

UN LIEN ENTRE L'ALLEMAGNE ET LA FRANCE LE NOUVEAU PONT SUR LE RHIN

Didier GUTH

Arcadis

Diter BRAET, Patrick VAN SEVEREN

Victor Buyck Steel Construction

Christian CREMONA

BOUYGUES TP

1. INTRODUCTION

Confiés à la Compagnie des Transports Strasbourgeois (CTS) par l'Eurométropole de Strasbourg (EMS), les travaux d'extension de la ligne D du tram vers Kehl ont démarré en 2014. Dans leur première phase, ils constituent un prolongement du réseau strasbourgeois vers l'Allemagne d'une longueur de 2,7 km, dont la mise en service commerciale est prévue au printemps 2017. Ce prolongement vers l'Allemagne, moteur dans le développement des liaisons transfrontalières, est appelé à



Figure 1 – Vue d'ensemble du pont depuis la berge allemande

devenir le vecteur d'urbanisation du secteur des deux Rives et permettra de recentrer l'agglomération sur le Rhin. La réalisation de cette extension nécessite la construction d'infrastructures remarquables, dont le Pont sur le Rhin. Retenu par l'EMS et la Ville de Kehl sur proposition de la CTS, maître d'ouvrage du projet, la conception-réalisation de cet ouvrage a été attribuée au groupement d'entreprises composé de Bouygues TPRF, Victor Buyck SC, Lingenheld TP, Früh Ingenieurbau(*), Arcadis et Marc Barani Architectes, à l'issue d'une consultation qui s'est déroulée d'août à décembre 2012. Le montant global de l'ouvrage, financé à parts égales par l'EMS et la Ville de Kehl, s'élève à 24,9 M€.

2. CONCEPTION DU PONT

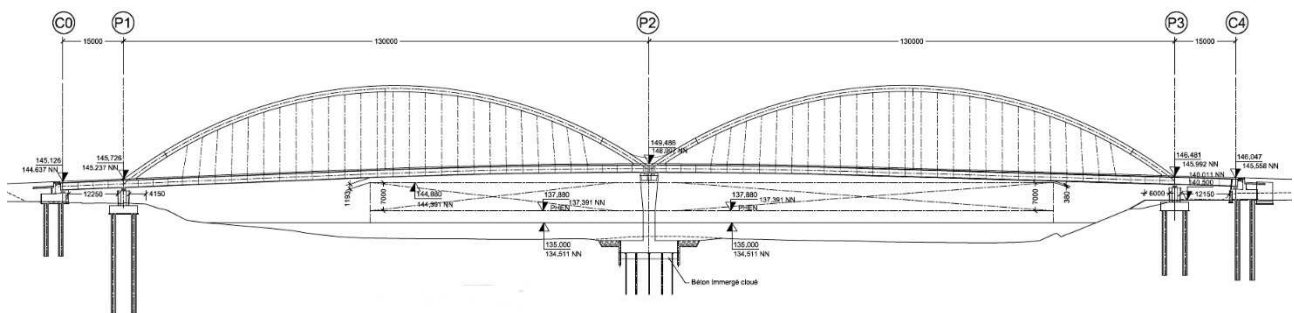


Figure 2 - Elévation longitudinale

2.1 GENERALITES

Le pont est un ouvrage d'art de type bow-string métallique, quasi symétrique, comportant deux tabliers distincts, à 4 travées de 15 -130 et 130 -15 m (Figure 2). L'ouvrage, calculé aux Eurocodes français, a été dimensionné pour supporter les trams-trains qui l'emprunteront dans le futur.

Le schéma statique (Figure 3) a été imposé, notamment, par le déséquilibre de la longueur des travées et les contraintes ferroviaires. Le déséquilibre des travées, 15 m/130 m, a contraint de libérer, transversalement pour chaque tablier, une file d'appuis sur les trois, afin de ne pas générer d'efforts qui se seraient avérés largement supérieurs à la demi-somme des charges de vent ou sismiques, par simple « effet d'encastrement » de la travée courte. L'idée première de libérer l'effort transversal sur les culées s'est trouvée être incompatible avec un déplacement différentiel tablier/culée entrant dans les limites imposées par le rail : ce sont donc les pilettes (P1 et P3) qui supportent des appuis glissants dans les deux directions.

