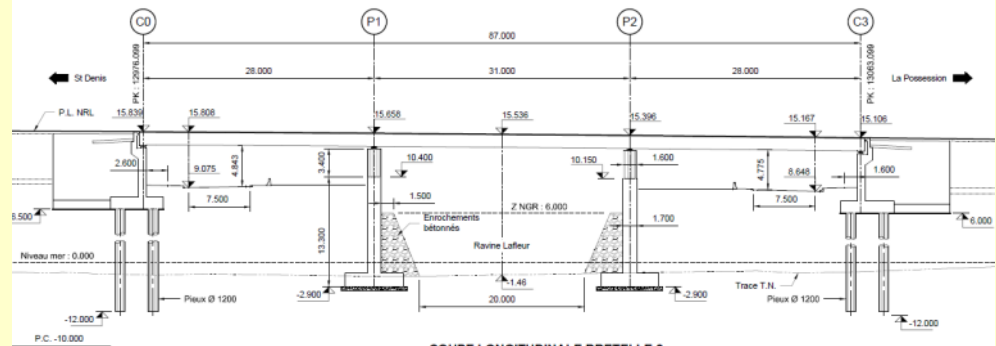
PI

OA H

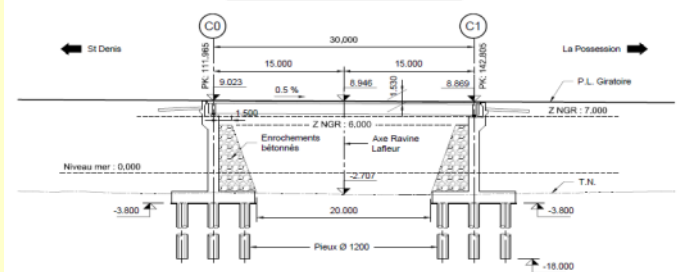
COUPE LONGITUDINALE BRETELLE 1



COUPE LONGITUDINALE NRL



COUPE LONGITUDINALE BRETELLE 2



Échangeur de La Possession – 1^{ère} phase

Groupeur titulaire du marché :



Travaux réalisés de 2014 à 2016 .
Montant des travaux : 54,7 M€ TTC



VIADUC DE 5400m



- **Le plus long pont de France: 5400 m (120 m / 2019)**
- **St Nazaire bridge: 3466 m (404 m / 1975)**
- **Oléron bridge: 3027 m (79 m / 1966)**
- **Ile de Ré bridge: 2926 m (110 m / 1988)**
- **Millau viaduct: 2460 m (342 m / 2004)**
- **Normandy viaduct: 2143 m (856m / 1995)**

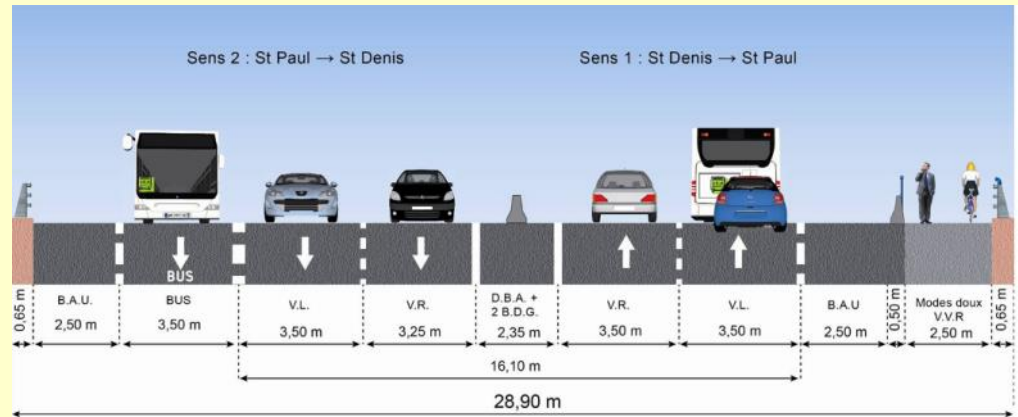
Viaduc 5400m

- ▶ **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**

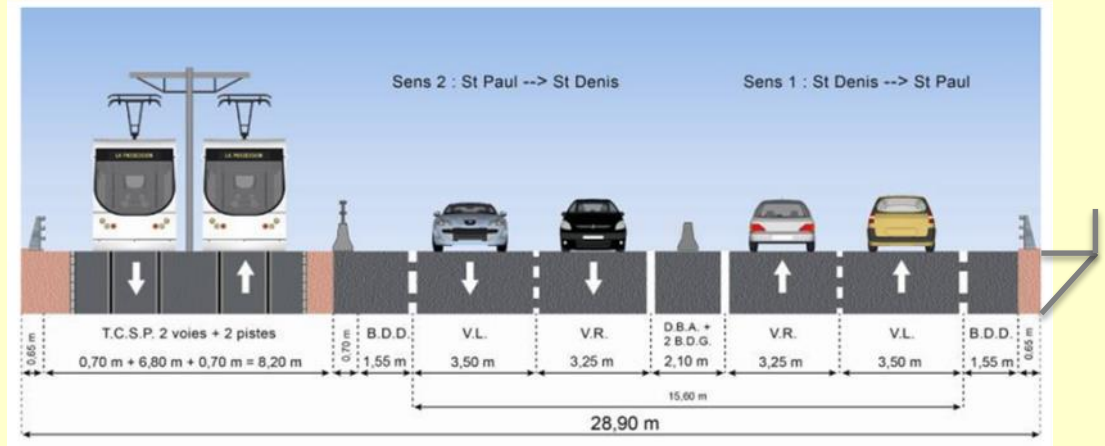
Viaduc 5400m

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

Mode 1 :
Mise en service

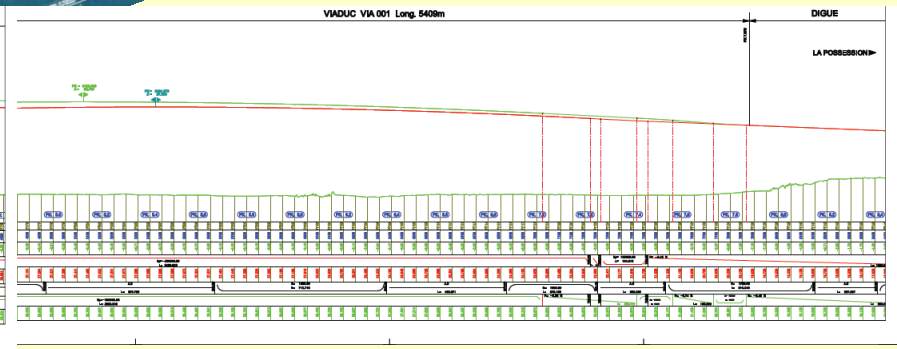
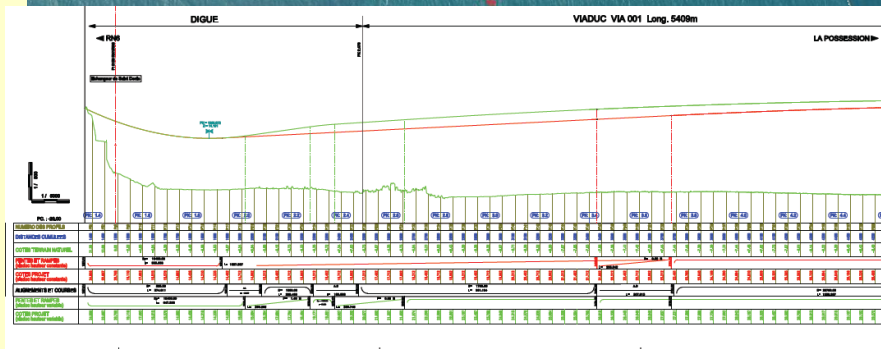


Mode 2 : TCSP guidé
+ passerelle mode doux



Viaduc 5400m

- ▶ 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

Géologie- géotechnique.

La Réunion est constituée d'une série de volcans dont le plus haut « le Piton des neiges » culmine à 3070 m ,

Volcans ayant émergés il y a 70 000 à 2 000 000 d'années

Dans la zone du projet on note la présence d'une falaise abrupte atteignant par endroits les 300 m.

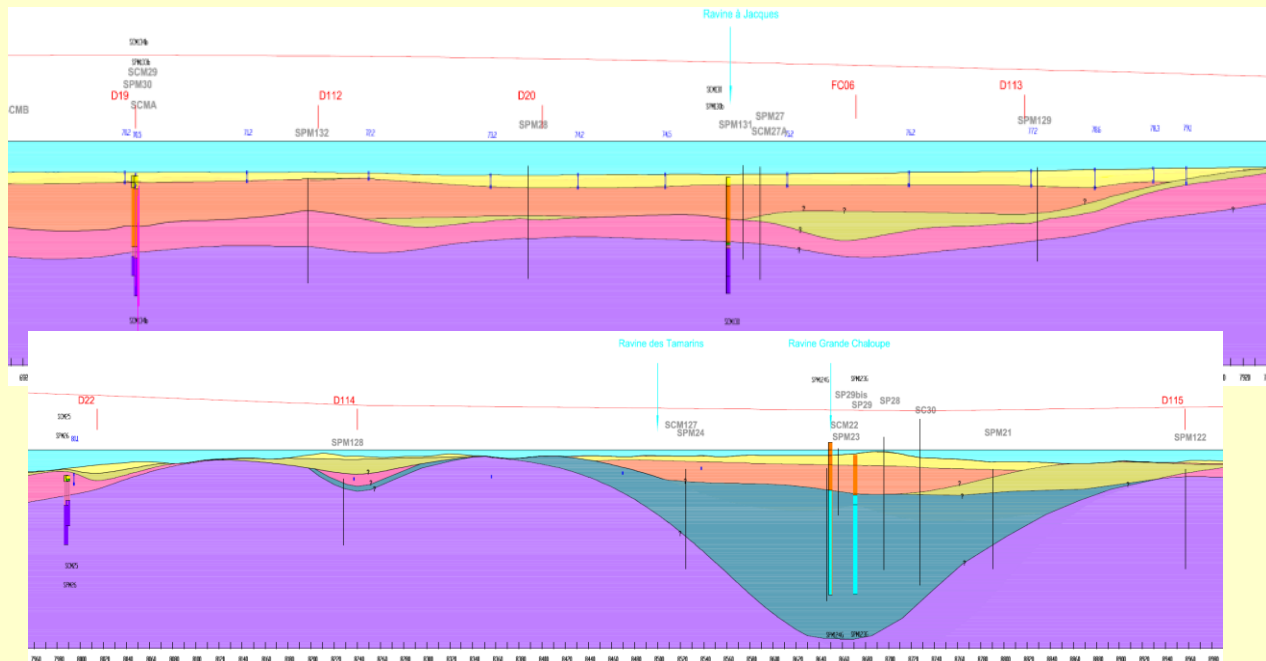
Côté océan une table basaltique allant de 10 à 25 m de profondeur. Au-delà , au large, à environ 1000m , de manière très marquée des fonds de grandes profondeurs.

Les sols depuis la surface sont schématiquement constitués de sables, scories, graviers de différentes tailles , de bouldingues et ensuite du substratum basaltique.

Viaduc 5400m

Contexte géotechnique complexe:

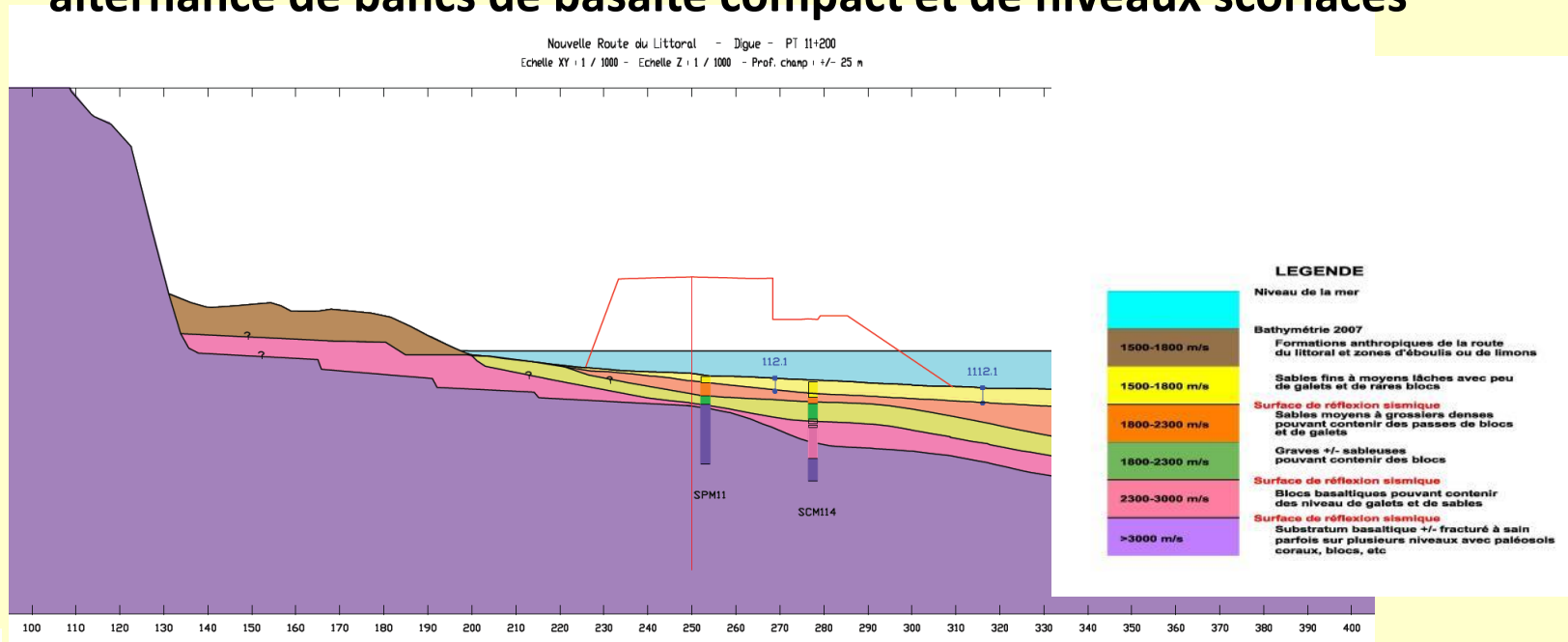
- ▶ Profondeur du basalte et épaisseur des couches supérieures variables
- ▶ Définition d'un modèle géotechnique avec des incertitudes.



Viaduc 5400m

► 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



profondeurs	Sols	PI Moy (MPa)	Em Moy (MPa)
0 – 4m	Sables	0,7	7,7
–	Sables et graviers	-	-
4 – 8m	Graviers et galets	4	61
8 – 15m	Blocs	>6	>200
> 15m	Substratum	-	-

Caractérisation des sols de fondation :

- ▶ A partir d'un logigramme de décision pour faire un 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

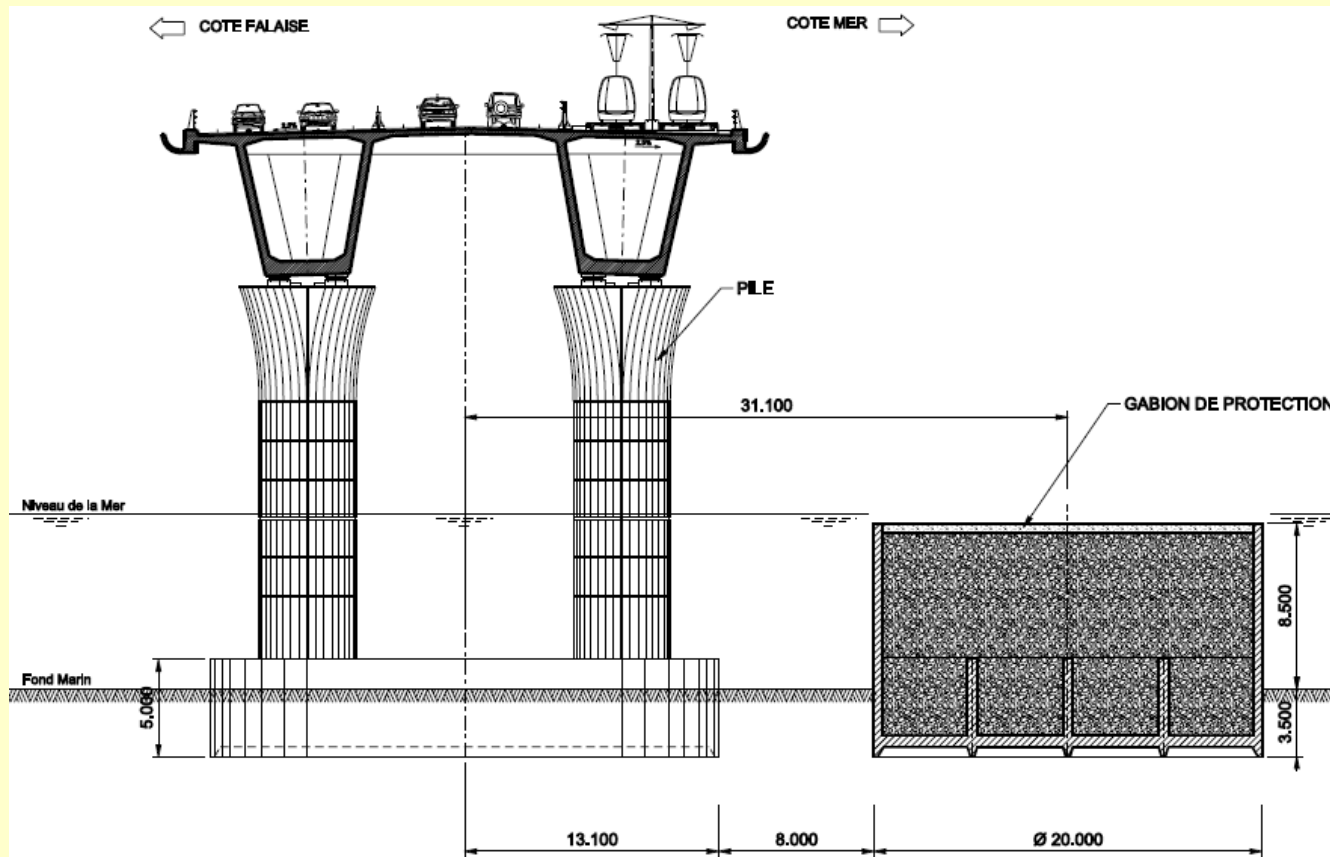
- ▶ **Choix des fondations: démarche selon un logigramme décisionnel et l'application de critères de choix**
 - ▶ **Critère 1 : faisabilité des fondations semelle (épaisseur des sables)**
 - ▶ **Critères 2 et 3 : caractéristiques mécaniques des sols (p_l et E_m)**
 - ▶ **Critère 4 « aléa géologique »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

Viaduc 5400m / Solutions étudiées.

Viaduc 5400m

Viaduc défini à l'APS

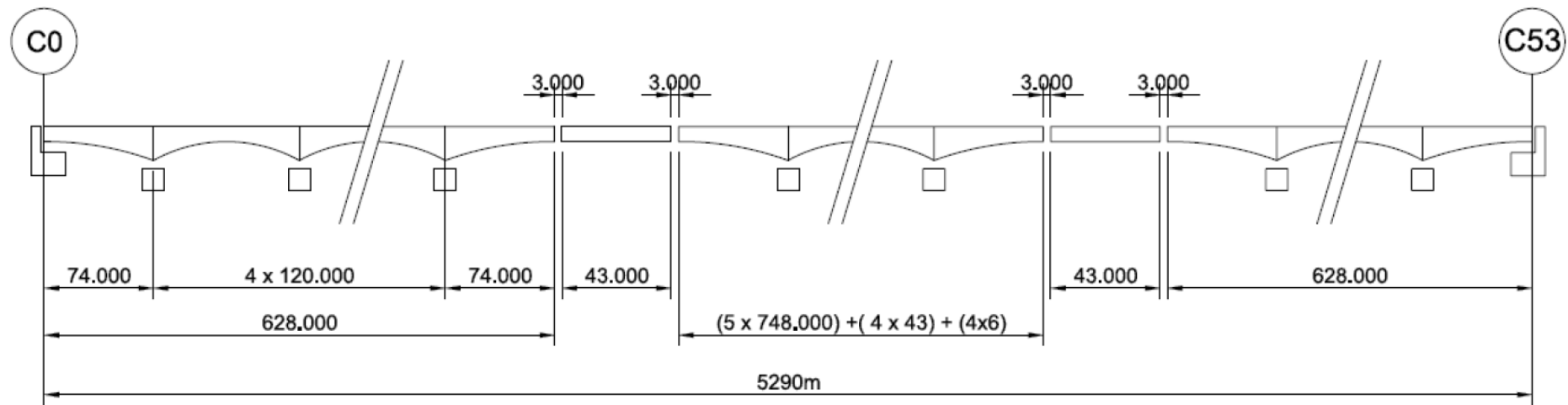
- ▶ Bi-caisson béton précontraint à hauteur variable
- ▶ Pile à double fûts et fondation unique
- ▶ Pile protégée par gabion immergé de grande dimension



