ÉCHANGEUR DE LA POINTE DES SABLES
VIADUC PRÉCONTRAINT COULÉ SUR CINTRE

Guillaume DUMONTET, Jonathan STAMP
EIFFAGE GC
Sébastien LEBRANCHU
COFFRAGE & EQUIPAGE

1. Introduction

Le projet s'inscrit dans le cadre de l'aménagement, programmé par la Région Martinique, de l'échangeur de la Pointe des sables en vue de permettre le passage de la future ligne de Bus à Haut Niveau de Service (BHNS) qui reliera à l'horizon 2015 Fort de France à l'aéroport du Lamentin.
Pour fluidifier le trafic, la voie de bus (TCSP) et les deux bretelles existantes seront dénivelés en un viaduc de 740m de long, constitué d'un tablier en caisson précontraint coulé en place. Le présent article décrit plus en détail la phase d'exécution du viaduc : la variante réalisée, les méthodes spécifiques d'exécution et le déroulement des travaux.

Figure 1 : Vue d'ensemble du Viaduc en cours de construction, mai 2015

2. Description de l'ouvrage

L'ouvrage se compose en trois tabliers distincts en béton précontraint coulés sur cintre, notés A, B et C, chacun desservant un type de circulation et une direction particulière (Figure 2) :

- le tablier A (voie TCSP), d'un linéaire de 320 m environ, est appuyé sur 10 piles (P2 à P11) et 2 culées (C1 et C12) ; 11 travées : 25 m + 9*30 m + 25 m ;

- le tablier B (bretelle de sortie pour accès au Port) présente une longueur totale de l'ordre de 218 m et est appuyé sur 7 piles (P2 à P8) et 2 culées (C1 et C9) ; 8 travées : 25 m + 5*30 m + 18 m + 25 m ;

- le tablier C (bretelle de sortie pour accès à l'Hôpital) présente une longueur totale de l'ordre de 170 m et est appuyé sur 5 piles (P2 à P6) et 2 culées (C1 et C7) ; 6 travées : 25 m + 4*30 m + 25 m.

Les tabliers reposent sur des appareils d'appui en élastomère fretté qui l'isolent partiellement des efforts dus au séisme. Des butées sismiques de sécurité dans les deux directions sont prévues au niveau de chaque appui.

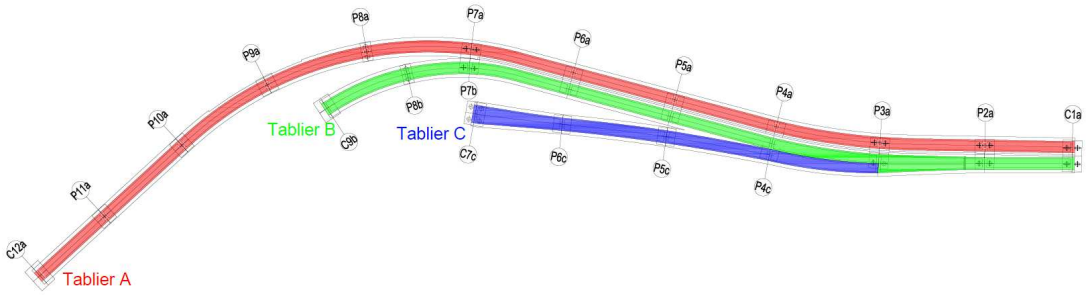

Figure 2 : Vue en plan de l'ouvrage

Piles

Les piles en béton C35/45 (d'une hauteur variable de 4,20 m à 6,40 m) sont fondées soit sur semelles superficielles en béton C25/30 de 9 m * 5 m * 1,5 m d'épaisseur (12 appuis), soit sur pieux (D1200 mm - 15 m de long) réalisée à la tarière avec foreuse montée sur grue à chenille (8 appuis).

Culées

Les culées en béton C35/45 sont constituées d'une semelle superficielle ou sur pieux (D1200 mm) et d'un chevêtre d'appui architectural.
Pour accéder à l'ouvrage, des rampes d'accès de type cadre fermé sont prévues à l'arrière des culées. Des joints séparent les culées de l'ouvrage de ces rampes d'accès.

Tablier

La structure du tablier en béton C40/50 précontraint est constituée d'un U de 1,12 m de hauteur, fermé par une dalle de 28 cm d'épaisseur avec des encorbellements de 1,00 m en zone courante. Le caisson est habillé de part et d'autre d'une corniche métallique en sous-face des encorbellements.

En travée, les U sont bétonnés sur cintre avec une précontrainte isostatique par post tension dans le hourdis inférieur constituée de quatre câbles 16T15S, à raison de deux câbles par âme.