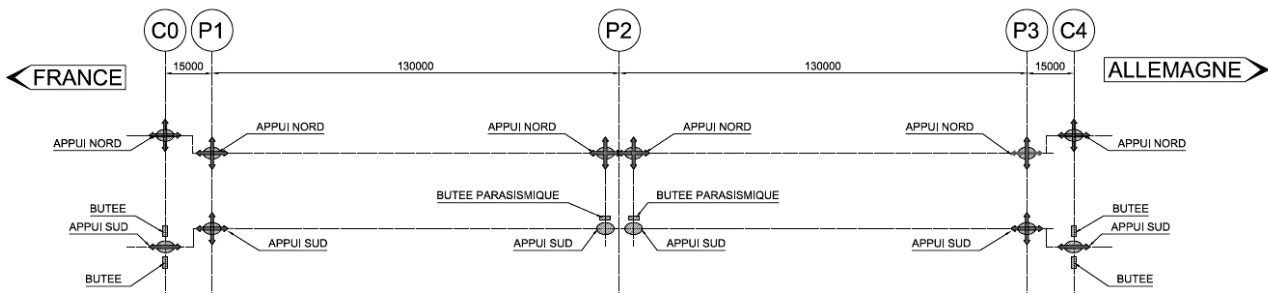


Figure 3 – Schéma statique

Longitudinalement, l'ouvrage comporte un seul point fixe par demi-tablier, au droit de P2.

2.2 LE TABLIER

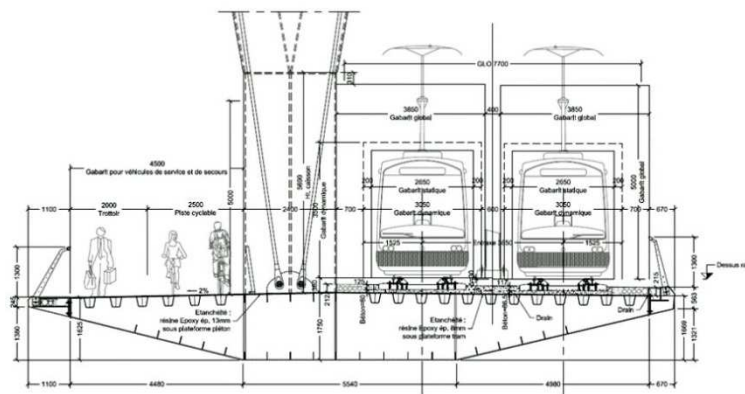


Figure 4 – Coupe transversale fonctionnelle

Le tablier a une largeur hors tout de 16800 mm et est équipé de garde-corps avec éclairage par LED et de corniches-caniveaux recouvertes d'un caillebotis, sur chaque rive, d'une voie dédiée aux piétons de 2,00 m et d'une piste cyclable de 2,50 m de large, d'un garde-corps séparateur implanté le long de la piste cyclable, de caissons d'éclairage de l'arc, d'une plateforme tram en béton de 8,10 m. L'extrados du tablier présente une pente à 2%, côté modes doux et à 1% côté tram, vers les caniveaux, nord et sud, respectivement (Figure 4).

Structure du tablier

Le tablier est un caisson métallique orthotrope dont le platelage supérieur est raidi par des augets d'épaisseur 6 mm côté piétons/cycles et d'épaisseur 8 mm côté tram. Dans la zone centrale de 2400 mm entre les deux zones circulées, les raidisseurs sont des plats de 200x14. De même, les faces latérales et le platelage inférieurs sont raidis par des plats de mêmes dimensions. Tous les raidisseurs sont soudés sur les diaphragmes espacés de 4000 mm environ. La partie supérieure des âmes inclinées est raidie par des raidisseurs transversaux. Les diaphragmes, d'épaisseur 30 mm dans la partie centrale et 16 mm dans les zones latérales, permettent, d'une part à rigidifier le caisson pour éviter sa distorsion sous l'effet des efforts transversaux (tranchant et torsion), et d'autre part de transférer ces mêmes charges vers les suspentes et donc les arcs, en jouant le rôle de poutre d'appui des augets longitudinaux (Figure 5). Une des particularités de l'ouvrage est que le caisson formant le tablier de l'ouvrage est suspendu à un arc unique. Les arcs ont une flèche de 20,00/130,00, soit 1/6,5. Ils se dédoublent à partir d'une cote d'environ 5400 mm au-dessus du tablier. On passe ainsi d'un arc commun de dimension 2400x1500 ht à deux arcs inclinés de dimension 1200 x 1500 ht chacun.