Viaduc 5400m

Viaduc défini à l'APS

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



Viaduc 5400m

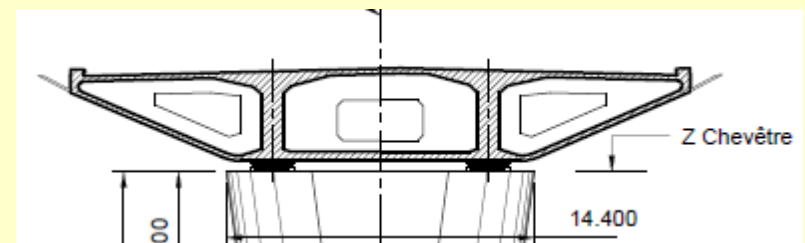
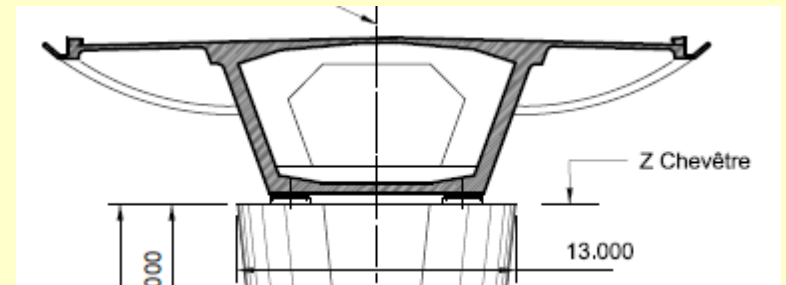
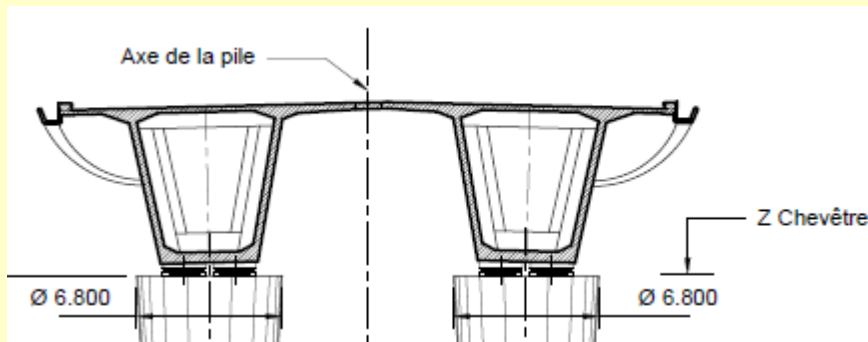
Sur une période de 2,5 mois (de mi sept. à fin nov. 2011) :

- ▶ **Étude des types de structure**
- ▶ **Étude des travures**
- ▶ **Étude des sections transversales**
- ▶ **Étude du schéma fonctionnel ferroviaire**
- ▶ **Étude probabiliste sur les chocs de bateau**

Viaduc 5400m

Phase 1. Étude du type de structure

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



Viaduc 5400m

► 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 travées entières,
 - 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 : superficielles / profondes pieux 2000 et au-delà.
- 2 configurations : avec et sans choc de bateau

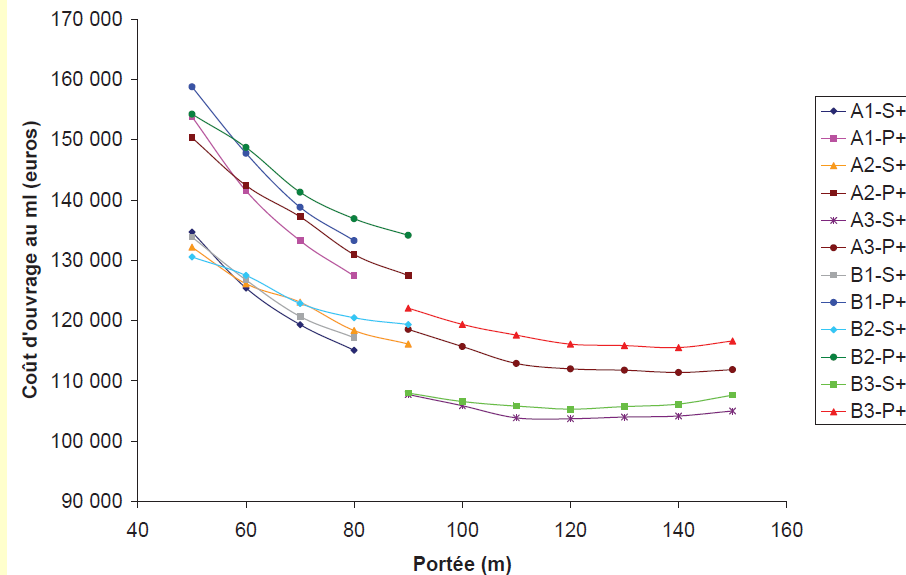
➔ Ce qui représente au total 128 solutions .

Viaduc 5400m

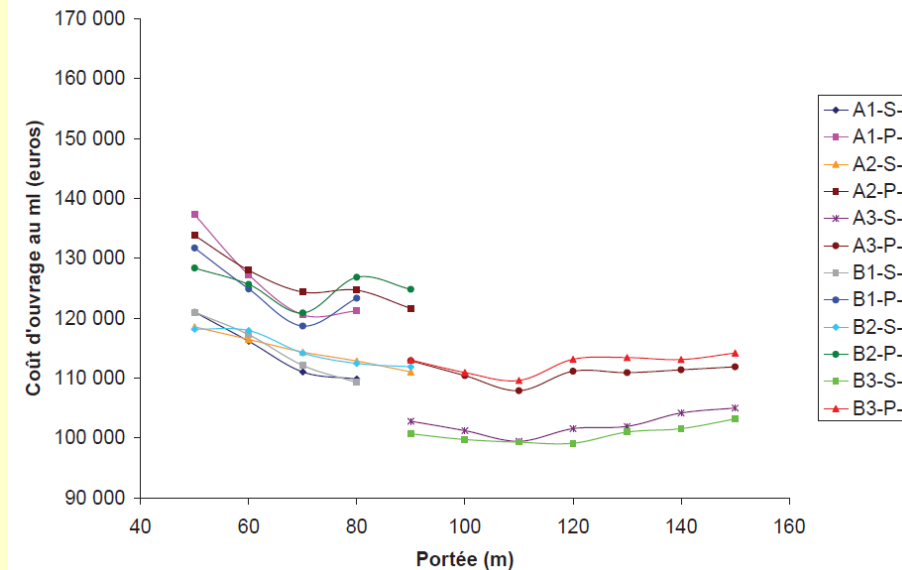
► Étude des travures : conclusion de l'étude paramétrique

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

Comparatif du coût des ouvrages dimensionnés avec choc



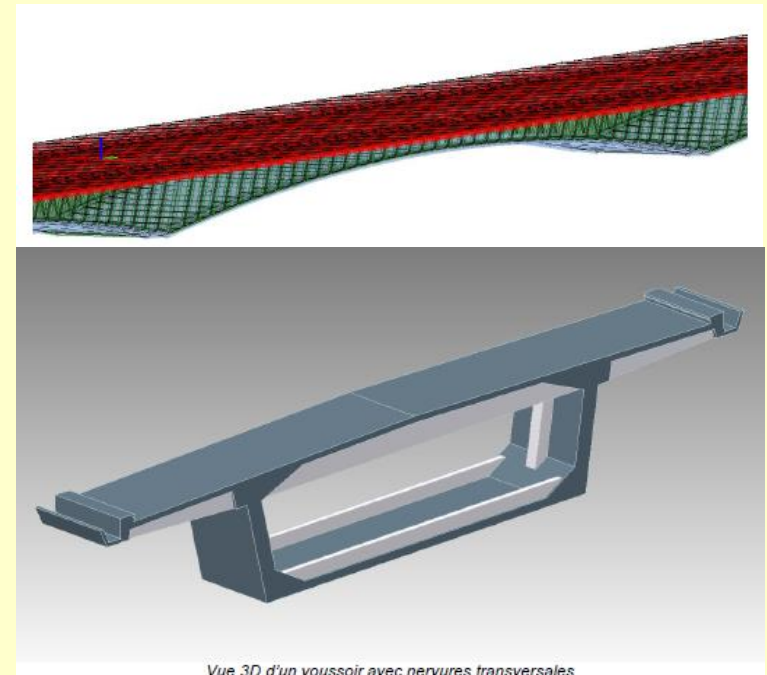
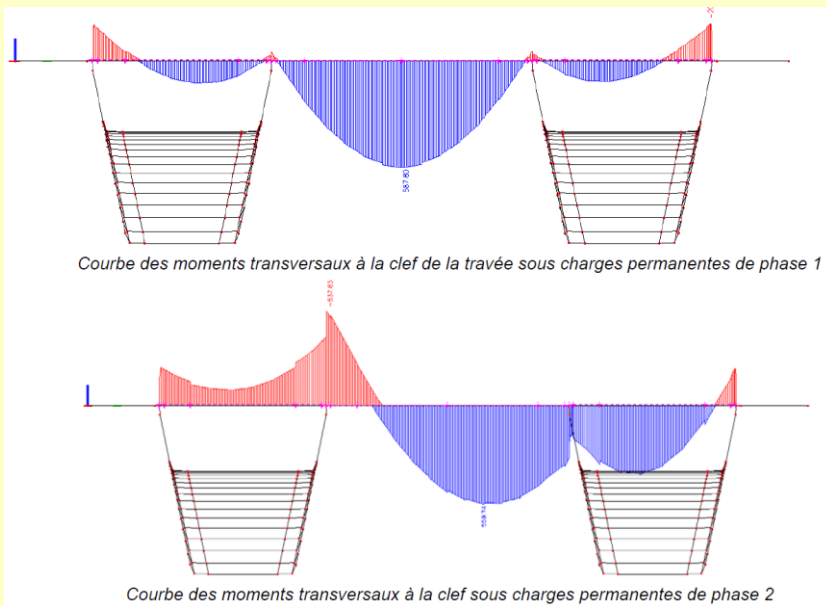
Comparatif du coût des ouvrages dimensionnés sans choc



Viaduc 5400m

Études des sections transversales

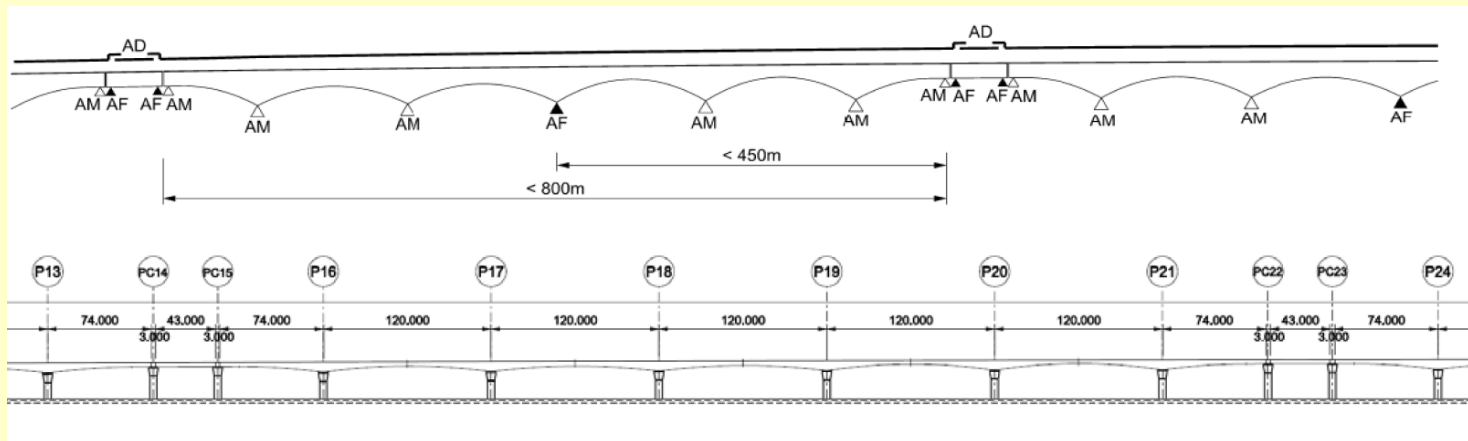
- ▶ Mono-caisson ou bi-caisson / nervuré ou pas / précontraint transversalement ou pas : 8 études aux éléments finis.
- ▶ Tablier bi-caisson : mal adapté à la reprise des surcharges ferroviaires
- ▶ Pas de grande différence entre tablier précontraint transversalement et tablier nervuré.



Viaduc 5400m

Phase 2 : schéma fonctionnel – solutions étudiées

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

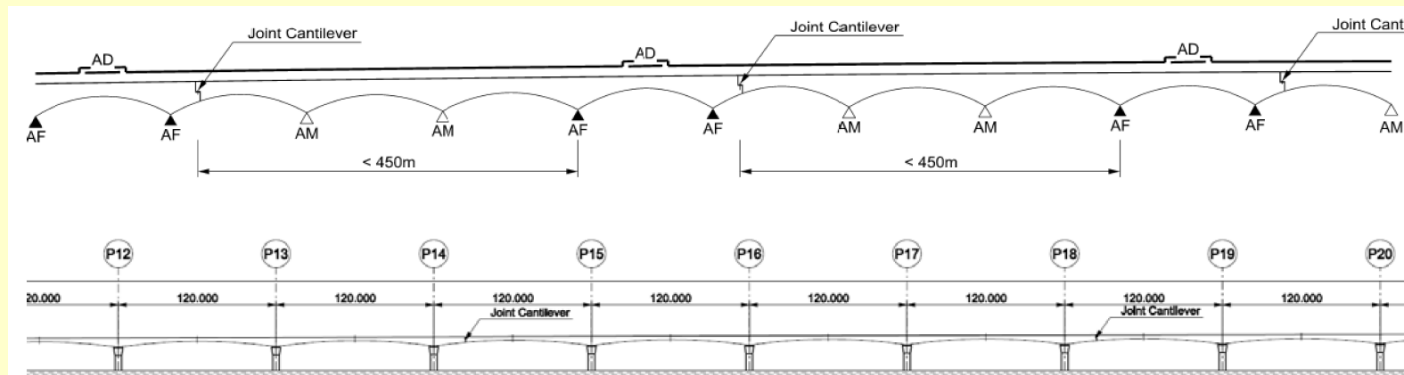


- Nombre d'appuis importants
- Esthétique pas « terrible »
- Méthode de construction de la travée inerte délicate.

Viaduc 5400m

Phase 2 : schéma fonctionnel – solutions étudiées

▶ Travées courantes inertes.



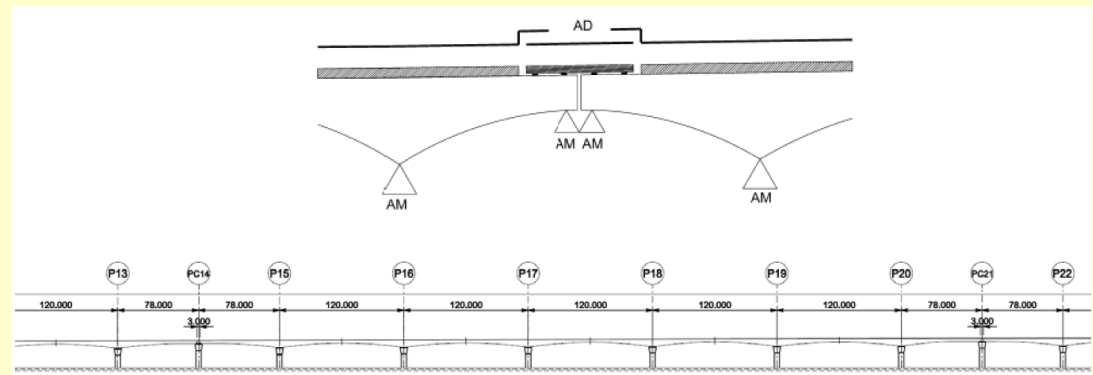
→ Voussoir d'articulation complexe

→ Méthode de construction complexe

▶ Structures inertes.



Viaduc du Storbelt



Viaduc 5400m

Étude probabiliste 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 :
 $1 \cdot 10^{-4}$ /an Ponts critiques - $1 \cdot 10^{-3}$ /an Ponts classiques
- Eurocode 1 partie 1-7 : Pas de valeur explicite

Exemple d'un diagramme possible :

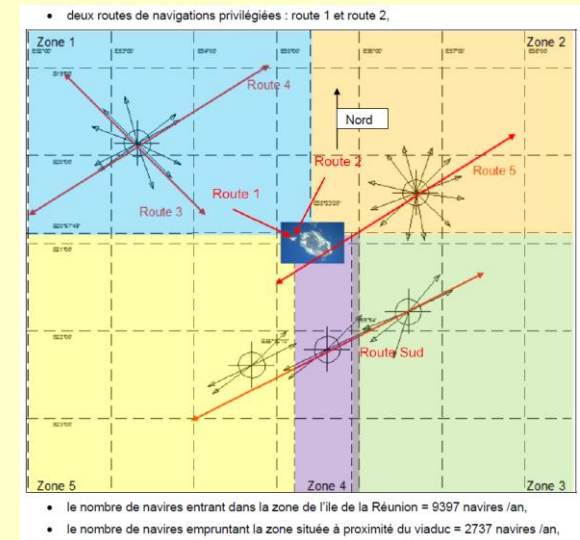
pour une conséquence élevée

ou très élevée : $1 \cdot 10^{-5}$ /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)

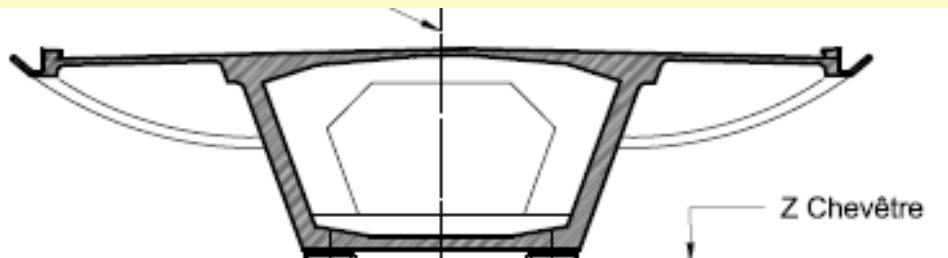


Très élevée	X				
Élevée	X				
Moyenne		X			
Faible			X		
Très faible				X	
▲ Conséquence					
→ Probabilité	0,00001	0,0001	0,001	0,01	> 0,1
Les X représentent des exemples de niveaux maximaux de risque acceptables					

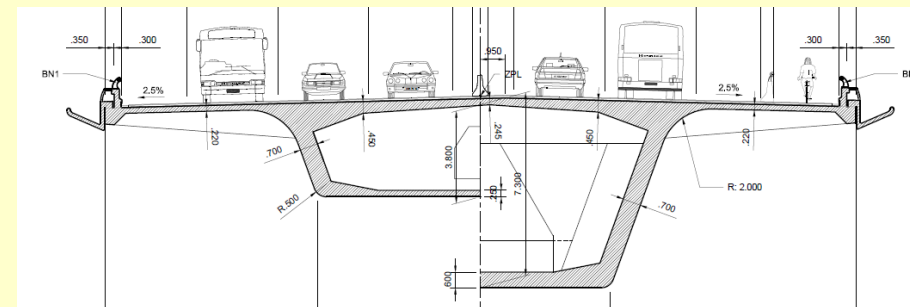
Viaduc 5400m

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 superficielles 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

Pour l'ensemble des études, notre réflexion s'est largement nourrie des études structurelles et des méthodes qui avaient été adoptées pour le viaduc de St Cloud (hauteur constante / 4 âmes),

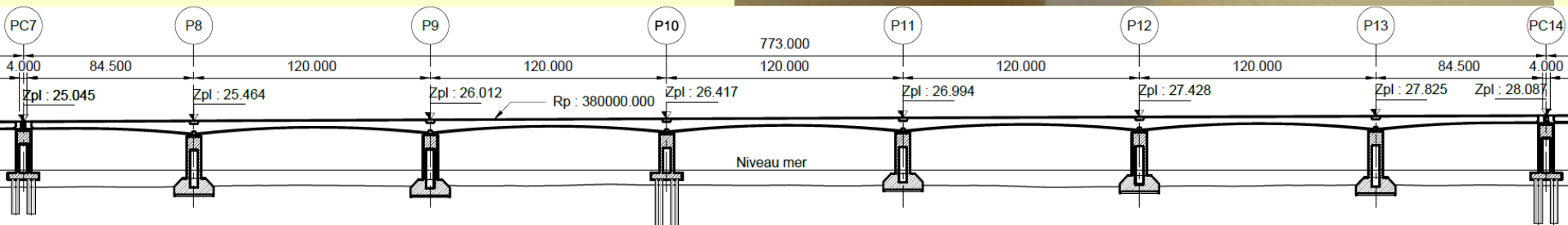
Le viaduc de la Confédération au Canada (fondations et préfabrication, industrialisation),

Le viaduc de Rion - Antirion (fondations superficielles en mer, travaux maritimes)

Viaduc 5400m

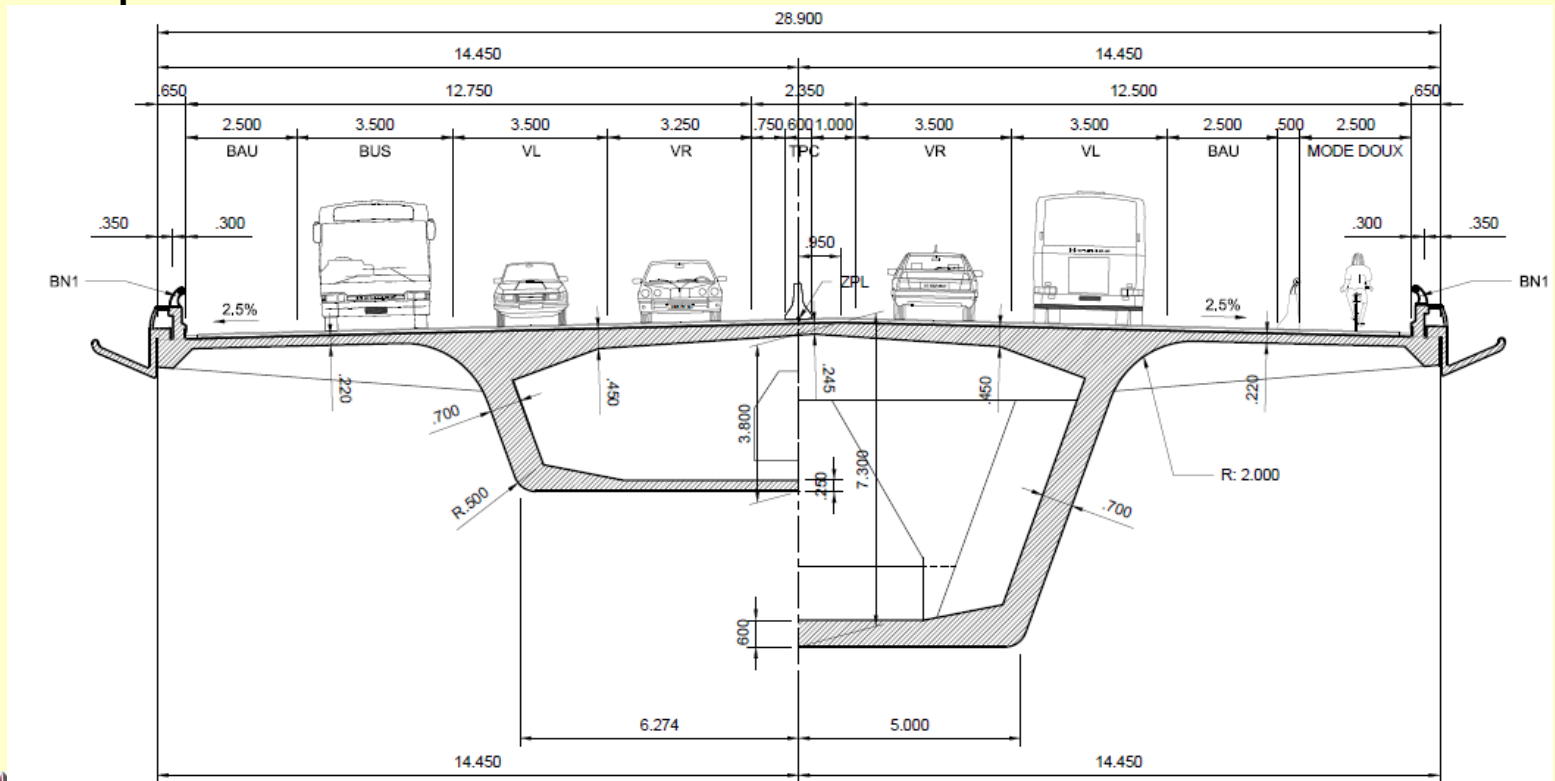
► Tablier de hauteur variable – 2 âmes

- 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, encorbellements successifs