Dans les âmes sont disposés deux câbles de continuité 19T15S, à raison d'un câble par âme. Leur mise en tension est réalisée après bétonnage des voussoirs sur pile ou culée.

La dalle est coulée sur des bacs acier après la mise en tension des câbles de continuité.

On présente ci-dessous à titre indicatif la coupe transversale du tablier en travée (Figure 3).

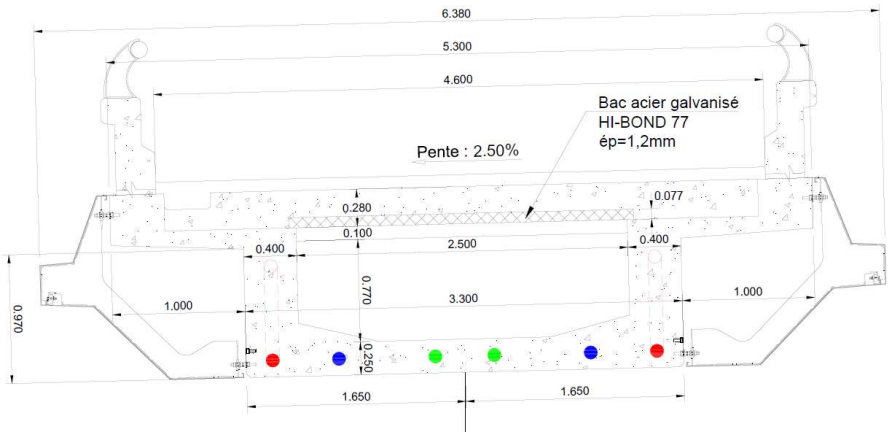

Figure 3 : Coupe transversale type du tablier avec bac acier

3. Etudes d'avant-projet et d'exécution – Variante réalisée

L'appel d'offres était ouvert aux variantes de fondations et de tablier. La géométrie routière (profil en long, pentes, et dévers), la coupe fonctionnelle, les coffrages des piles et des culées du projet de base devaient toutefois être respectés. Les études de prix et des méthodes constructives du projet de base réalisées par l'Entreprise dans le cadre de la préparation de l'offre avaient rapidement montré que le tablier en caisson multicellulaire en béton armé (Figure 4) était une solution relativement onéreuse, du fait notamment de la quantité de béton à mettre en œuvre, de la complexité du coffrage et du délai réduit de réalisation des travaux. D'autre parts, l'ouvrage étant situé en zone de forte sismicité (zone 5), la masse importante du tablier et la prépondérance des sollicitations sismiques qui en résultent, sont fortement pénalisant pour les fondations.

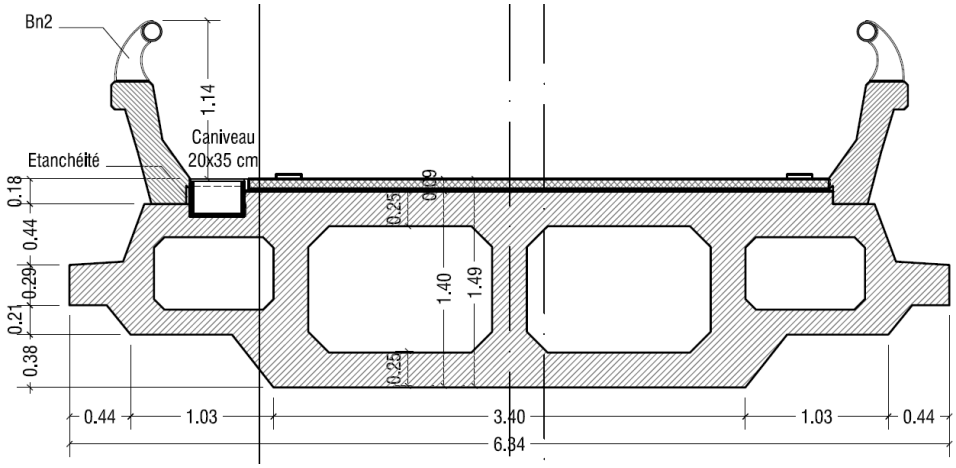

Figure 4 : Coupe transversale type du tablier du dossier DCE

Pour ces raisons, le bureau d'études d'Eiffage TP a envisagé de simplifier et d'alléger la section transversale du tablier en attribuant à chaque voie une nervure sous hourdis. Pour améliorer la durabilité de l'ouvrage, une structure en béton précontraint a été retenue. Afin de limiter la quantité d'étaiement à mettre en œuvre, il a été décidé de couler le tablier en deux phases, les U avec les encorbellements d'abord, le hourdis ensuite. Les U avec les encorbellements, rendus continus après réalisation des clavages sur pile, servent ainsi de cintre pour le coulage du hourdis.