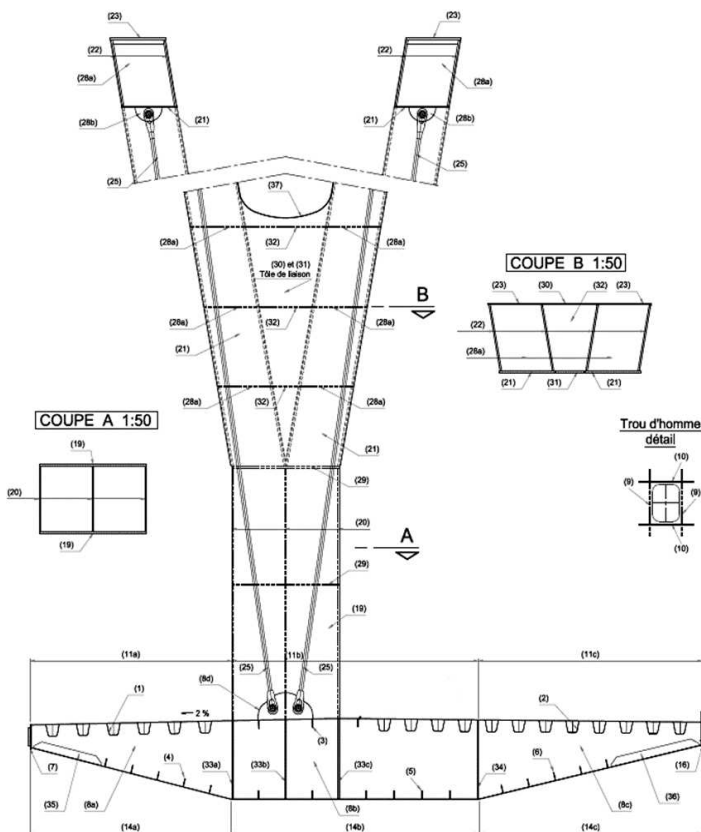


Figure 5 - Coupe transversale

Avant de se séparer, les arcs dédoublés restent néanmoins liaisonnés entre eux, sur 11,00 m environ, via des tôles en prolongement de leurs semelles supérieures et inférieures et des voiles orthogonales. Ceci s'est imposé pour permettre une réduction de la longueur de flambement des arcs. L'espacement libre maximal, au sommet des arcs vaut environ 5400 mm, de caisson à caisson. Les suspentes sont des barres Φ 80 mm en acier S460. Elles sont fixées via un système d'axe et de chapes faisant office d'articulation sur les voiles d'accrochage. Le tablier est circulaire et visitable sur toute sa longueur grâce à un trou d'homme aménagé au droit de chaque diaphragme. L'accès à l'intérieur du tablier se fait par les culées. Une protection anticorrosion de l'intérieur est assurée par déshumidificateurs.

2.3 LES APPUIS

L'ouvrage comporte 4 travées qui reposent sur 5 appuis : la culée C0 et la pile P1 sur la rive française, la pile P2 dans le Rhin, la Pile P3 et la culée C4 sur la rive allemande. (Figure 2).

Les travaux de la pile P2 ont débuté en juin 2014 pour se terminer en avril 2015. Les appuis respectifs côté français et allemands ont démarré en octobre 2014 et janvier 2015 pour se terminer en février 2015 et avril 2015.

