

LES VIADUCS DE LA NOUVELLE ROUTE DU LITTORAL

Thierry DUCLOS - VINCI Construction Grands Projets

Brahim DJESSAS - Bouygues TP

Fahed CHEBBI - Dodin Campenon Bernard

Romain LEONARD - Demathieu Bard



Table des matières

LES VIADUCS DE LA NOUVELLE ROUTE DU LITTORAL	1
1 préambule	3
2 description du projet	4
2.1 tablier	5
2.2 appuis	8
2.2.1 Piles et piles culées	8
2.2.2 Les culées	9
2.3 méthodes constructives	9
3 Enjeux des études d'exécution	10
3.1 Réalisation des études	10
3.2 Enjeux structurels	10
3.2.1 Les fondations	10
3.2.2 La répartition des points fixes	10
4 Sollicitations prédominantes	11
4.1 La houle	11
4.2 Le choc	11
4.3 Les charges d'exploitation	11
4.4 Le vent	11
4.5 La construction	11
5 Analyse transversale	12
6 Analyse longitudinale	12
6.1 Description de la méthode d'étude	12
6.2 Points particuliers des études	13
7 Analyses particulières	14
7.1 cisaillement	14
7.2 voussoirs spéciaux	14
7.2.1 Voussoir sur pile	14
7.2.2 Voussoir sur culée	16
7.3 Piles	17
7.4 études spécifiques à la préfabrication	18
7.4.1 Embases et piles	18
7.4.2 Voussoirs	18
8 Conclusion	18

1 PRÉAMBULE

La Nouvelle route du littoral (NRL) permettra aux habitants de l'île de La Réunion, dans l'océan Indien, de relier rapidement et en toute sécurité Saint-Denis, la capitale à l'est, et son port de commerce situé une vingtaine de kilomètres plus à l'ouest. Elle remplacera l'actuelle route de la corniche à deux fois deux voies située au pied d'une falaise.



Figure 1 : la route actuelle en pied de falaise



Figure 2 : chute de 15 tonnes de pierre le 3/03/2016

Cette route dangereuse fait courir deux types de risques à ses usagers :

- côté mer, exposition aux paquets de mer en cas de forte houle, ce qui arrive fréquemment du fait de l'absence de plateau continental ;
- côté montagne, exposition aux chutes de pierres, malgré la présence de filets de protection.

Ainsi deux mois par an en moyenne, pour protéger les usagers, les autorités ferment une ou deux voies de circulation provoquant de vastes bouchons.

Le projet de la nouvelle route du littoral (NRL) s'étend sur une longueur de 12.5km entre l'entrée Ouest de Saint Denis et La Possession. Il est presque entièrement situé en mer. La future route, parallèle à la côte, permettra de s'affranchir des chutes de pierres mais aussi de la houle, puisqu'elle se situera entre 20 et 30 m au-dessus du niveau de la mer. La chaussée sera nettement plus large car elle permettra une exploitation à 2 fois 3 voies dans un premier temps tout en assurant le passage de circulations douces (piétonnes et cyclistes). A terme un tramway en site propre pourra être installé sur le tablier.

La liaison sera principalement composée d'un viaduc de 5,4 km - il sera le plus long viaduc de France que ce soit terrestre ou en mer, du viaduc de la Grande Chaloupe et d'une série de digues d'une longueur totale de 6,7 km.

Le groupement chargé du viaduc (marché n°3 (MT3) : 715 millions d'euros de travaux) réunit.

Le Dossier de Consultation des Entreprises établie par EGIS maître d'œuvre pour le compte du maître d'ouvrage la Région Réunion comportait deux solutions techniques de base:

- Tablier de hauteur variable et portée 120m constitué d'un mono-caisson à deux âmes ; nervures transversales permettant une épaisseur des encorbellements de 0.22m,
- Tablier de hauteur constante et portée 100m constitué d'un mono-caisson à quatre âmes.

Les fondations de ces ouvrages étaient superficielles pour environ la moitié des piles, et profondes pour l'autre moitié avec des massifs de quatre pieux de 4m de diamètre.

Au cours de la phase d'appel d'offres, le groupement d'entreprises a établi une variante dont les principales caractéristiques techniques étaient les suivantes:

- Préfabrication de l'ensemble des éléments de l'ouvrage
- Tablier de hauteur variable et portée 120m constitué d'un mono-caisson à deux âmes ; encorbellements sans nervures transversales mais précontraints transversalement dans le but de simplifier la préfabrication des voussoirs,
- Elimination des pieux (sauf pour les 2 culées d'extrémité), sous réserve de confirmation par sondages géotechniques complémentaires et avec la possibilité de renforcer les sols au cas par cas.

C'est cette variante technique, présentant des économies substantielles du fait de l'élimination quasi-totale des fondations profondes, qui a été développée par le groupement d'entreprises après l'attribution du marché.

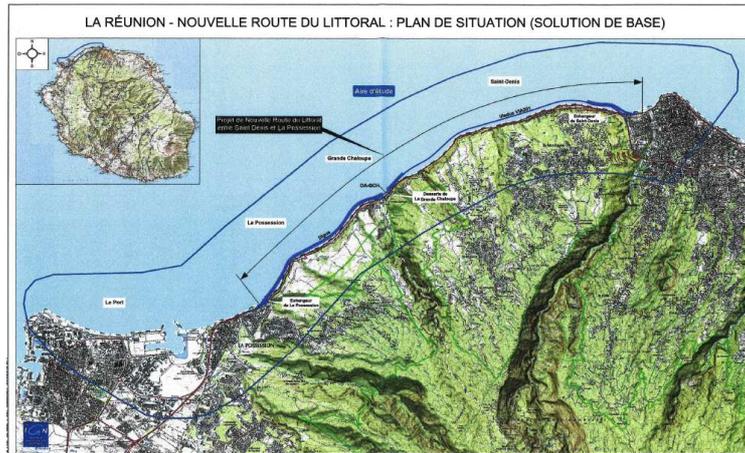


Figure 3 : plan de situation

2 DESCRIPTION DU PROJET

Le marché n°3 ne concerne que le "Viaduc en mer" (viaduc de 5409 mètres). Il couvre la réalisation des piles en mer, des culées, et des tabliers en béton précontraint.

La partie viaduc de la NRL est située essentiellement en mer à l'écart de la falaise. Elle est conçue pour une durée de vie de 100 ans, notamment vis-à-vis de la contrainte maritime (houle cyclonique). Elle est également conçue pour permettre l'intégration ultérieure (mode 2) d'un transport collectif en site propre (TCSP) routier ou ferroviaire (de type tramway).

L'ouvrage est soumis à des aléas météorologiques (la houle, les cyclones, les alizés), des aléas sismiques et les chocs de bateaux.

Le viaduc est constitué de 7 tronçons indépendants. Les tronçons ont des longueurs variables 771.285 m pour les tronçons de rive (1 et 7) et 773.286 m pour les tronçons intermédiaires (2 à 6), entre axe d'appui d'extrémité de tronçon.

Pour les 7 tronçons, les travées principales sont identiques. Leur longueur est de 120.0m. Toutes les travées de rive sont identiques et leur longueur fait 84,643m.