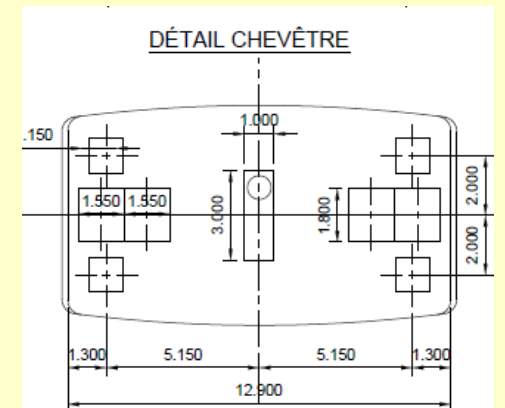
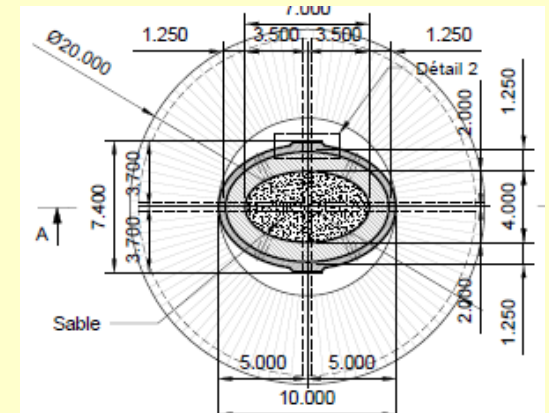
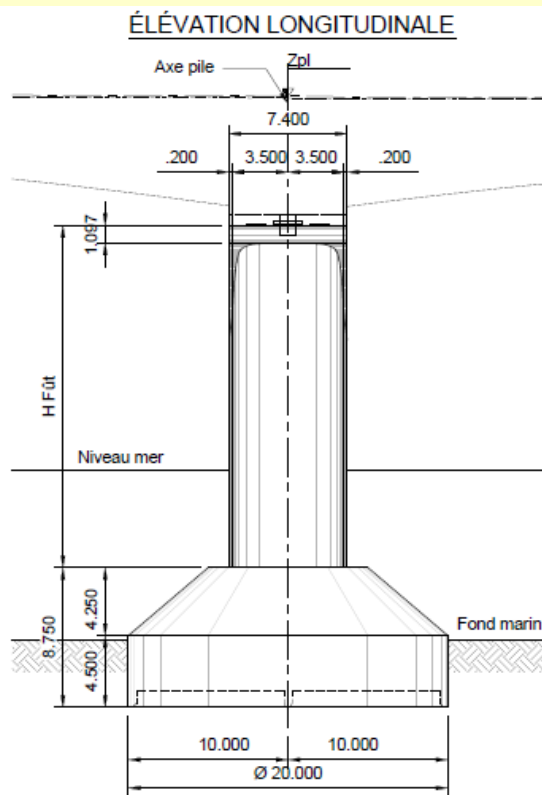
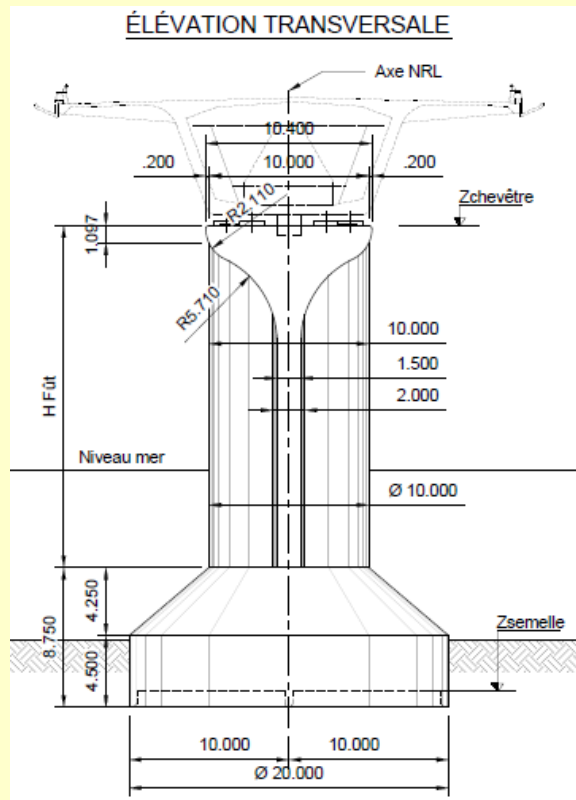


Viaduc 5400m

- ▶ **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 mais pb de méthode pour grandes portées

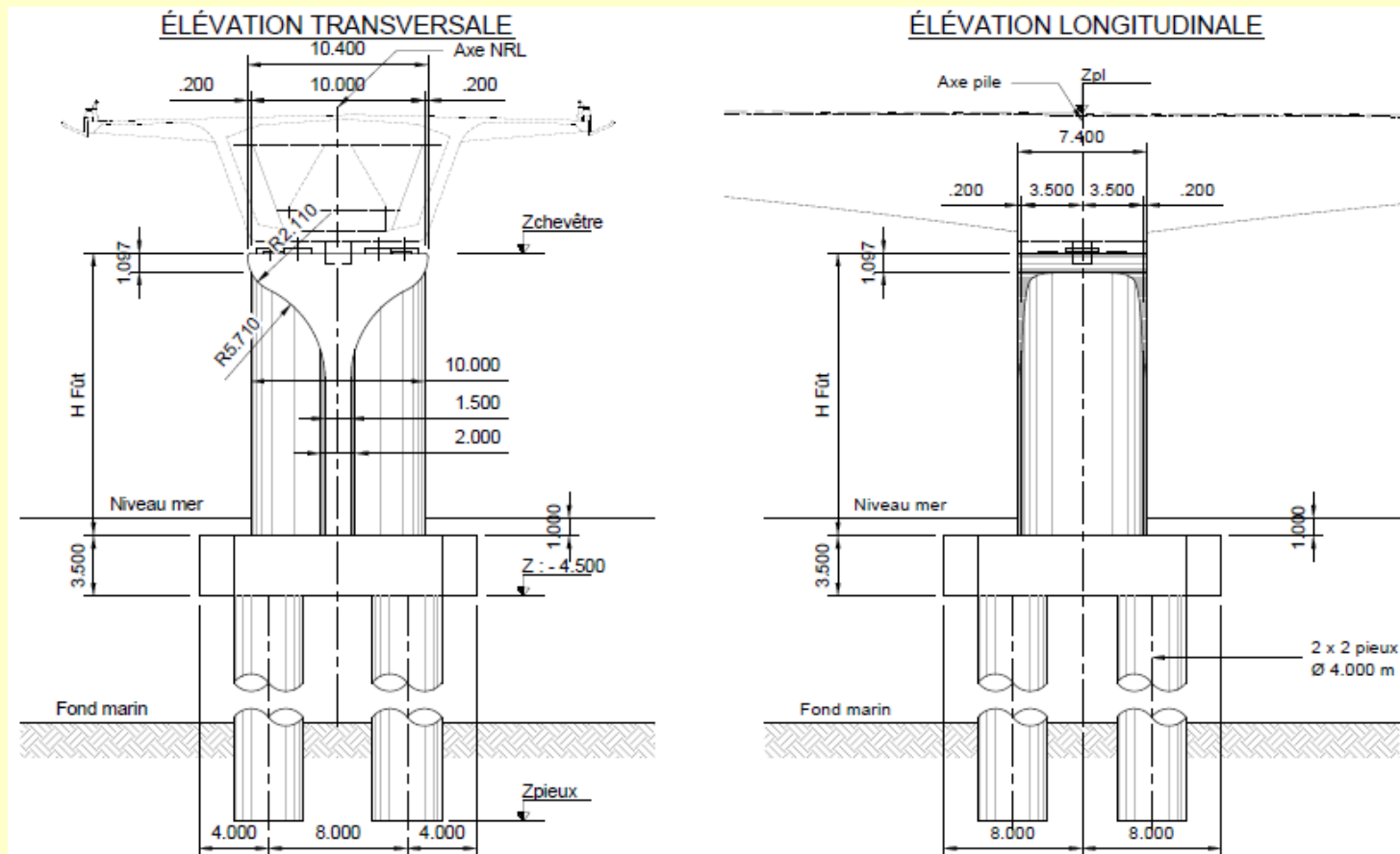


- **48 Piles en mer dont 25 sur semelles : 1 fût simple et profilé**



Viaduc 5400m

► 48 Piles en mer dont 23 sur pieux



Viaduc 5400m

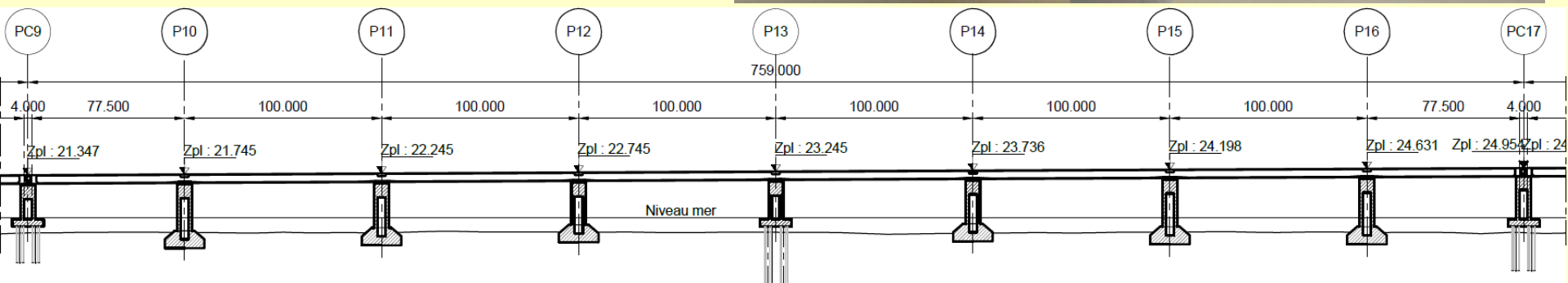
- ▶ **Solution hauteur variable – Architecture Th. LAVIGNE- Ch. CHERON.**
 - ▶ Tracé en plan avec courbes et contre-courbes afin de « suivre » la falaise
 - ▶ Affirmation d'un caractère maritime aux formes douces et carénées
 - ▶ Pile avec chevêtre d'inspiration « quille de navire »



Viaduc 5400m

► Tablier 4 âmes de hauteur constante

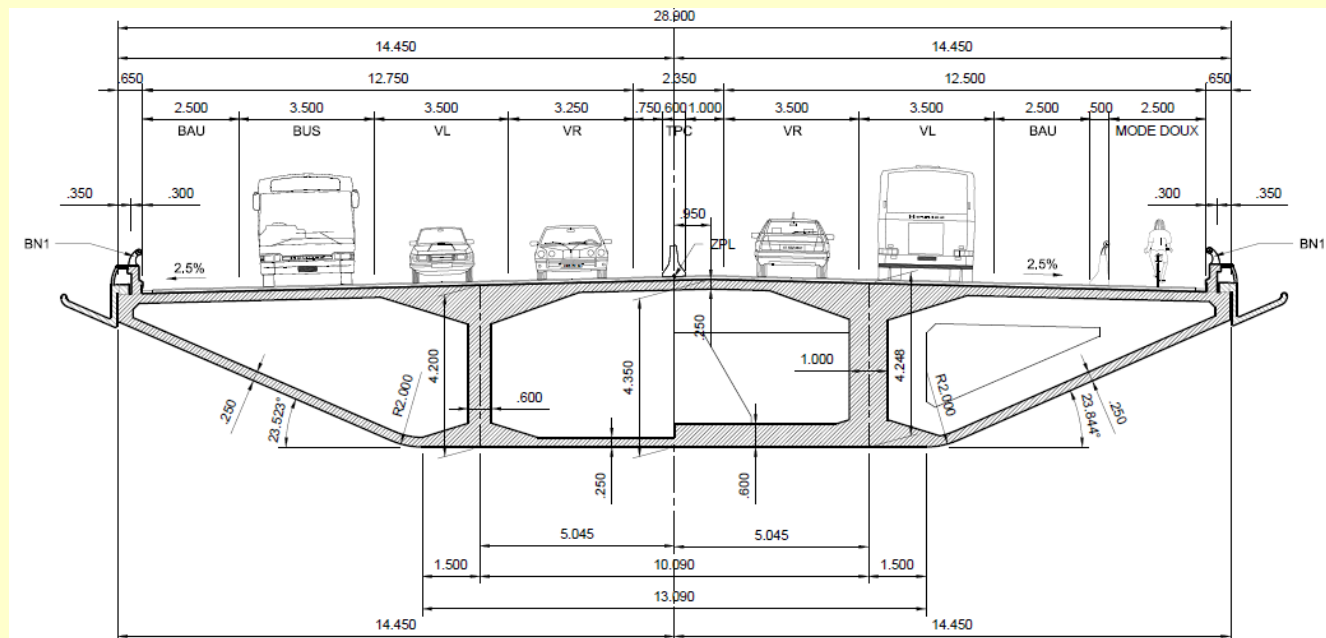
- Mono-caisson béton précontraint
- Travée principale de 100 m
- Hauteur constante de 4.35 m,
- Découpage en tronçons de 770 m de longueur environ (contrainte ferroviaire),
- Point fixe au centre et pile-culées aux extrémités
- Voussoirs préfabriqués, encorbellements successifs



Viaduc 5400m

► Tablier 4 âmes de hauteur constante 4,35 m

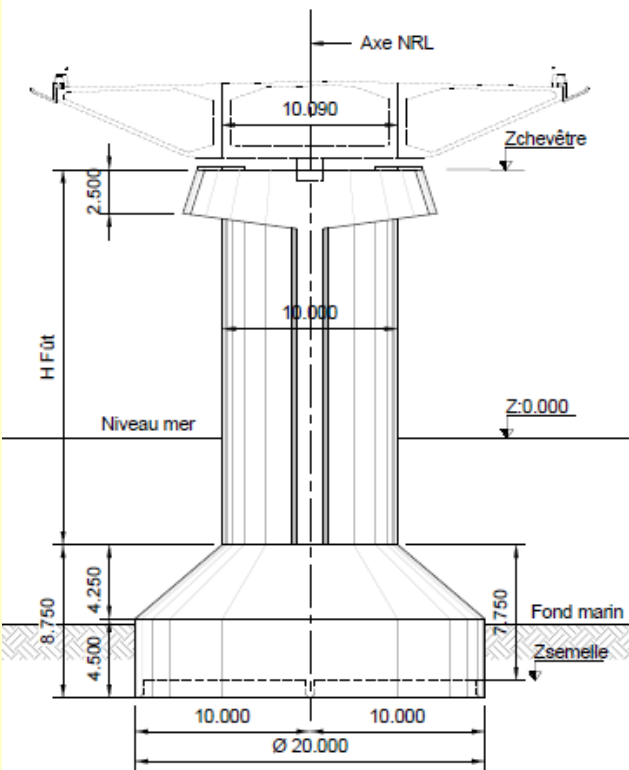
- Epaissement des âmes et du hourdis inférieur sur appuis
- Enveloppe extérieure identique => simplicité des coffrages et armatures
- Solution compacte et fermée avec meilleure protection des structures résistantes



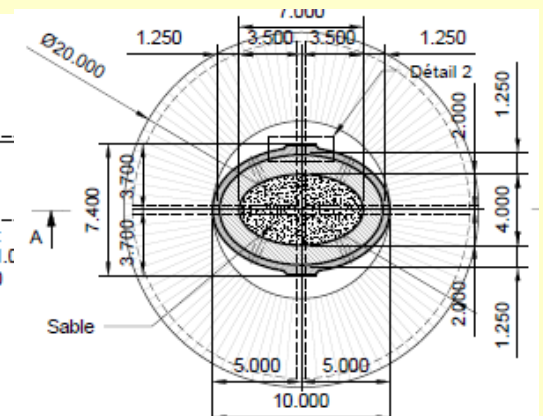
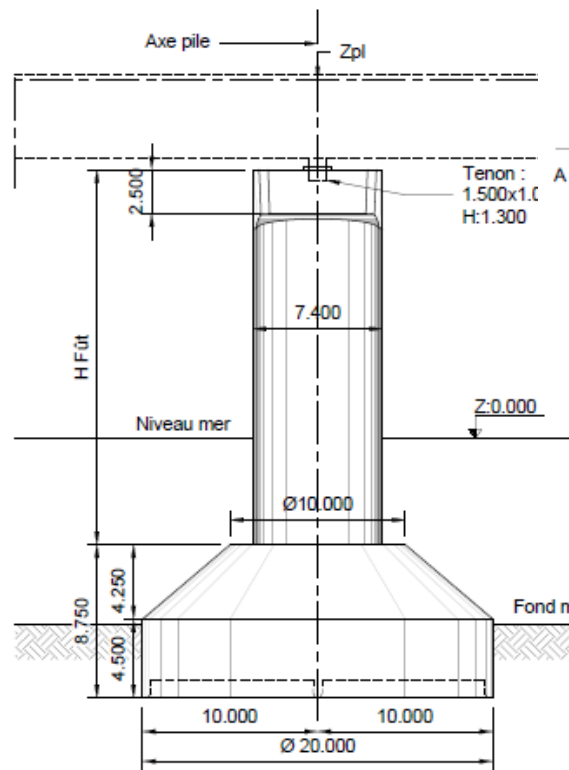
Viaduc 5400m

► 56 Piles en mer dont 31 sur semelles

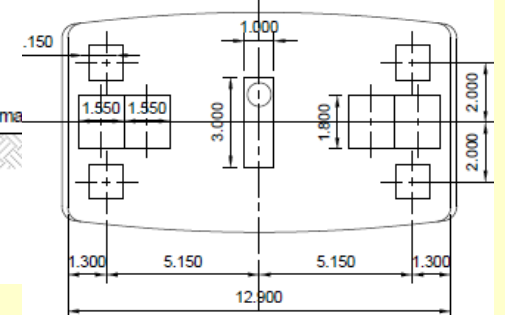
ÉLÉVATION TRANSVERSALE



ÉLÉVATION LONGITUDINALE

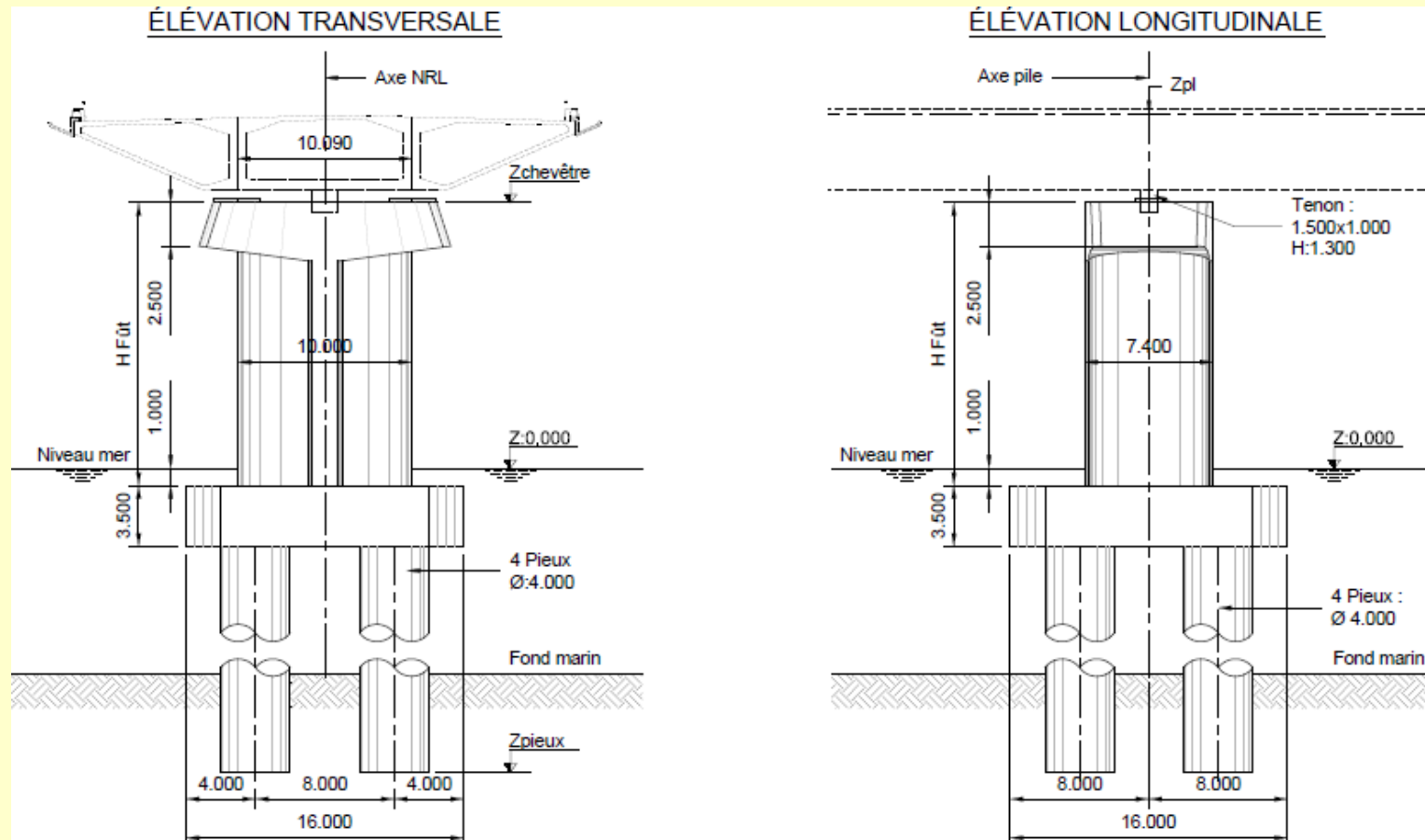


DÉTAIL CHEVÊTRE



Viaduc 5400m

► 56 Piles en mer dont 25 sur pieux



Viaduc 5400m

► Solution hauteur constante – Architecture Th. LAVIGNE – Ch. CHERON.