Piles et culées sur les berges

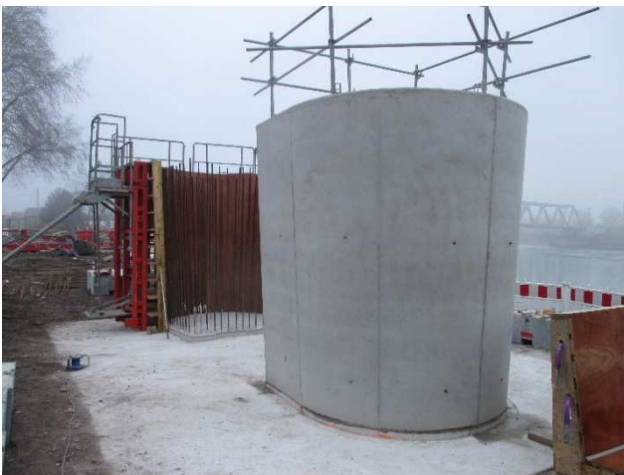


Figure 6 – Semelle, pile et coffrage

L'article de la Revue Travaux [1] a largement décrit les modes de construction des fondations retenus vis-à-vis des caractéristiques géotechniques situées au droit des appuis. Le recours à des fondations profondes a été retenu en raison de la présence de remblais et d'une couche alluvionnaire de qualité médiocre en tête d'alluvions anciennes. Des pieux forés-tubés de 1200 mm de diamètre ont donc été mis en place pour les culées C0 / C4 et les piles P1 / P3. Réalisés à l'aide d'une tarière, 10 pieux ont été forés sous les culées et 6 pieux sous les piles.

Des radiers en béton armé respectifs de 150 m³ sur les piles P1 et P3 et de 250 m³ sur C0 et C4 (80 kg/m³ d'acier) ont été coulés, une fois le recépage effectué. Les deux fûts de pile ont été coulés séparément avec un coffrage en bois sur mesure (Figure 6). Les bétons des murs, appuis et culées sont des bétons prêts à l'emploi C30/37 formulés en classe d'exposition XF1 à base de CEM III/A dosé à 350 kg/m³.

Pile P2 dans le Rhin

Dans le Rhin, les alluvions anciennes régulièrement compactées ont conduit à s'orienter vers une solution avec semelle superficielle sollicitant directement les sols de bonne compacité.

Les dimensions de semelle sont de 18 x 14,5 m² pour 3 m d'épaisseur. La solution retenue pour le bouchon est un béton non armé de faible épaisseur (1,5 m) avec clouage passif constitué de HEA 200 de 14 m de longueur dans le fond du Rhin. Le batardeau, hydrauliquement profilé, est constitué de palplanches de longueur 18,50 m, fichés de 11,50 m dans le fond du Rhin. Sa stabilité a nécessité un lit de butons et liernes disposé à 10,50 m du fond de fouille. La forme du butonnage a été conçue de manière à ne pas interférer avec le coffrage de la pile P2. Les palplanches ont été étanchées

à l'aide d'un joint bitumineux. Une connexion par aciers passifs avec la semelle a été prévue de manière à ce que le batardeau puisse remplir son rôle de parafouille. Le fut de pile a été bétonné en deux levées de 7 m et 8,50 m. Les parties arrondies ont été coffrées à l'aide de négatifs bois fabriqués en atelier.

L'ensemble des travaux effectués pour la réalisation de la pile P2 ont été facilités par la neutralisation de la passe navigable, côté France, en œuvre depuis les travaux du pont ferroviaire situé en aval de l'ouvrage (2008-2010). Un atelier flottant, composé d'un ponton flottant, d'une grue treillis et d'un bateau pousseur a été utilisé pour l'ensemble des travaux. La mise en fiche et le battage des palplanches ont été effectués par vibrofonçage.

Le tapis d'enrochement préconisé sur le pourtour du batardeau (5,00 m de largeur pour 1,00 m de profondeur) afin d'éviter les affouillements et une déstabilisation du batardeau a fait l'objet d'un rechargement en raison d'un creusement de 4 m à l'avant de ce dernier; d'importantes crues, exceptionnelles pour la saison, ont en effet interrompu à plusieurs reprises les travaux, le débit du Rhin passant de 1200 m³/s à 3400 m³/s. Le relevé hebdomadaire du niveau du fond n'a pas montré, par la suite, de reprise du phénomène.



