

La revue technique des entreprises de Travaux Publics

# Travaux

n° 849  
Février 2008

## OUVRAGES D'ART

### Construction neuve

- **Bordeaux :**  
le nouveau pont ferroviaire sur la Garonne
- **A89 - Le viaduc de l'Elle**
- **Un pont high-tech en Russie**
- **Ouvrage d'art sur la rivière des Pluies à la Réunion**
- **Architecture des ouvrages d'art de la LGV Est**
- **Le pont Renault**
- **La selle multitube pour structures câblées**
- **Le triplement du pont Pinel à Rouen**
- **Gamme Artéfac de Bonna Sabla**

### Réhabilitation

- **Réparation du viaduc de Fozières**
- **Réhabilitation du pont de Labrau**
- **Rénovation de la galerie de Sabart**
- **RD 142**  
Réfection des trois ponts des Aires
- **Reconstruction d'une route en encorbellement**
- **Réhabilitation d'une cheminée de cokerie**
- **Lifting pour le pont d'Ebebda**

# Ouvrages d'art

## Construction neuve - Réhabilitation



# Maintenance des Ouvrages d'art : Sécurité, Expertise et Pérennité



**Bruno Godart**  
Directeur Technique  
Ouvrages d'art au LCPC

Ce numéro de la revue *Travaux* comporte une partie importante consacrée à la réhabilitation d'ouvrages, sujet que je souhaite développer dans cet éditorial.

Compte tenu du niveau d'équipement routier atteint dans notre pays, les travaux vont de plus en plus se porter sur la maintenance des routes et du patrimoine d'ouvrages d'art. Si le parc d'ouvrages d'art national est encore relativement jeune (avec une moyenne d'âge d'une trentaine d'années), le parc des ouvrages départementaux a une moyenne d'âge bien supérieure, et le parc des ouvrages communaux est encore plus ancien. La maintenance des ouvrages existants va donc devenir un challenge important, que ce soit pour les gestionnaires d'infrastructures qui auront à améliorer leurs méthodes de gestion, comme pour les entreprises qui auront à réaliser des travaux dans des conditions spécifiques, et parfois difficiles. Concernant ce dernier point, on pourrait citer à titre d'exemple le développement de chantiers dits « furtifs », terme quelque peu caricatural qui signifie que les chantiers vont, de plus en plus, devoir être menés en gênant le moins possible le trafic, et qu'il faudra faire preuve d'imagination pour trouver des solutions adaptées aux fortes contraintes d'exploitation de certaines infrastructures, notamment en milieu urbain.

Les effondrements récents et coûteux en vies humaines du pont de la Concorde à Montréal au Canada et du pont de Minnesota sur le Mississippi aux États-Unis, l'effondrement heureusement sans victime du pont de la Rivière Saint-Étienne dans l'île de la Réunion sont là pour nous rappeler que les stratégies de surveillance et de gestion et les moyens financiers qui y sont affectés sont encore à améliorer pour assurer la sécurité des usagers qui empruntent les infrastructures routières. Ces effondrements devraient favoriser le développement d'une ingénierie forensique, c'est-à-dire fondée sur l'ensemble des méthodes et techniques appliquées à l'investigation pour analyser et comprendre l'origine des catastrophes et en tirer des leçons.

Mais d'ores et déjà, il nous paraît possible de tracer quelques pistes de recherches et développements en matière de diagnostic, d'évaluation, de réhabilitation et de gestion d'ouvrages d'art.

Concernant le diagnostic, des progrès importants sont attendus en matière d'inspection assistée par drones, de méthodes d'essais et de contrôles non destructifs, d'instrumentation répartie, de technologies sans fil, de systèmes de télésurveillance de façon à rendre les ouvrages plus « communicants »...

En matière d'évaluation de santé structurale, un effort important est à mener en France pour se doter de recommandations, voire de nouvelles règles, pour l'évaluation de la capacité portante des ponts, car pour l'instant les évaluations se font encore sur la base des règlements de conception et de calcul des ouvrages neufs. Une stratégie d'évaluation devrait comporter plusieurs niveaux allant du plus simple au plus sophistiqué, ce dernier reposant sur une analyse complète de fiabilité, elle-même basée sur une approche probabiliste des sollicitations et résistances.

En matière de réhabilitation, les renforcements par composites devraient acquérir leur titre de noblesse, et les traitements électrochimiques comme la protection cathodique, la déchloruration et la réalcalinisation devraient prendre de l'essor. Des solutions de réparation ou de confortement seront également à mettre au point pour traiter certaines familles d'ouvrages à risques identifiés comme les buses métalliques et les premiers ponts à poutres précontraintes afin de prolonger leur durée de vie.

En ce qui concerne la gestion, il est encore possible de progresser en introduisant la notion de carnet de santé d'un ouvrage, en intégrant mieux les résultats de l'auscultation, en faisant appel à des méthodes de priorisation basées sur des analyses technico-économiques comme l'approche coûts-bénéfices, en y incorporant des méthodes d'analyse de risques, en effectuant un suivi des ouvrages par des mesures d'indicateurs de vieillissement et en développant l'entretien préventif. En s'inspirant de ce qui se pratique dans le nucléaire ou dans l'offshore, il apparaît également possible d'introduire une analyse de criticité des structures de génie civil permettant d'optimiser les fréquences d'inspection et d'auscultation des parties les plus sensibles. Le souci d'un développement durable devrait également inscrire la gestion des ouvrages sous l'angle d'une approche en coût global intégrant les coûts indirects et notamment les coûts environnementaux et sociaux, et promouvoir l'analyse du cycle de vie.

L'enjeu à venir est donc d'évaluer et de maintenir notre patrimoine d'ouvrages d'art, tout en le valorisant et le modernisant, de façon à le rendre plus durable.

## Bordeaux : le nouveau sur la Garonne

**Le nouveau pont ferroviaire de Bordeaux sur la Garonne voit ses travaux de première phase s'achever.**

**Ce tricaïsson mixte de 21,00 ml de largeur va livrer sa partie aval le 17 janvier 2008 aux équipements ferroviaires; deux voies de circulation seront mises en service le 8 mai 2008 et les trains circulant actuellement sur la passerelle Eiffel seront basculés sur ces voies.**

**La deuxième phase des travaux achèvera les raccordements de l'ouvrage à ses deux extrémités et équipera les deux voies de circulation amont; quatre voies circuleront alors sur l'ouvrage et le bouchon ferroviaire de Bordeaux aura sauté.**

Pour la réalisation du nouveau pont ferroviaire de Bordeaux sur la Garonne, second ouvrage réalisé par Réseau Ferré de France en conception construction après le viaduc de Jaulny, le groupement comprenant les entreprises Eiffage TP (mandataire), Eiffel, Spie Fondations, les ingénieries SNCF (IGOA/Inexia) et BE Greisch, les architectes Duval et De Giacinto, a été retenu à l'issue de la phase concours en mai 2005.

Ce franchissement stratégique pour le développement du transport par fer vers Bordeaux et le sud de l'Europe (il permettra à terme l'utilisation de quatre voies contre deux actuellement), est composé d'un ouvrage à tablier métallique tricaïsson à six travées de 66 à 77 m et d'un portique béton armé à son extrémité rive gauche.

Les appuis sur les berges sont constitués par trois piles sur pieux, et en Garonne par cinq piles sur fondations

semi-profondes (batardeau et béton de remplissage). Cet ouvrage remplacera dès le 8 mai 2008 la passerelle métallique existante, construite en 1860, qui n'a plus, à ce jour, la capacité de trafic requise et qui a subi les outrages du temps.

Le chantier du plus important ouvrage ferroviaire français en construction, hors lignes nouvelles, fait appel à des techniques pointues de travail en site nautique, et présente quelques opérations spectaculaires (batardeaux innovants, estacade, levages de caissons métalliques de 500 t...).

### ■ Présentation du projet et de ses contraintes

L'ouvrage est constitué d'un mono tablier métallique. Ce tricaïsson à pièces de pont et dalle béton TPE (tablier poutrelles enrobées) est appuyé sur la rive droite sur une pile culée (Pc1), en rivièrre sur cinq piles (P2 à P6) et sur un portique béton armé en rive gauche (Pc7-Pc8) (figures 1 et 2).

Les portées dans l'axe de l'ouvrage sont les suivants : 4 x 77 m de Pc1 à P5, 66 m de P5 à P6, 71 m de P6 à Pc7 et 23 m pour le portique Pc7-Pc8.

Le tracé en plan est rectiligne pour la partie centrale du franchissement (P2 à P6 environ) et courbe à rayons variables pour les parties de raccordement aux viaducs d'accès et voies existantes.

Le profil en long comporte des pentes maximum de 9 mm/m compte tenu de la proximité de la gare (le démarrage des trains les plus lourds doit rester possible).

La description des contraintes et des grands principes de la conception a fait l'objet d'une présentation dans le numéro 827 de la revue *Travaux* de février 2006. Il est néanmoins intéressant de rappeler les contraintes

Figure 1

Coupe longitudinale  
Longitudinal section

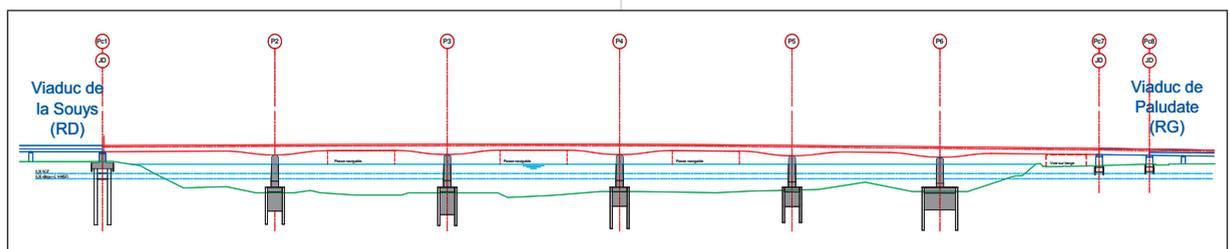
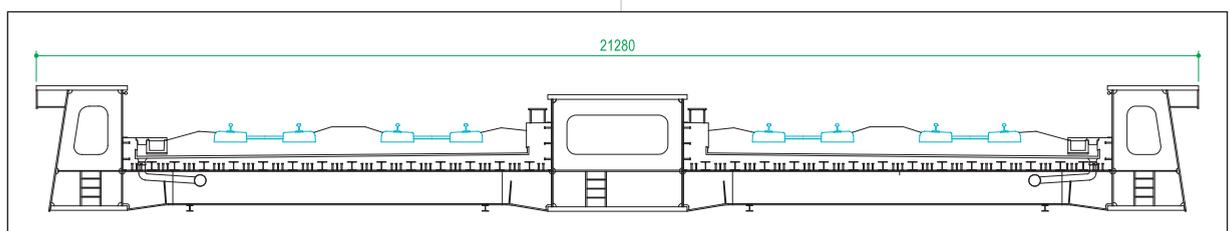


Figure 2

Coupe transversale en travée et sur appuis Pc1 et Pc7  
Cross section on span and on supports Pc1 and Pc7



# pont ferroviaire

ayant une incidence sur le déroulement du chantier :

- le fleuve : la Garonne est large au droit du franchissement de 420 m environ. Elle est soumise à un marnage de l'ordre de 5 m. Elle est navigable et le chantier ne doit en aucun cas interrompre la circulation des barges transportant de Pauillac à Langon, les éléments de l'airbus A380;
- l'environnement urbain : voiries et bâtis environnants ne permettent pas de disposer de zones d'installations étendues;
- la passerelle ferroviaire existante : sa proximité immédiate joue un rôle important dans l'organisation des travaux et de la gestion de la sécurité;
- le fameux pont de Pierre : situé à 1 km environ à l'aval du chantier, il limite en terme de tirant d'eau et de tirant d'air les dimensions des convois permettant les approvisionnements par voie fluviale et/ou maritime;
- le classement du site en zone Natura 2000 : présence d'espèces protégées.