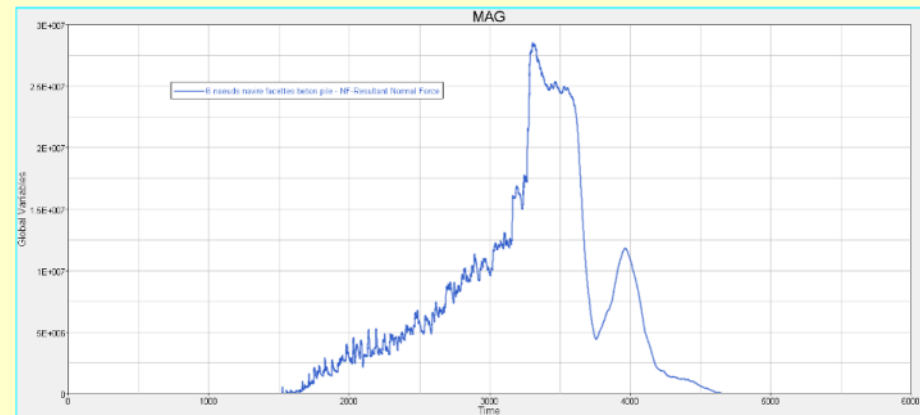
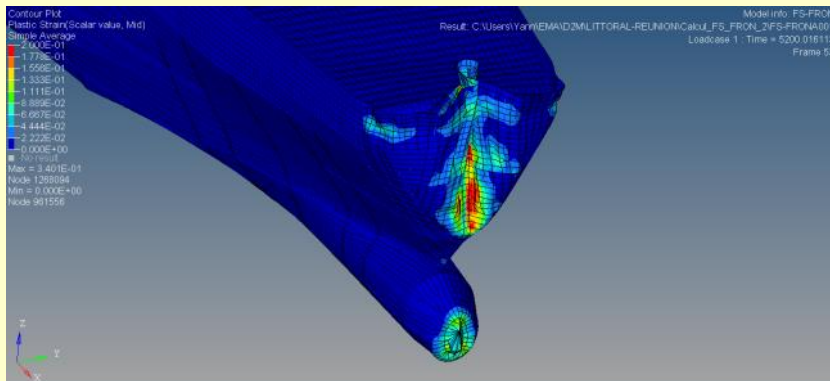
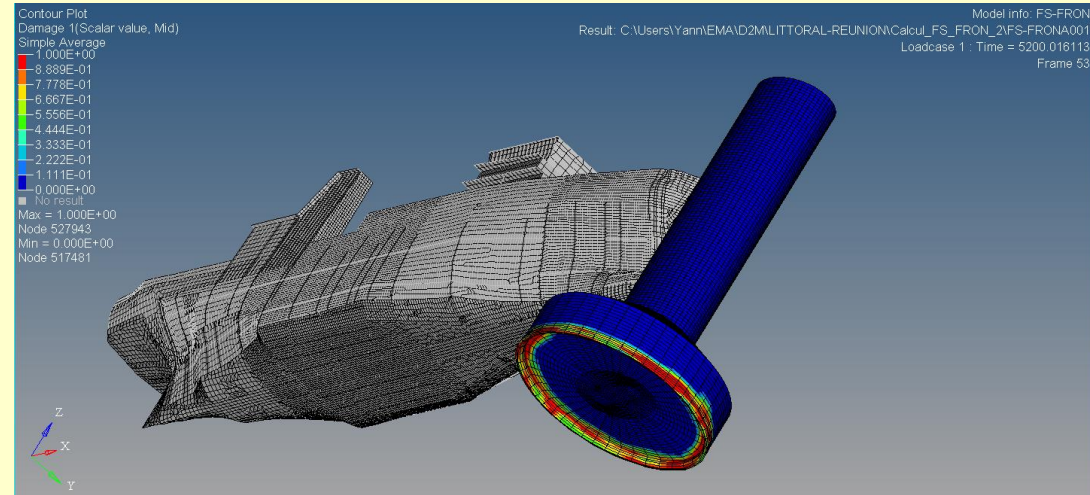
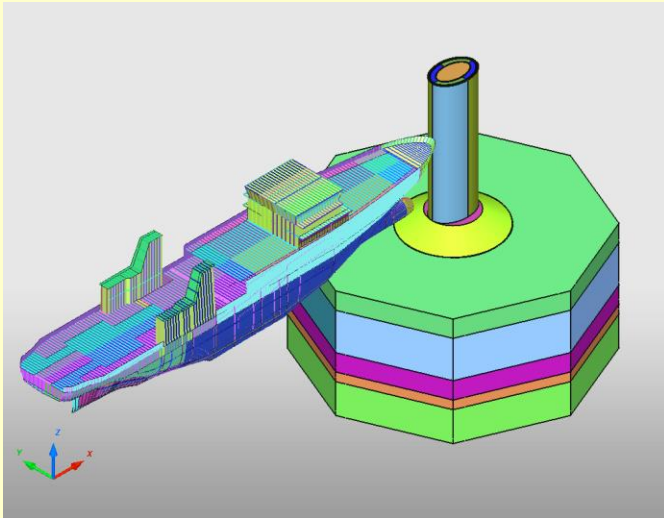
- Tracé en plan avec courbes et contre-courbes afin de « suivre » la falaise
- Evocation d'un bateau avec âmes latérales très inclinées
- Formes arrondies pour insister sur le côté maritime
- Tablier caractérisé par des lignes filantes



Viaduc 5400m

► Chocs de bateau

► METHODE ENEGETIQUE



30 MN en valeur maxi

Viaduc 5400m

► Efforts de houle

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

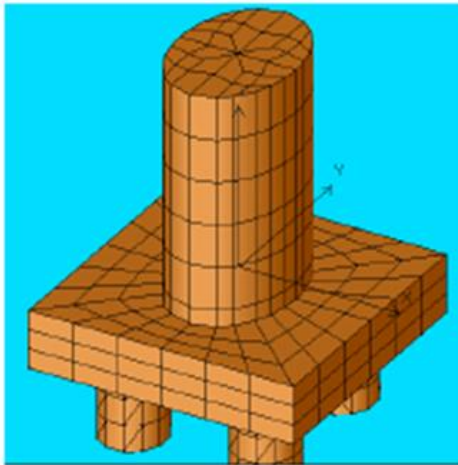


Figure 7 : Pile n°55 équipée d'une balance pour mesurer les efforts

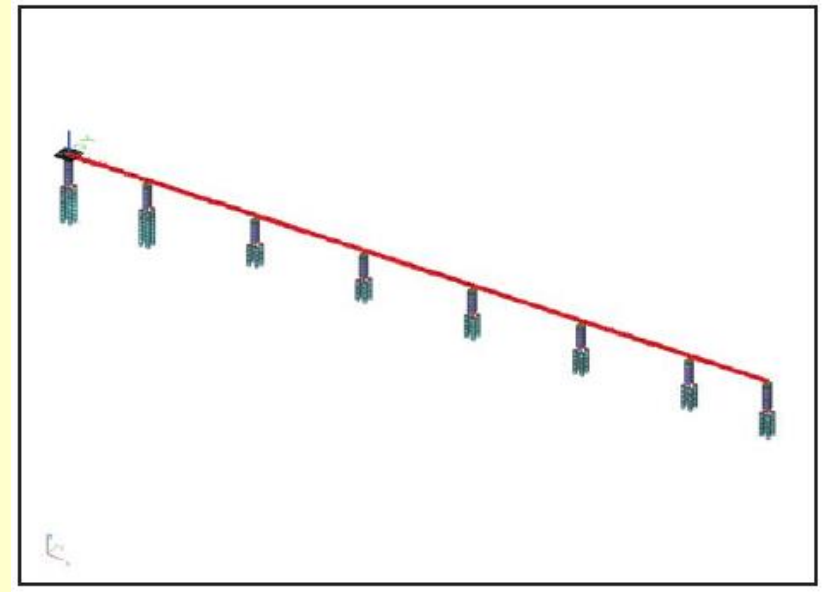
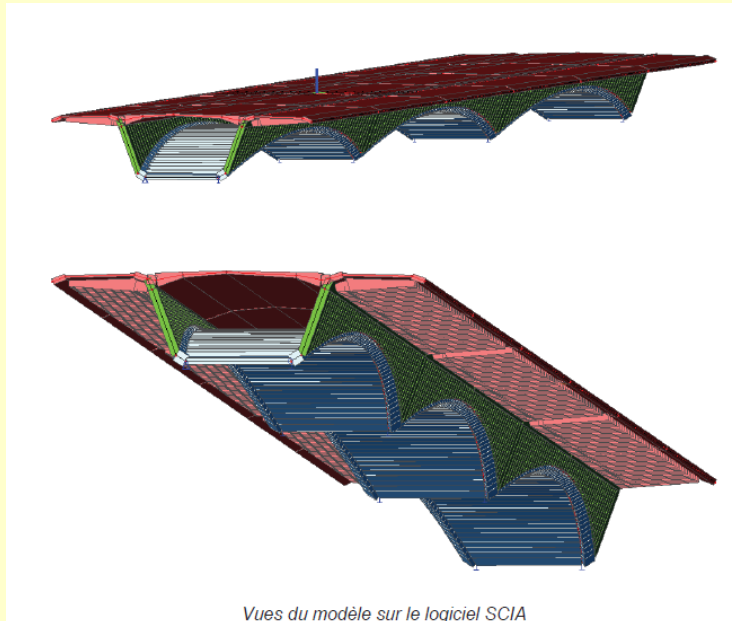


Figure 8 : Mesure du niveau d'eau (sonde de niveau) et des efforts de houle sur la pile n°55

Viaduc 5400m

► Etude du tablier

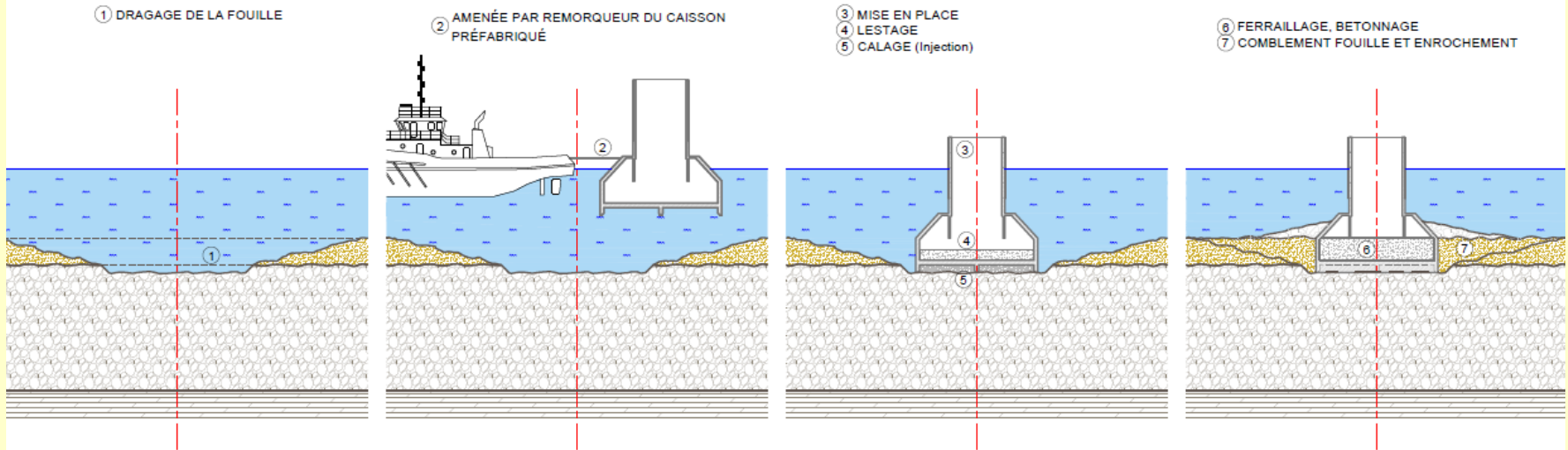
- Tablier très large (28,90m) sollicité par des charges routières et ferroviaires
- Modélisation 3D aux éléments finis
- Modèle complet intégrant le tablier, les appuis et le sol
- Calcul dynamique pour le séisme avec prise en compte de l'arrêt de 2011



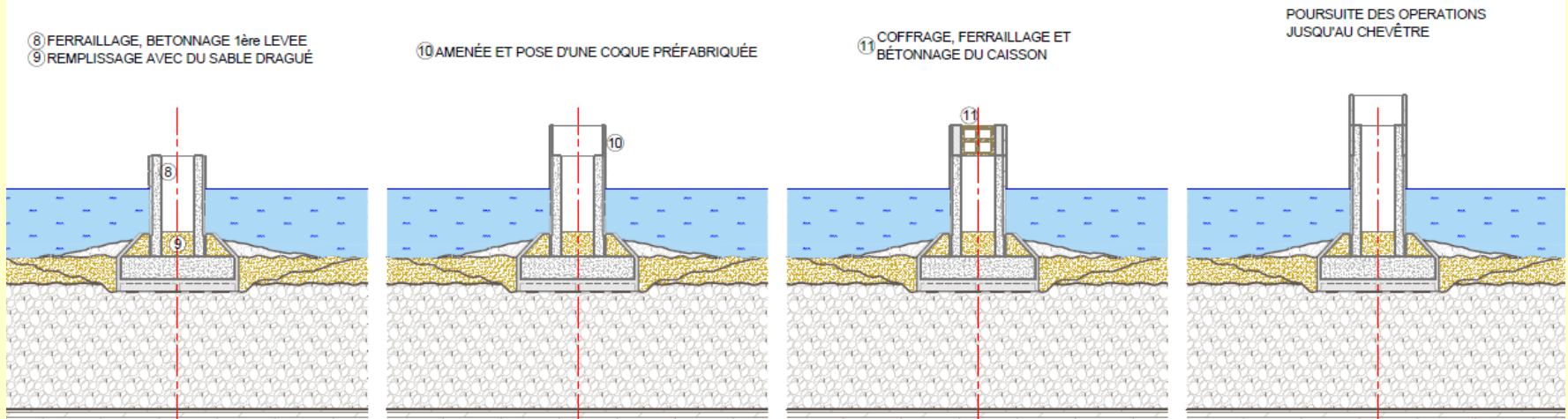
Viaduc 5400m

► Méthodes de construction des appuis sur semelles

SEMELLE

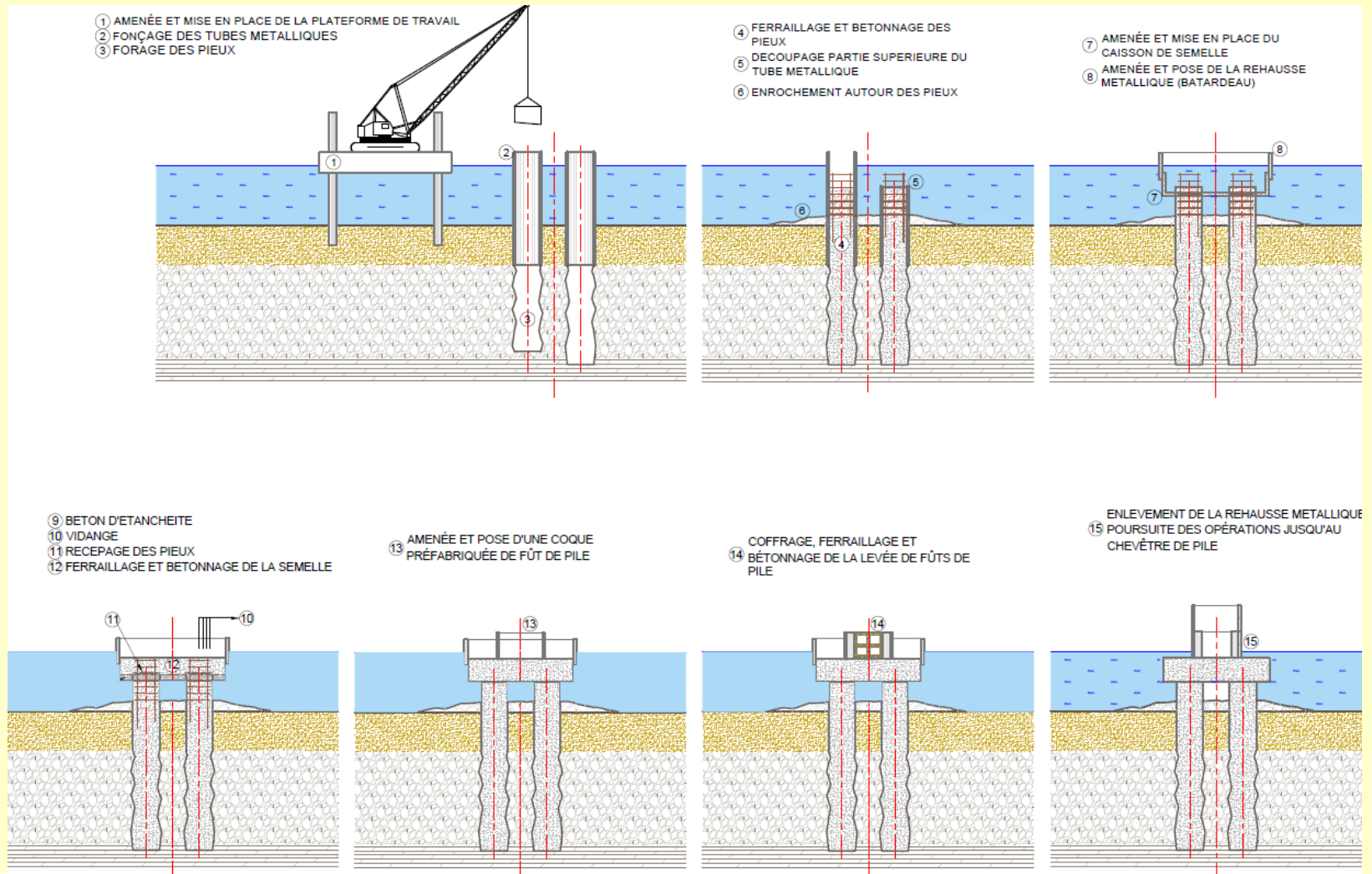


PILE



Viaduc 5400m

► Méthodes de construction des appuis sur pieux



Viaduc 5400m

► Matériels pour la construction des appuis



Viaduc 5400m

► Méthodes de construction du tablier



Viaduc 5400m

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

Viaduc 5400m - Les travaux

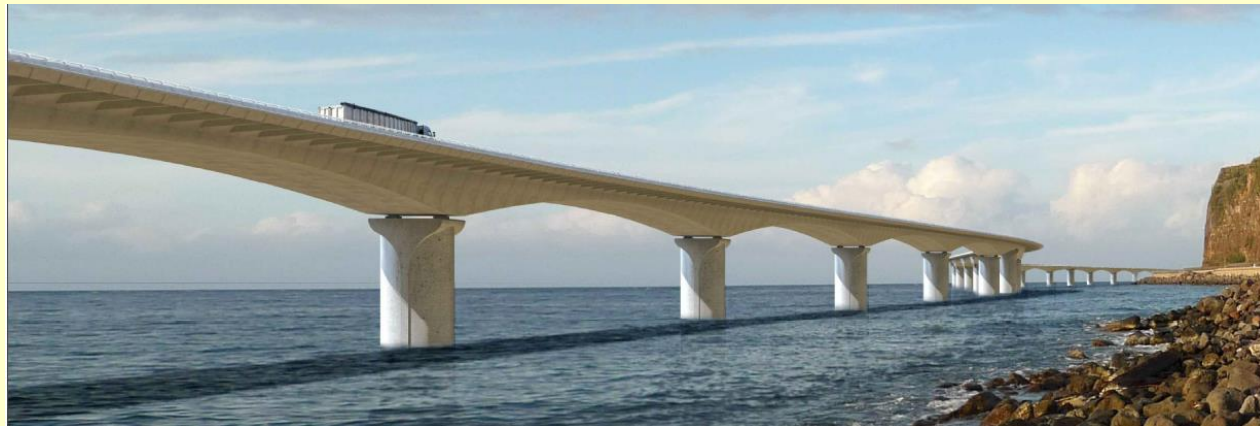
► MT3 – Viaduc de 5 400 m :

► 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



un process industriel

- Pour préparer les sols
- Pour fabriquer et mettre en place les fondations, les futs de pile, les chevêtres
- Pour fabriquer et mettre en place les tabliers
- Pour produire des bétons selon la méthode performantielle
- Pour déplacer les éléments préfabriqués à l'aide d'outils spéciaux

Zourite

(la pieuvre)