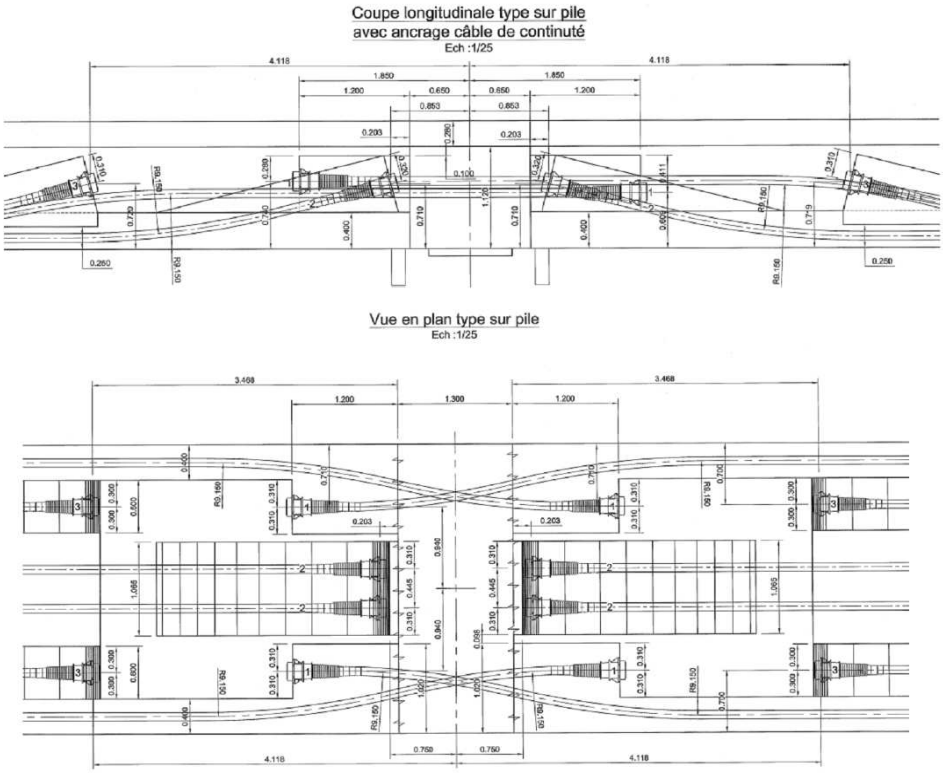

Figure 5 : Vue en plan et coupe – Câblage de précontrainte

La précontrainte (Figure 5), dont les bossages sont situés à l'intérieur des U, a été répartie en deux familles :

- les câbles isostatiques pour le décintrement des caissons et la reprise des moments en travée
- les câbles de continuité pour la reprise des moments sur appui.

Le tablier a pris l'aspect d'un mono, bi ou tri caisson selon les voies portées.

Quant aux fondations, de la diminution du poids du tablier découle la possibilité d'une optimisation du nombre ou de la longueur des pieux, et permet dans certains cas, de passer sur fondations superficielles. Cela s'est traduit par le passage de 10 piles et culées de fondations sur pieux à fondations superficielles, et par une réduction significative de la longueur des pieux forés en D1200 mm.

4. Méthodes d'exécution et déroulement des travaux

L'échangeur étant circulé par plus de 130 000 véhicules jour, le phasage de construction du Viaduc a été bâti pour maintenir en permanence les voies circulées.

4.1 Planning des travaux

Le délai global des travaux est de 21 mois, décomposé en trois phases rythmées par des dévoiements successifs de circulation en fonction de l'avancement des travaux (Figure 6) :

- **Réalisation des demi semelles du Viaduc A de C1 à P7 : durée 3 mois**

Cette phase consiste à déplacer les réseaux et dévoyer la circulation pour libérer les emprises travaux des appuis C1 à P7 du Viaduc A. Les semelles des Viaducs A/B/C étant communes de C1 à P7, les semelles ont été coulées par moitié à l'aide de reprise de bétonnage manchonnée.

- **Réalisation des semelles, piles et tabliers des Viaducs B et C : durée 14 mois**

La circulation est dévoyée sur les demi-semelles réalisées du Viaduc A pour libérer les emprises des appuis communs des Viaducs B et C. Cette étape comprend la réalisation des semelles, des piles et des tabliers B et C pour une mise en service du Viaduc C.

- **Réalisation des piles et tablier du Viaduc A : durée 4 mois**

La circulation est ensuite dévoyée sur le tablier du Viaduc C pour libérer les emprises des appuis et du tablier du Viaduc A.