## ■ Le phasage général des travaux

La proximité du nouvel ouvrage et de la passerelle existante est une contrainte majeure pour la construction de ce nouveau franchissement. En effet, au niveau de l'extrémité rive gauche du nouveau pont, la superposition partielle du tracé de voies projeté avec la situation actuelle et la nécessité de maintenir pendant toute la durée des travaux le trafic ferroviaire, impliquent d'effectuer les travaux en deux phases distinctes. Ainsi, sur une première durée de 26 mois, la construction de tous les appuis, de la totalité du tablier jusqu'à la pile P6 et de la partie aval du tablier de P6 à Pc8 a été finalisée. Le tablier aval a donc pu être livré à RFF le 17 janvier 2008 pour la pose des voies et des équipements ferroviaires nécessaires à la circulation des trains. Le basculement de la circulation ferroviaire de la passerelle Eiffel au nouvel ouvrage interviendra le 8 mai 2008 et nécessitera une interruption totale du trafic de 72 heures. Dans une seconde phase de 13 mois, il faudra déconstruire la passerelle existante (projet actuellement à l'étude) et achever la construction des appuis Pc7 et Pc8, du tablier amont de P6 à Pc8. Le tout sous circulation à l'aval, nouvelle contrainte forte en terme de technique mais aussi de sécurité.

## ■ Travaux préparatoires

Des travaux préparatoires ont été menés préalablement au démarrage des travaux. On note en particulier :



Photo 1

Maquette CNR pour essais hydrauliques dans le laboratoire de Lyon

*CNR model for hydraulic tests in the Lyons laboratory*

- la transplantation par le Conservatoire botanique d'Aquitaine des essences végétales protégées (cenanthe de Foucault et angélique à fruits variés) sur les berges de la Garonne, celle-ci étant inscrite au classement Natura 2000;
- la réalisation d'une campagne de reconnaissance géotechnique complémentaire pour les appuis situés sur les berges (piles Pc1, Pc7 et Pc8);
- la réalisation d'essais de battage des profilés et palplanches en Garonne afin de conforter les choix techniques adoptés lors de la phase concours;
- la réalisation par la Compagnie Nationale du Rhône (CNR) dans son laboratoire de Lyon d'essais hydrauliques sur modèle physique. Cette étude avait pour but de dimensionner les protections par enrochements des piles de l'ancien et du nouveau pont ainsi que celles sur les berges. Deux maquettes au 1/60<sup>e</sup> (photo 1) ont permis de modéliser par analogie les conditions hydrauliques de la Garonne (marées, courantologie) pour les piles placées dans les zones les plus sollicitées. Les études ont été menées pour les phases de chantier (présence de batardeaux et de l'ouvrage existant) et d'exploitation (présence uniquement des nouvelles piles). Les résultats obtenus ont été étendus à l'ensemble des autres appuis dans le lit mineur de la rivière;
- instrumentation de la passerelle existante. Toutes les piles ont été équipées de capteurs de vibrations reliés à un ordinateur dans les bureaux de chantier. Ce dispositif a permis pendant toute la durée de réalisation des appuis de s'assurer que ces travaux n'étaient pas plus préjudiciables pour l'ouvrage que les passages des trains, les plus générateurs de vibrations.



**Patrick Charlon**  
Directeur département  
ouvrages d'art  
et précontrainte  
Eiffage TP



**Matthieu Carry**  
Ingénieur travaux  
Eiffage TP



**William Carrignon**  
Directeur de travaux  
Eiffage TP



**Bernard Rouyer**  
Chargé d'affaire  
Eiffel

Bordeaux : le nouveau pont ferroviaire sur la Garonne

Figure 3

Coupe type des appuis en Garonne  
Typical section of supports in the Garonne

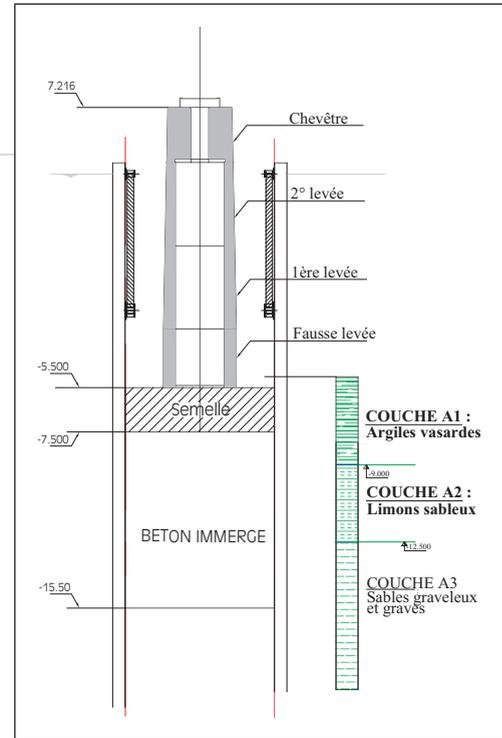
Photo 2

Estacade en rive droite  
Breakwater on the right bank



Photo 3

Mobilisation importante de moyens nautiques  
Extensive deployment of nautical equipment



viaduc de Paludate en rive gauche, sont fondées sur une file de six pieux Ø 1800 mm de 24,50 m de longueur. Réalisés selon le même procédé que pour Pc1, ces pieux permettent aux deux piles d'enjamber un collecteur d'assainissement Ø 1,60 m. En revanche, pour ces appuis, les semelles ont été réduites à leur plus simple expression puisqu'elles ont une largeur identique au fût. En effet, le chantier étant encadré sur cette berge par une voie rapide et une bretelle d'accès au pont routier Saint-Jean, il était indispensable de limiter la surface au sol impactée par les travaux. La mise en place de blindages (rideaux de palplanches et berlinoises au droit des collecteurs) a permis de respecter cette contrainte que le groupement s'était imposée dès la remise de l'offre.

Les fûts en élévation, contrairement à celui de la pile Pc1 sont pleins pour assurer une meilleure rigidité à la pile. Ils sont réalisés en deux phases puisqu'ils sont impactés par le viaduc existant, une reprise de bétonnage toute hauteur est donc réalisée sur ces fûts.

Les bétons sont de type BPSC C30/37 XS2 S4 CEMIII/A 42,5N PM ES D20 pour les pieux (dosés à 400 kg) et BPSC C35/45 XS2 S3 CEMIII/A 42,5N PM ES D20 pour les semelles et piles (dosés à 370 kg).

■ Les appuis sur berges

La pile Pc1 sert à la fois d'appui pour le pont sur la Garonne et le viaduc d'accès rive droite, dit viaduc de la Souys. Fondée sur 12 pieux Ø 1500 mm de 24 m de longueur (pieux forés, tubés sur les douze premiers mètres et réalisés à la boue bentonitique), elle porte un collecteur d'assainissement 2 m x 2 m. Une semelle de 30 x 6 x 2,50 m sert d'assise au fût de pile. Elle a dû être réalisée en deux phases afin de limiter les charges sur le collecteur; la première phase servant de dalle de protection en appui sur les pieux adjacents.

Les fûts, de géométrie relativement simple, par souhait architectural, ont été réalisés avec des banches métalliques pour les parties droites et des coffrages spécifiques en bois pour les parties d'abouts (demi-troncs de cônes).

Les piles Pc7 et Pc8 qui constituent les piédroits du portique de liaison entre le pont de la Garonne et le

■ Le portique rive gauche

Comme pour les appuis Pc7 et Pc8, il présente une reprise de bétonnage longitudinale. La dalle a une épaisseur de 1,20 m. Le soffite est coffré traditionnellement sur étaielements alors que la rive d'ouvrage est constituée d'un coffrage perdu par tôles rappelant la géométrie des caissons de rive du pont sur la Garonne. Le ferrailage très dense (trois nappes de HA 40 croisées



**Photo 4**  
Mâts de bétonnage sur batardeau P6  
Concreting masts on cofferdam P6

20 x 20 cm) a nécessité l'aménagement de cheminées de bétonnage, notamment dans les zones de jonction avec les piédroits pour limiter les hauteurs de chute. Les armatures au niveau de la reprise de bétonnage seront manchonnées. Certaines barres seront reconstituées par recouvrements réglementaires.

## ■ Les appuis en rivière

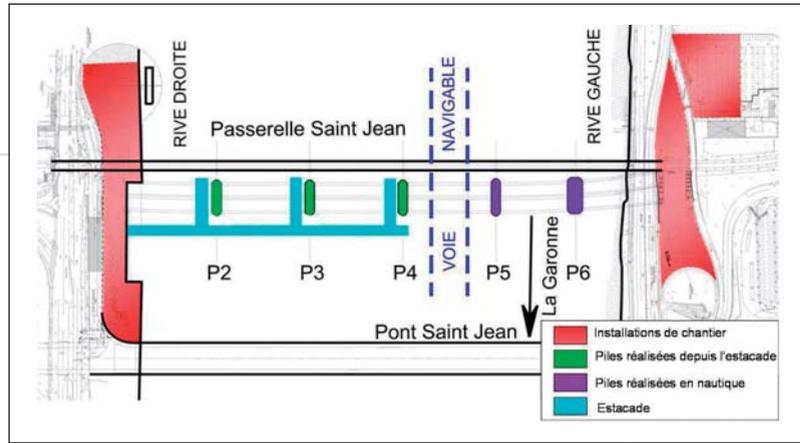
Au nombre de cinq, les appuis en Garonne sont composés, de bas en haut (figure 3) :

- de massifs de fondations semi-profondes (bouchon béton de 8 à 10 m de hauteur selon les piles) ;
- d'une semelle béton armé de 2 m de hauteur ;
- d'une fausse levée de hauteur variable permettant d'obtenir en tête une géométrie identique pour toutes les piles ;
- de deux levées de 3,80 m environ ;
- d'un chevêtre de 2,50 m.

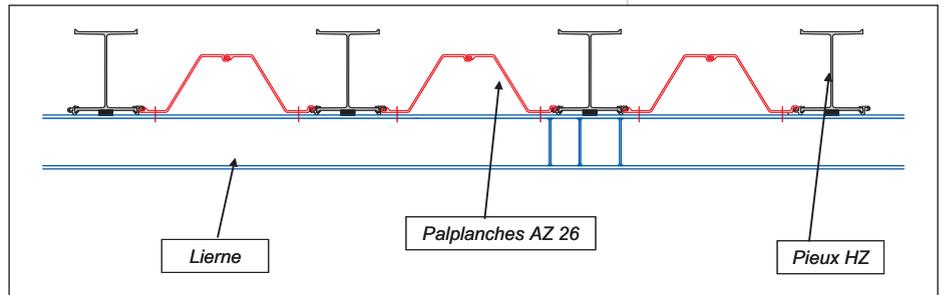
Pour construire les piles dans les meilleures conditions de délais et de coûts possibles, en s'affranchissant du marnage et des crues potentielles du fleuve, le groupement a eu recours au maximum à des moyens terrestres. Ainsi les piles P2, P3 et P4 ont été réalisées depuis une estacade (pont provisoire). Large de 7 m utiles et longue de 230 m environ, elle était munie de trois épis latéraux de 30 m x 10 m permettant le stationnement d'une grue et le stockage de matériels et matériaux au droit de chacune des piles (photo 2). Les pieux supports d'estacade ont été battus à l'avancement depuis la partie d'estacade déjà réalisée.

Le travelage de 20 m entre les files d'appui a conduit à utiliser des profilés HEM 1100 pour supporter les charges appliquées pendant le chantier (grue sur chenille de 120 t). Un dallage préfabriqué est disposé pour assurer le roulement des engins. Il est remplacé par un plateau métallique (assemblage bord à bord de profilés HEB 300) dans les zones de rotation des grues et sur les épis latéraux.