- **résistante aux Cyclone**
- **107 m de long**
- **48 m de large**
- **33 m de haut**
- **8 pieds mobiles (55m de haut/3m diam)**
- **Poids max : 4800 t / Diam max 23 m**
- **Poids des paquets:**
 - Fondations et piles (4800t)**
 - chevêtres des piles (2300t)**
 - éléments des piles (2400t)**

Zourite à quai













Zourite et la poutre de lancement







Vue générale de la préfabrication des piles

















25.01.2017 19:46

Vue générale de la préfabrication des voussoirs







27.04.2017 09:59





19.06.2017 13:30



264321 - 10 TONS

BVS Bultmann
cranes
2015

VADUCUTOKU

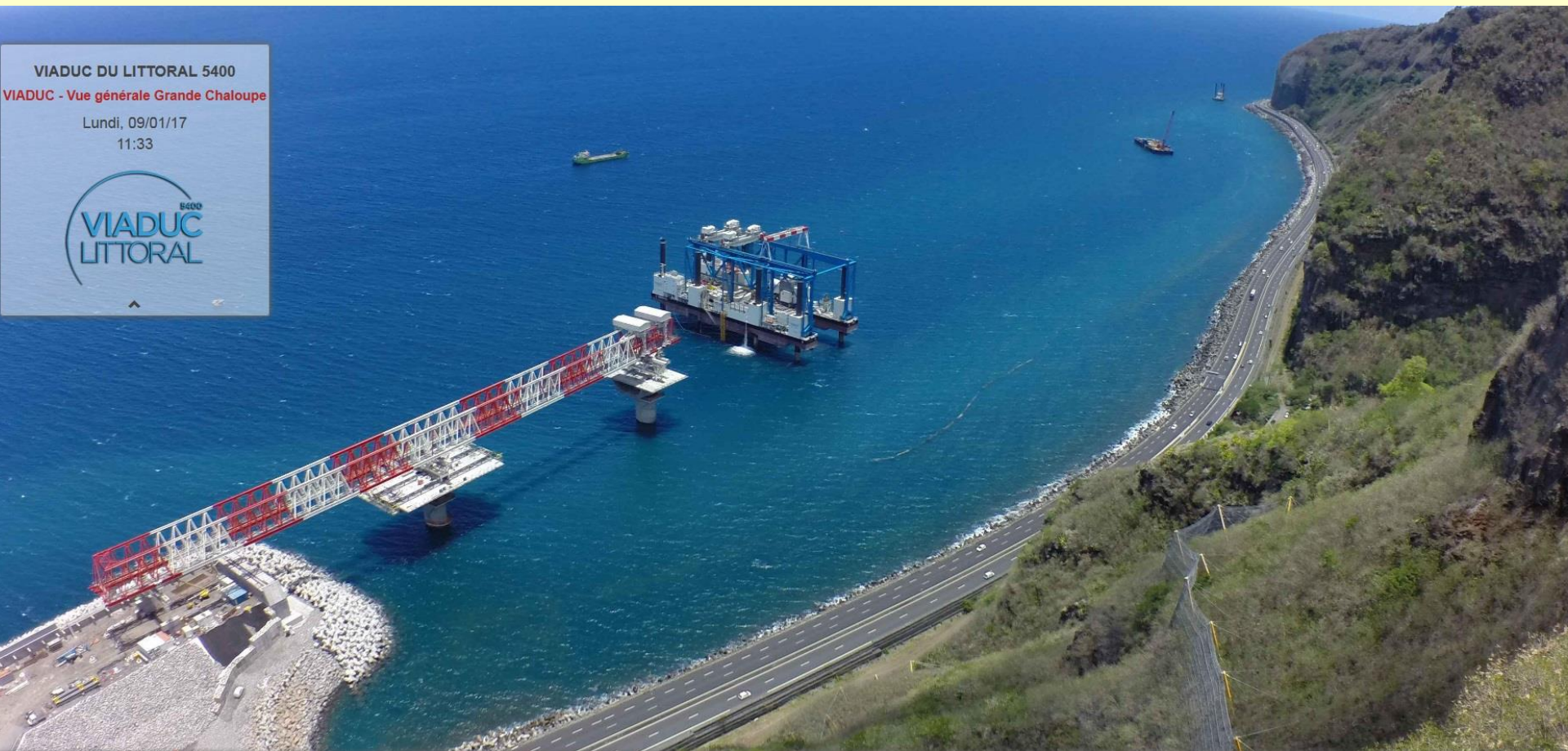






25.01.2017 19:46

La poutre de lancement et Zourite



VIADUC DU LITTORAL 5400

VIADUC - Vue générale Grande Chaloupe

Lundi, 09/01/17

11:33

VIADUC
LITTORAL

La poutre de lancement

- **La plus longue du monde**
- 278 m de long
- 240m de viaduc par mois



19.01.2017 15:02

RAIL 1

RAIL 1

RAIL 1



16.12.2016 12:06







19.01.2017 14:54



28.06.2017 12:03



28.06.2017 12:04



31.01.2017 17:38



15.06.2017 10:30





Le viaduc de la Grande Chaloupe

- 240 m de long.
- Coulé en place
- Groupement:
EIFFAGE, RAZEL Bec, SAIPEM, NGE, GUINTOLI









06.02.2016 08:45





6.4. Quels enseignements?

Un recueil des données aussi complet que possible.

Océaniques

Climatiques

Géotechniques

Matériaux, ressources

Une identification et une évaluation des risques

Une réflexion et une mise au point poussée des processus de construction tendant vers une industrialisation généralisée.

La mise au point du processus qualité.

Un objectif permanent, la durabilité, qui ne pourra être validé que par nos successeurs,.

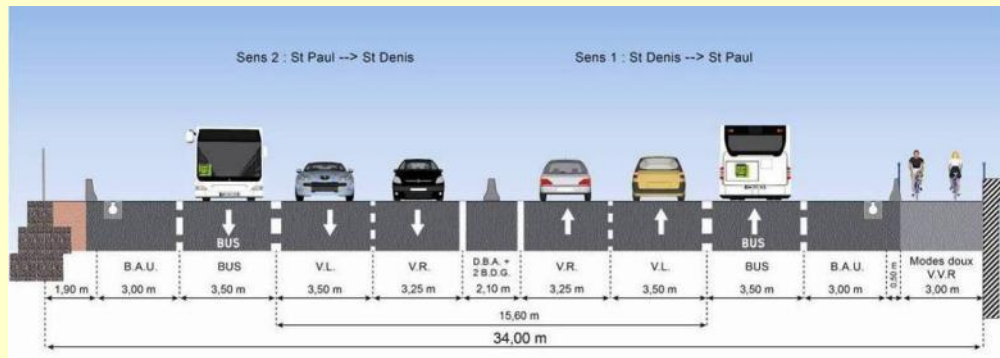
7 LES DIGUES

Digue – Les hypothèses du programme

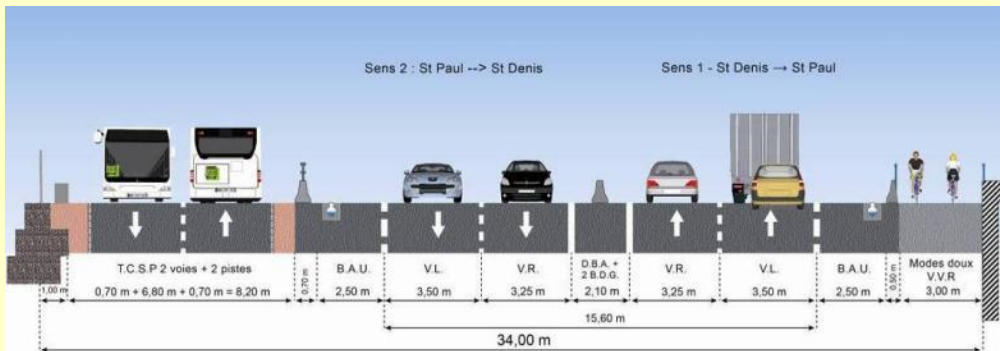
RAPPEL :

- ▶ 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 :

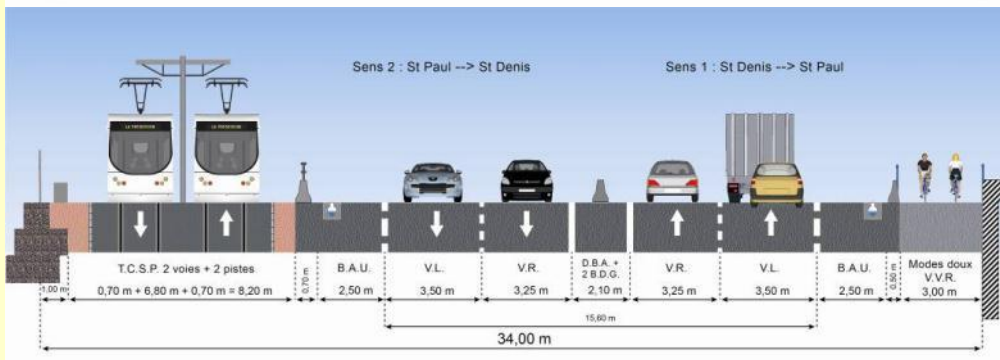
Digue – Les hypothèses du programme



Mode 1

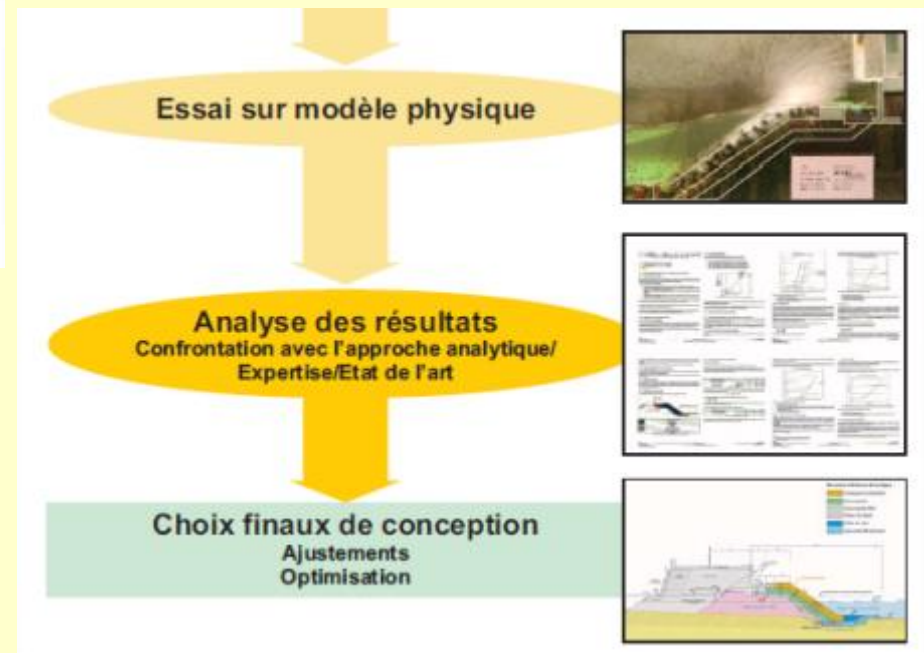
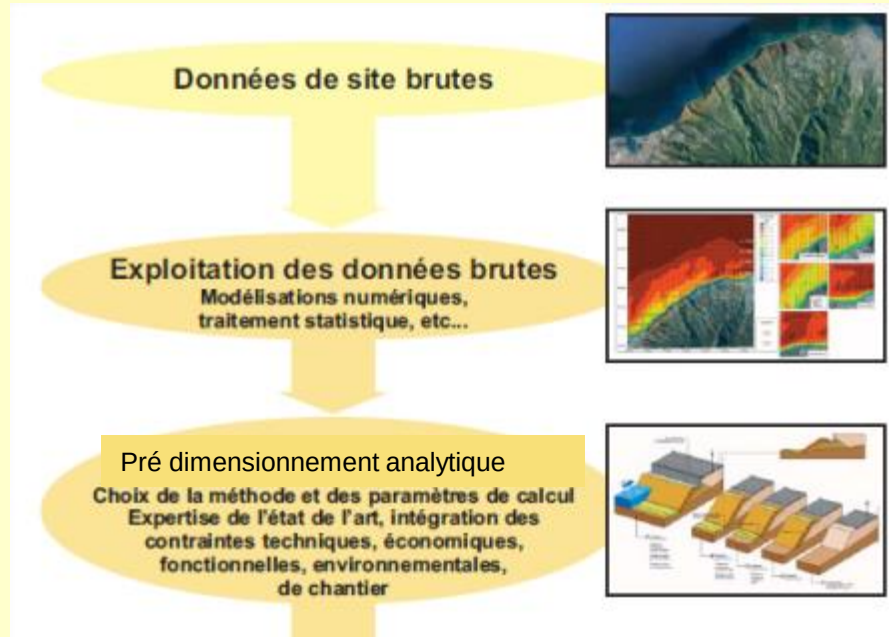


Mode 2a



Mode 2b

Digue – Démarche générale de conception



Digue – Des experts de niveau international

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



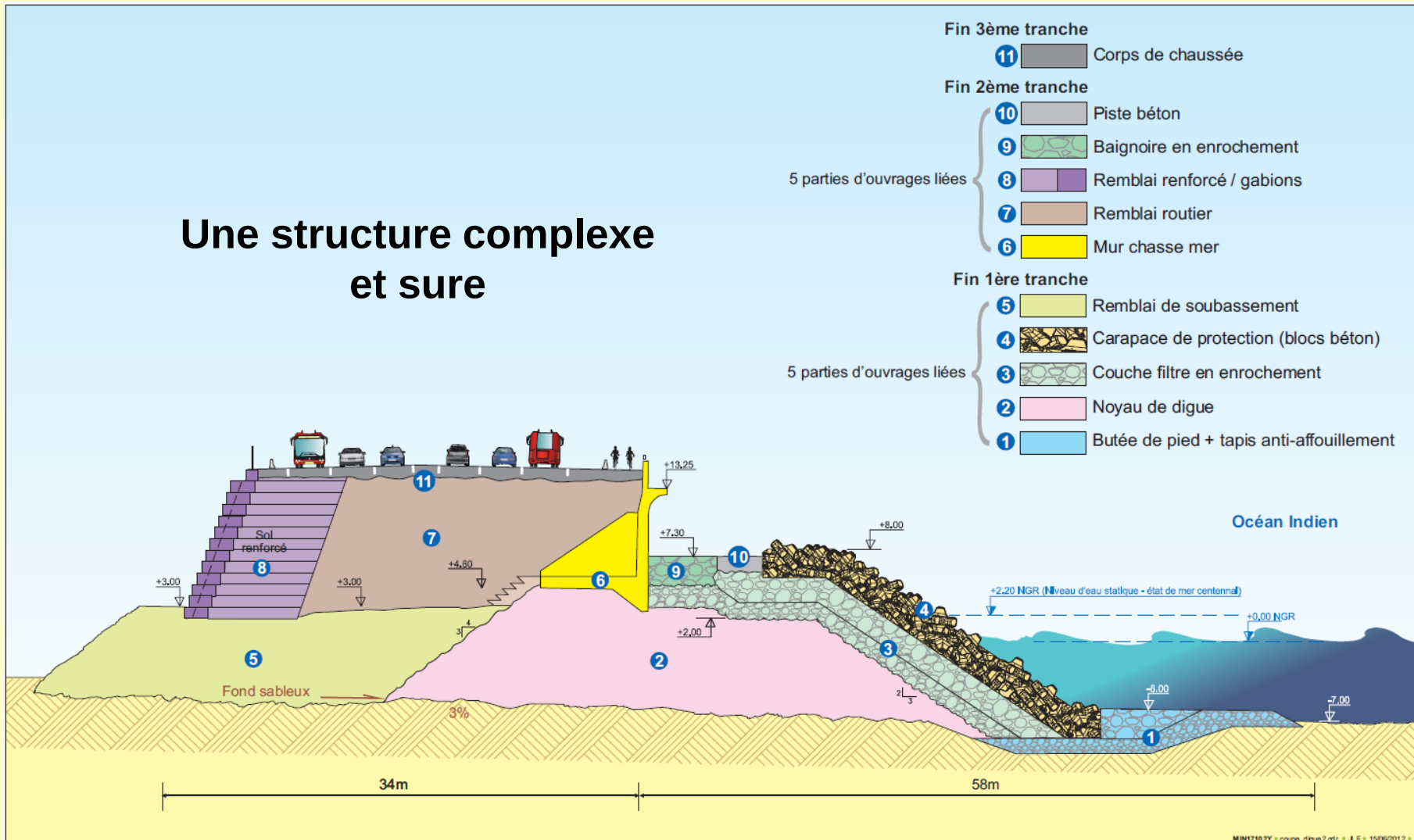
J. FREDSOE : Expert danois notamment pour le tapis anti-affouillement



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

Digue – La solution étudiée en détail

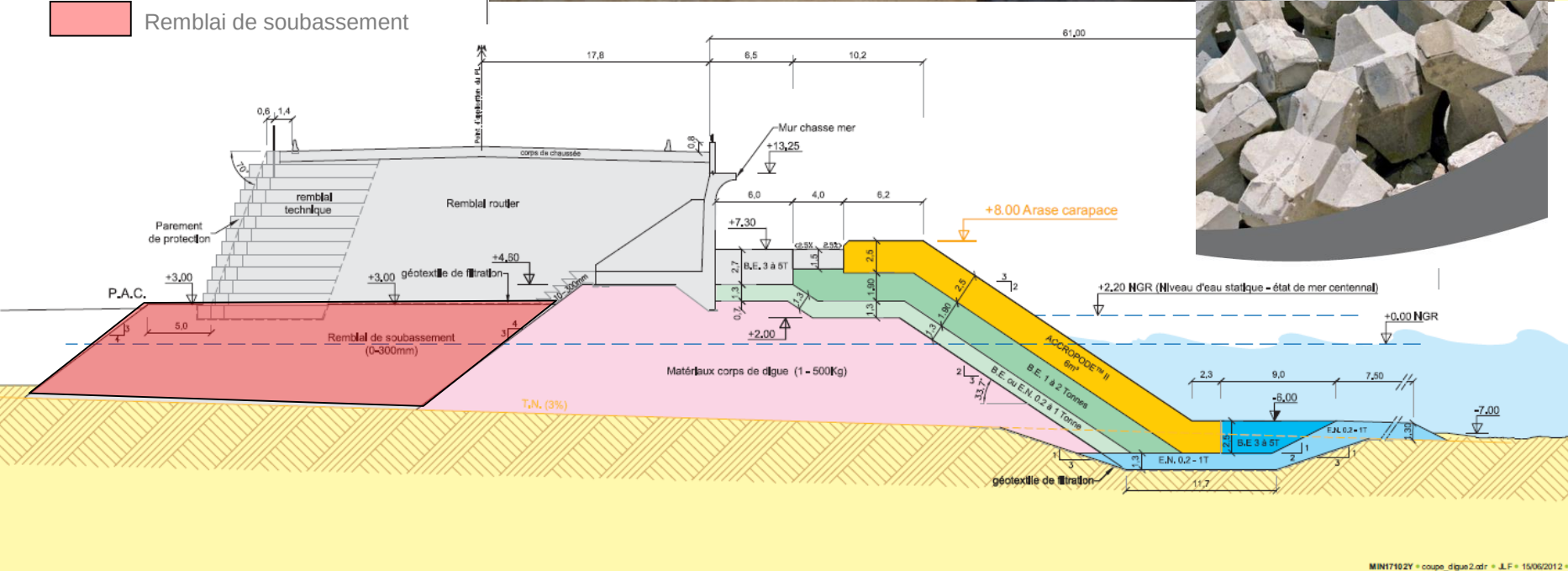
Une structure complexe
et sure



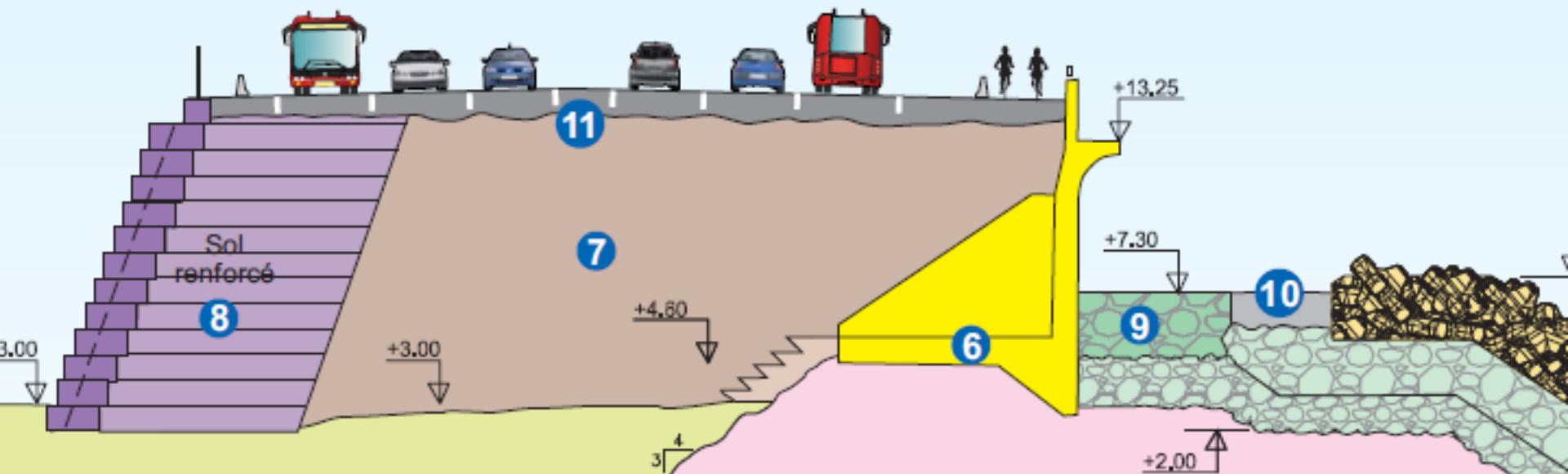
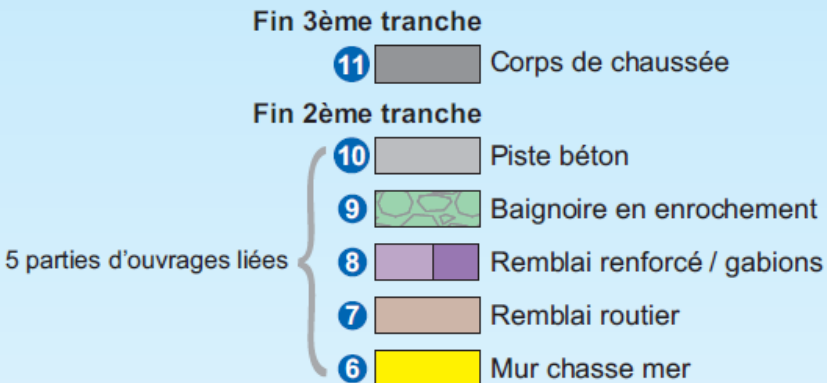
Digue – La structure inférieure