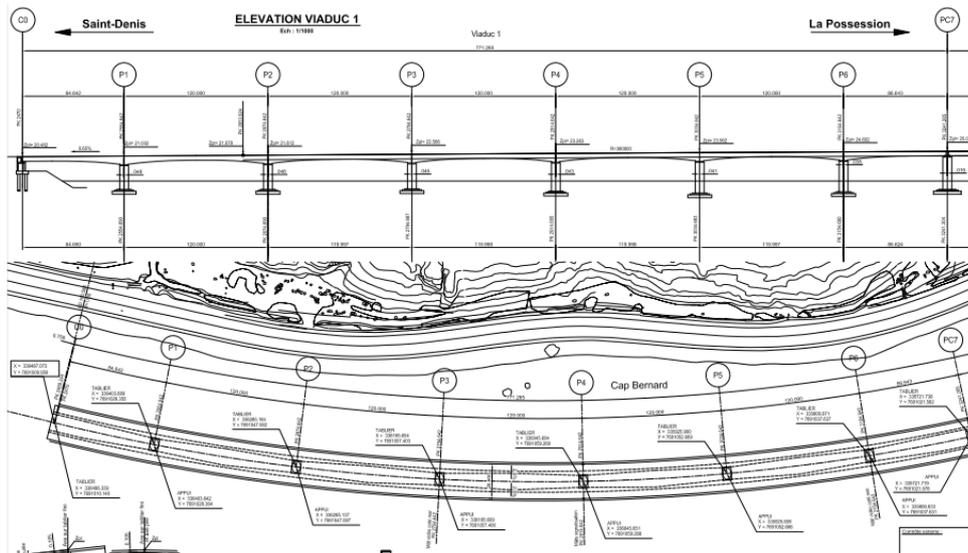


Figure 4 : élévation et vue en plan du viaduc 1 – Est-

Les appareils d'appui d'extrémité de deux tronçons adjacents sont distants de 4.0m sur les piles culées. La longueur totale de l'ouvrage entre axe d'appareils d'appui d'extrémité est alors :

$$2*769.285+5*769.286+6*4 = 5409.000 \text{ m}$$

L'ouvrage est situé entre les PK2470 (axe d'appui C0 côté Saint Denis) et PK7879 (axe C49 côté La Possession). Il présente un sommet au PK 5123.883 et une altitude de z=29.705m.

Le profil en long est défini sur l'axe du viaduc. La vue en plan est une succession de courbes dont la plus petite présente un rayon de courbure de 1500 m.

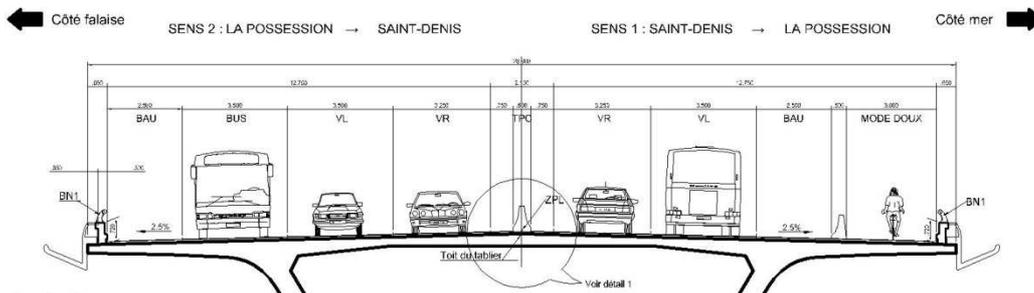
La ligne de référence choisie pour définir le profil en long est prise au niveau de la chaussée finie.

Les chaussées et le hourdis supérieur ont un profil transversal en toit centré sur l'axe de référence, correspondant à un dévers constant de $\pm 2.5\%$ de part et d'autre de l'axe.

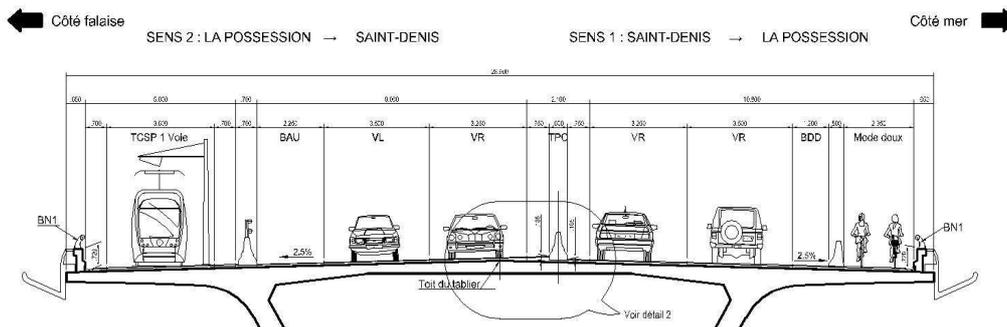
Durant la vie de l'ouvrage, le maître d'ouvrage a prévu trois types d'exploitation se succédant chronologiquement et se terminant à terme par l'implantation d'un tramway en site propre.

Ces trois types fonctionnels sont figurés ci-dessous. Le premier mode ne prévoit que de la circulation routière avec une voie bus dédiée côté falaise.

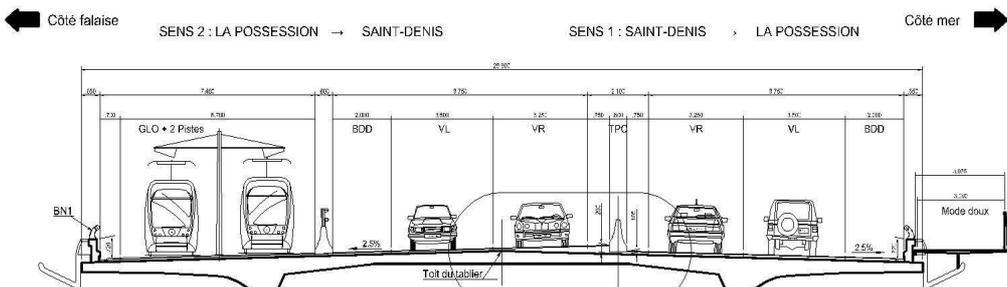
Mode 1 - Figure 5 : coupe fonctionnelle à la mise en service



Mode 2a (1 voies TCSP Tramway) : Figure 6 : coupe fonctionnelle Tramway en site propre en circulation alternée



Mode 2b (2 voies TCSP Tramway) : Figure 7 : coupe fonctionnelle à terme avec un TCSP 2 voies.



Le mode 2b & 2 voies TCSP Tramway correspondra à la phase finale de l'aménagement avec l'introduction latérale coté océan d'une passerelle restituant le franchissement des modes doux.

2.1 TABLIER

Chaque tablier est constitué d'un seul caisson à deux âmes en béton précontraint. Il est totalement préfabriqué, et les voussoirs conjugués. Il est assemblé suivant la méthode de construction par encorbellements successifs à l'aide d'une poutre de lancement de 278m de long s'appuyant sur 3 points d'abord par 2 pylônes, 1 sur la pile du fléau en cours de construction et le 2^{ème} à l'axe du voussoir sur pile (VSP) du fléau précédent puis d'une béquille positionnée sur la pile située en aval du fléau en cours de construction.

Le tablier est de hauteur variable de 7.3m sur appui (VSP) à 3.8m au milieu de la travée (à la clé) suivant une loi polynomiale en puissance 2,5.

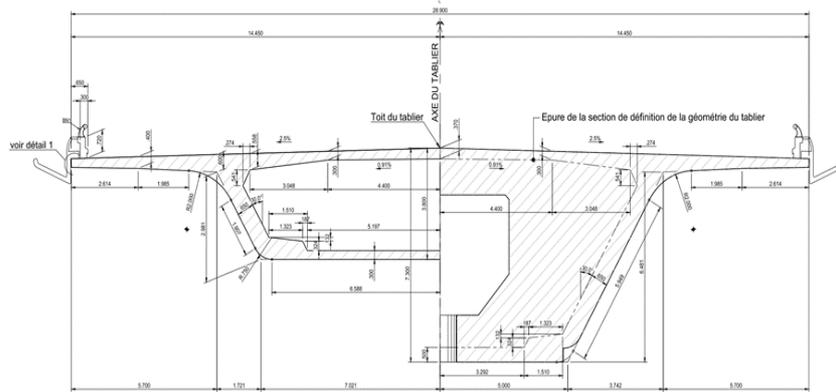


Figure 8 : demi-coupe à la clé et sur pile

Le hourdis supérieur est d'épaisseur variable de 0,3m en extrémité d'encorbellements à 0,6m à l'enracinement sur le gousset d'âme, puis de 0,558m à 0,3m en fin de gousset pour revenir à 0,37m en milieu du hourdis central. L'extrados de ce hourdis suit le profil en toit de la chaussée pendant que l'intrados du hourdis central reste horizontal. Il est précontraint transversalement au moment de la préfabrication.

Les âmes ont une épaisseur de 0,65m. Elles sont inclinées de 30° sur la verticale ce qui est peu commun dans ce type d'ouvrages et ce qui conduit à des largeurs de hourdis inférieur variables de 14,042m à la clé à 10m sur appui. Son épaisseur est variable longitudinalement de l'axe du VSP au joint J8 (entre les voussoirs 7 et 8) de 0,5m à 0,3m suivant une loi polynomiale en puissance 2,5. Il reste d'épaisseur constant à 0,3m du voussoir 8 au voussoir 14.