Les piles P5 et P6 ne pouvant être accessibles depuis



**Figure 4**  
Vue en plan du site  
Plan view of the site



**Figure 5**  
Principe de rideau mixte retenu pour les batardeaux  
Composite screen technique adopted for the cofferdams

cette estacade (passe navigable à conserver entre P4 et P5 pour le passage des barges transportant les pièces de l'airbus A380) et la construction d'un tel ouvrage n'étant pas envisageable depuis la rive gauche (impossibilité d'accès due à la voie sur berge), l'utilisation de moyens nautiques a été nécessaire (photo 3 - figure 4). Afin d'assurer en complément un accès piétons et les approvisionnements de béton, une passerelle réalisée avec des éléments tubulaires d'échafaudages a été suspendue latéralement à l'ouvrage existant. Trois conduites (dont une de secours) y furent installées et tous les bétons ont pu être pompés (sur plus de 200 m pour P5) depuis la zone d'installation de chantier rive gauche. Deux mâts de bétonnage positionnés en extrémité de conduites sur les batardeaux (photo 4) permettaient d'assurer une distribution convenable du béton.

## Les batardeaux

Les dimensions des batardeaux ont été choisies pour permettre le passage des coffrages. Pour les piles P2 à P5, ils mesurent 6,70 m x 28 m. La pile P6 qui est le point fixe de l'ouvrage nécessite une semelle plus large. Les dimensions sont donc adaptées en conséquence (12 m x 31 m) et le rideau est inversé de telle sorte que les profilés soient noyés dans le bouchon et les semelles, assurant ainsi, grâce à des ferraillements complémentaires, la connexion acier - béton.

Les batardeaux sont constitués par un rideau mixte alternant 36 pieux métalliques HZ 575 ou HZ 775 selon

Bordeaux : le nouveau pont ferroviaire sur la Garonne

Photo 5

Mise en eau du cadrage  
du batardeau P2  
*First filling of the frame  
of cofferdam P2*

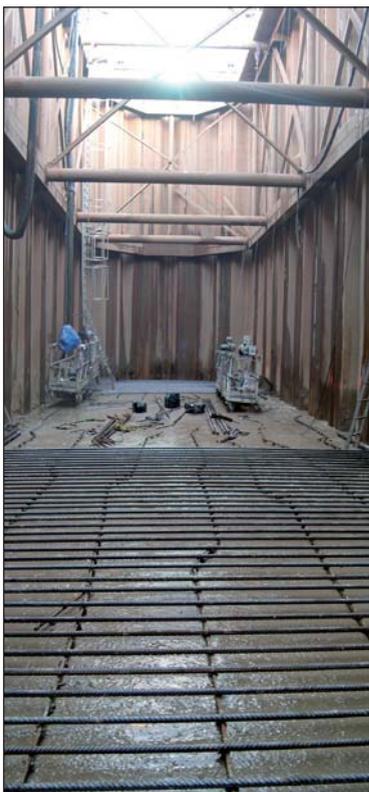


Photo 6

Ferrailage de la semelle au fond  
des batardeaux  
*Reinforcement of the foundation  
slab at the bottom of the cofferdams*



les piles et 36 paires de palplanches AZ26 (figure 5). Cette technique, fréquente pour une utilisation en rideaux linéaires (murs de quais...), a été utilisée pour la première fois en rideau fermé sur ce chantier. Elle permet de donner une plus grande inertie au rideau et ainsi de mieux reprendre les variations d'efforts dues au marnage (environ 5 m) et aux inversions de courant. Les éléments constitutifs du rideau ont une longueur de 30 m. Ils sont battus au refus dans les marno-calcaires. La cote en tête de 5,00 m NGF permet de s'affranchir des crues décennales.

Ils sont renforcés à l'intérieur par un cadrage métallique de plus de 47 t constitué de deux niveaux de liernes et butons :

- à la cote 4,20 m NGF : liernage HEB 400 de nuance S355 et six butons Ø 323,9 mm ép. 12 mm S235;
- à la cote - 2,00 m NGF : liernage 2 HEB 400 de nuance S355 et six butons Ø 323,9 mm, ép. 14 mm S235 (Ø 400 mm ép. 16 mm S355 pour le batardeau P6 plus large, afin d'éviter le flambement).

Le cadrage est préfabriqué au sol (sur l'estacade ou à quai) puis descendu sur huit pieux supports en Garonne (photo 5). Cette opération est réalisée en premier car l'ossature sert également de guide pour le battage, les deux niveaux permettant une parfaite verticalité des pieux HZ ce qui limite considérablement les risques de dégrafage des palplanches en pied.

Le recépage des batardeaux au niveau supérieur des enrochements ou de la semelle est réalisé après mise en eau dès l'achèvement des piles.

**Les enrochements**

Les enrochements sont de deux natures :

- blocs calcaires 50/200 kg pour les confortements des piles de la passerelle ferroviaire existante (cet ouvrage



Photo 7

Coffrages dans les batardeaux  
*Formwork in the cofferdams*

était voué à disparaître dans le cadre de l'opération);

- blocs dioritiques 100/400 kg pour les protections autour des piles du nouveau pont. La couronne de protection, sur une largeur de 4,50 m, est épaisse de 2,50 m. Au-delà un talutage à 1/1 est réalisé.

Une couche filtre placée sous les enrochements permet d'éviter le poinçonnement de ces derniers. Ces critères dimensionnels spécifiques assurent en effet une transition entre la granulométrie du terrain en place et celle des blocs.

Approvisionnés par l'estacade ou par chaland pour les piles P5/P6, les enrochements sont mis en place avec une grue treillis munie d'une benne preneuse (photo 3).

**Les terrassements dans les batardeaux**

Les excavations dans les batardeaux sont réalisées à la grue avec une benne preneuse. Les matériaux sont évacués soit par voie routière en décharge, soit par voie fluviale avec clapage à 20 km en Garonne dans des zones définies par le Port Autonome de Bordeaux.

**Les bouchons immergés**

Les bouchons immergés, sont entièrement réalisés sous l'eau. Un béton C25/30 XC1 S5 CEM II/A LL 52,5 N PM D20 dosé à 350 kg est mis en place par des plongeurs. La visibilité en Garonne étant extrêmement réduite voire nulle, l'intégralité du travail s'effectue au toucher.

Afin de garantir la bonne réalisation et ainsi l'intégrité des bouchons, il est nécessaire de procéder à un coulage sans interruption avec une cadence voisine de 90 m³/h. Les volumes considérables de ces pièces (1500 à 3000 m³) ont nécessité des bétonnages par

pompage de 24 à 40 heures environ pendant lesquelles trois centrales (dont une centrale de secours) ont alimenté une noria de camions malaxeurs (un camion toutes les 5-6 minutes en moyenne).

L'épuisement du batardeau est réalisé ensuite pendant 6 heures et un nettoyage soigneux est nécessaire, les épaisseurs de vase atteignant parfois 1 m dans les batardeaux.

### Les piles

Les semelles sont réalisées « pleine fouille » dans les batardeaux. Elles sont ferrillées en place 13 m sous le niveau de la Garonne (photo 6). Les fûts sont coffrés avec des banches métalliques pour les parties droites et des coffrages bois spécifiques pour les abouts (photo 7). Pour les levées supérieures, les coffrages sont maintenus en position sur étaie. Les bétons utilisés sont de formulation identique à celle des appuis à terre. Les butons supérieurs sont enlevés pour réaliser la pile (le cas de chargement dimensionnant du batardeau étant la fin du terrassement et l'ensemble bouchon-semelle augmentant considérablement la fiche et diminuant ainsi la console).

En revanche, les butons inférieurs sont noyés dans la pile. Ils sont recépés à la fin, sur la même marée, avant remise en eau du batardeau (photo 8). Des capotages métalliques toujours immergés sont disposés pour les obturer.

### ■ Travaux préparatoires aux travaux de charpente

Ils ont été principalement de deux natures :

- réalisation de palées provisoires sur les berges en rives droite et gauche;
- réalisation de renforcement de sols pour supporter le poids des engins de levage sur la rive gauche : mise en fiche et battage au refus de tubes métalliques couronnés de chevêtres et platelages permettant de porter le collecteur Ø 1600 qui ne tolère que 7 mm de flèche et donc de tassement.

### ■ La charpente métallique

#### Géométrie

En coupe transversale (figure 2), les membrures caissons sont extérieures au gabarit des circulations ferroviaires. Elles sont reliées par des pièces de pont régulièrement espacées (3,50 m) en partie basse du tablier (extrémités et mi-travées) ou en partie intermédiaire (sur appuis). Les pièces de pont supportent



des rails en sous-face pour porter des nacelles de visite. Les caissons latéraux ont une hauteur de 2,77 m en travée variable jusqu'à 4,5 m au droit des appuis en rivière. L'âme extérieure de ces caissons est inclinée avec un fruit constant, ce qui induit une variation de semelle inférieure dans les zones à hauteur variable. Le caisson central est de forme rectangulaire, à hauteur variable entre 2,57 m et 4,30 m.

Au droit de chaque pièce de pont, un diaphragme transversal encastre les pièces de pont sur les caissons et raidi en torsion ces derniers. Un trou de visite équipé d'échelles permet la circulation dans l'ouvrage. Les pièces de pont transmettent les charges verticales de la dalle vers les membrures. Elles sont de hauteur constante (760 mm) avec un moignon de hauteur et largeur variables à l'encastrement. La variation de hauteur permet de loger les rails supports de nacelle sans dépasser l'intrados des membrures.

#### Aciers de l'ouvrage

Ils sont pour les zones courantes de nuance :

- $e \leq 30$  mm : S355K2G3;
- $30$  mm  $< e \leq 80$  mm : S355N;
- $e > 80$  mm : S355ML.

Et pour de nombreuses zones d'appui ou milieu des travées de rive en nuance :

- $e \leq 50$  mm : S460M;
- $e > 50$  mm : S460ML.

Photo 8

Bétonnage des piles autour des butons inférieurs

Concreting of piers around the lower struts

#### LES PRINCIPALES QUANTITÉS

- Béton des piles : 21 000 m<sup>3</sup> dont 10 000 m<sup>3</sup> pour les bétons immergés
- Aciers HA : 1 500 t
- Pieux forés (Ø 1500 ou Ø 180) : 600 ml
- Charpente métallique : 7 950 t (tour Eiffel : 7 300 t)
- Métal d'apport pour soudures : 65 t
- Boulons HR : 14 500
- Batardeaux : 2 300 t d'acier
- Terrassements dans les batardeaux : 11 000 m<sup>3</sup>
- Enrochements : 20 000 t
- Étanchéité : 8 400 m<sup>2</sup>

Bordeaux : le nouveau pont ferroviaire sur la Garonne

Photo 9

Transport de caissons élémentaires à l'usine de Lauterbourg

*Transport of caisson elements in the Lauterbourg factory*



Photo 10

Assemblage des caissons sur plate-forme à Lauterbourg

*Assembly of caissons on platform in Lauterbourg*



Photo 11

Chargement des caissons au port de Lauterbourg avant expédition

*Loading the caissons in Lauterbourg Port prior to shipment*



Les âmes intérieures des caissons sont en classe Z25 voire Z35 pour les caissons sur appuis de culées Pc1 et Pc7. Les épaisseurs de semelles varient entre 60 et 120 mm, celles des âmes entre 24 et 40 mm et celles des diaphragmes entre 30 et 100 mm. La masse totale de l'ouvrage métallique est de 8000 t environ.

### Protection anticorrosion

Le système de protection anticorrosion de type C4ANV, est constitué de trois couches dont la première est riche en zinc. En atelier, après un grenailage DS3, hors joints de chantier, il est fait application des couches primaires et intermédiaires.