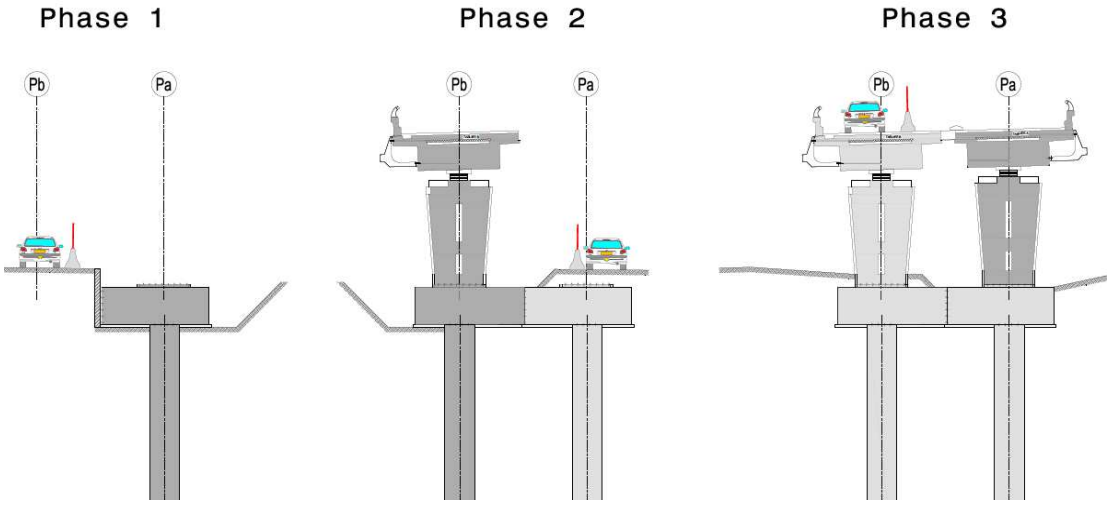

Figure 6 : Phasage travaux

4.2 La réalisation des appuis

Malgré sa forme elliptique et son évidement central coiffé d'un chevêtre, l'Entreprise a décidé de bétonner la pile en une fois à l'aide d'un coffrage négatif bridé sur deux coquilles. Cette solution a permis de garantir une qualité de parement optimale ainsi qu'un gain significatif sur le planning.

Le climat étant tropical, la solution de coffrage bois n'a pas été retenue.. En effet compte tenu du nombre de réemploi nécessaire (20 réutilisations), les peaux des coffrages bois, certes moins couteuses, auraient dû être changées après 5 réutilisations.

L'Entreprise a donc adapté la hauteur de la fausse levée de manière à harmoniser les hauteurs des piles permettant ainsi de se limiter à trois familles de piles et concevoir ainsi un outil métallique sur mesure (Figures 7 et 8).

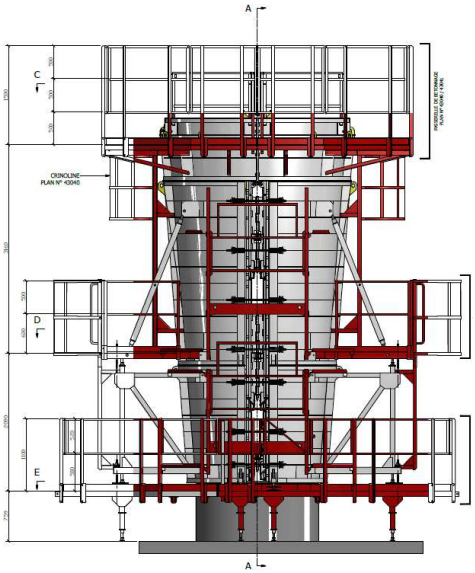

Figure 7 : Outil coffrant

Figure 8 : Coffrage des piles

Au regard du ferraillage dense des piles (qui s'explique par une section béton réduite en son embase), le chantier a porté une vigilance particulière sur le positionnement et la verticalité des attentes (40 HA40) afin d'assurer à l'aide d'un gabarit la mise en place des cages préfabriquées du fût de pile.

Les cadences de réalisation d'une pile initialement prévues à 7 jours ont pu être ramenées à 4 jours par la mise en place d'un second jeu d'outil intérieur.