Structure inférieure de la digue :

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



Digue – La structure supérieure



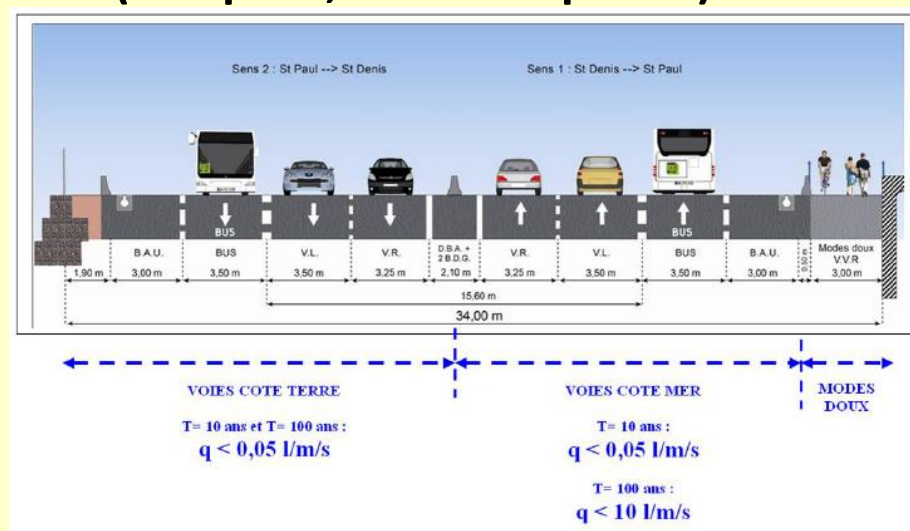
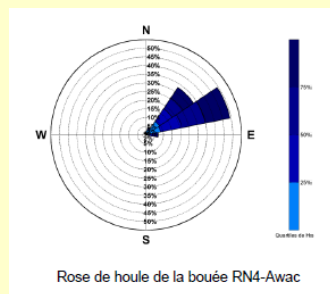
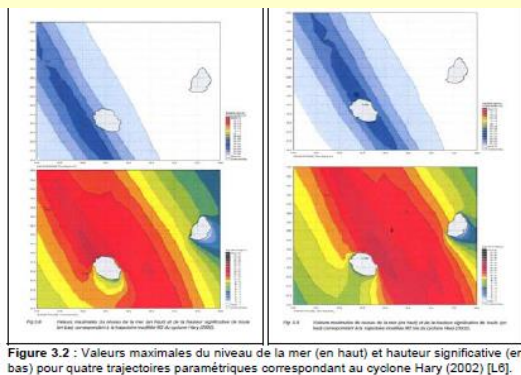
Digue – Partie inférieure

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



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

Digue – Modèles physiques



Digue – Modèles physiques

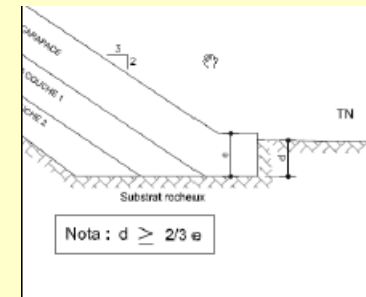
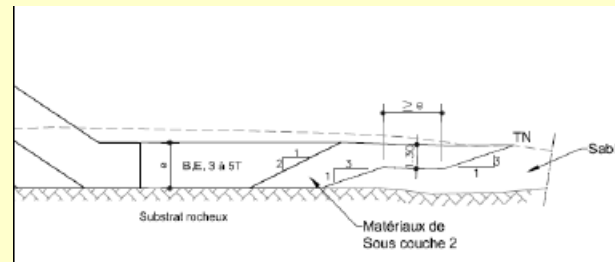
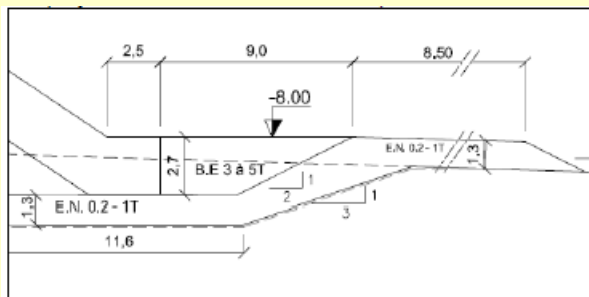


Digue – Partie inférieure

- 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 :

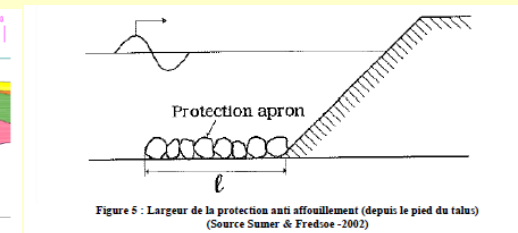
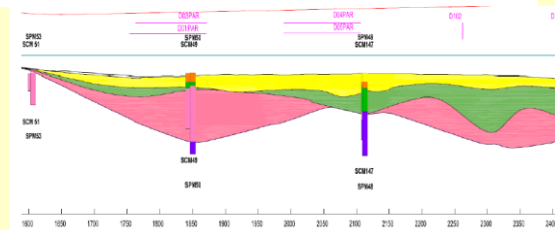
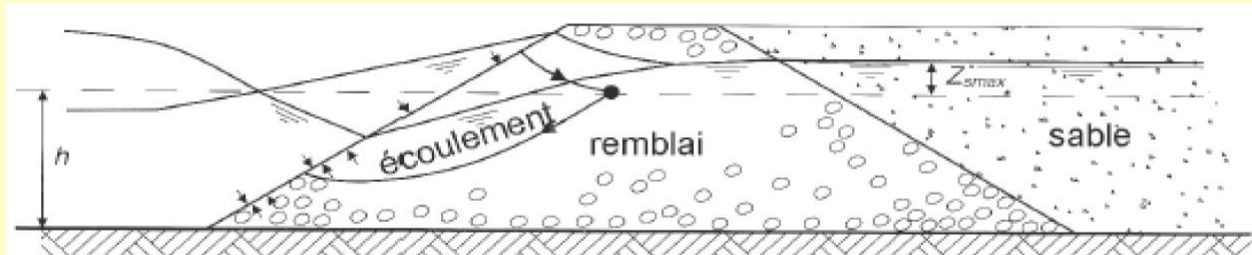


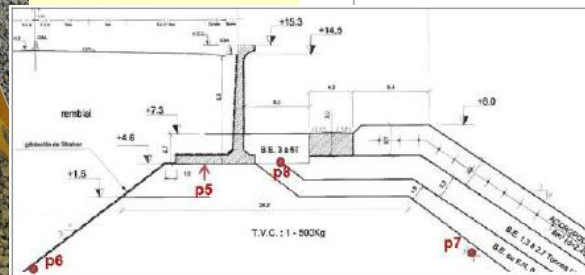
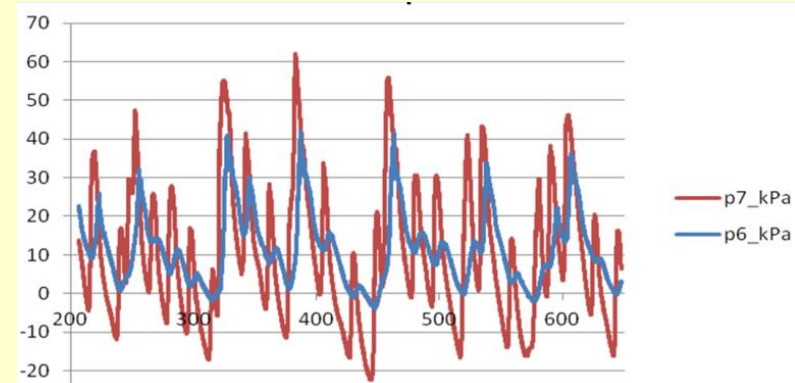
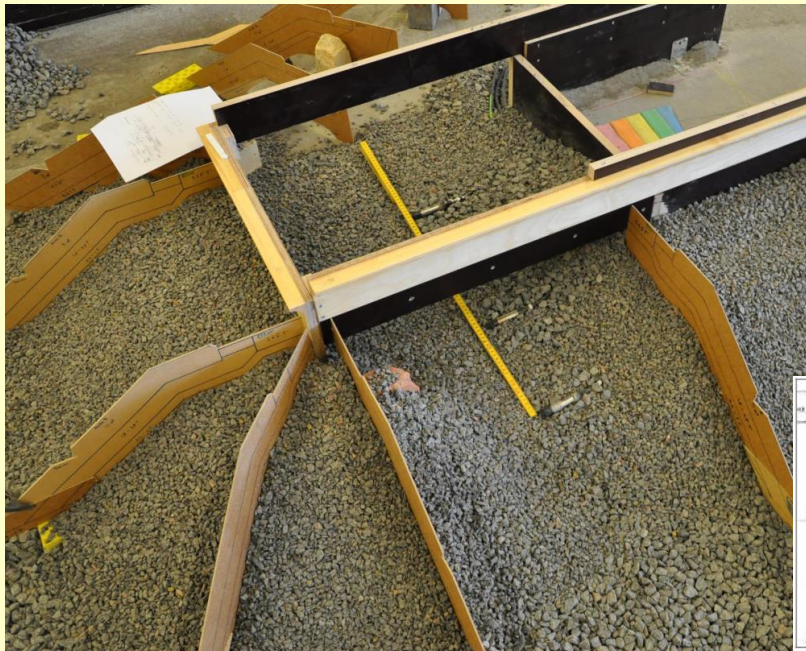
Figure 5 : Largeur de la protection anti affouillement (depuis le pied du talus)
(Source Sumer & Fredsoe -2002)

Digue – Partie inférieure

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

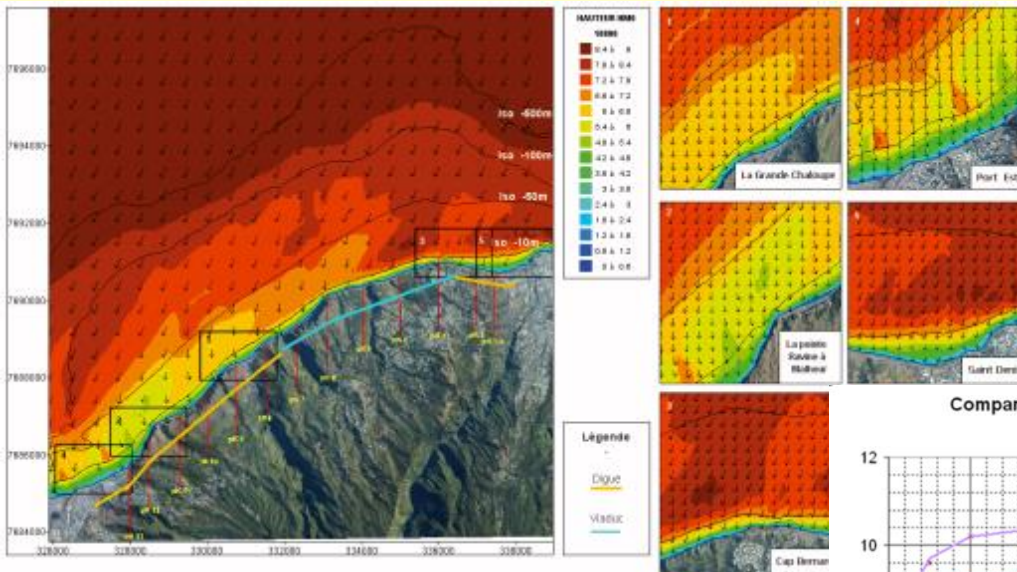


- Corrélation par l'analyse des enregistrements des sondes en modèle physique



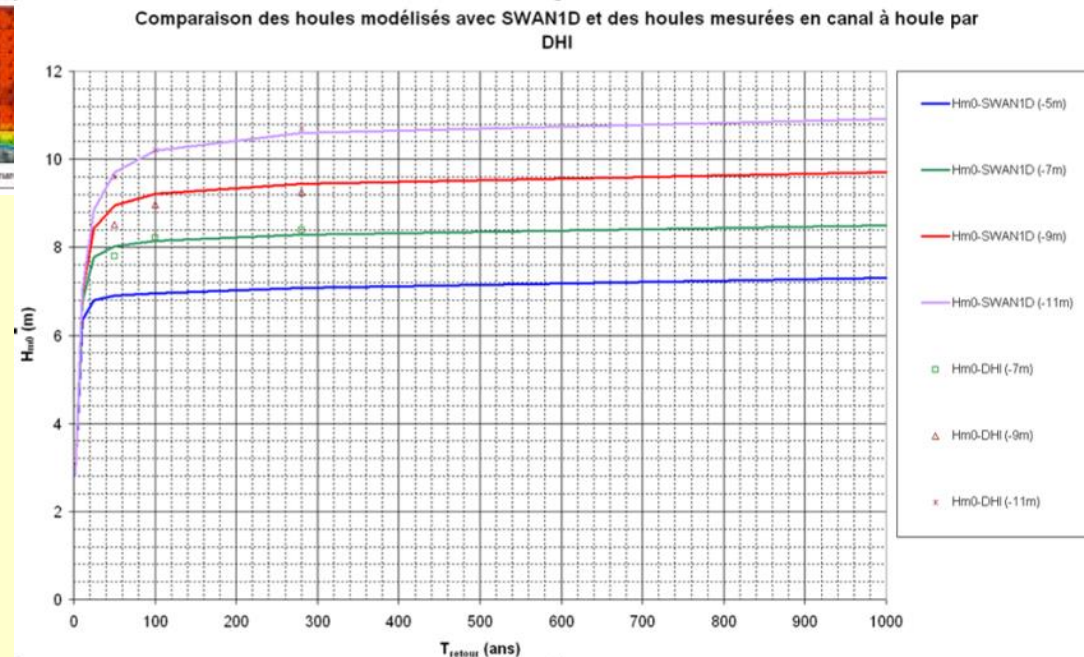
Digue – Partie inférieure

Etude de sensibilité des fonds marins sur les houles

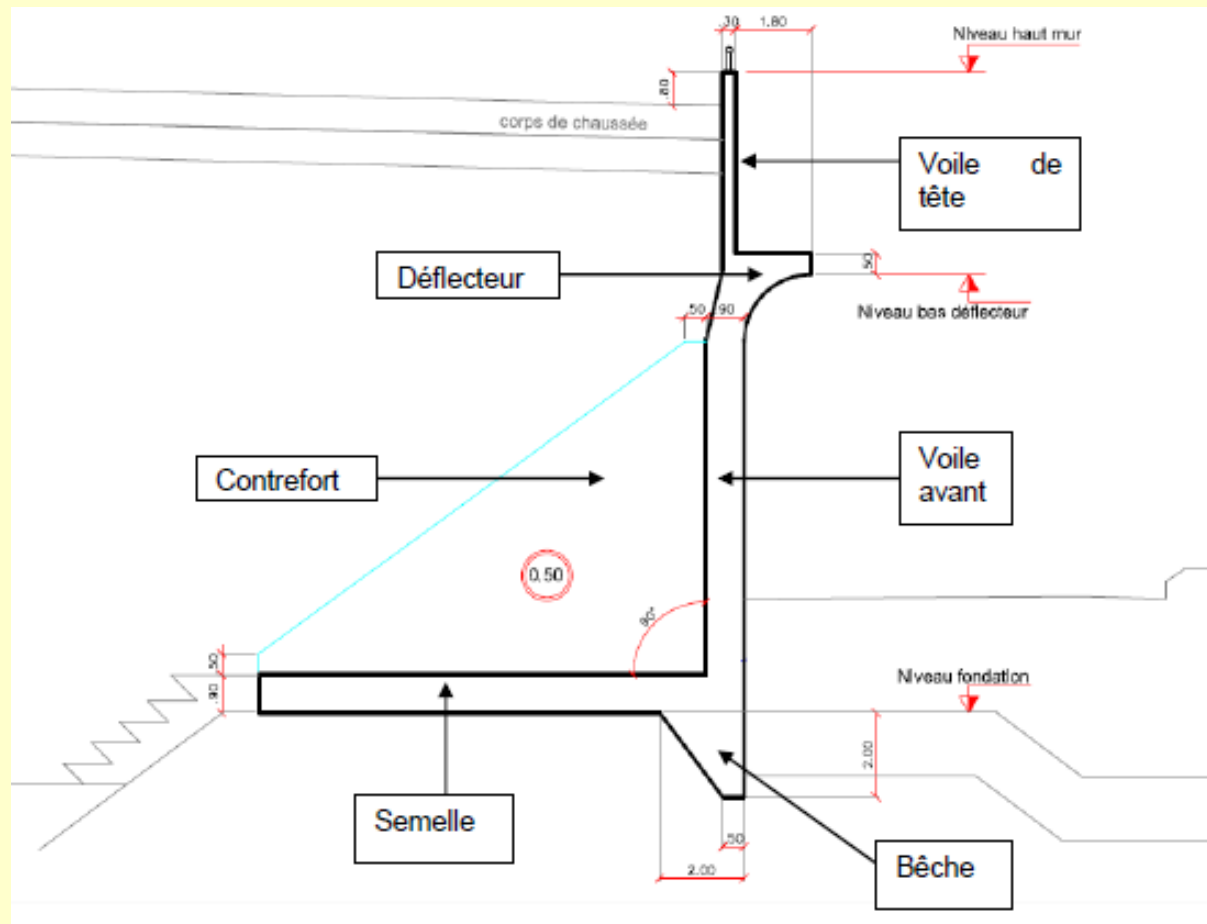


Les houles de conception sont les houles les plus fortes physiquement possibles du fait de la configuration bathymétrique

→ garantie sur la pérennité



Digue - Le mur chasse mer



Fonction soutènement

Fonction chasse-mer

Digue - Le mur chasse mer

Pré-dimensionnement

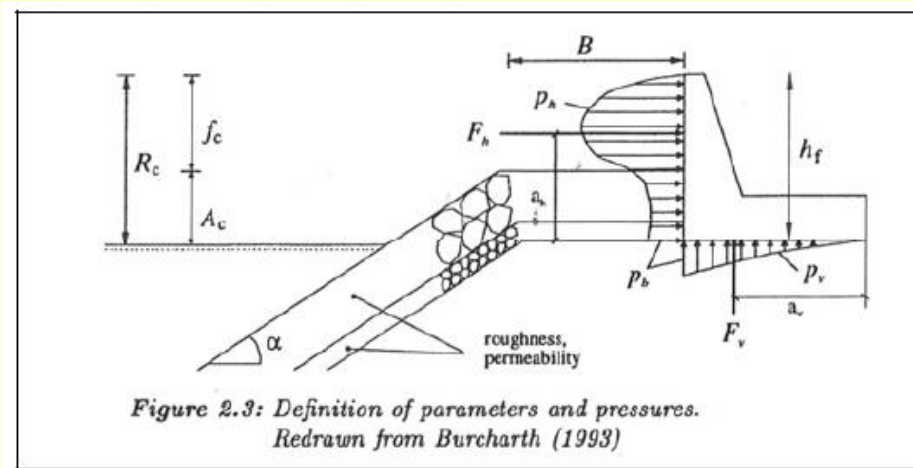


Figure 5.3.1 : Paramètres géométriques de la formule de Pedersen [G8].