Les âmes extérieures des caissons de rive ainsi que leur semelle inférieure et la semelle inférieure de la membrure centrale reçoivent la couche de finition sur la plate-forme avant expédition.

Après traitement sur site des joints de chantier et reconstitution du complexe, une couche de finition pour homogénéisation de la teinte est appliquée sur les zones traitées d'atelier.

L'intérieur des caissons reçoit une couche de primaire. Des déshumidificateurs sont placés à chaque extrémité des caissons sur culées Pc1 et Pc7.

### Mise sur appuis

Une platine en acier thermomécanique est préscellée sur les dés d'appuis. Une contre-platine est soudée sur cette dernière lors de la mise sur appuis.

Les appareils d'appuis sont posés avant bétonnage du hourdis.

### Fabrication

Elle est exécutée dans l'usine Eiffel à Lauterbourg. Les membrures extérieures sont tronçonnées en 25 caissons unitaires de longueur comprise entre 15 et 21 m. La membrure centrale est tronçonnée en 37 caissons de 8 à 15 m.

Les masses unitaires de ces caissons restent inférieures à 90 t pour des questions de manutention dans les ateliers (photo 9).

L'une des difficultés majeures rencontrée en fabrication concerne les approvisionnements de tôles, touchés par les quotas imposés par les laminaires dès l'automne 2006.

La programmation des fabrications est alors devenue difficilement gérable pour satisfaire les expéditions.

Après traitement anticorrosion, les caissons unitaires sont transportés par un engin multi-essieux sur une plate-forme extérieure aménagée pour recevoir l'assemblage en travée complète de chaque membrure. Deux travées sont assemblées à la file (photo 10) avant d'être transportées par kamags vers le port de Lauterbourg pour expédition ou pour stockage intermédiaire en attente du convoi fluvio-maritime.

Les contrôles géométriques de chaque tronçon en fabrication sont faits par comparaison des valeurs théoriques en DAO aux valeurs relevées. Des surlongueurs à recouper sur un tronçon par travée ont été vite abandonnées au vu des bons résultats géométriques et de présentation des joints obtenus lors de l'assemblage sur plate-forme.

La fabrication a commencé en avril 2006 pour satisfaire les premiers montages sur chaque culée à compter de l'été 2006 en raison des interfaces avec les viaducs d'accès.

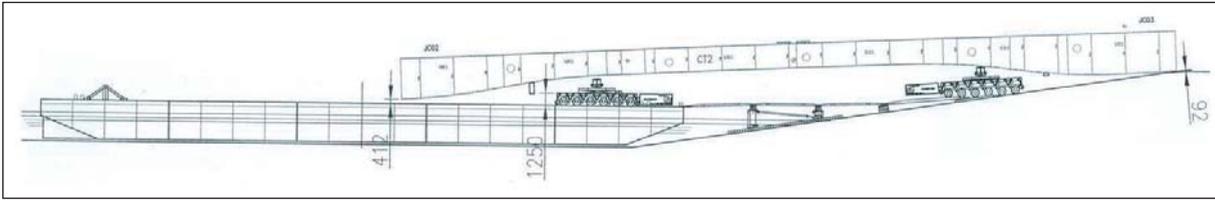


Figure 6

Principe de chargement des caissons sur ponton à Lauterbourg

*Schematic of caisson loading on pontoon in Lauterbourg*



Figure 7

Les caissons effectuent un tour de France en ponton  
*The caissons do a "Tour de France" by pontoon*

## Transport

Il s'est déroulé en plusieurs étapes, par convois routiers dès l'été 2006 côté rive gauche, au-dessus de la rocade pour cinq tronçons, puis trois tronçons en rive droite à l'automne 2006 avant les grands transports fluviomaritimes à partir de mars 2007.

Un transfert de la plate-forme d'assemblage en usine jusqu'au port de Lauterbourg, des membrures constituées en longueur de travée (max. 80 m) et de masse comprise entre 350 et 520 t, permet le chargement RORO sur un ponton maritime ballastable d'une travée complète (photo 11 - figure 6).

Des fixations complexes, « seafastening », des membrures sur le ponton de transport permettent de reprendre des forces d'accélération appliquées au centre de gravité de ces membrures de 350 t longitudinales, 450 t transversales, et verticales de 320 à 620 t. Ces résultantes sont engendrées par les effets de houle, roulis et tangage.

Un tour de France (figure 7) qui commence par la descente du Rhin jusqu'à Rotterdam, puis par la mer du Nord, la Manche avant de contourner Brest pour remonter la Garonne se termine par un passage très délicat sous le pont de Pierre. Le ponton de transport de 65 x 17 x 4 m est dimensionné pour accepter des creux de 1,5 m à une vitesse de cinq nœuds. Cinq jours sont nécessaires pour la descente du Rhin et six jours de mer sous bonnes conditions permettent de rejoindre Bordeaux.

Des ports refuges sur le parcours à moins de 10 heures de navigation permettent de s'abriter par mauvais temps. Le plus long voyage en mer se sera déroulé en juin-juillet sur une période de 24 jours. Le ponton de transport devant remonter pour chercher la travée sui-

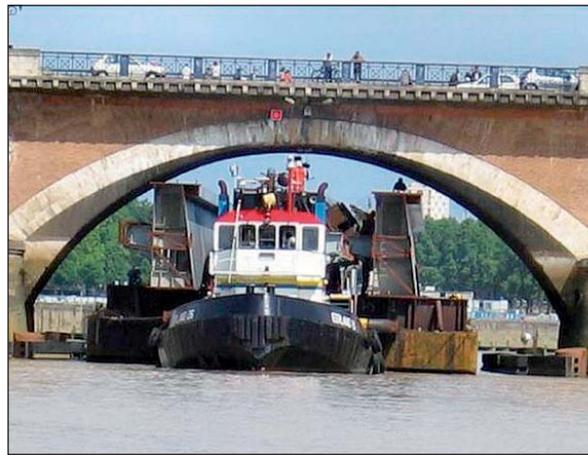


Photo 12

Passage sous le pont de Pierre à Bordeaux

*Passing under the Pont de Pierre bridge in Bordeaux*



Photo 13

Arrivée du convoi de 150 m de long à Bordeaux

*Arrival of the 150-metre long convoy in Bordeaux*

vante, la gestion des rotations et de ce fait du planning général est devenue critique.

Le passage sous l'arche 9 du pont de Pierre (photo 12) s'effectue avec deux remorqueurs sous d'importantes contraintes. Dix minutes de passage sur une fenêtre de vingt minutes, permettent aux pilotes du port de faire franchir au convoi, après de nombreuses études de mise au point, la dernière difficulté du transport (photo 13).

## Montage

Pour permettre la réalisation en parallèle des voies d'accès et de raccordement à l'existant et à la gare, les opérations de montage se déroulent en trois phases successives.

Une plate-forme renforcée côté rive gauche qui chevauche le collecteur de diamètre 1600 mm de la Lyonnaise des Eaux a permis l'installation d'une grue chenille superlift de 800 t pour anticiper la mise en

Bordeaux : le nouveau pont ferroviaire sur la Garonne

Figure 8

Principe de levage des caissons au-dessus de la voie rapide  
Schematic of caisson lifting above the expressway

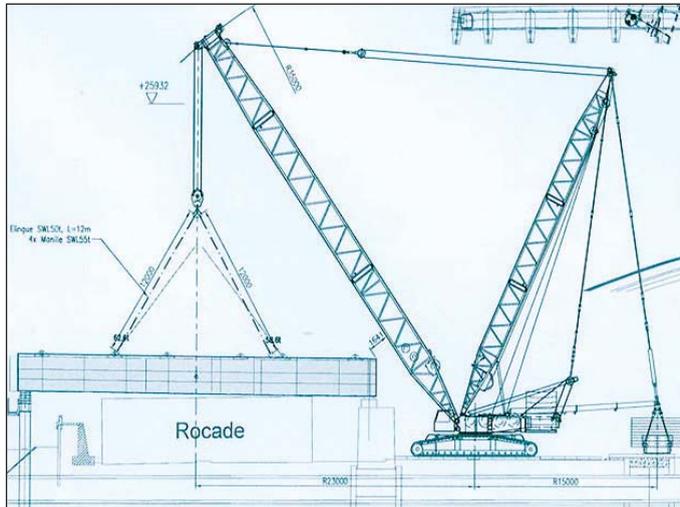


Photo 14

Pose du caisson aval au-dessus de la voie sur berge rive gauche  
Placing the downstream caisson above the track on the edge of the left bank



place après assemblage au sol de 30 ml de membrures centrale et aval (figure 8).

Ces membrures reposent sur la pile-culée Pc7 (photo 14) et sur des palées provisoires fichées en rive de Garonne. La membrure amont en conflit avec la structure de l'ancien ouvrage ne sera posée qu'à l'automne 2008 après le basculement de la circulation ferroviaire sur les voies aval du nouveau pont. Cette opération ne pourra s'effectuer qu'après dépose de la travée de rive de l'ouvrage existant.

À la suite de cette première opération, côté rive droite, les premiers tronçons en appui sur la culée Pc1 et sur des palées provisoires ont été posés avec une grue télescopique de 400 t courant octobre 2006 pour permettre la réalisation du raccordement côté viaduc de la Souys.

Vient ensuite la pose en rivière des travées complètes par trois membrures de plus de 80 mètres pour certaines, qui arrivent de Lauterbourg par voie fluviale puis maritime. Le convoi le plus lourd représente un poids d'ossature de 1200 t, plus long, plus large, plus haut que les éléments de l'airbus et il emprunte la même passe navigable encadré par un pousseur de 800 CV et un remorqueur de 1900 CV.

Une étude approfondie de ce passage sous le pont de Pierre par le Port Autonome de Bordeaux, nous a



Photo 15

Levage de la travée 1 en Garonne avec la potence  
Lifting span 1 in the Garonne with the jib crane

imposé un passage à marée basse et à contre-courant de la Garonne, assisté par deux pilotes du port. C'est la société Sarens qui assure pour Eiffel le transport et le levage des tronçons.

Un ponton ballastable de 65 x 19,5 x 6 m, prisonnier pendant la durée du chantier entre les ponts Saint-Jean et la passerelle SNCF, est équipé d'une chèvre de levage orientable munie d'un vérin avaleur de câble de capacité 650 t (photo 15).

Un palonnier spécialement conçu à multipositions (photo 16) permet la prise en charge des membrures en un point au droit de leur centre de gravité. Un délicat équilibre est trouvé pour l'assiette du ponton avec sa charge orientable, d'où l'utilité du ballastage et de masselottes mobiles d'équilibrage de la poutre.

Le déplacement longitudinal du ponton est assuré par des treuils sur des ancrées disposées en amont et à l'aval, à 250 m du ponton (figure 9). Son déplacement est lent mais très précis. Latéralement, des points fixes sont créés en pied de semelle des piles et assurent un positionnement centrimétrique du ponton et de sa charge, malgré un fort courant et une amplitude de marée importante.

La continuité des poutres est assurée après un réglage fin de la géométrie d'ensemble et un calcul d'inclinaison de la membrure, pour obtenir une présentation de joint parfaite en fonction des chargements et donc des déformées des travées précédentes. Toutes les soudures sont contrôlées par ultrasons, avant mise en place des pièces de pont à l'aide d'un portique roulant sur la membrure.

Après achèvement des soudures, le complexe anticorrosion est reconstitué.

### ■ Les hourdis TPE

Ils sont constitués par des poutrelles HEA 200 (14 sur la largeur de chaque dalle) noyées dans une épaisseur de béton armé de 25 à 35 cm. Un coffrage perdu

Figure 9

Principe d'amarrage du ponton Louis  
Mooring technique for the Louis pontoon



Photo 16

Palonnier de levage multipositions  
Multi-position lifting beam

Duripanel® (plaques de ciment et fibres bois) permet de combler les vides entre poutrelles. Un ferrailage transversal est disposé dans les percements d'âmes des poutrelles prévus à cet effet.