Les goussets inférieurs sont conçus pour éviter toute intrusion de la précontrainte éclisse dans la partie inférieure des âmes. De même en partie supérieure de l'âme tous les ancrages de précontrainte de fléau sont placés de part et d'autre des cadres d'âmes et les gaines sont positionnées pour ne jamais s'introduire à l'intérieur des cadres. De cette manière l'ensemble des cadres présente une forme régulière assujettis à la seule variation de la hauteur du tablier.

La précontrainte est de type mixte, c'est-à-dire en partie intérieure pour assurer la stabilité en construction, et extérieure pour les phases d'exploitation. Deux déviateurs sont donc introduits par travée courante de même qu'en travées de rive.

Les dimensionnements en phase d'exploitation tiennent compte des modes d'exploitation décrits : mode 1, 2a et 2b.

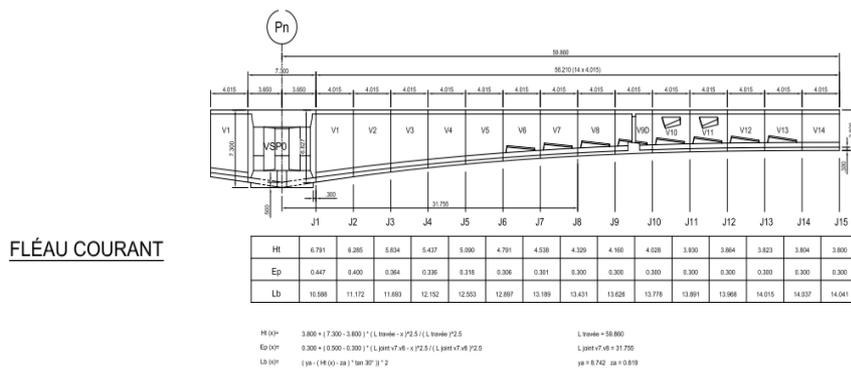


Figure 9 : segmentation en travée courante (demi-fléau)

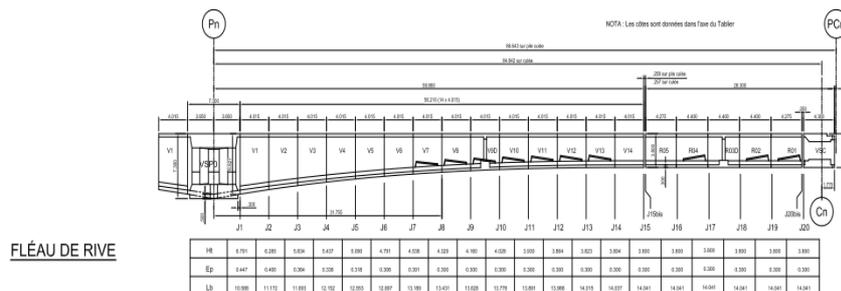


Figure 10 : segmentation en travée de rive

La segmentation a été choisie pour s'accorder aux capacités des méthodes de levage à la fois sur la zone de préfabrication (pont roulant) et sur la zone de pose (barge et lanceur). La longueur courante des 14 voussoirs est de 4,015m. Le voussoir de pile a été décomposé en trois parties pour une longueur de 7,30m. Cette segmentation répond à la contrainte des capacités de levage sur le site de préfabrication afin de permettre le coulage en conjugaison du voussoir n°1. Ces trois parties sont ensuite assemblées sur l'aire de préfabrication. Chaque demi-fléau fait ainsi 59,86m de long. Le joint maté de clavage fait 0,28m d'épaisseur.

VUE 3D

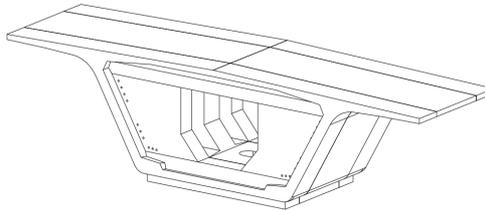


Figure 11 : vue 3D du VSP

En travée de rive le voussoir sur culée ou de pile culée, long de 4,30m, réalisé en un seul élément, est assemblé par un joint de 0,25m aux cinq voussoirs de rive longs respectivement de 4,275m, 3x 4,400m, 4,275m soit 26,30m. Cet ensemble est lié au premier et au dernier fléau de chaque tablier par un joint de 0,258m.

Le VSP est complété sur la zone de préfabrication avec les 2 premiers voussoirs V1 et V2 qui y sont assemblés de chaque côté pour constituer le méga VSP (MVSP) dont il sera question dans le chapitre des méthodes de construction. Son poids est de 2370 tonnes.

Le câblage de précontrainte du fléau est constitué de 20 câbles actifs par âme en 31T15S complétés de 2 gaines vides.

Les câbles éclisses inférieurs sont en 37T15S. Au nombre de 7 par âme en travée courante du voussoir V7 au voussoir V13, ils sont complétés par 1 câble éclisse supérieur au voussoir V11. Chacune de ces familles comprend une gaine vide. (voir figures 10, 8, 9)

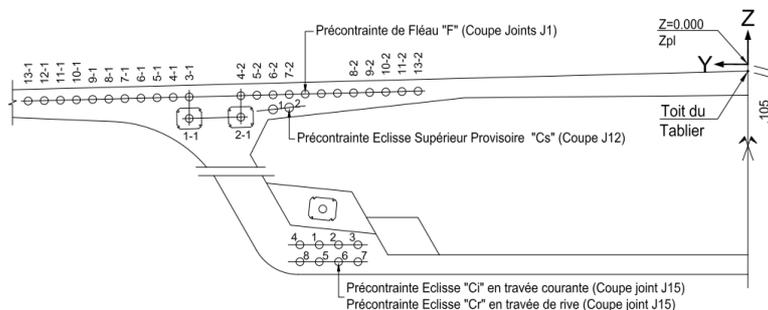


Figure 12 : principe général du masque de précontrainte

Enfin les câbles extérieurs sont aussi en 37T15S. On en trouve 6 par âme dans toutes les travées (y compris les travées de rive).

Transversalement, les câbles transversaux sont des monotorons à ancrage 4T15S, mis en place lors de la préfabrication et suivant un phasage régulant et limitant les effets différentiels de flèches entre voussoirs afin de conserver la conjugaison.

Chaque voussoir est muni de clés de conjugaison réparties essentiellement dans les âmes.



Des clés sont aussi disposées dans les hourdis mais en moindre densité pour faciliter la mise en place et pour limiter les effets de touches de pianos pouvant générer des efforts locaux trop agressifs sans apporter de contribution notable à la précision de la conjugaison.

Figure 13 : répartition des clés dans les âmes



2.2 APPUIS

Seules les culées d'extrémités, C0 et C49 sont coulées en place. Les appuis en mer, fondations, piles et piles-culées sont préfabriqués en béton armé puis mis en place depuis une barge de travail de type off-shore. La capacité de transport et de levage de la barge est de 4800 tonnes.

2.2.1 Piles et piles culées

Les piles et piles culées sont fondées sur des semelles superficielles circulaires de 20 ou 23m de diamètre suivant le type d'appui.

Chaque viaduc comporte un seul point fixe. La répartition des points fixes se traduit par le même nombre de travée de part et d'autre du joint de manière à obtenir sur chaque joint entre tablier un souffle assez voisin eu égard aux différences de rigidité inhérentes aux conditions de fondation. Les piles supportant les points fixes sont fondées sur des semelles de 23m de diamètre. Il en est de même des piles culées sur lesquelles s'appuient les viaducs et pour lesquelles les descentes de charge sont plus faibles alors que les efforts appliqués (chocs ou houle) sont similaires à ceux des piles courantes.

Ces fondations s'appuient sur des sables ou des zones rocheuses. Certaines de ces zones sableuses présentes des faiblesses et sont consolidées par la méthode de vibroflottation.

Ces appuis ainsi que les fondations sont préfabriqués en deux parties. La première partie dite « embase » comprend la semelle et la partie de fût permettant d'atteindre une cote d'environ 3 m au-dessus du niveau d'eau. La seconde partie dite « tête de pile » comprend la partie haute du fût et son chevêtre.