4.3 La réalisation des tabliers

Le synoptique de réalisation des tabliers est le suivant (Figures 9 et 10) :

- Réalisation des piles P1, P2 et P3
- Bétonnage sur cintre et boites à sables du caisson en U de la travée N (entre les piles P1 et P2)
- Mise en tension en actif / passif des câbles de précontrainte isostatique (16T15S) de la travée N, la résistance du béton requise étant de 30MPa
- Décintrement de la travée N
- Bétonnage des caissons en U des travées N+1 et N+2
- Bétonnage des voussoirs sur piles (VSP 1, 2 et 3)
- Mise en tension en actif / passif des câbles de continuité (19T15S) régnant sur les deux travées consécutives N et N+1 dés que la résistance du béton des VSP atteint 30MPa
- Libération des appuis et dépose des boites à sables
- Fermeture des caissons à l'aide de bacs aciers
- Bétonnage des hourdis

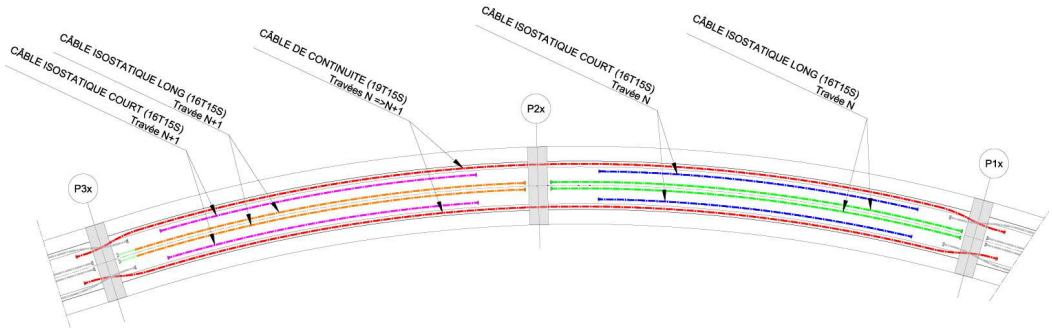

Figure 9 : Plan de câblage de précontrainte

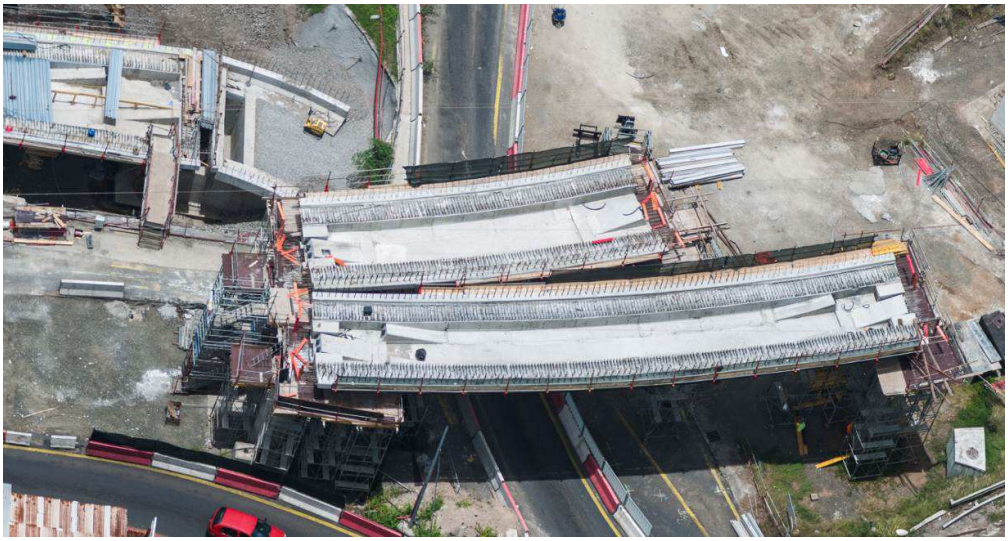

Figure 10 : Vue aérienne des caissons

4.4 Les dispositions retenues par l'entreprise

La construction d'un tel ouvrage en béton précontraint post tension est rendue complexe par l'environnement très contraint du site :

- réseaux enterrés et aériens
- proximité des riverains – emprise réduite
- climat tropical
- proximité du réseau routier avec l'autoroute A1, ses bretelles d'entrée et de sortie et son échangeur

<u>Proximité des réseaux enterrés (HTA, HTB 63kV, AEP, EU, EP, Télécoms, Fibres…)</u>

L'Entreprise s'est astreinte à demander à ses sous-traitants avant chaque démarrage de travaux de fouilles ou de forages d'établir une étude d'adéquation reprenant la liste des réseaux à proximité, les DICT des réseaux présents sur zone, les plans de terrassements avec superposition des réseaux existants et dévoyés et le matériel utilisé. Avant démarrage des travaux, un point d'arrêt est formalisé sur site en présence du Maitre d'oeuvre, de l'Entreprise, du chef de chantier réalisant les travaux et du conducteur d'engin.