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

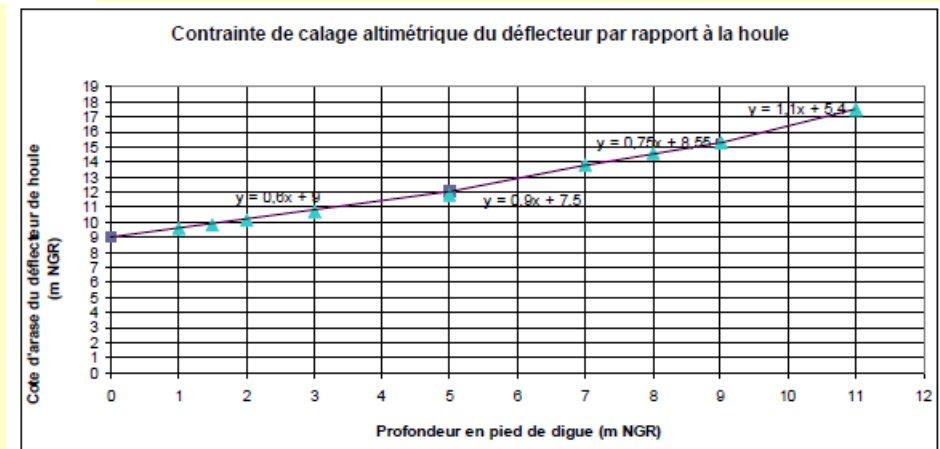
$$m_{h,0.1\%} = a f_{h,0.1\%}$$

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

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

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

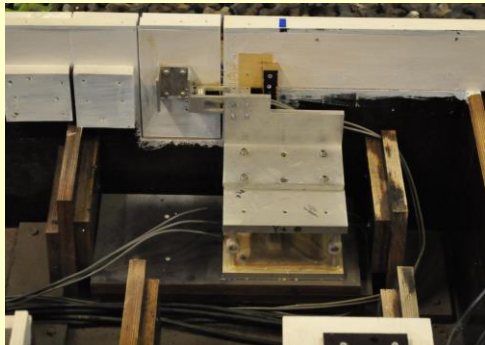
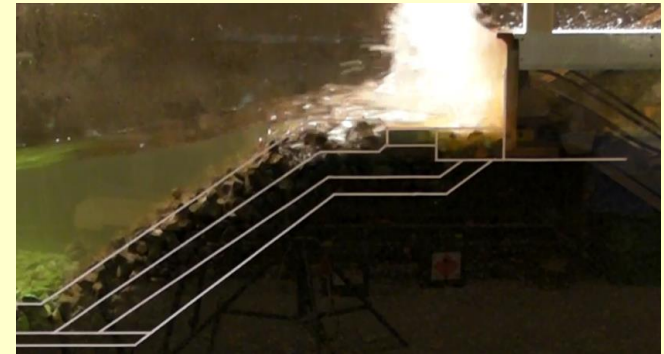
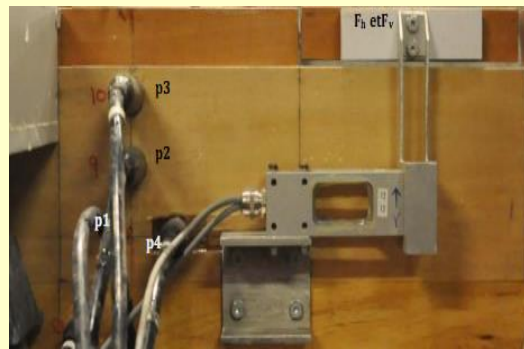
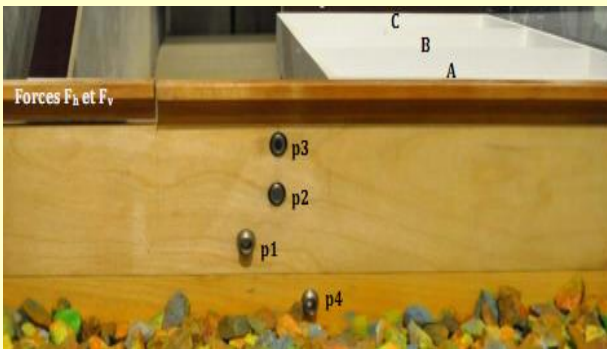


Digue - Le mur chasse mer

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

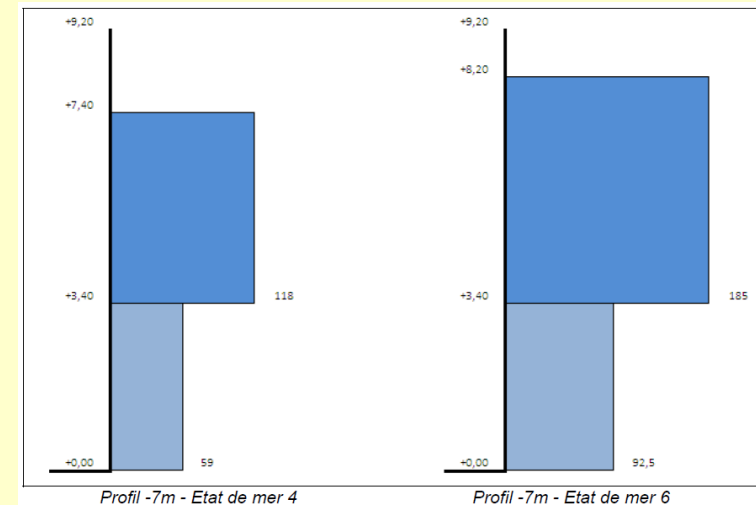
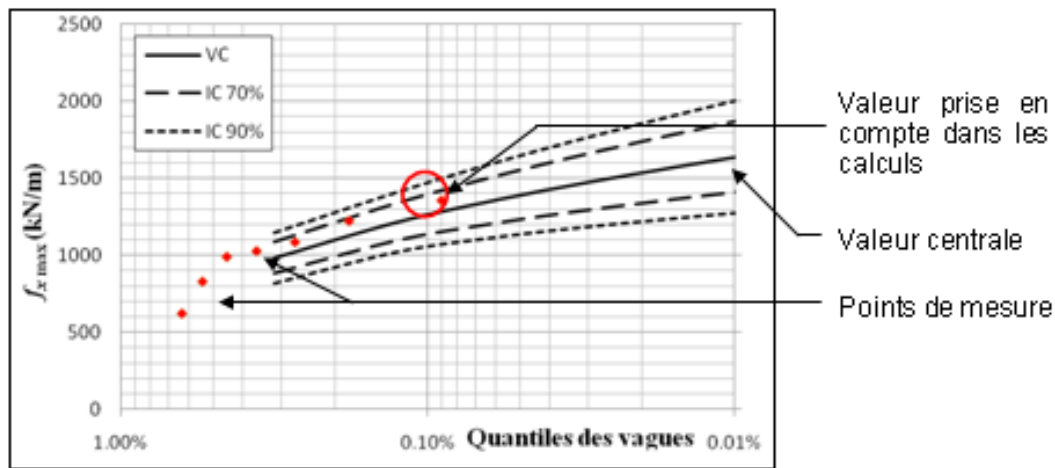
Traitement des signaux: filtrage des efforts et des pressions

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

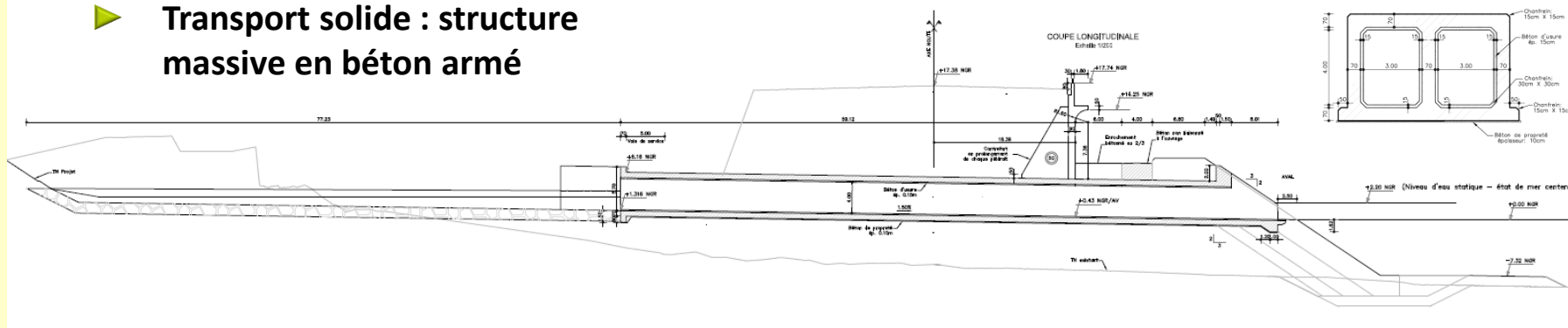
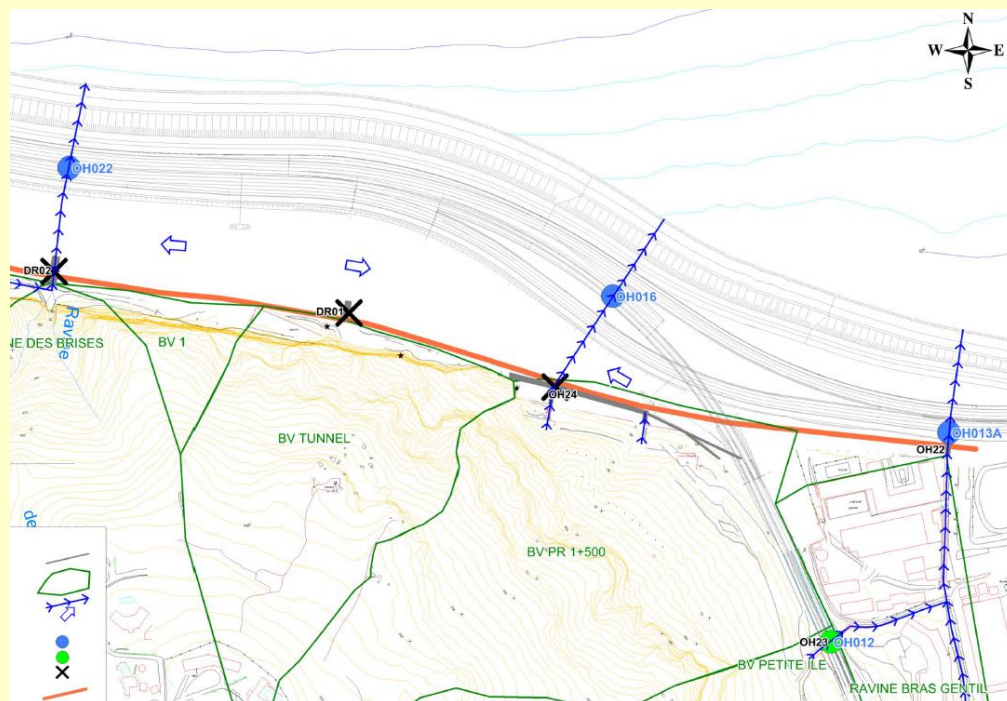
Comportement logarithmique des efforts et moments mesurés



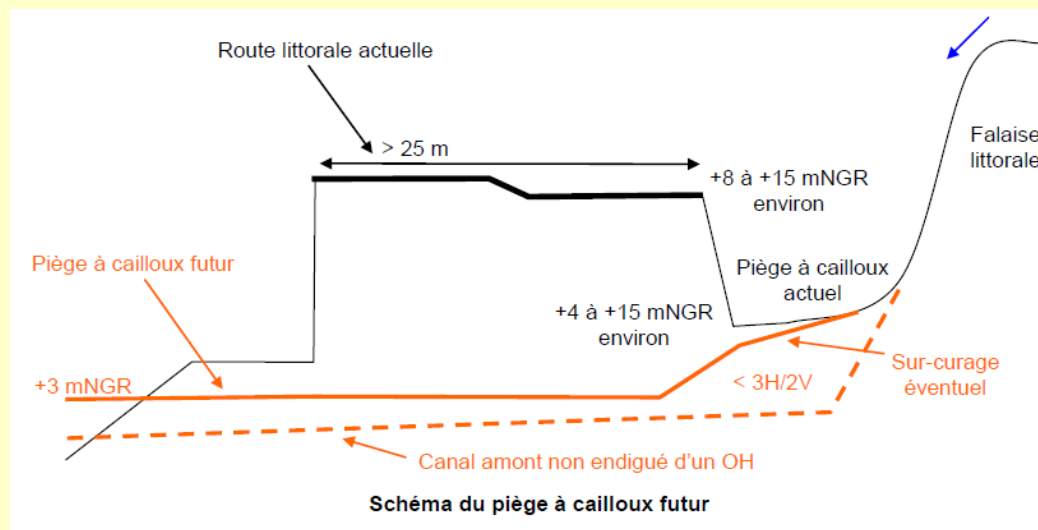
Digue – Ouvrages hydrauliques

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



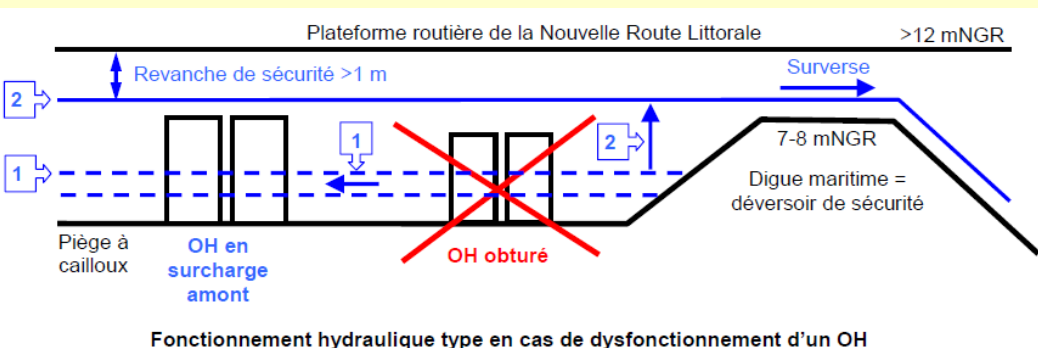
Digue – OH et Piège à cailloux (PAC)



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



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,**

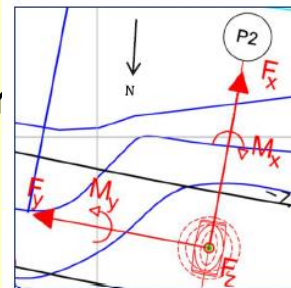
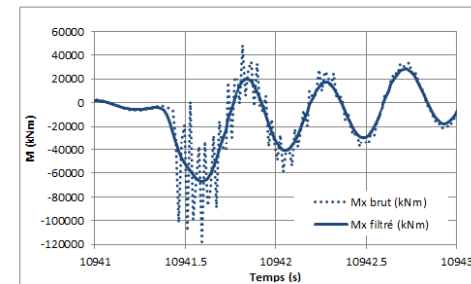
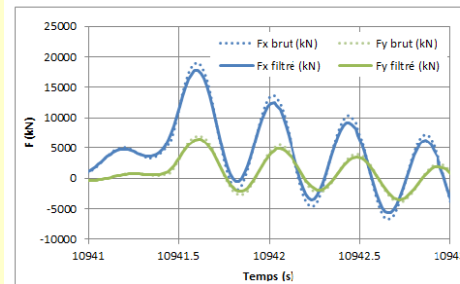
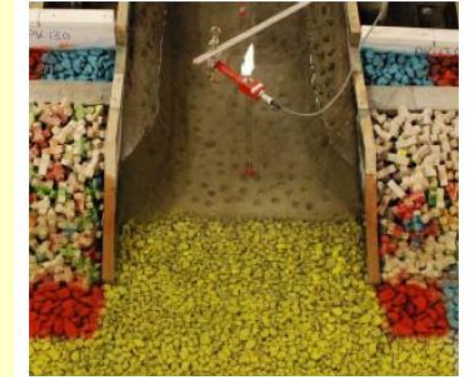
Mesurer les franchissements au-delà du mur chasse-mer

Mesurer les niveaux atteints par les crêtes des vagues pour caler l'altimétrie des viaducs

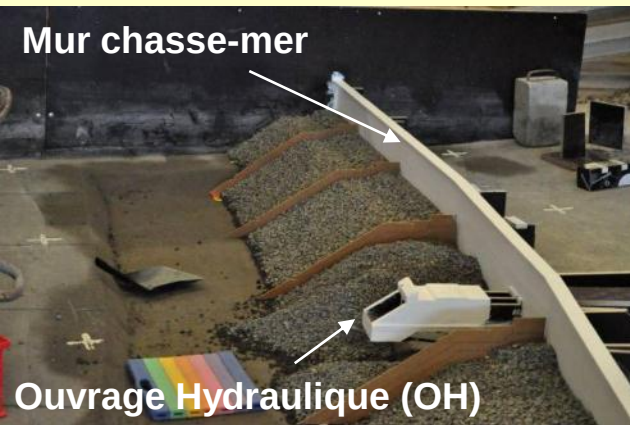


Digue - Modèles physiques

- ▶ 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



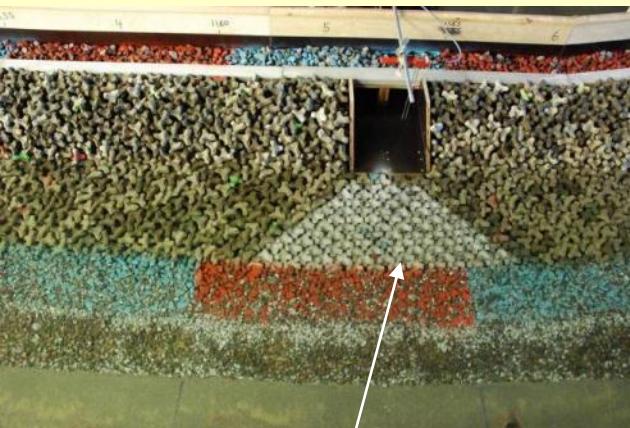
Mise en place du noyau sur gabarit



Mise en place des blocs autour de l'OH



Noyau autour du musoir



Blocs densifiés au droit de l'OH

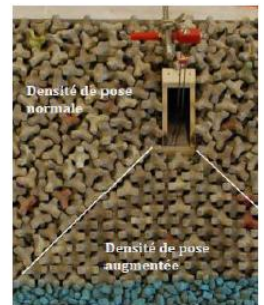
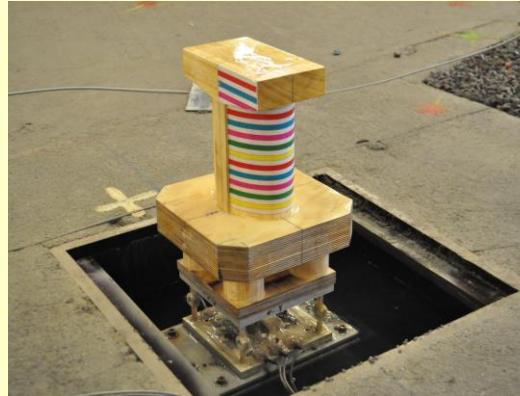


Construction terminée

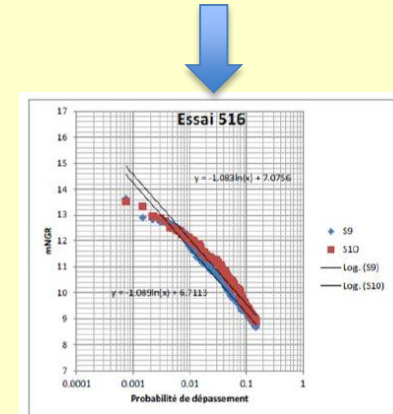
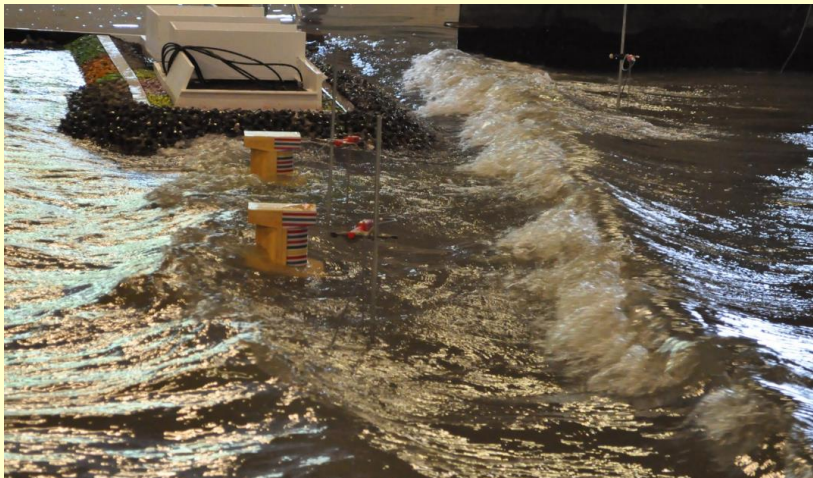
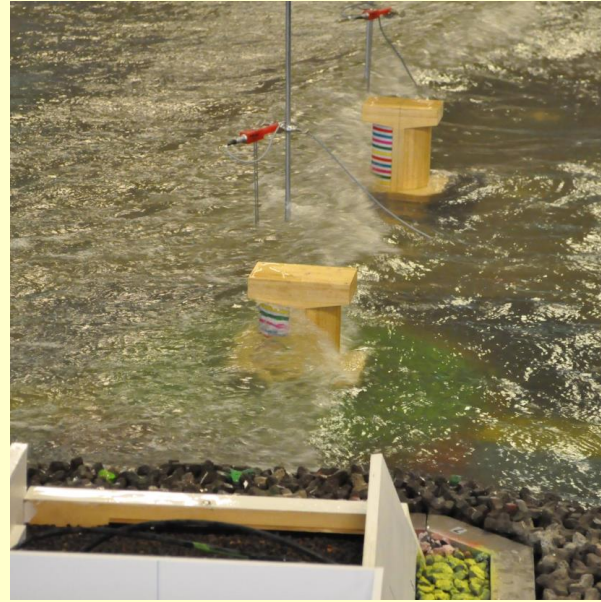


Génération de la houle incidente

Digue - Modèles physiques



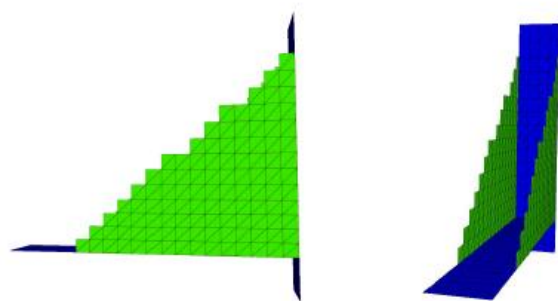
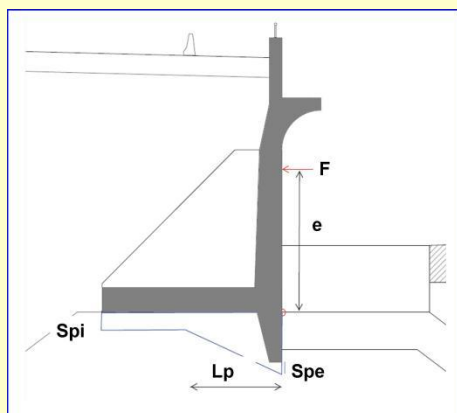
Digue - Modèles physiques