Figure 8 - Estacade provisoire, mât de bétonnage et barge

Seize heures ont été nécessaires pour le bétonnage du bouchon qui s'est déroulé sous l'eau, assisté par plongeurs pour guider la chaussette de bétonnage. La vidange a été effectuée au bout de 7 jours, visant à assurer une résistance minimale de 20 MPa. Une couche de propreté de 10 cm a été mise en place avant le ferrailage de la semelle (Figure 8). Pour éviter des problèmes importants d'organisation liés à un bétonnage continu de 20 h, à une cadence de 35 m³/h, la semelle de béton C25/30 a été bétonnée en deux fois (2 x 350 m³), mais nécessitant de rajouter 8 T d'aciers verticaux pour reprendre les efforts horizontaux au niveau de la reprise de bétonnage. La semelle a nécessité l'assemblage de 100 T d'acier.

L'intérieur du batardeau a été terrassé pour réaliser le bouchon et la semelle. Il a été notamment décidé de sur-creuser le fond de fouille de 20 cm minimum, de manière à obtenir l'épaisseur minimale sur toute la surface. Le bouchon cloué d'1m50 d'épaisseur est constitué d'un béton C25/30 (CEM III/A dosé à 330 kg/m³) de classe d'exposition XC2. A la fin de cette opération, un nettoyage des creux de palplanches a été effectué par plongeurs. Une estacade provisoire reliant le Pont de l'Europe existant au batardeau a permis d'assurer les bétonnages, un mât de bétonnage ayant été installé à l'extrémité de l'estacade (Figure 7).



Figure 7 – Coulage du béton de propreté

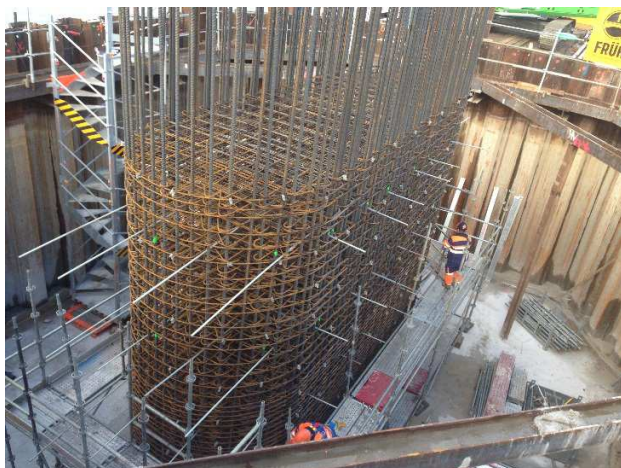


Figure 9 - Armatures en attente sur P2

La formule du béton a été adaptée pour augmenter la rhéologie à 4h par l'ajout d'un retardateur de prise. La présence de nombreuses pièces massives a nécessité de vérifier que les bétons n'étaient pas sensibles à des réactions sulfatiques internes (RSI). Celle-ci est une pathologie endogène qui peut toucher les matériaux cimentaires ayant été exposés à des températures supérieures à environ 65°C. Elle est causée par une formation tardive de l'ettringite dans le matériau durci, induisant le développement de pressions de cristallisation et de gonflements importants, et donc une coloration du parement, un faïençage et une fissuration pouvant accélérer l'apparition d'autres pathologies ou une résistance au gel amoindrie. L'évolution de la température d'hydratation a donc été mesurée par thermocouples pour vérifier que celle-ci ne dépasse pas 75°C.