<u>Proximité des réseaux aériens (HTB 63KV)</u>

Une partie de l'ouvrage à construire étant située sous une ligne Haute Tension de 63KV (tablier à une distance de 11m de la ligne), les méthodes de construction ont été adaptées pour limiter au strict minimum les mises hors tension auprès d'EDF. Certains travaux (tels que les phases de bétonnage ou d'approvisionnement des cages de ferraillage), nécessitent d'entrer dans la zone de sécurité des 5m par rapport à la ligne, la mise hors tension est alors inévitable. Pour les travaux en dehors de la zone de sécurité des 5m, les engins de levage sont équipés de détecteur de champ magnétique. Cet équipement monté en bout de télescope coupe le mouvement de la grue et avertie le conducteur d'un signal sonore et lumineux dès que le télescope se trouve à 5m de la ligne. Pour compléter ces mesures de prévention, un registre grutier quotidien a été mis en place et des surveillants électriques ont été formés.

Proximités des riverains

Les emprises travaux étant réduites, les moyens de levage ont dû être étudiés au plus juste. Les coffrages de caissons ont été équipés de roues (poids du coffrage de 750 kg) pour pouvoir être translatés sur les platelages des cintres jusqu'aux zones de couverture des grues mobiles. (Figure 11).
Les coffrages perdus des hourdis, initialement prévus en prédalles BA, ont été remplacés par des bacs aciers qui ont pu être manutentionnés à la main. Cela a permis de limiter les opérations de levage.

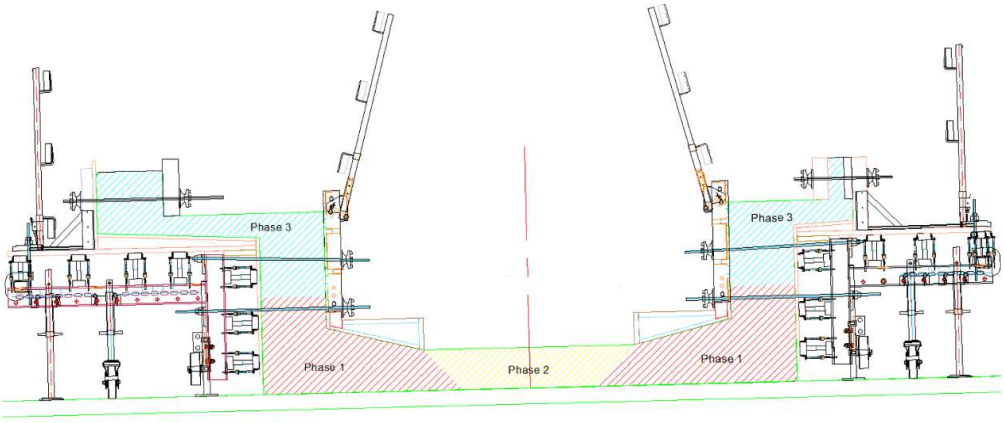

Figure 11 : Outil coffrant des caissons

Climat tropical – Incidence sur les travaux de précontraintes

Le taux d'humidité ambiant, les embruns et les températures étant plus élevés dans les départements Outre Mer, l'Entreprise a dû être vigilante sur le stockage des bobines de torons et des gaines de précontrainte pour éviter une oxydation de l'acier. Les gaines et bobines ont donc été bachées et recouvertes d'huile soluble tous les 15 jours. Le ciment Superstressem injecté dans les gaines une fois les câbles mis en tension (Figure 12) a été stocké dans un conteneur réfrigéré et la mise en œuvre s'est faite avec de l'eau à 5°C pour retarder la montée en température du coulis au moment de la mise en œuvre (30°C maxi).