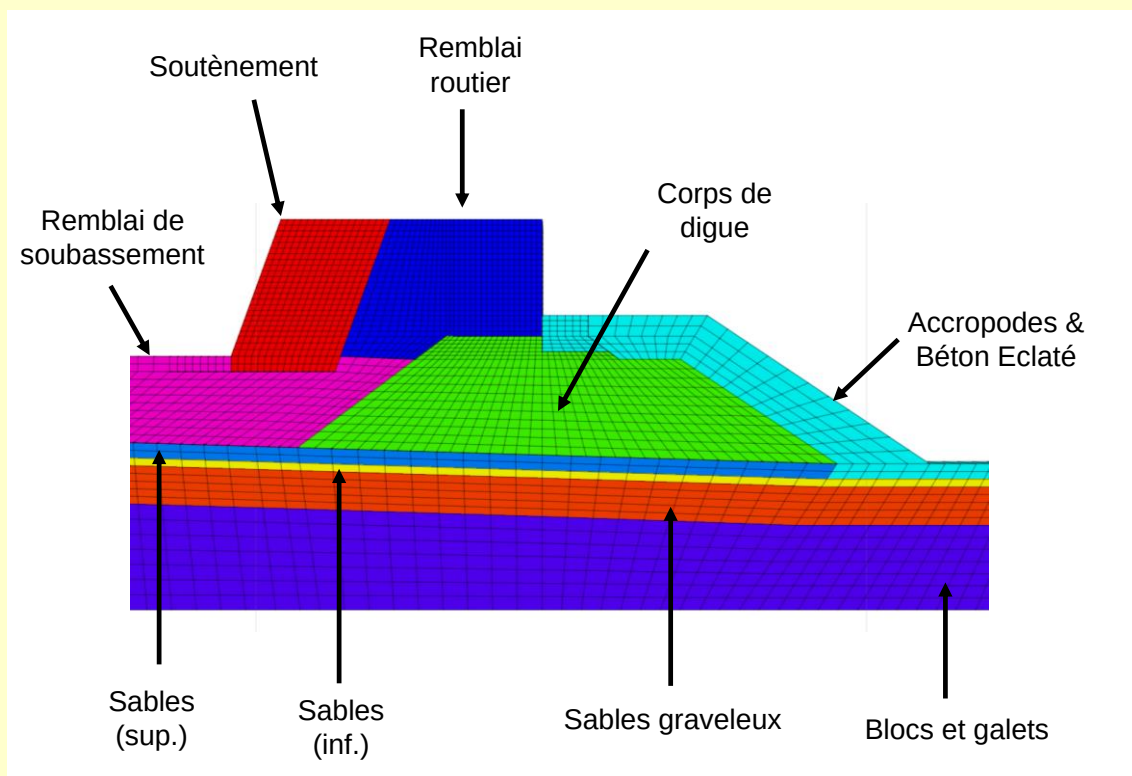
Modélisation de la Digue

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

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



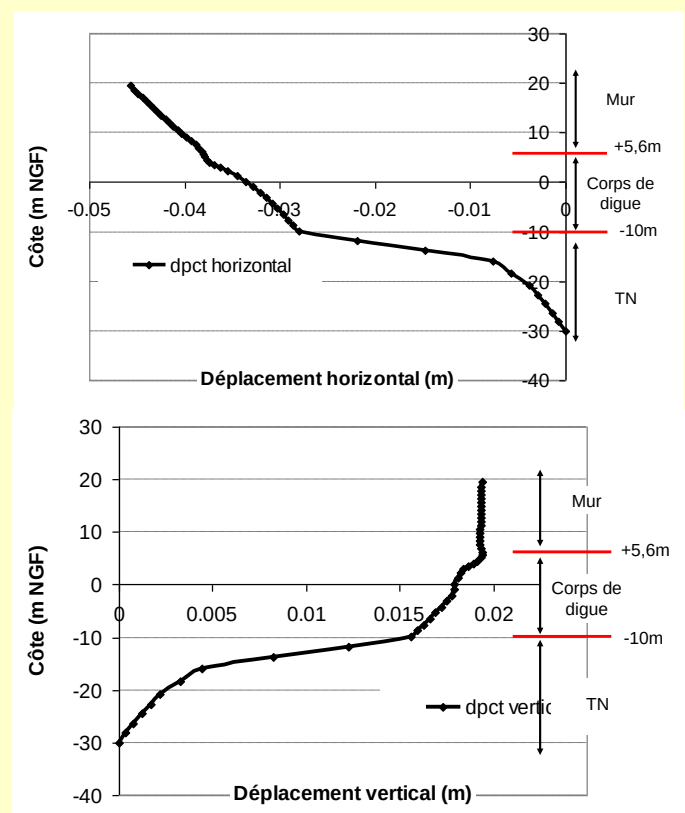
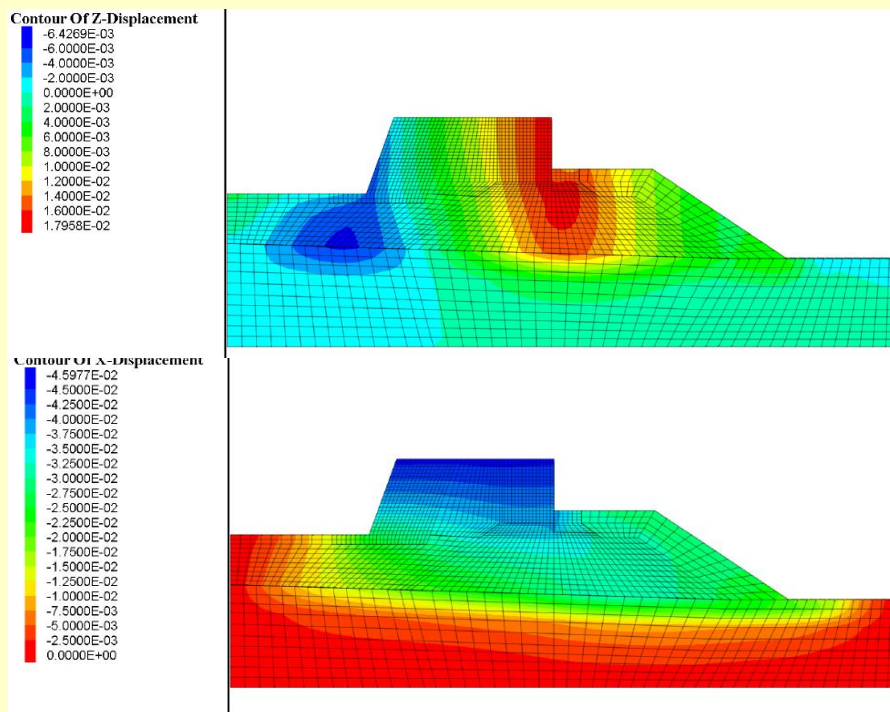
Modèle du mur en L et ses contreforts.



Modélisation de la Digue

Résultats:

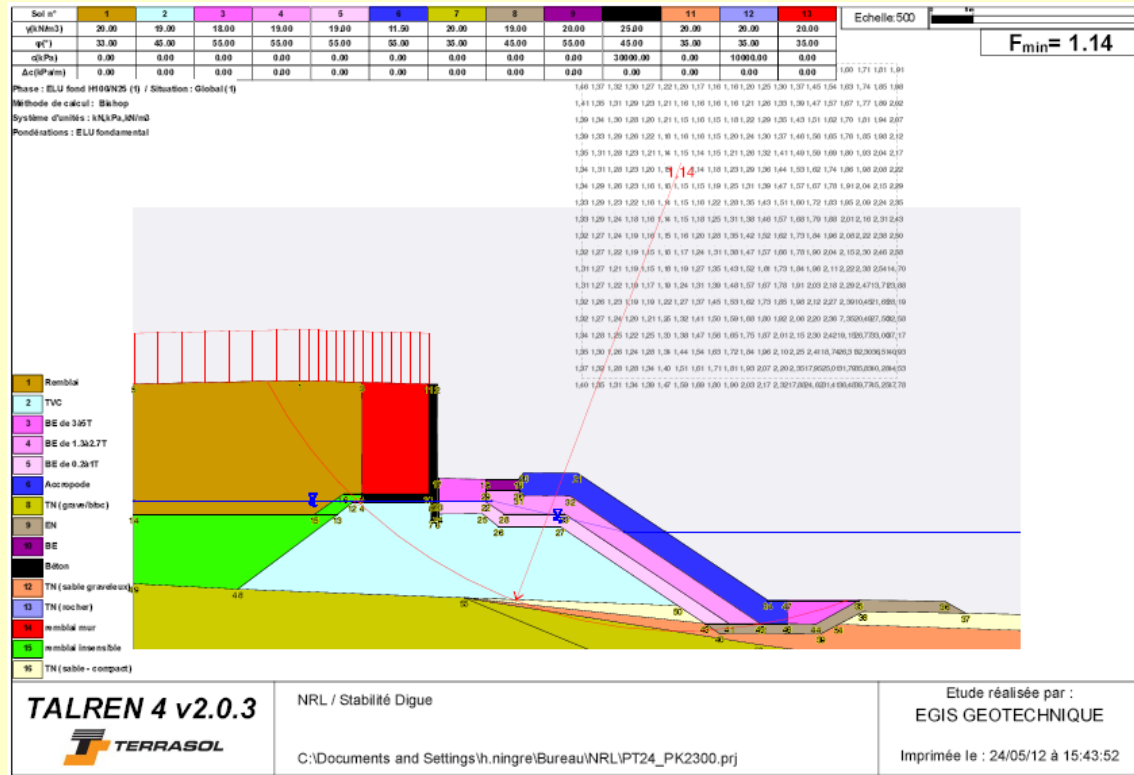
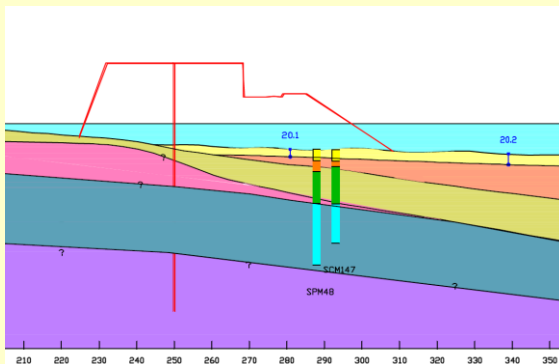
- ▶ Déplacements extrêmes cumulés : 4,5cm en horizontal, 2cm en vertical : principalement localisés dans le terrain naturel
- ▶ Comportement élastique



Géotechnique – modélisation de la Digue

Coefficient de sécurité satisfaisant au grand glissement

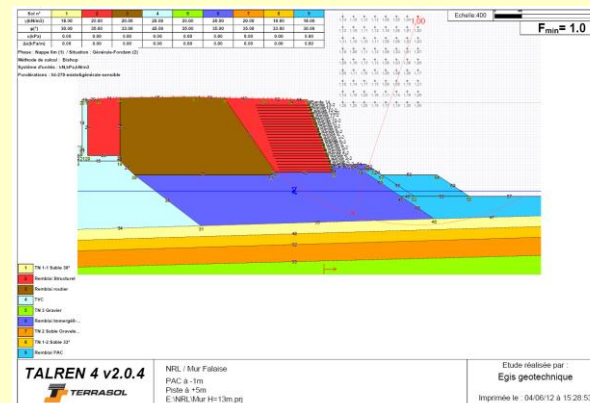
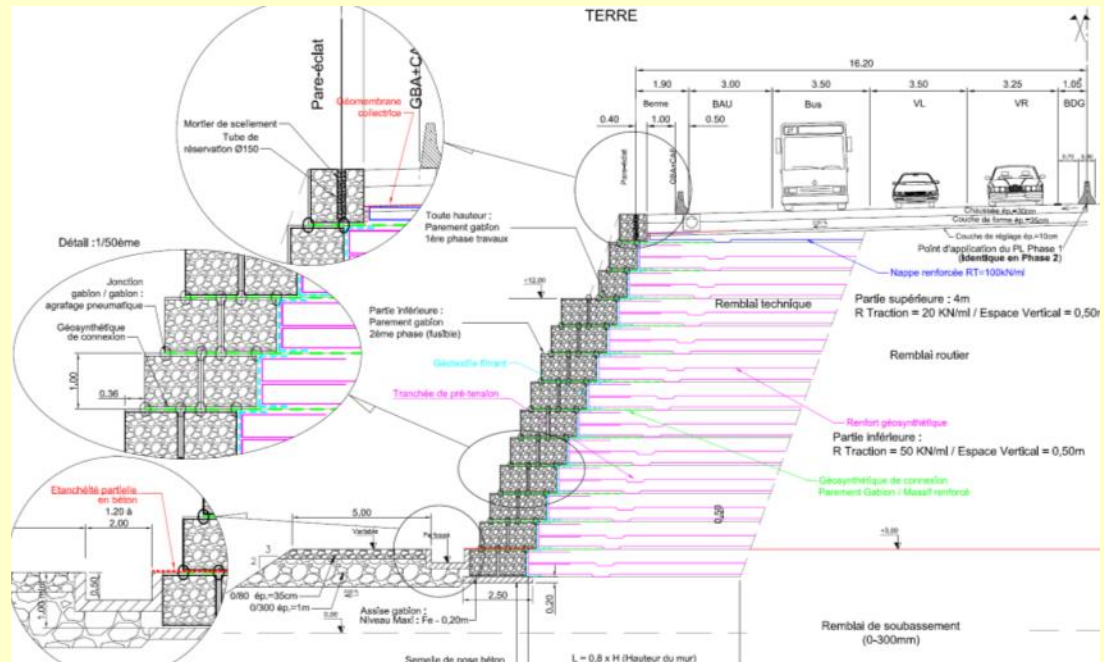
- ▶ Résultats probants $F > 1$ sous conditions accidentelles (houle centennale et séisme)
- ▶ Résultats très probants $F \gg 1$ sous conditions fondamentales



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 – Dignes

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

- ▶ Montant des travaux réceptionnés en juillet 2016 : 45 M€ HT ;
- ▶ Groupement titulaire du marché :



Marché de travaux – Digues

MT5.1 – Digue – 1^{ère} phase :

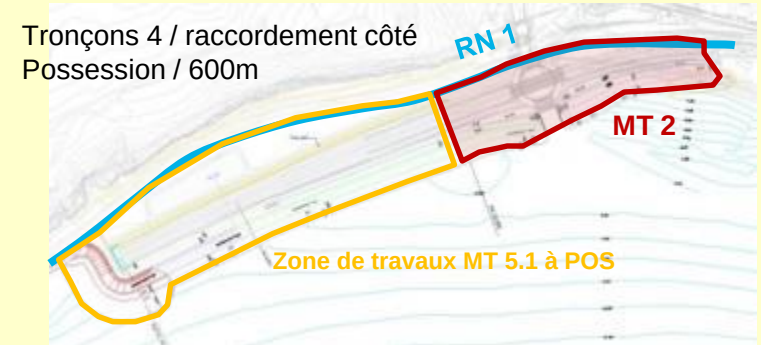
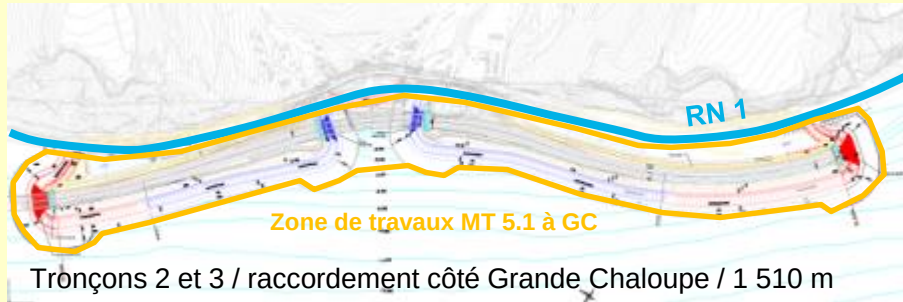
- ▶ Montant des travaux : 438 M€ HT ;
- ▶ Délais global : 57 mois (dont 8 mois de préparation) à partir du 27 janvier 2014;
- ▶ Groupement titulaire du marché :



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



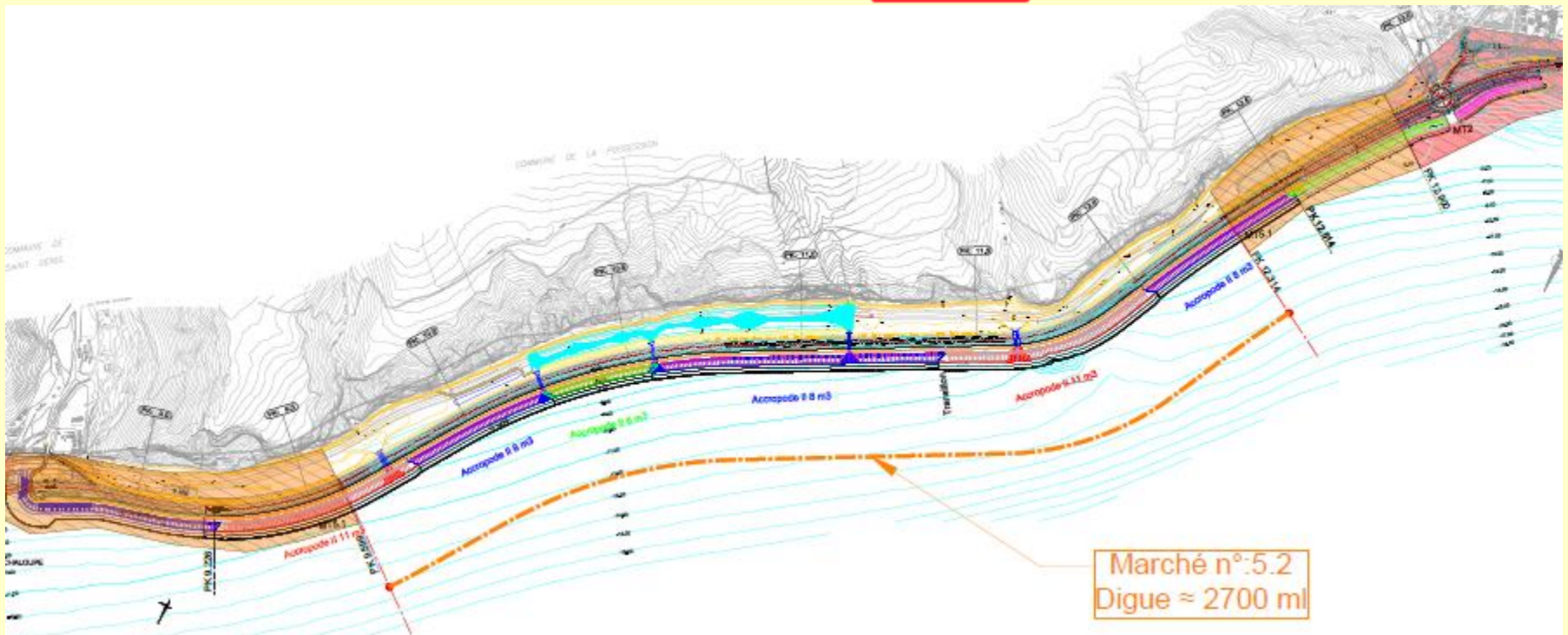
Marché de travaux – Digues



Marché de travaux – Digues

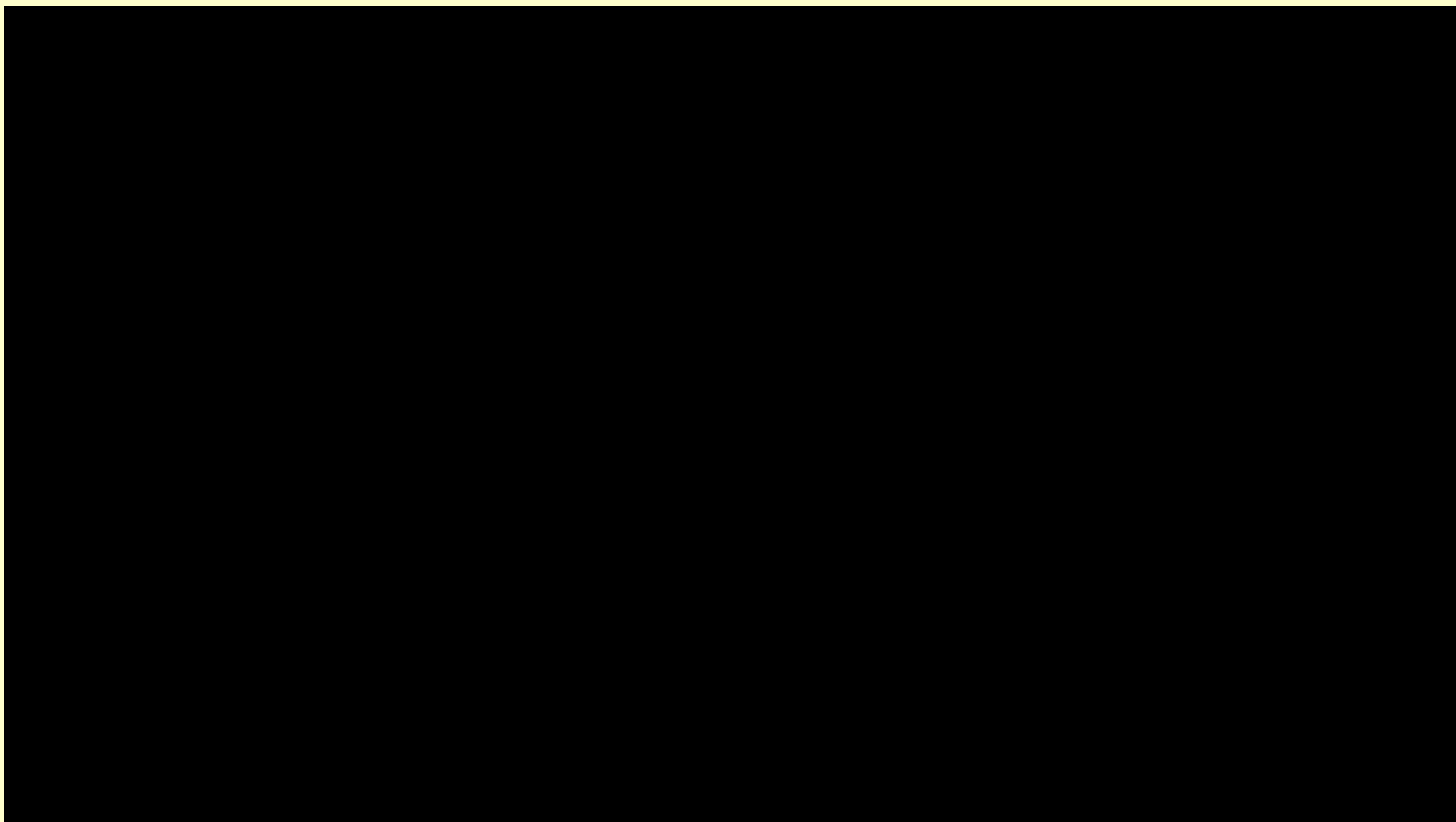
MT5.2 – DIGUE 2^{ème} phase

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



Quelques chiffres

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 pour votre attention