Les deux parties sont reliées entre elles par un joint de clavage de 1,5 m de hauteur.

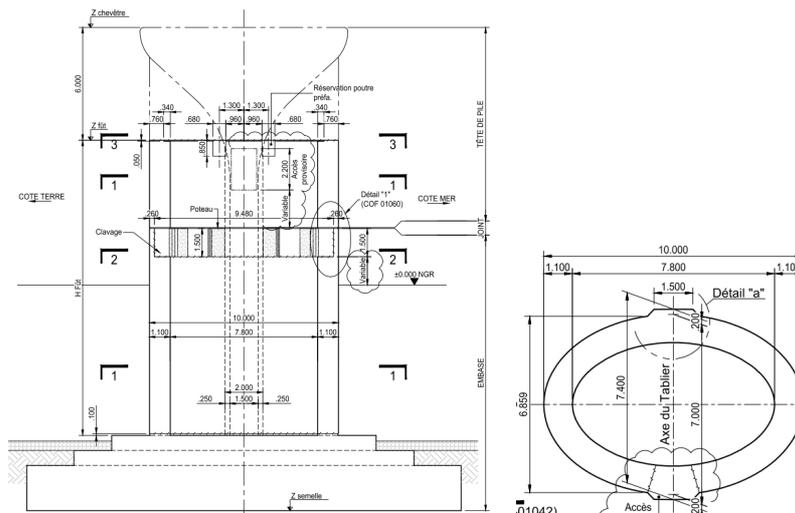


Figure 14 : coffrage transversal des piles et des fondations et coupe 1-1 en section courante

Les semelles circulaires font 2,40m d'épaisseur. Elles sont surmontées de 2 tabourets de 0,8 m d'épaisseur chacun. Le fût de pile est creux et sa forme est elliptique de grande base 10 m et de petite base 7,4 m. L'épaisseur du voile fait 1,1 m. Une rainure en excroissance de 1,5 m de large est placée le long du fût sur chaque face de la grande base de l'ellipse afin de respecter le projet architectural.

Le joint de clavage entre les 2 parties de fûts préfabriqués comporte un voile de périphérie de 26 cm d'épaisseur placé sur la première partie de fût avec des plots d'appui permettant le réglage de pose de la 2^{ème} partie.

En tête, les chevêtres, eux aussi préfabriqués avec la deuxième partie de fût présentent une face sous le voussoir sur pile qui est une ellipse tronquée de petite base 7,4 m, pour 11 m sur la grande base s'appuyant sur un arc de cercle de rayon 50 m. la transition entre la forme ellipsoïdale du fût au chevêtre se réalise par l'intermédiaire de l'épanouissement de la rainure du fût qui s'élargit de 1,5 m à 11 m. Le cycle de construction place un joint de reprise en tête de fût. Un plancher préfabriqué est mis en place pour bétonner le chevêtre.

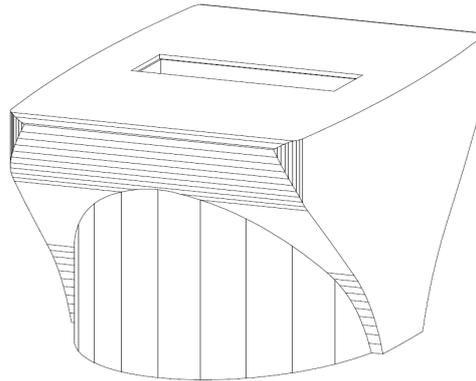


Figure 15 : Axonométrie du chevêtre de la pile fixe, hors bossages

La tête de pile comprend les appareils d'appuis, les réservations nécessaires à la construction (zones de cales et passage des câbles de clouage et levage). Une baignoire de 4,60 m de long et 1,6 m de largeur est placée à l'axe pour les besoins de visite et de maintenance.

Les appareils d'appuis sont de type "appareil d'appuis à pot". L'élément inférieur de la pile, embase, pèse au maximum 4500 t. la partie supérieure pèse au maximum 2500 t.

2.2.2 Les culées

Les culées sont fondées sur 26 pieux de diamètre Ø1000 qui subissent des déplacements de terrain significatifs à cause de l'important remblai monté après leur réalisation. Les efforts de $g(z)$ sont de l'ordre du cm et le frottement négatif de l'ordre de la centaine de tonnes.

Plus généralement, celles-ci intègrent les dispositifs de recueil des eaux des corniches caniveaux ainsi que les réservations pour le passage des réseaux.

2.3 METHODES CONSTRUCTIVES

Pour les méthodes de construction levage et pose, celles-ci seront décrites ultérieurement car les outils sont toujours en phase d'études et de mise au point.

A l'appel d'offres, le groupement a proposé une solution entièrement préfabriquée. Des outils de transports et de levage (barge) ont été étudiés ainsi qu'une poutre de lancement.

Les viaducs sont réalisés par assemblage des voussoirs par la méthode dite de l'encorbellement successif. Les voussoirs sont brélés au moment de leur pose puis précontraints par des câbles dits de fléaux.

Pour réaliser cet assemblage sur site, tous les éléments des viaducs sont préfabriqués.

Les installations de préfabrication sont déjà opérationnelles et s'étendent sur plusieurs sites de la ville de Le Port.



Figure 16 : site de préfabrication des piles

Après séchage sur une aire de stockage les voussoirs seront acheminés sur le site par un fardier. La poutre de lancement prendra alors en charge ces voussoirs.



Cette poutre de lancement de 278m de long permettant la réalisation des fléaux par encorbellements est réalisée en Italie par Cimolai et préassemblée près du site de préfabrication des voussoirs.

La méthode d'approvisionnement se fera par la culée C49 coté La Possession. Le schéma ci-dessous présente la poutre de lancement vue depuis la route du littoral actuelle dans la phase de démarrage d'un fléau :

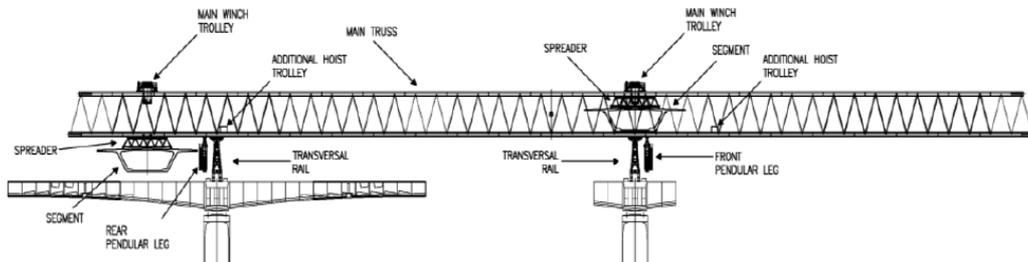


Figure 17 : principe de la poutre de lancement

Les voussoirs sont acheminés par le fardier sur la partie du tablier déjà clavé, la construction ayant démarrée par l'appui P48.

3 ENJEUX DES ETUDES D'EXECUTION

3.1 REALISATION DES ETUDES

Le groupement a préféré mettre en place une structure d'étude des tabliers regroupant les moyens des différents bureaux d'études des entreprises plutôt que de chercher une sous-traitance. Cette option n'a pas été retenue pour des raisons d'opérationnalité. Le fait de disposer des moyens propres des entreprises permet d'assurer une parfaite continuité des études et une plus grande réactivité auprès du chantier lors de la mise au point des phases d'exécution.

Cette structure d'étude a été regroupée sur un plateau (environ une vingtaine de personnes) composée pour ¼ de projeteurs et pour ¾ d'ingénieurs.

Tous les calculs ont été réalisés sur un même logiciel (Sofistik) afin d'assurer une meilleure qualité des études.

3.2 ENJEUX STRUCTURELS

3.2.1 Les fondations

La taille des fondations constituait un enjeu de taille car elle conditionnait la dimension de la barge, celle-ci devant être conçue, réalisée et opérationnelle en deux ans.

Le démarrage du projet correspond à la recherche d'optimisation concernant la structure, pouvant impacter son schéma statique et donc les descentes de charges, et à la mise au point des hypothèses de calcul, en particulier les hypothèses de sol et les méthodes de calcul.