La température maximale relevée a été limitée à 45 °C. Des aciers HA 40 de 12 m ont été placés en attente pour la première levée du fût, puis, une fois la semelle bétonnée, le ferrailage et le coffrage de la première élévation du fût de la pile P2 ont été réalisés (Figure 9). Le béton est de formulation analogue au béton des piles P1 et P3, soit un C30/37 (classe d'exposition XF1). La seconde levée s'est successivement effectuée par la pose du coffrage, de la peau périphérique et des épingles, de bas en haut

2.4 FABRICATION, TRANSPORT ET MONTAGE DES TABLIERS METALLIQUES

Le pont est composé de 2 tabliers en acier pesant 3000 t au total, dont 1000 t pour les arcs. Mise à part les naissances d'arc en acier S460, le tablier a été fabriqué en acier S355. La fabrication et le montage ont été conditionnés par les possibilités de transport. En effet, les accès directs aux voies navigables depuis l'atelier d'assemblage de Victor Buyck Steel Construction ont permis d'acheminer le tablier sur site par barges. Chaque tablier a donc pu être fabriqué et assemblé dans sa longueur totale de 145 m en Belgique. Les arcs, quant à eux, ont été transportés en 10 tronçons (longueur maximale 23,10 m).

Fabrication des tabliers



Figure 10 – Soudage en atelier

Les pièces métalliques (hors suspentes) ont été fabriquées dans les usines de Victor Buyck Steel Construction. Certaines parties de tablier ont été fabriquées à Eeklo, mais les deux tabliers ont été assemblés dans le nouveau hall d'assemblage à Wondelgem, situé le long du canal de Gand. Pour permettre un assemblage dans deux usines, chaque tablier a été fabriqué en 6 tronçons d'une longueur maximale de 28,50 m. Chaque tronçon était composé lui-même d'un caisson central de 5,56 m et de 2 caissons de rives de 4,47 m et 4,97 m de largeur. Une fois acheminés à Wondelgem, les tronçons ont été soudés dans un hall fermé. Les tronçons d'arc, quant à eux, ont fait l'objet d'un montage à blanc, les uns aux autres, en usine, afin d'assurer un montage parfait sur site. La fabrication a incorporé une contreflèche verticale ainsi qu'une contreflèche transversale, du fait de la suspension centrale et de la différence notable de poids liée à

la présence d'une voie béton du côté tram uniquement. Une contreflèche complémentaire de 125 mm, vers le bas, a été imposée sur chacune des culées pour charger les appuis qui auraient eu tendance à se soulever lors du chargement de la travée centrale (Figure 10).

Un trajet fluvial



Figure 11- Chargement des tabliers à Gand

Chaque tablier a été chargé, depuis l'atelier, sur une barge à l'aide de transporteurs S.P.M.T (Self Propelled Modular Transporter). A titre d'anecdote, on peut mentionner qu'il a été nécessaire d'arroser un des tabliers pendant la manutention, pour le refroidir : le soleil printanier belge a, en effet, chauffé l'extrados et provoqué une cambrure générale du tablier, incompatible avec la faible distance sol-about de tablier (Figure 11). Les arcs ont été chargés à l'aide de grues mobiles sur une seconde barge. Les deux barges accolées l'une derrière l'autre ont ainsi été remorquées et guidées par un remorqueur et un pousseur. Toutes les pièces ont emprunté un trajet fluvial, depuis les ateliers de Victor Buyck Steel Construction (Gand),

par le canal Gent-Terneuzen, puis Rotterdam pour remonter le Rhin jusqu'à la ville de Strasbourg. (Figure 12). L'exiguïté de l'aire d'assemblage, à Strasbourg, a conduit à acheminer le tablier coté Allemagne en premier alors qu'il a été mis en place en dernier.

Déchargement, assemblage des arcs et mise en place des suspentes



Figure 12 - Le convoi fluvial

Afin de procéder à l'élévation et l'assemblage final des arcs aux tabliers, ces derniers ont été déchargés, à deux dates différentes, à Kehl, sur la berge allemande du Rhin, à l'aide des S.P.M.T restés en place sur la barge lors du chargement. La différence d'altimétrie entre la barge et l'aire d'assemblage a imposé une rampe de lancement placée sur la barge. La stabilité de cette dernière a été assurée par son ballastage qui a permis l'équilibrage des charges tout au long de l'opération. La barge était dirigée grâce des câbles et des points d'ancrage ancrés sur les rives.