La conception de l'ouvrage avec poutres-caissons latérales ne permet pas l'enfilage des aciers transversaux dans les poutrelles. Une aire a été aménagée pour procéder à la préfabrication sur deux gabarits de paniers de 7 m de longueur (deux intervalles de pièces de pont). Une grue à tour Liebherr 280 EC-H 12 Litronic fondée sur quatre pieux battus au refus permet, outre la manutention des poutrelles pour la préfabrication, d'approvisionner les paniers (128 au total) sur le tablier au niveau de la pile Pc1. Ils sont ensuite repris et transportés jusqu'à leur position finale par des portiques roulant sur les caissons (photo 17). Des outils spécifiques ont été conçus pour assurer le maintien et la non-déformabilité des paniers pendant les opérations de levage et transport. Ils sont composés de trois filières métalliques supportant des griffes pinçant les profilés. L'assemblage des paniers sur les pièces de pont est réalisé par boulons HR ou HRC. Des nacelles de chantiers suspendues sous l'ouvrage et pouvant se translater de Pc1 à la berge rive gauche sont utilisées. Une fois les paniers mis en place, le ferrailage inférieur est achevé (mise en place des tirettes et préfabrication des armatures des relevés latéraux) et la nappe supérieure est assemblée en place. Le bétonnage se fait par plots de 42 m de longueur (photo 18). L'avancement entre la dalle amont et la dalle aval ne peut excéder 21 m pour limiter les effets du retrait sur la structure. Les bétons, de type BPSCC 35/45370 kg XS2 S3 CEMII/A LL 52,5 N PM D20, ont été pompés depuis Pc1 jusqu'à P6 (sur 350 m environ). La travée P6-Pc7 est réalisée depuis la rive gauche. Deux relevés latéraux en béton sont construits ensuite.

La répétition des tâches a permis de tenir des cadences élevées :

- préfabrication et pose de trois paniers par jour en moyenne;

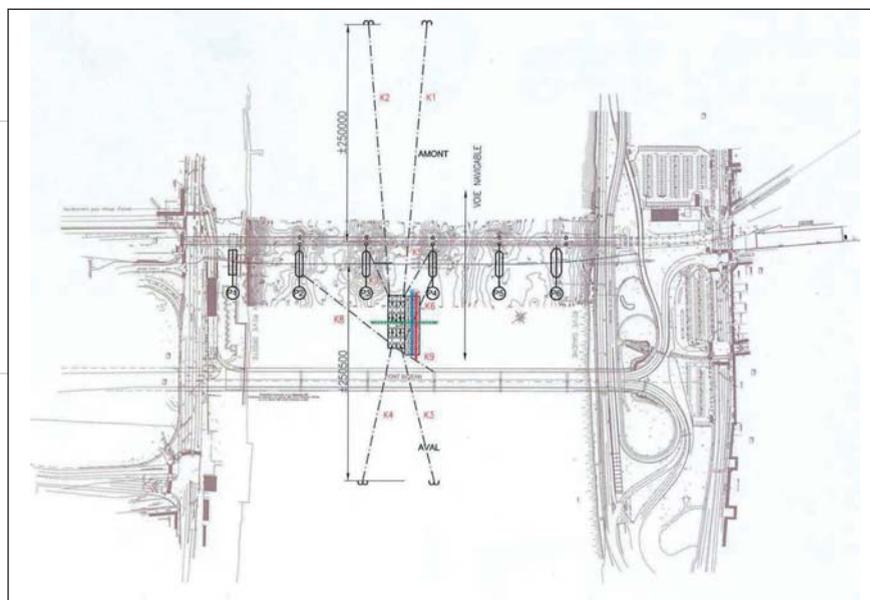


Photo 17

Approvisionnement des paniers préfabriqués de TPE

Procurement of prefabricated TPE baskets



Photo 18

Premier bétonnage de dalle sur le hourdis amont

Initial slab concreting on the upstream deck section

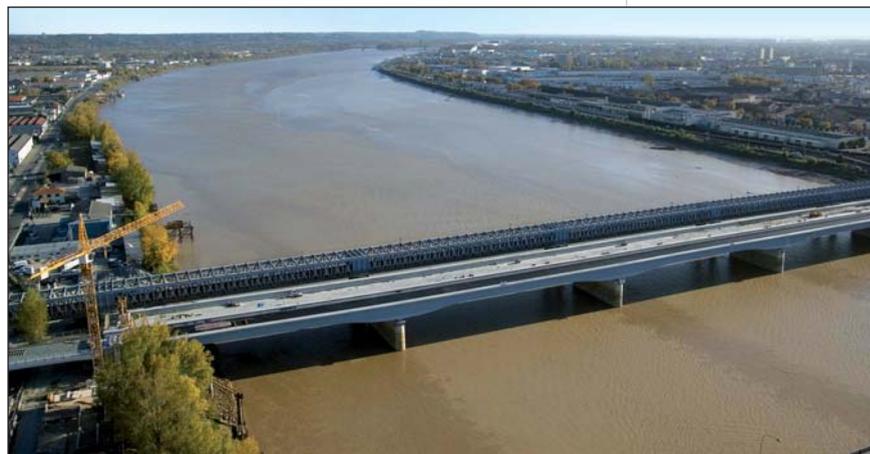


Photo 19

Avancement du chantier (novembre 2007)

Site progress (November 2007)

## Bordeaux : le nouveau pont ferroviaire sur la Garonne

- ferrailage-bétonnage d'un plot de 42 m tous les deux jours;
  - coffrage-bétonnage des relevés jusqu'à 77 m/jour.
- Les dalles béton sont protégées par un complexe d'étanchéité composé d'une chape mince (Sopralen Flam Antirock P) protégée par une contre-chape lourde (3 cm de BBM 0/6 mm). Une protection par peinture anti-UV est appliquée dans les zones non recouvertes à courte échéance par le ballast.

### ■ Les équipements

Un dévers unique de 1 % est réalisé sur chaque hourdis. Il conduit les eaux de surface vers des avaloirs permettant l'évacuation dans un collecteur PEHD Ø 250 mm suspendu sous le tablier.

Les équipements ferroviaires nécessaires à la bonne exploitation de l'ouvrage sont ensuite disposés, caniveaux pour câbles simple et double alvéoles, marches d'accès, pieds de poteaux caténaires. Un joint garde-ballast est mis en place en Pc1 (souffle de 35 cm) et deux joints couteaux sous-ballast sont disposés en Pc7 et Pc8.

Des corniches identiques à celles utilisées sur les viaducs d'accès sont disposées sur les caissons latéraux (au-dessus des berges uniquement) et sur le portique pour assurer une continuité architecturale avec les ouvrages d'accès. ■

### LES PRINCIPAUX INTERVENANTS

#### Maître d'ouvrage

Réseau Ferré de France (RFF)

#### Assistant maître d'ouvrage

Setec TPI et Terrasol

#### Groupement d'entreprises et maîtrise d'œuvre

- Génie civil : Eiffage TP (mandataire)
- Charpente : Eiffel
- Pieux : Spie Fondations
- Ingénieries : SNCF (IGOA) et BE Greisch
- Architectes : Duval et De Giacinto

#### Entreprises

- Études hydrauliques : CNR
- Études de sol : Fondasol
- Études d'exécution GC : Arcadis Lyon
- Études d'exécution CM : BE Greisch
- Réalisation de l'estacade : Leduc
- Réalisation des batardeaux, terrassements, enrochements : Leduc - Balineau
- Armatures : SAMT
- Levages spéciaux et transport : Sarens - SMIT
- Peinture charpente : Borifer
- Joints garde-ballast – Sous-ballast : Etic
- Étanchéité : Eurovia

### ABSTRACT

#### **Bordeaux : the new railway bridge over the Garonne**

*P. Charlon, M. Carry, B. Rouyer,*

*W. Carrignon*

*The first phase of work on the new Bordeaux railway bridge over the Garonne is now completed.*

*The downstream part of this composite triple caisson 21.00 metres wide will be delivered on 17 January 2008 for rail equipment; two tracks will come into operation on 8 May 2008 and the trains currently travelling over the Eiffel walkway platform will be switched over to these tracks.*

*The second phase of the works will complete the structure's connections at both its ends and equip the two upstream tracks; four tracks will then run over the bridge and railway congestion in Bordeaux will have been eliminated.*

### RESUMEN ESPAÑOL

#### **Burdeos : nuevo puente ferroviario sobre el río Garona**

*P. Charlon, M. Carry, B. Rouyer*

*y W. Carrignon*

*Acaban de finalizarse los trabajos de la primera etapa del nuevo puente ferroviario de Burdeos sobre el río Garona.*

*Este tricajón mixto de una longitud de 21,00 metros ha suministrado su parte aguas abajo el 17 de enero de 2008 a los equipamientos ferroviarios; dos carriles de circulación serán puestos en servicio el 8 de mayo de 2008 y los trenes que circulan actualmente en la pasarela Eiffel serán dirigidos hacia estas vías.*

*La segunda etapa de los trabajos permitirá finalizar las conexiones de la obra con sus dos extremos y dotará los dos carriles de circulación aguas arriba; cuatro vías podrán circular en la misma estructura y se acabará con la congestión ferroviaria de Burdeos.*

# A89 – Conception et réalisation du viaduc de l'Elle

**Le viaduc de l'Elle est situé sur le tronçon qui permettra de terminer la liaison autoroutière par l'A89 entre Bordeaux et l'A20 à l'ouest de Brive-la-Gaillarde.**

**Cet ouvrage de 474 m de long franchit le ruisseau de l'Elle à une hauteur maximale de 100 m.**

**Pour respecter les différentes contraintes du programme le groupement a choisi de réaliser un ouvrage en monotablier mixte de 19,40 m de largeur totale. Son tracé en plan en S avec une courbure variable a nécessité de prévoir un ouvrage de 7 travées avec un lancement par les deux extrémités.**

**L'architecte a conçu un ouvrage occupant de la manière la plus simple possible une vallée en V presque symétrique en essayant de rappeler par sa forme les bois qui occupent le fond de la vallée. Les variations de hauteur des piles nécessitent un accroissement de leurs sections. Pour ce faire, il a choisi de marquer par une variation nette les changements nécessaires entre sections constantes des piles suivant leurs hauteurs. L'appui du tablier sur chaque pile est marqué par un chevêtre puissant soulignant sa fonction.**



**L**e viaduc de l'Elle fait partie de la section 4.2 de l'autoroute A89. Il est situé dans le département de la Dordogne, sur la commune de Villac.

Il permet le franchissement de la vallée de l'Elle qui comporte le ruisseau de l'Elle et le RD 64.

La brèche à franchir est formée d'une vallée en V presque symétrique de 100 m de hauteur et d'environ 500 m de long.

L'appel d'offres est le second auquel répondent les entreprises. Le premier ayant été cassé à la suite d'un recours déposé par des riverains.

Deux solutions ont été proposées dans le dossier de consultation des entreprises :

- la solution de base, appelée solution B, constituée par un projet de pont en béton précontraint ;
- la solution proposée en conception-réalisation, appelée solution A, pour un tablier en ossature mixte.

## ■ Programme de la solution proposée en conception-réalisation

Le programme fixe les différentes étapes de l'étude, l'étendue de la mission de conception, les exigences et les prestations à réaliser à chaque étape.