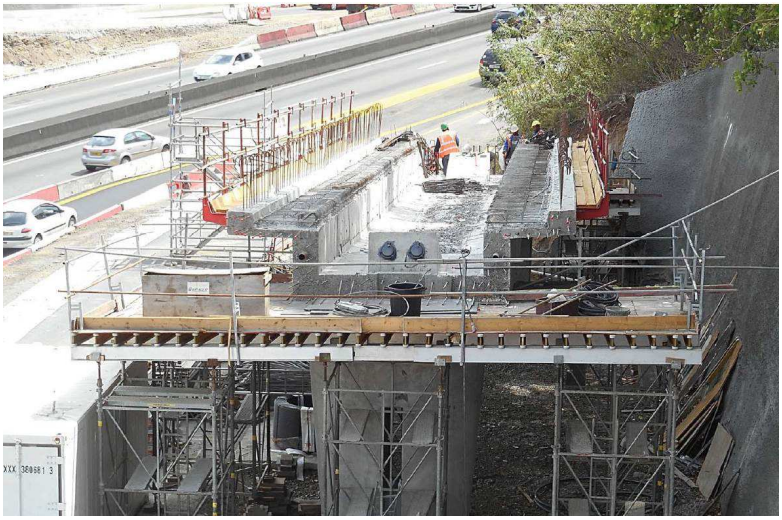

Figure 12 : Caisson décoffré après mise en précontrainte

Milieu insulaire – Moyens humains et matériels adaptés

Au regard de la géométrie des caissons, tantôt simple, double ou triple, en courbe, déversée à 2.5% avec une pente longitudinale variable, il n'a pas été possible de de recourir à des plateaux coffrants. Les cintres ont donc été simplifiés au maximum (Figure 13) et sont composés de tours MILLS de 1,60 m * 1,60 m, de poutrelles primaires en aluminium de type PHAL P1 et de poutrelles bois de type H20 en secondaire tous les 20 cm. Dans un contexte insulaire, Il a été préféré de former des monteurs d'étaiement et éviter ainsi de récourir à la sous-traitance, prestation qui au regard du phasage et des conditions d'accès aurait été difficilement contractualisable sans réclamation.
De plus, lors de chaque approvisionnement un comparatif financier a du être mené entre un achat local et métropolitain. Le coût du transit et des octrois de mer, le délai d'approvisionnement (1 mois) ont dû être pris en compte.

Figure 13 :Cintre d'une travée avec platelage

Proximité du réseau routier - Mise sur appuis définitifs des travées du tablier

Trois travées franchissent les artères principales de Fort de France et ces dernières doivent impérativement être maintenues en circulation pendant toute la durée du chantier. Aussi, compte tenu de l'encombrement des coffrages en sous face du tablier, ces travées devaient être réalisées à 1,2 m au-dessus de leur position définitive afin de maintenir la disponibilité du gabarit routier sous ouvrages.

Après bétonnage des caissons sur des chandelles, un des enjeux était donc de décintrer ces travées de 30 m de long pour 165 t pour les placer sur leurs appuis définitifs tout en générant le moins de désagrément possible pour les usagers routiers et les riverains.

Pour ce faire, la première solution envisagée consistait à lever puis à déposer chaque travée au moyen de 2 grues mobiles placées à chaque extrémité de la travée (Figure 14). Cependant, la complexité de l'environnement (peu d'espace disponible au sol et présence d'une ligne électrique haute tension de 63 kV) ainsi que les risques liés à une telle opération à proximité des habitations, ont conduit l'Entreprise à abandonner cette méthode.

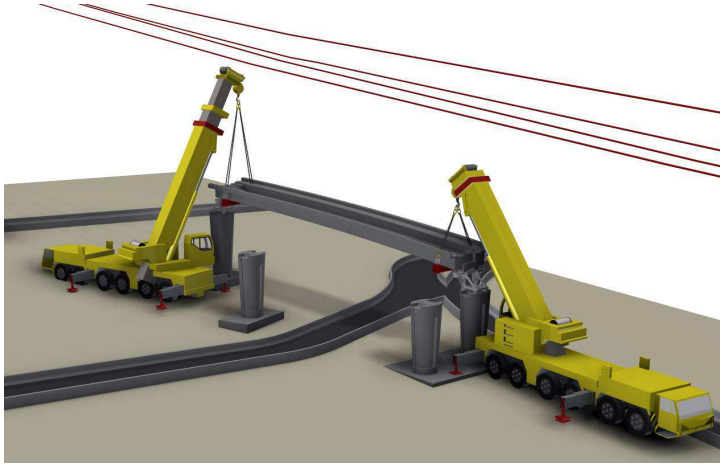

Figure 14 : Solution N°1 Levage

La 2ème solution étudiée consistait à reprendre provisoirement le poids propre de la travée sur 4 tours d'étaiement associées à une compensation sur camarteaux pour la déposer par décintrage sur ses appuis définitifs. (Figure 15)

Cependant, un tel calage sur 1,2 m de haut combiné à la forme complexe des travées (rayon plan de 100 m, dévers de 2,5 % et pente longitudinale de 9,65 %) pose des problèmes de stabilité. De plus, la manipulation de 120 camarteaux en HEB 200 de 45 kg unitaire induirait une pénibilité pour les compagnons.