Dans ce contexte, à partir des données disponibles au marché nous avons établis les descentes de charges des différents viaducs et procédés aux vérifications géotechniques des fondations, afin de confirmer le plus rapidement possible les dimensions des semelles.

3.2.2 La répartition des points fixes

Au tout début de la phase d'études, la définition des conditions d'appuis en tête de pile a été l'objet de discussions. En effet les efforts de houle comme les efforts du choc pouvaient justifier de retenir plus d'un point fixe dans le sens longitudinal. La répartition des effets engendrés par ces efforts assez significatifs sur plusieurs piles pouvait être bénéfique.

Cependant les conditions géotechniques d'appuis étaient très différentes suivant les zones et créaient de grande variabilité dans les raideurs. De plus chaque viaduc se retrouvait sur une zone de raideurs spécifiques. En fait il y avait de fortes chances qu'une telle conception avec plus d'un point fixe conduise à des conceptions propres à chaque viaduc. Cette stratégie a été abandonnée pour revenir à une conception avec un seul point fixe par viaduc.

4 SOLLICITATIONS PREDOMINANTES

4.1 LA HOULE

La houle est décrite par deux actions distinctes d'une part la houle supérieure à 2m dite cyclonique, qui représente 1631t appliquées au niveau 0NGR, d'autre part la houle inférieure à 2m dite houle fréquente qui peut être concomitante au choc de bateau, qui représente 353t appliquées au niveau 0NGR.

4.2 LE CHOC

Le choc de bateau retenu pour l'étude de l'ouvrage représente une force de 3000t exercé sur la pile dans n'importe quelle direction, et appliquée au niveau +4.2NGR.

4.3 LES CHARGES D'EXPLOITATION

La particularité de l'étude en phase d'exploitation consiste en la prise en compte des deux modes d'exploitation décrits précédemment conduisant à installer une précontrainte additionnelle lors de l'initialisation du mode 2.

On passe en effet d'un mode d'exploitation purement routier à un mode mixte, tramway et routier. Les charges routières sont celles de l'Eurocode 1 : LM1, LM2 piétons, complétées par le convoi exceptionnel C2. Le tramway pris en compte pour le mode 2 est de type Alstom Citadis, représentant 132t pour un convoi composé de deux rames. Alors l'effort de freinage cumulé du tram et des charges routières représente un effort de 1,17MN.

Les autres charges d'exploitation sont la température (+17/-15°C pour les variations uniformes de température, par rapport à une température de référence 22°C, et +9.6°C/-6°C pour le gradient thermique).

4.4 LE VENT

La Réunion étant soumise aux cyclones, l'ouvrage est donc soumis à l'action du vent cyclonique.

Cette action est importante du point de vue de l'ouvrage en service, mais elle produit encore plus d'effet sur l'ouvrage en construction, alors que celui-ci n'est pas dans sa configuration définitive.

La mise au point des efforts de vent a été réalisée avec l'aide du CSTB sur maquettes physiques et numériques.

4.5 LA CONSTRUCTION

Les charges en construction sont principalement gouvernées par les outils mis en œuvre :

- le fardier transporte les voussoirs de la culée jusqu'au lanceur. Il représente une charge de 414 tonnes répartie sur 18 essieux et circule sur le tablier en construction.

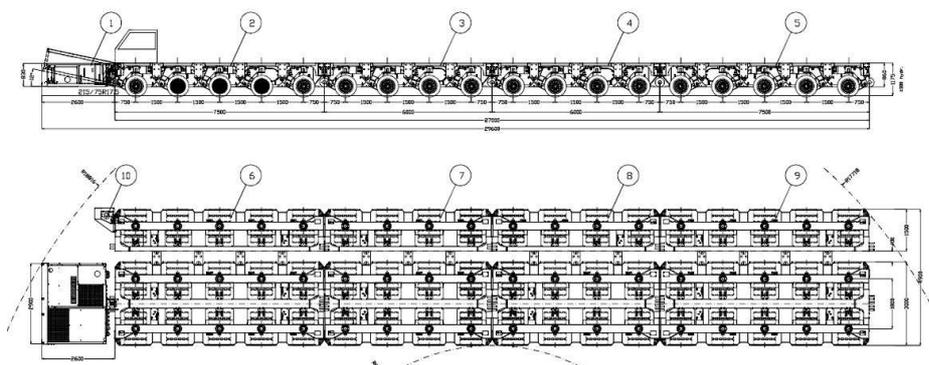


Figure 18 : représentation du fardier

- le lanceur, mesure 278m de long et pèse 2400t. Il surplombe l'ouvrage de 11m et mesure 11m de hauteur. Il est appuyé sur deux pylônes en phase de pose et est équipé de deux béquilles supplémentaires pour permettre son déplacement le long de l'ouvrage. Il est source de charges importantes appliquées directement par les pylônes sur les VSP avec des excentres transversaux allant jusqu'à 5m. Il transmet également par les deux pylônes un effort de vent important compte tenu de sa grande surface offerte au vent, cet effort pouvant être très significatif pour les piles pendant les phases provisoires.



- la barge. Elle ne constitue pas directement une charge Mais le levage et la manutention des éléments préfabriqués, que ce soit les voussoirs, les têtes de piles ou les embases, engendrent des sollicitations inhabituelles sur ces éléments.

5 ANALYSE TRANSVERSALE

Compte tenu de la grande largeur du tablier, l'analyse transversale du tablier a nécessité des approches de calcul spécifiques afin de pouvoir apprécier à la fois :

- La distribution des efforts transversaux dans le caisson (fonctionnement en « cadre »)
- L'interaction forte entre la flexion longitudinale et la flexion transversale
- La prise en compte du trainage de cisaillement et l'appréciation qualitative des spécificités liées à la diffusion de la précontrainte dans des tabliers de grande largeur.

A cet effet, une modélisation 3D coques a été réalisée avec le logiciel Sofistik. Trois travées de 120m ont ainsi été modélisées. Un travail de modélisation des nœuds des hourdis sur les âmes a été réalisé pour assurer un fonctionnement cohérent entre les âmes et le hourdis.

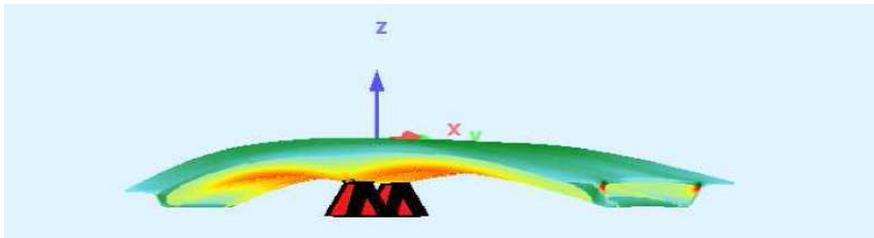


Figure 19 : fléau extrait du modèle 3D coque – compression longitudinale

Du fait que le phasage n'est pas pris en compte, l'effet des charges permanentes a nécessité là aussi une analyse soignée pour pouvoir exploiter les résultats entre autre de l'analyse du comportement tridimensionnel. Cette analyse a permis de mettre en évidence un couplage entre le comportement longitudinal et transversal, notamment du fait de la variation de hauteur du hourdis inférieur et des poussées au vide générées par les compressions.

De plus des efforts normaux transversaux liés au comportement en cadre de la structure ont été mis en évidence dans les hourdis.

Enfin compte tenu de la très grande largeur du tablier, le trainage de cisaillement induit une répartition non homogène des contraintes normales longitudinales dans le tablier. Ce phénomène a pu être apprécié par comparaison des contraintes normales longitudinales induites sous le poids propre et la précontrainte longitudinale obtenues d'une part sur un modèle filaire basé sur des éléments de poutre 3D, et celles obtenues sur le modèle surfacique basé sur des éléments de coques 3D.

Des différences au niveau des contraintes normales principalement dans le hourdis supérieur et le hourdis inférieur au niveau de l'encastrement avec les âmes a permis de définir des marges à prendre en compte, vis-à-vis des critères de vérifications des contraintes normales basées sur le modèle filaire longitudinal.

6 ANALYSE LONGITUDINALE

6.1 DESCRIPTION DE LA METHODE D'ETUDE

Les analyses de flexion longitudinale ont été réalisées en phase d'exploitation du mode1 et 2 et en phase de construction.