### Les exigences

Ces exigences portent sur la géométrie de la voie portée :

- tracé en plan de l'A89 d'ouest en est :
  - > rayon  $R = 1800$  m jusqu'au PK 146+453,389,
  - > raccordement en S par deux clothoïdes de paramètre  $A = 690$  avec point d'inflexion au PK 146 + 718,234,
  - > l'axe d'implantation est situé à l'axe de la plateforme ;
- profil en long :
  - > pente constante de 3,5 % ;
- profil en travers : le programme laisse les candidats libres de choisir entre une solution monotablier et une solution à deux tabliers. Le profil en travers doit être conforme à la circulaire du 29 août 1991 pour une autoroute à 2 x 2 voies à faible trafic.

#### Photo 1

L'autoroute, vue à partir du tunnel de la Crête, trace son chemin. Les viaducs de l'Elle et de Ribeyrol

*The motorway, viewed from the Crête Tunnel, makes its way. The Elle and Ribeyrol viaducts*

**Jean-Louis Jolin**  
Architecte  
demathieu & bard

**Alain Bourg**  
Directeur de travaux  
demathieu & bard

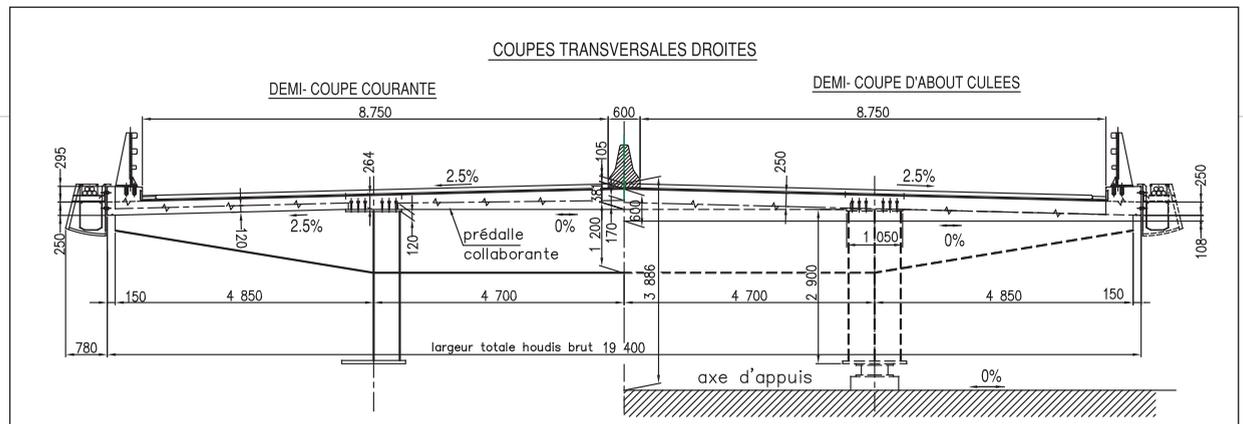
**Jacques Mossot**  
Directeur scientifique  
demathieu & bard

**Jacques Daquin**  
Responsable du service  
Méthodes  
demathieu & bard

**Jacques Dubeuf**  
Service outils spéciaux  
demathieu & bard

A89 – Conception et réalisation du viaduc de l'Elle

Figure 1  
Coupe transversale  
Cross section



**Solution à un tablier**

- Longrine de droite pour barrière lourde : 0,65 m minimum.
- Bande dérasée de droite : 1,00 m.
- Deux voies : 7,00 m.
- Bande dérasée de gauche : 0,75 m.
- DBA en TPC : 0,60 m.
- Bande dérasée de gauche : 0,75 m.
- Deux 2 voies : 7,00 m.
- Bande dérasée de droite : 1,00 m.
- Longrine de gauche pour barrière lourde : 0,65 m minimum.

La largeur utile est de 18,10 m et la largeur hors tout minimale est de 19,40 m.

**Solution à deux tabliers**

Par tablier :

- longrine de droite pour barrière lourde : 0,65 m minimum;
- bande dérasée de droite : 1,00 m;
- deux voies : 7,00 m;
- bande dérasée de gauche : 0,75 m;
- longrine de gauche pour glissière : 0,55 m minimum.

La largeur utile est de 8,75 m et la largeur hors tout minimale est de 9,95 m.

La largeur du TPC central est de 3 m.

Les chaussées sont en toit avec un dévers de 2,5 %. Le recueil des eaux de ruissellement se fait sur les bords extérieurs de la chaussée dans des corniches-caniveaux.

**Les autres exigences**

**L'environnement**

- L'entrepreneur doit respecter l'arrêté préfectoral d'autorisation pris au titre de la loi sur l'eau.
- Zone « non aedificanti » entre la RD 64 et la piste de l'ancienne voie ferrée constituant le lit majeur de l'Elle, y compris le RD et la piste, soit environ 70 m.
- Les pistes principales doivent rester en place en fin de chantier. L'ouvrage provisoire de franchissement de l'Elle et toutes les pistes d'accès secondaires doivent être restitués en fin de chantier à leur état naturel d'origine.

**Géologie et géotechnique**

Le dossier géotechnique a été réalisé pour la solution B. En phase d'appel d'offres les concurrents s'appuient sur ce dossier pour établir leur offre.

En phase d'étude de l'avant-projet de l'ouvrage d'art (A.P.O.A.), l'entreprise a à sa charge la réalisation et l'interprétation des reconnaissances géotechniques et géologiques complémentaires nécessaires à l'établissement de son avant-projet. Ces études seront poursuivies pour la réalisation de son projet d'exécution, du suivi de l'exécution des travaux de terrassements, fouilles, fondations et ouvrages géotechniques (missions G0, G12, G13, G2, G3 et G4).

Pour mener l'ensemble des prestations demandées, le titulaire du marché doit être assisté par un ou plusieurs bureaux d'études spécialisés en mécanique des sols et en mécanique des roches soumis à l'agrément de l'assistant au maître d'ouvrage (A.M.O.).

**Exigences et contraintes techniques**

- Fondations des piles : les fondations des piles de hauteur supérieure à 30 m sur le versant ouest et 40 m sur le versant est doivent être obligatoirement des puits de 5 l de hauteur minimum.
- Études : bases réglementaires, définition des actions et sollicitations pour des ouvrages mixtes.
- Matériaux : spécifications de fourniture des aciers et assemblages soudés de la charpente métallique.
- Protection anticorrosion des parties métalliques.

**Exigences et contraintes de réalisation des ouvrages**

- Installations générales : emprises mises à la disposition de l'entreprise. L'accès aux installations générales en venant de la RD 64 ne peut se faire que par la piste de l'ancienne voie ferrée qui doit être aménagée (franchissement de l'Elle par un pont et aménagement pour emprunter l'ancien tunnel ferroviaire).
- Pistes d'accès ouest et est : l'entreprise doit présenter un projet adapté à la solution proposée.
- Connexion en fond de vallée entre les pistes ouest et

est : pour assurer durant le chantier une circulation entre les pistes ouest et est, une connexion est faite en fond de vallée par l'intermédiaire d'un ouvrage provisoire de franchissement de l'Elle. Il est prévu l'aménagement d'un carrefour pour la traversée de la RD 64. Il est interdit d'accéder grâce à cet ouvrage provisoire à la RD 64 ou aux installations principales en venant de la RD 64.

- Accès aux plates-formes de réalisation des appuis depuis les pistes principales à la charge de l'entreprise.
- Plates-formes d'assemblage et de lancement des charpentes métalliques et accès à ces plates-formes :
  - > plate-forme côté ouest : la plate-forme disponible est d'environ 80 m à partir de la culée ouest. Cette zone est disponible dès le début des travaux. Si les opérations de lançage nécessitaient des largeurs supérieures, elles seraient à la charge de l'entreprise. L'accès à cette plate-forme est prévu fait par le TOARC 4.2 à partir de la RD 62. Un autre accès est possible à partir de la piste principale ouest du chantier;
  - > plate-forme côté est : la plate-forme disponible est d'environ 120 m à partir de la culée Est. Cette plate-forme est soumise aux contraintes de co-activité avec le marché du TOARC 4.3.11. L'accès à cette plate-forme pour les approvisionnements des éléments de charpente est prévu par la piste du TOARC 4.3.11. Un autre accès est possible à partir de la piste principale Est du chantier.

## Maîtrise d'œuvre

L'organisation de la maîtrise d'œuvre de ce projet est précisée à l'article 1.5.1 des Clauses administratives particulières :

- la loi MOP du 12 juillet 1985 et ses décrets du 29 novembre 1993 qui instituent une séparation de principe entre maître d'œuvre et entrepreneur ne peut être mis en application dans le cadre d'un marché de « conception-réalisation » ;
- dans le cadre de la mise en œuvre de la solution A en conception-réalisation, Setec assure :
  - > le contrôle extérieur technique des études,
  - > le contrôle extérieur des travaux assisté de prestataires choisis par le maître d'ouvrage,
  - > la gestion administrative et comptable du marché;
- Setec est en particulier investi des prérogatives de suivi du marché de travaux attribués à un maître d'œuvre, à l'exclusion de celles engageant la responsabilité du concepteur.

Dans la réalisation du projet, la maîtrise d'œuvre relevant de la conception est assurée par la direction scientifique de demathieu & bard.

## Organigramme simplifié du projet

Le groupement est constitué de :

- pour le génie civil et mandataire : demathieu & bard;
- pour la charpente métallique : URSSA;
- pour l'architecture : Jean-Louis Jolin, architecte à Metz.

L'entreprise assurant le génie civil s'est associée :

- avec le bureau d'études Geotec pour les études géologiques et géotechniques nécessaires à la validation

### LES PRINCIPAUX INTERVENANTS

#### Maître d'ouvrage

Autoroutes du Sud de la France - Direction opérationnelle de Brive

#### Assistant au maître d'ouvrage

Setec

#### Groupement d'entreprises

- Génie civil (mandataire) : demathieu & bard
- Charpente métallique : URSSA

#### Entreprise sous-traitante pour le génie civil

Dodin

#### Architecte

Jean-Louis Jolin

#### Maître d'œuvre conception

Direction scientifique demathieu & bard

#### Assistant du maître d'œuvre pour les études de charpente métallique

Setra

#### Assistant du maître d'œuvre pour les plans de construction de charpente métallique

MIO

#### Bureau d'études géotechniques

Geotec

#### Bureau d'études pour le génie civil

CERT Rennes

#### Contrôle extérieur des études du génie civil et A.P.O.A.

Secoa

#### Bureau d'études pour la charpente métallique

IOA Lexiq

#### Contrôle extérieur des études de charpente métallique

IPSO

#### Entreprises

- Terrassements des pistes : SST/Estardier
- Puits marocains : SOD
- Clouage et béton projeté : Coffex
- Pont provisoire sur l'Elle : Leduc
- Armaturier : Germain
- Coffrages des piles : Simpra
- Fourniture du béton : Béton Contrôlé Corrèze Dordogne Lot
- Étanchéité et couche de roulement : Eurovia - Sacan
- Barrières de sécurité BN4-16 : SLER
- Corniches caniveau : Sati
- Appareils d'appui à pot et joints de chaussée : Freyssinet