Figure 13 – Palées d'appui et de montage des arcs

L'assemblage des arcs a nécessité plus de 300 t de matériel de montage (Figure 13). La pose des tronçons d'arcs sur les palées de montage a été réalisée à l'aide de 2 grues mobiles. L'accès en tête des palées pour le réglage et le soudage des arcs, se faisait à l'aide d'échafaudages permettant au personnel de VBSC de circuler et travailler en toute sécurité. Les suspentes ont été montées en une seule longueur pour éviter l'usage de ridoirs jugés inesthétiques par Marc Barani. Leur installation a été réalisée une fois les arcs soudés. Ce n'est qu'après l'installation des suspentes que les palées ont été démontées. Il est à noter qu'il s'est avéré nécessaire d'étudier plus de 15 phases de vérinage/déverinage

sur appuis, du fait de la longueur et de la souplesse du tablier privé de ses arcs et suspentes. Les palées utilisées pour l'assemblage du premier tablier ont été réutilisées pour le second.

Opérations de mise en place des tabliers

Les opérations de mise en place se sont déroulées les 7 et 18 décembre 2015, respectivement pour le tablier français et pour le tablier allemand. Avant la mise en place des tabliers à leur emplacement définitif, 4 butons verticaux ont été montés approximativement au quart de la portée centrale. Ces butons étaient indispensables pendant les phases de mise en place ; sans eux, les conditions de résistance et de stabilité du tablier et des suspentes n'auraient pas été vérifiées.

Quatre phases ont été nécessaires pour la mise en place de chacun des tabliers :

- la mise à niveau du tablier sur la berge, c'est-à-dire des opérations de décalage altimétrique des appuis parallèlement à la géométrie définitive,
- le chargement par lancement, depuis les berges sur les barges, au moyen des S.P.M.T,
- la mise en place sur les piles et culées par déplacement des barges (Figure 14),
- le réglage final en position définitive



Figure 15 - Vue aérienne de la mise en place des tabliers © @airdiasol-Rothan

Le tablier a tout d'abord été mis à niveau avec des tours à vérins sur l'aire d'assemblage, afin de limiter les manœuvres de vérinage une fois celui-ci sur les barges. Le lançage permettant de mettre le tablier en porte-à-faux au-dessus du



Figure 14 - Pieux en bois au fond du Rhin

Rhin, puis de le mettre en charge sur des twin-barges (2 barges couplées côte-à-côte) a été effectué avec des S.P.M.T, des barges, des tours à vérins et un poussoir. Après fermeture des passes navigables par les services de VNF et WSA après accord de la CCNR, chaque tablier a été mis en place à l'aide des twin-barges, dirigées par des câbles ancrés sur les rives et un poussoir, afin de positionner le tablier dans son axe définitif. La mauvaise surprise est venue de la présence de pieux en bois verticaux au fond du Rhin : les câbles de traction sont en effet venus s'y bloquer, nécessitant l'envoi de plongeurs (Figure 15). Enfin, pour terminer les opérations de manutention, le tablier a été dévériné à l'aide des tours à vérins pour le mettre à son niveau définitif.

Ces mêmes opérations de mise en place ont été renouvelées pour le deuxième tablier, 10 jours plus tard.



Principales quantités	
Préchargement	36 000 m ³
Pieux	576 m
Béton	4 300 m ³
Charpente métallique	3 000 T
Voie ferrée	620 m
Garde-corps	1 000 m
Étanchéité	4 200 m ²

Remerciements pour leurs contributions :

Elvis DARNAULT, Chef de projets, CTS - Brice LHUILLIER, Ingénieur principal, Sébastien MEYER, Chef de groupe, Denis ROYER, Directeur de Travaux Adjoint, BOUYGUES TP RF

Lien vers la vidéo de la CTS concernant la mise en place des tabliers : <https://www.youtube.com/watch?v=iejZqIBkGoY>

Références

[1] Guth D., Bort M. (2015), Ligne D du tramway de Strasbourg, Travaux, N°916, juillet 2015, 78-84

(*) devenu Schleith GmbH Baugesellschaft depuis