Pour cela, des modèles spécifiques ont été réalisées pour étudier ces phases. Bien que ces modèles soient distincts, toute la géométrie, la numérotation, les conventions de signe, la précontrainte sont identiques. Une séparation des modèles a été nécessaire pour les alléger.

Le bureau d'étude s'est en premier lieu consacré à l'étude de la phase d'exploitation. Pour ce modèle, un phasage simplifié a été retenu pour obtenir les bonnes répartitions des charges permanentes de poids propre sans s'encombrer d'un grand nombre de phases.

Un modèle beaucoup plus détaillé a été réalisé pour l'étude des phases de construction.

6.2 POINTS PARTICULIERS DES ETUDES

Des points particuliers ont été analysés pour la flexion longitudinale en construction.

- Le passage du fardier sur les parties déjà réalisées et rendues continues du tablier
- Travées de rive suspendues

Les travées de rive de la NRL composées de 5 voussoirs seront suspendues à la poutre de lancement pendant la construction.

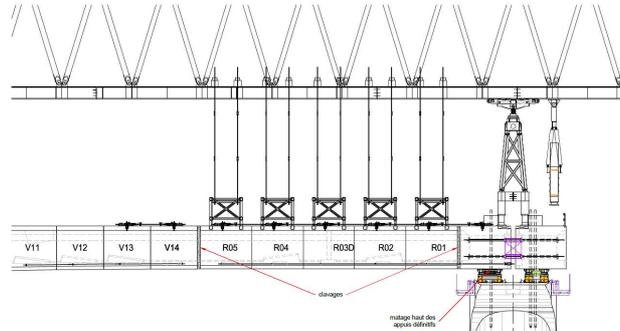


Figure 20 : phase de réalisation de la fin de travée de rive – voussoirs suspendus

Certains câbles de précontrainte sont mis en tension pendant la suspension de ces voussoirs. On alterne les phases de mise en tension et de relâchement des suspentes pour éviter les tractions dans le béton en fibre supérieure et inférieure des voussoirs suspendus.

- Double clavage en travée de rive

Les travées de rive sont reliées au reste de l'ouvrage par deux clavages. Le premier se trouve entre le fléau existant et les voussoirs de rive suspendus et le second entre le VSC/VSPC et les voussoirs suspendus. Ce second clavage sert à corriger la géométrie de l'ouvrage.

- Câble éclipse provisoire supérieur

Le passage du fardier qui achemine les voussoirs sur le viaduc pendant la construction crée de la traction en fibre supérieure sur une travée adjacente. Cela a impliqué la mise en place d'une paire de câble de précontrainte éclipse provisoire (37T15) dans le hourdis supérieur.

- Phasage d'une travée courante

On détaille ci-contre le phasage d'un clavage d'une travée courante :

- 1) Pose voussoirs V7 à V14

Brèlage provisoire inférieur et supérieur (Brèlage inférieur sur V11/12, V12/V13 et V13/V14 laissé, Brèlage supérieur sur V13/V14 laissé)

Précontrainte de fléaux V7 à V13 (pas de câble de fléau sur le dernier voussoir)

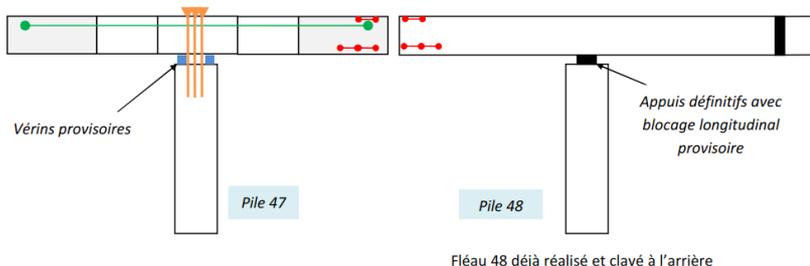


Figure 21 : phase de clavage entre P47 et P48

- 2) Pose de la charpente de brèlage des fléaux avant clavage

2 paires de câbles de clouage enlevées (sur les 3) pour permettre l'ajustement géométrique des fléaux des fléaux (X, Y, Z + rotations si nécessaires)

Le fléau reste sur les appuis provisoires et il est toujours encastré en tête de pile.

- 3) Bétonnage des diaphragmes des voussoirs déviateurs V9D puis clavage



- 4) Mise en tension de la paire de câbles éclisses Ci4 inférieure
- 5) Mise en tension de la paire de câbles éclisses provisoires Cs1 supérieure
- 6) Mise en tension de la paire de câbles éclisses Ci5 inférieure
- 7) Suppression de la charpente de brèlage des fléaux
- 8) Passage sur appuis définitifs sur P47
Retrait de la paire de câble de clouage restante sur appui puis suppression du brèlage provisoire des joints V11/V12, V12/V13 et V13/V14
- 9) Mise en tension des paires de câbles éclisses restants
- 10) Mise en tension de la paire de câbles extérieurs pour permettre le passage du fardier.

7 ANALYSES PARTICULIÈRES

7.1 CISAILLEMENT

L'analyse de la reprise de l'effort tranchant longitudinal et de la torsion dans le tablier préfabriqué s'est réalisé dans l'esprit de l'Eurocode 2 partie 2. L'effet de l'ouverture des joints (correspondant à la phase de fissuration) à l'état limite ultime a ainsi été pris en compte. La résistance au cisaillement de l'ouvrage s'appuie alors sur un mécanisme de treillis constitué par les membrures tendues et comprimées par la flexion longitudinale (N, M_y) et par les bielles inclinées dans les âmes et les hourdis induites par l'effort tranchant (V_z) et la torsion (M_t).

La composante longitudinale de ces bielles induit des efforts de traction longitudinaux additionnels dans les membrures par rapport à ceux générés par la flexion. De cette analyse l'équilibre et la résistance des éléments du treillis ont été vérifiés en utilisant la méthode de l'inclinaison variable des bielles.

La présence des câbles de fléaux et d'éclissage injectés au coulis a permis de tenir compte des surtensions et ainsi d'une part de vérifier l'équilibre tant des efforts normaux (N, M) que des efforts de cisaillements (V, M^{torsion}).

L'EN1992-2 autorisant une surtension maximale de 500MPa dans les câbles adhérents de la précontrainte, une vérification de la cohérence a été réalisée en s'assurant que l'ensemble des surtensions provenant de l'équilibre de flexion, et de celles du cisaillement étaient compatibles avec l'état réel de tension. Bien entendu plus la flexion mobilise de surtensions plus les bielles doivent être redressées ce qui conduit à équilibrer les efforts de cisaillements par les étriers.

7.2 VOUSOIRS SPECIAUX

Les voussoirs spéciaux (voussoirs sur piles (VSP), voussoirs sur culées (VSC)) sont des éléments principaux du tablier en béton précontraint constitué de voussoirs préfabriqués. Chacun de ces voussoirs spéciaux permet à la fois de diffuser l'introduction d'efforts concentrés de précontrainte et d'assurer le fonctionnement longitudinal global du tablier au droit des appuis.

7.2.1 Voussoir sur pile

Le voussoir sur pile (VSP) sert à la fois d'ancrage pour la précontrainte extérieure mais également de voussoir d'appui en phase provisoire et en phase de service. Il s'agit de l'élément du voussoir de démarrage pour la construction du fléau. Son réglage et la maîtrise de son comportement est un enjeu primordial pour le suivi géométrique du fléau.

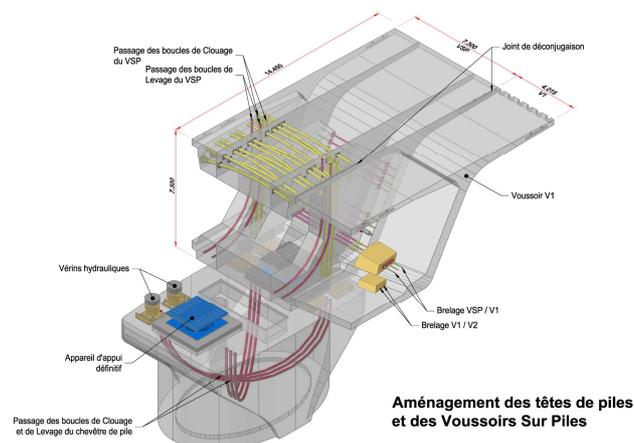


Figure 22 : écorché du voussoir sur pile montrant les dispositions de brélagés intérieurs et de clouage

Du fait de la préfabrication du tablier et de la limitation des moyens de levage et de manutention, le VSP a été préfabriquée en 3 morceaux distincts.