A89 – Conception et réalisation du viaduc de l'Elle

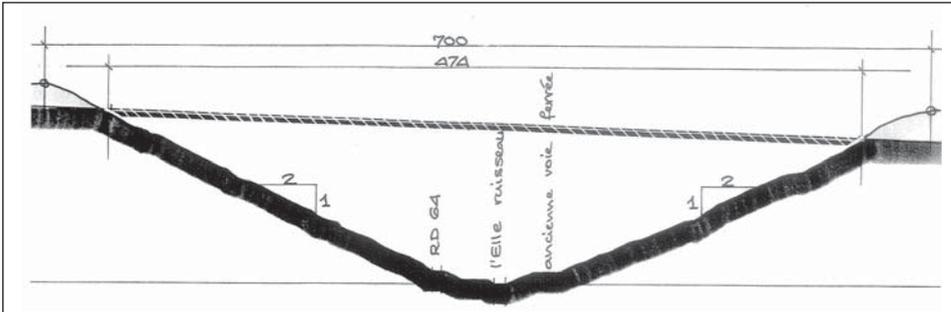


Figure 2  
La vallée et ses contraintes  
*The valley and its constraints*

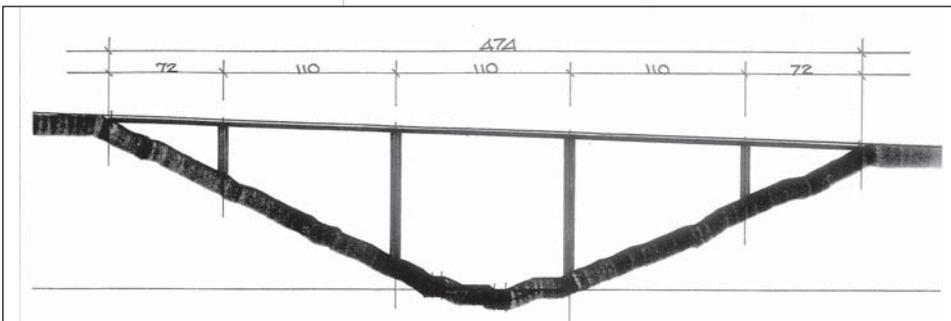


Figure 3  
L'ouvrage avec cinq travées  
*The structure with five spans*

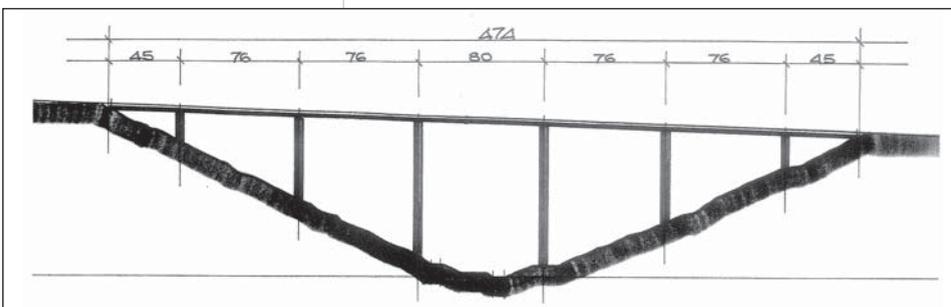


Figure 4  
L'ouvrage avec sept travées  
*The structure with seven spans*



des données du projet, la justification des ouvrages provisoires (stabilité des pentes, clouages provisoires) et le suivi des travaux ainsi que la réception des fouilles;

- avec le bureau d'études CERT Rennes pour les études des ouvrages en béton. Le contrôle extérieur est réalisé par le bureau d'études Secoa.

L'entreprise réalisant la charpente métallique s'est associée :

- avec le bureau d'études IOA Lexiq pour les études des ouvrages métalliques. Le contrôle extérieur est fait par le bureau d'études Ipsy.

■ Solution proposée par le groupement en conception-réalisation

L'étude du projet proposé à l'offre a été guidée par plusieurs contraintes :

- la profondeur de la vallée nécessitant des piles de grande hauteur;
- le tracé en plan du tablier en forme de S avec une courbure variable;
- le respect de la zone « non aedificanti » entre la RD 64 et la piste de l'ancienne voie ferrée;
- le délai de réalisation du projet.

Deux travures ont été évaluées pour cet ouvrage :

- 72,00 - 110,00 - 110,00 - 110,00 - 72,00 m;
- 45,00 - 76,00 - 76,00 - 80,00 - 76,00 - 76,00 - 45,00 m.

Dans la seconde solution, la plus grande portée pour la travée centrale vient du respect de la contrainte de zone « non aedificanti ».

La conception architecturale

Les contraintes liées au site

Les diverses contraintes propres au projet du viaduc de l'Elle ont été déterminantes pour sa conception. Elles sont nombreuses d'où l'importance de les sérier et de les analyser avant de décrire le projet.

Sur la section Thenon-Villac, l'autoroute A89 franchit un certain nombre de crêtes puis de talwegs étroits et encaissés. Ils sont assez rapprochés : à l'aplomb du viaduc, l'Elle passe entre deux crêtes distantes de 700 m. Le dénivelé étant de 100 à 120 m, les pentes des versants – assez réguliers – sont fortes : environ 50 %.

La RD 64 et une ancienne voie ferrée se fauillent le long du ruisseau, dans la partie pittoresque presque plate et étroite de la vallée. Les versants sont boisés d'arbres aux maigres troncs, poussant en hauteur sur un sol très caillouteux. Au-dessus, sur les crêtes arrondies se trouvent des fermes et des hameaux entourés de prés. Les accès sont peu nombreux. Outre la RD 64, ce ne sont que des chemins sommaires, tortueux et en forte pente.

La configuration assez mouvementée du site, fait que le viaduc, pourtant assez long est relativement peu visible du sol. De nulle part on en a une vision globale. Les meilleures vues sont obtenues depuis les chemins qui montent au hameau de Serre-Bru à l'ouest et à la ferme Muratel à l'est. De la RD 64 on devine le tablier en hiver entre les arbres, et on ne découvre l'ouvrage et ses piles qu'en arrivant dessus. Ces rares occasions de voir le viaduc ne pouvaient être un prétexte à en sacrifier l'aspect.

## Le parti général de l'ouvrage

### Le choix des travures

Deux solutions ont été envisagées :

- un ouvrage à cinq travées, quatre piles avec des portées centrales dépassant les 100 m;
- un ouvrage à sept travées et six piles avec des portées n'excédant pas 80 m.

C'est cette solution qui a été finalement retenue pour les raisons suivantes :

- elle était la plus économique après comparaison du coût du tablier et celui des piles;
- elle était plus facile à lancer depuis de courtes plateformes. Le fait de lancer de chaque côté permettait de raccourcir les délais de façon significative. De plus, la forme en S du tablier ne permettait pas de lancement par une seule extrémité;
- elle permettait une structure très mince – moins de 3 m – qui allégeait la silhouette du tablier. La travée centrale, par ses proportions assez hautes avec des piles effilées, donne une assez juste échelle d'un franchissement de haut vol.

### Le choix de la structure

Compte tenu de la grande hauteur des piles centrales, la solution bitablier a très vite été abandonnée, au profit d'un monotablier.

Diverses solutions ont été comparées :

- un bipoutre classique avec pièces de pont et consoles. Ce n'est pas une solution originale, mais elle est bien maîtrisée par l'entreprise et peut être exécutée plus rapidement. Elle est surtout beaucoup plus économique;
- une structure à caisson avec bracons supportant les abouts de dalles. La solution est plus élégante, mais elle est plus complexe à réaliser, et donc plus coûteuse.

Ces diverses raisons ont conduit à la solution adoptée : un bipoutre avec poutres de 2,90 m de haut et consoles supportant un platelage en dalles béton préfabriquées. L'économie et la rapidité d'exécution ont été déterminantes pour ce choix. L'aspect restait satisfaisant.

## Les constituants de l'ouvrage

### Les piles

Au nombre de six, leur hauteur varie de 19 à 91 m. Par leur proximité avec la route et le chemin de randonnée et en raison de leur taille, les piles sont les éléments prépondérants dans la perception du viaduc. Il importait qu'elles soient stables, mais que, malgré leur taille, elles restent élégantes, de loin comme de près. La facilité d'exécution conduisait à une section constante. Mais celle-ci – ou trop étroite en pied, ou trop lourde

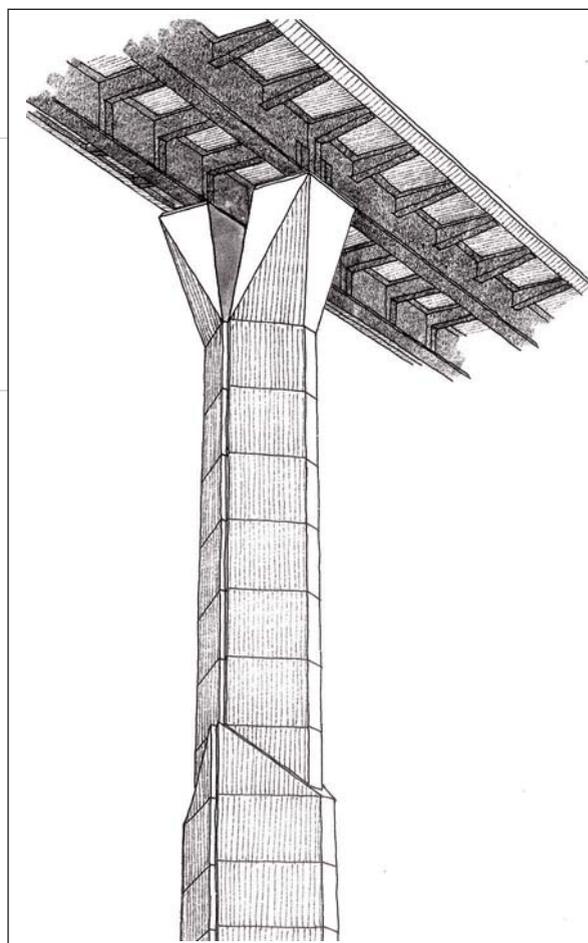


Figure 5

Croquis d'une pile avec le tablier  
Sketch of a pier with the deck

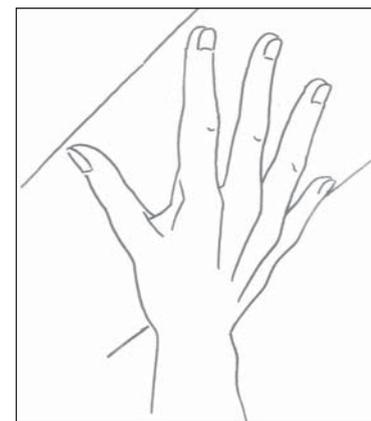


Figure 6

Comme une main ouverte supportant une charge lourde  
Like an open hand bearing a heavy load

en tête – risquait d'être instable ou de consommer trop de béton.

L'élégance et la stabilité militaient pour une section s'affinant du bas vers le haut. Pour concilier ces impératifs apparemment contradictoires, nous avons opté pour une section constante, décroissant en montant par tronçons successifs : deux pour les piles moyennes, trois pour les plus hautes. Il en résulte une silhouette dynamique animée par des paliers sculptés en V inversé.

La silhouette des piles est affinée et rendue plus vivante par leur forme en losange.

Leur perception évolue au fur et à mesure que l'on se déplace, comme une sculpture. Les parements sont en béton gris clair à coffrage net lisse. Des joints en creux de 8 x 2 cm marquent les levées du coffrage tous les 4 m.

La partie supérieure haute des piles doit mettre en valeur le passage du support vertical à l'horizontalité du tablier. L'image d'une main ouverte qui porte une lourde planche en est une bonne illustration.

Pour exprimer ce concept, l'architecte a dessiné un chapiteau puissant, sculpté en dièdres faciles à construire. Il s'ouvre en V vers les deux poutres. La partie centrale, évidée et foncée par l'ombre, accuse la transmission des efforts.