Figure 15 : Solution N°2 Calage sur camarteaux

Après ces constats, il apparaissait clairement que l'enjeu était de maîtriser la stabilité de la travée lors de la descente sur appuis ainsi que la sécurité du personnel à proximité.
Aussi, l'Entreprise a confié à la société Coffrage&quipage l'étude d'une 3ème solution de descente des travées au moyen de palées de stabilité. Il s'agit de 4 tours métalliques ancrées aux piles de l'ouvrage et associées à un système hydraulique (Figure 16).

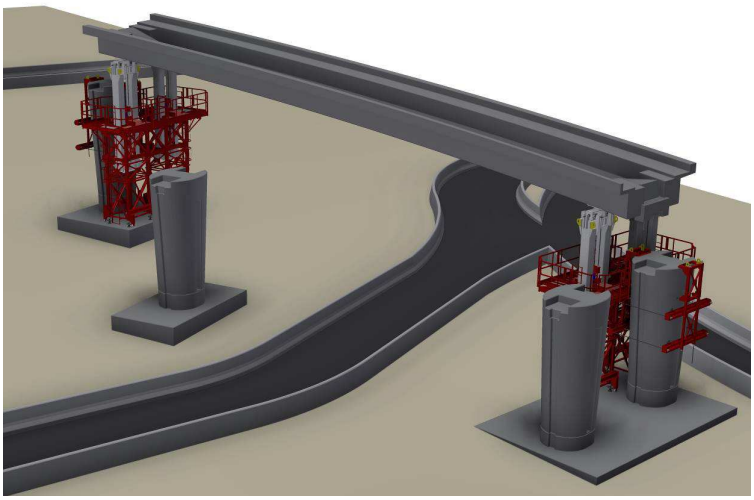

Figure 16 : Solution N°3 Descenseur (Coffrage&quipage)

La travée est en appui sur les palées par l'intermédiaire d'appuis rotulés s'adaptant à la surface biaise de la sous face du tablier, afin de diffuser les efforts tout en maitrisant la stabilité. A chaque extrémité de la travée, 2 palées sont positionnées et espacées de 2,9 m afin de conserver le centre de gravité de la travée béton dans la surface de sustentation du dispositif.

Chaque palée est équipée d'une coulisse associée à un vérin hydraulique de capacité 100 t - course 200 mm et 2 barres de brêlage. Le principe est de descendre la travée par passes de 20 cm simultanément sur les 4 palées, en reprenant la descente de charges tantôt sur le vérin tantôt sur les barres de brêlage (Figure 17). Le transfert des charges à la fin de chaque cycle permet de libérer les vérins et de reprendre le cycle pour descendre à nouveau de 20 cm. L'opération de descente de la travée béton est ainsi réalisée en 6 cycles, permettant de placer la travée sur ses appuis définitifs en une heure (Figure 18).

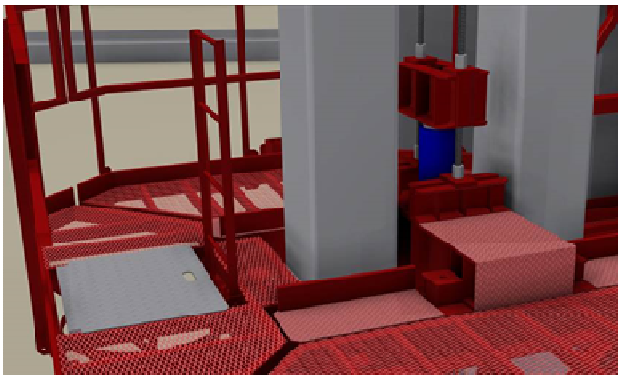

Figure 17 : Dispositif de descente (Coffrage&quipage)

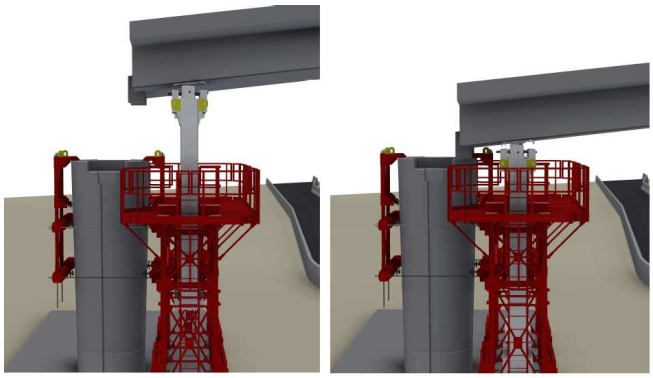

Figure 18 : Travée avant et après descente

Cet outil est classé en appareil de levage et a été conçu en respectant la Directive Machine 2006/42 CE. Au-delà de sa fonction première de levage, une attention particulière a été apportée pour intégrer l'ergonomie au poste de travail.