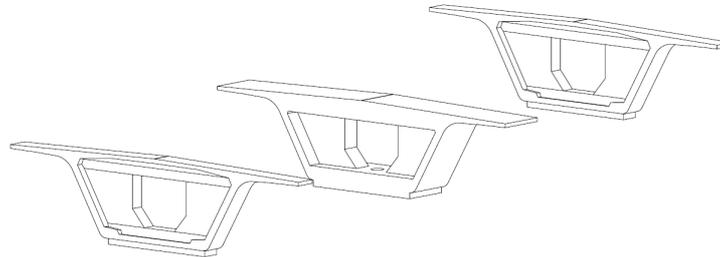


Figure 23 : parties élémentaire du VSP, parties latérales et partie centrale

Pour la phase de pose du tablier, les trois tiers de voussoir sur pile sont assemblés avec les voussoirs V1 et V2 afin de constituer un élément de tablier appelé méga-VSP.

La justification du voussoir sur pile s'appuie sur une modélisation aux éléments finis. Le Méga-VSP est modélisé dans son ensemble. Toutes les phases de travaux sont étudiées afin d'avoir une justification de ce voussoir spécial pour toutes ses phases de manutention, travaux, et d'exploitation.

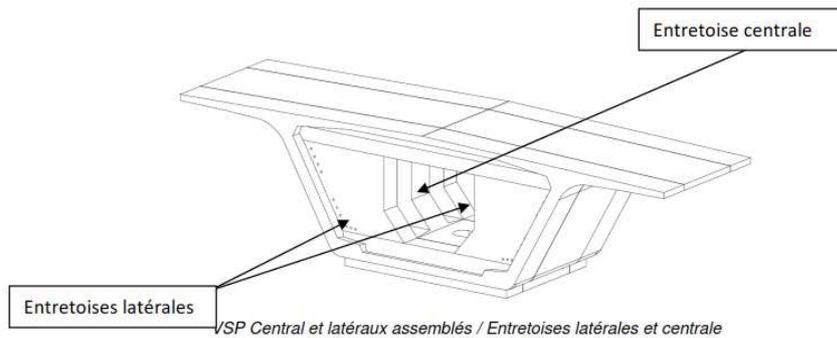


Figure 24 : VSP assemblé

Le précontrainte extérieure passe en partie supérieure du caisson sur appui. La traverse supérieure du voussoir sur pile est dimensionnée en épaisseur et en ferrailage pour reprendre les efforts engendrés par l'ancrage de ces grosses unités de précontrainte.

Du point de vue du fonctionnement global du tablier, le schéma statique est différent entre les phases travaux et les phases d'exploitation. En phase travaux, le tablier s'appuie via le VSP sur deux lignes d'appuis de vérins provisoires. On crée ainsi un encastrement permettant d'assurer la stabilité du fléau.

En phase d'exploitation, le tablier s'appuie via le VSP sur une ligne d'appui constituée par les appareils d'appuis à pots définitifs (considérés comme des appuis simples rotulés).

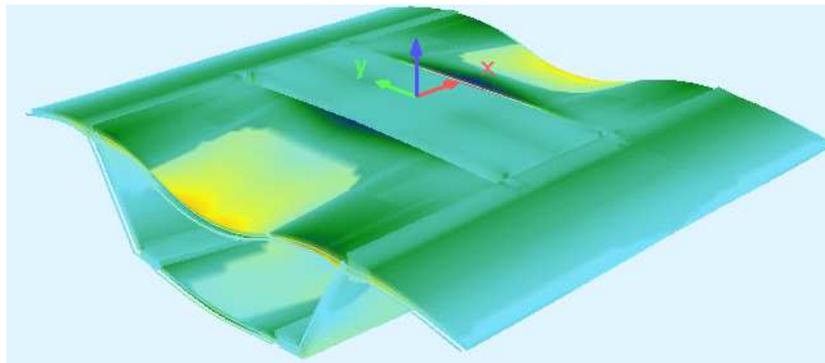


Figure 25 : Vue du modèle de flexion – Déformées sous charges permanentes



Le VSP est constitué de membrures plus épaisses mais également d'entretoises centrales et latérales centrées sur les appareils d'appuis définitifs et provisoires. La rigidité de ces éléments permet un fonctionnement en diaphragme qui a été étudié en modélisant l'ensemble du VSP et ses voussoirs adjacents aux éléments finis. L'exploitation de ce modèle a eu pour objectif d'étudier la transition des efforts généraux du tablier aux appuis et la stabilité locale des éléments constituant le VSP.

Les efforts provenant de la flexion générale ont été introduits sous la forme d'un état de contrainte normal et un flux cisaillement le long des membrures afin de reconstituer l'état de contrainte régularisé théorique aux bornes du modèle.

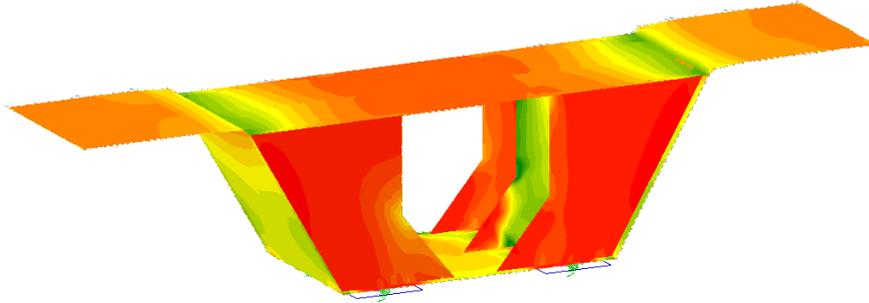


Figure 26 : Vue du modèle éléments finis – Iso régions des efforts principaux de membranes

Le reste des charges appliquées entre les deux sections J3 sont directement modélisées sur le modèle éléments finis.

7.2.2 Voussoir sur culée

Le voussoir sur culée (VSC) est le lieu d'introduction d'efforts de précontrainte considérables (9 paires de câbles extérieurs 37T15S, 4 paires de câbles éclisses 37T15S). Ce voussoir doit également pouvoir reprendre les efforts internes dus à l'ancrage de la bielle d'about. Il supporte de plus des phases particulières de construction.

Le VSC est constitué d'un seul voussoir de 4.0m de long. Suivant que l'on se trouve sur culée ou pile culée, les conditions statiques sont différentes. Sur culée, le voussoir sur culée est posé et cloué par des barres de précontrainte lors d'une phase de courte durée garantissant ainsi sa stabilité. Une fois clavé avec le reste du tablier, le VSC est libéré puis mis sur appuis définitifs. Sur pile culée, les deux voussoirs sur pile culée (VSPC) adjacents sont posés brêlés puis cloués par des câbles sur la tête de pile-culée. Une fois désolidarisés, ils sont clavés avec le reste de leur tablier respectif et le brêlage est supprimé. Puis ils sont placés sur appuis définitifs.

Le VSC est constitué d'une section transversale renforcée, avec des âmes et des membrures épaissies, mais également d'une entretoise de 3.00m d'épaisseur. Comme pour le VSP, les membrures servent principalement à rigidifier le caisson pour transformer tout moment de torsion en un couple de réaction +/-R. De plus, la présence des appuis du lanceur (pieds de lanceur et béquilles) sont autant de raison d'avoir un VSC rigide.

L'entretoise d'appui épaisse a pour rôle de régulariser les efforts de précontrainte. Les règles de calcul du guide du SETRA « Diffusion des efforts concentrés » a été retenue. Cette méthode est basée sur le principe de coupures réalisées aux zones dites sensibles (changement d'épaisseur, zone d'ancrage). Chaque coupure étant le lieu d'une potentielle fissuration, un ferrailage passif est calculé pour reprendre les efforts de cisaillement. L'état de contrainte du tablier est également vérifié pour se prémunir de toute fissuration du béton par cisaillement le long de ces coupures. L'ensemble de ces justifications sont menées aux états limites ultimes mais également aux états limites de fissuration en retenant une contrainte de travail des armatures de 300 MPa.

Ces calculs ont également été complétés par un modèle volumique sur Sofistik qui a permis d'identifier les directions des contraintes principales dans l'entretoise sous l'action de la précontrainte.

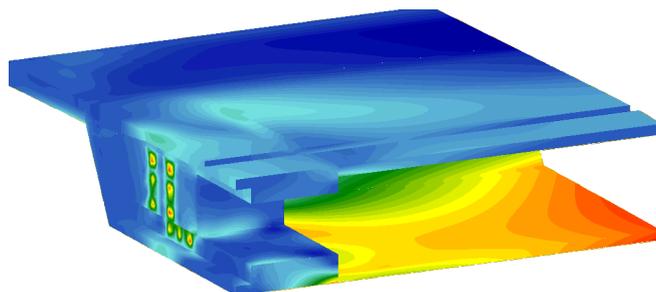


Figure 27 : Chargement par la précontrainte extérieure – Iso région des contraintes longitudinales

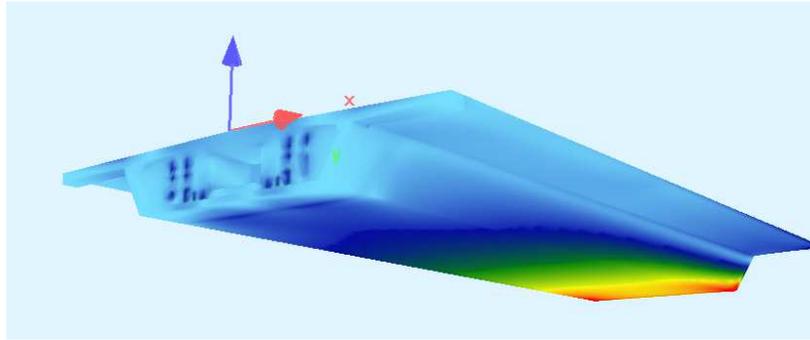


Figure 28 : iso région de contrainte dans l'entretoise – Coupe horizontale

L'ancrage de la bielle d'about durant toutes les phases de sollicitations du voussoir sur culée est optimisé par un phasage précis de mise en tension des câbles extérieurs et éclisses.

Pour terminer, le VSC étant à l'about du tablier, il est très sensible aux effets de bord et aussi aux effets dynamiques générés par les charges d'exploitation dont le tramway. La présence du joint de chaussée aux caractéristiques particulières du fait de la liaison à un autre tablier a aussi contribué aux difficultés d'analyse et de réalisation du ferrailage de cette partie.

L'étude des déplacements à l'about du VSC sont également des points clés permettant de garantir un fonctionnement correct et pérenne des équipements et superstructures (joints de chaussée, joint couteau pour voirie, appareils d'appuis, corniches caniveaux, etc).

7.3 PILES

L'étude des piles a fait l'objet d'une analyse détaillée afin de tenir compte des effets importants des sollicitations s'appliquant directement sur le fût de pile, notamment le choc de bateau.

Le fût de pile, constitué d'une section elliptique creuse en béton armé, peut être étudié suivant deux schémas principaux de déformation à l'image de ce que l'on pratique sur les tabliers de pont :

- Une déformation dite « globale » qui suppose une non-déformation de la section elliptique creuse suivant le principe de Navier-Bernouilli.
- Une déformation dite « locale » pour laquelle on étudie le fléchissement des parois de la section elliptique.

Le fonctionnement global est étudié via le modèle général de référence de l'ouvrage utilisé pour l'analyse longitudinale. Un modèle particulier en 3D éléments coques a été mis en œuvre pour l'étude du fonctionnement local.

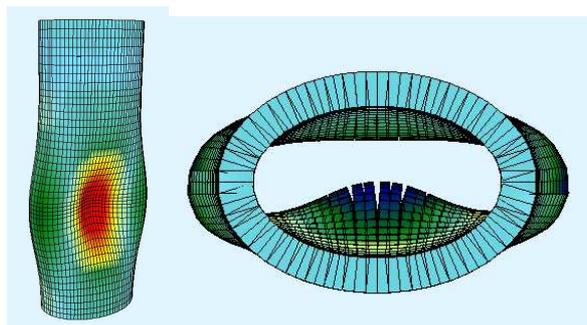


Figure 29 : Modèle coque pour l'étude de la flexion locale

Le cumul des aciers de flexion et de cisaillement du modèle global avec les aciers de flexion locale a été réalisé conformément aux règles de l'Eurocode 2 reprises et appliquées au cas des plaques dans le guide Setra « Eurocode 2 – Application aux ponts-routes en béton ». Les effets de la flexion longitudinale globale se cumulent ainsi pleinement avec les effets de la flexion locale dans le même sens. Les effets du cisaillement du modèle global sont eux considérés soit seuls, soit cumulés de moitié avec les effets de la flexion locale transversale.



7.4 ETUDES SPECIFIQUES A LA PREFABRICATION

7.4.1 Embases et piles

Les embases (semelle et partie inférieure du fût de pile) sont préfabriquées en une seule pièce. La partie haute des fûts et les chevêtres constituent la 2^{ème} partie préfabriquée des piles. Les études particulières de ces éléments ont surtout porté sur les phases de mise en place sur site, et l'assurance de leurs stabilités dans les différentes phases d'assemblage, y compris au moment de l'installation du MGVSP.

7.4.2 Voussoirs

La préfabrication des voussoirs à joints conjugués a nécessité des analyses particulières de déformations à différents stades de l'exécution afin de vérifier que les déformations pouvant nuire à la conjugaison étaient limitées à des valeurs issues de l'expérience. L'effet de la précontrainte transversale, ainsi que les conséquences du fluage et du retrait du béton ont été analysées pendant les séquences de préfabrication et celles du stockage.

Ces calculs ont été longs et itératifs afin de caler les phases de mise en tension.

8 CONCLUSION

Ce bref résumé des études d'exécution du projet des viaducs de la nouvelle route du littoral montre que la préfabrication n'autorise aucun amateurisme comme le soulignaient dans leur cours Jean Armand Calgareo et Jacques Combault.

Les points principaux ont été mentionnés. D'autres études ont été menées certaines touchant à des variantes d'exécution, d'autres touchant à des analyses plus poussées des points évoqués ci-dessous. La grande largeur du caisson a aussi amené l'équipe d'étude à approfondir certains points d'une part pour évaluer les risques mais aussi pour assurer la fiabilité du processus de construction. Dans ce cadre, la démarche s'apparente à la démarche « safety in design » qu'entre autre VINCI comme d'autres grands groupes développent et mettent en œuvre dans l'élaboration de leurs projets.

Liste des ingénieurs et projecteurs étant intervenus durant les études :

AKOWANOU Georges	BYTP	BUSSERY Benoît	VCGP
BAILLY Laurent	BYTP	DHIVER Philippe	VCGP
CHAMPION Cédric	BYTP	DUCLOS Thierry	VCGP
DJESSAS Brahim	BYTP	GUYADER Jean Michel	VCGP
FELIX Valentin	BYTP	KHELIFA Zerrouk	VCGP
GAUGUÉLIN-VILLALBA	BYTP	LEHEBEL Philippe	VCGP
HOARAU Jérémy	BYTP	MEUR Juliette	VCGP
LECHOPIED Michel	BYTP	OREFICI Jean François	VCGP
LEMOINE Patrice	BYTP	PRIETO Santos	VCGP
MEYER Jocelyn	BYTP	QUIEC Gilbert	VCGP
SCARAMOZZINO Anthony	BYTP	RAHERIVÉLO Joellitania	VCGP
CHEBBI Fahed	DCB	ROZIER Adrien	VCGP
DUMONTIER Hervé	DCB	SIMON Antoine	VCGP
LANDAIS Matthieu	DCB	LEONARD Romain	DB
GAULIARD Matthieu	DCB	GEORGES-BURGER Alison	DB

Maître d'ouvrage : Région Réunion

Maître d'œuvre : EGIS

Groupement d'entreprises : VINCI Construction Grands Projets – Dodin Campenon Bernard – Bouygues TP – Demathieu Bard.