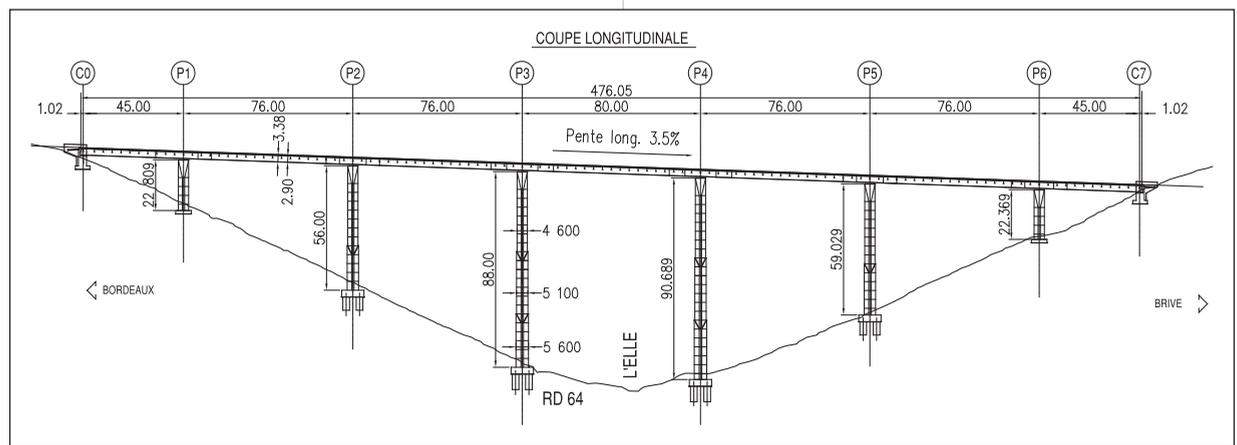
### Les culées

Les culées sont encadrées par des murs en retour englobant le tablier et les caniveaux latéraux. Une légère inclinaison de leurs extrémités – parallèles aux têtes des chapiteaux – dynamise leur silhouette. Ils sont traités en béton clair avec parements nets lisses, dont seront discrètement soulignés les joints entre panneaux de coffrage.

Les perrés ont été traités en calcaire récupéré sur place et soigneusement dressé, du replat au chemin agricole de la Mothe.

A89 – Conception et réalisation du viaduc de l'Elle

Figure 7  
Coupe longitudinale  
Longitudinal section



**Le tablier**

Comme évoqué précédemment, la structure comporte deux poutres reconstituées soudées en I de 2, 90 m de hauteur. Elles sont liaisonnées tous les 4 m par des pièces de pont se prolongeant en consoles.

Cette structure reçoit un tablier en éléments de béton armé préfabriqués liaisonnés à l'aplomb des éléments porteurs. Cette organisation permet d'allier la qualité de finition à la rapidité d'exécution. La structure métallique, à l'ombre du tablier, sera toujours foncée. Elle est colorée par une peinture vert mousse RAL 6005 (agrée ACQPA).

**La corniche-caniveau**

La rive du tablier est bordée de chaque côté par un ensemble corniche-caniveau de forte section : la corniche est en tôle épaisse laquée blanc RAL 9010. Plutôt qu'une forme molle où la lumière n'accroche pas, nous avons préféré la fragmenter en deux éléments : l'un légèrement oblique face à la lumière, l'autre faiblement cambré, à l'ombre. De la sorte la perception est franche et dynamique.

**Dimensionnement de la structure proposée**

**Étapes de la conception du projet**

L'étude du projet a été scindée en plusieurs étapes :

a. Pendant l'étude du projet en phase d'appel d'offres : l'étude du projet est faite pour remettre un projet correspondant au niveau E.P.O.A. Le groupement dans cette phase de l'étude est associé aux bureaux d'études CERT Rennes pour le génie civil et IOA Lexiq pour la charpente métallique. Conformément aux termes du DCE, ils se sont associés à des bureaux d'études externes pour assurer leur contrôle externe, Secoa pour le génie civil et Ipsos pour la charpente métallique.

À ce stade nous avons fait le choix d'un tablier mixte, de la forme des appuis et des méthodes de

construction optimisées pour la réalisation des appuis, le lancement de la charpente métallique et la réalisation du hourdis du tablier.

b. Après adjudication : l'étude du projet est avancée pendant la période de préparation de deux mois pour mener le projet au niveau d'un A.P.O.A. qui doit être approuvé par le maître d'ouvrage. Cette étude a été faite, pour le génie civil, par Secoa de façon à lui permettre de profiter de cette période de rédaction de l'A.P.O.A. pour assurer un contrôle du projet remis à l'appel d'offres.

Cette étude a permis :

- > d'optimiser le coffrage des piles;
- > de prévoir de mettre le tablier sur appuis fixes longitudinalement au droit des piles les plus hautes.

c. Après approbation de l'A.P.O.A. par le président de ASF, début des études d'exécution par les bureaux d'études CERT Rennes et IOA Lexiq.

**Campagne d'essais géotechniques**

La zone du viaduc se trouve au sein de la série métamorphique primaire du horst de Châtres. L'orientation structurale d'ensemble est nord-ouest/sud-est, conforme aux directions hercyniennes.

Ces formations concernées sont :

- les schistes verts ou noirs à séricite et à chlorite. Ils présentent fréquemment des filons de quartz;
- les grès de Châtres.

L'ouvrage sur l'Elle est concerné essentiellement par des schistes pouvant comporter, outre des filons de quartz, des passages gréseux.

Les pendages de la schistosité sont favorables en rive gauche et défavorables en rive droite. Aucune faille d'importance régionale ne se trouve dans la zone du viaduc. Aucun écoulement d'eau n'a été observé dans les fractures, mais des venues d'eau peuvent se produire en période pluvieuse.

Les essais pressiométriques donnent les valeurs suivantes :

- formations superficielles :  
 $2,10 \leq EM \leq 12,60$  MPa et  $0,24 \leq pl^* \leq 0,91$  MPa
- formations rocheuses :
  - > pour les schistes sains :  
 $EM \approx 140$  MPa et  $pl^* \approx 9,5$  MPa
  - > pour les schistes altérés :  
 $EM \approx 28$  MPa et  $pl^* \approx 3$  MPa

Le terrain se trouve dans une zone de sismique 0.

## ■ Installations générales du chantier

### Les pistes

La piste d'accès aux installations générales reprend l'ancien tracé de la voie de chemin de fer. La piste a été aménagée et un sens unique avec feux a été mis en place pour le franchissement de l'ancien tunnel de Muratel.

Depuis les installations générales situées en rive gauche de l'Elle, partent trois pistes :

- la piste rive gauche donnant accès aux piles P5, P6, C7 et la plate-forme à l'arrière de la culée ;
- la piste permettant de rejoindre la pile P4 ;
- la piste rive droite après le franchissement par un pont provisoire de la rivière de l'Elle et le RD 64, donnant accès aux piles P3, P2, P1, C0 et la plate-forme rive droite.

Des barreaux partent de chacune des pistes et autorisent l'accès aux plates-formes de chaque pile et aux grues à tour de capacité 12 t.

Pour permettre les travaux sur la pile P3 et un stockage de matériel au début de la piste rive droite, nous avons réalisé une déviation provisoire du RD 64.

Les pentes des pistes, les rayons de braquage nécessaires pour les engins, le pendage des différentes couches de sol, ont entraîné la mise en œuvre de clouage du terrain.

L'exécution des terrassements a révélé la présence de couches d'argile fine et de venues d'eau dans les fracturations et la schistosité du massif. Cette couche d'argile joue le rôle d'une couche « savon » pouvant engendrer des glissements de terrain conséquents. Cela nous a conduits à éloigner les grues des bords de talus en augmentant les terrassements de plates-formes et les clouages prévus à l'offre.

### Pont provisoire pour le franchissement de l'Elle

Un pont provisoire de 22 m de portée permettant le franchissement de l'Elle et devant être démonté après la fin de la construction du viaduc, a été fourni et mis en place par la société Leduc.

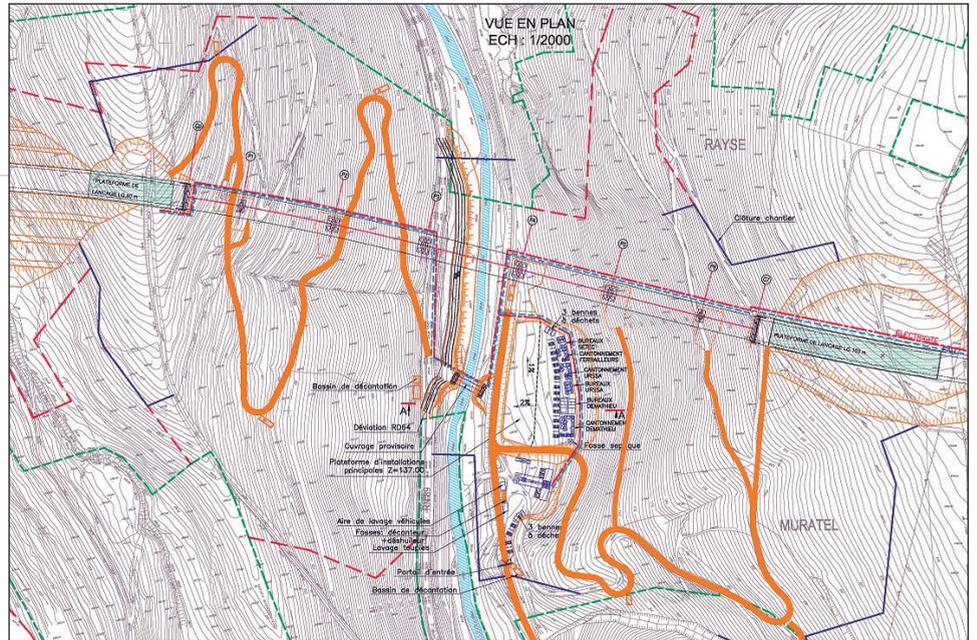


Figure 8

Pistes rive gauche et rive droite. Installations générales  
 Tracks on the left and right banks. General facilities

À la fin du chantier, ce pont a été racheté par la commune pour servir d'accès à la ferme de Muratel par l'ancienne piste de chantier.

### Installations de chantier

L'installation générale de chantier comprend les locaux de la maîtrise d'œuvre, du chantier, l'aire de préfabrication des prédalles et la centrale à béton mise en place par BCCDL.



## ■ Génie civil

### Les fondations

Les fondations des culées et des piles P1 et P6 sont superficielles.

Les fondations des piles P2 à P5 sont constituées de quatre puits marocains de 3,00 m de diamètre et d'une profondeur variant de 6,00 m sur la pile P3 à 7,00 m sur les piles P4 et P5. Les puits de la pile P2 ont dû être approfondis pour tenir compte de l'état du terrain en fond de fouille.

Photo 2

Installations générales et aire de préfabrication des prédalles  
 General facilities and precast slab prefabrication area

A89 – Conception et réalisation du viaduc de l'Elle

Photo 3  
Coffrages des piles  
Pier formwork



Photo 4  
Ensemble des piles depuis  
la pile P1  
All the piers from pier P1



Photo 5  
La pile P3 en cours  
d'exécution  
Pier P3 in progress



**Les piles**

Les piles ont une forme de losange. Cette forme souhaitée par l'architecte n'est pas la plus efficace pour reprendre les actions sur une pile de grande hauteur. Pour permettre une simplification de leurs réalisations, nous avons choisi d'avoir :

- un noyau intérieur de section constante;
- une section extérieure constante par niveau. Trois variations des sections extérieures ont été prévues. Ces changements de section se font par épaississement des voiles de 25 cm. Cette modification se fait sur la hauteur d'une levée de bétonnage. Cette solution permet de faire apparaître nettement cette variation. Elle se fait par une coupure inclinée sur chaque face du losange.

Hauteur d'une levée : 4,00 m.

**Section**

- Longueur maxi = 11,00 m, largeur maxi = 5,60 m.
- Épaisseur du voile = 0,86 m.

**Section 2**

- Longueur maxi = 10,00 m, largeur maxi = 5,10 m.
- Épaisseur du voile = 0,63 m.
- Hauteur maximale : sept levées.



Photo 6  
Coffrage d'un chevêtre  
Formwork for a crosshead beam

**Section 3**

- Longueur maxi = 9,00 m, largeur maxi = 4,60 m.
- Épaisseur du voile = 0,40 m.
- Hauteur maximale : huit levées.

Pour reprendre la charge du tablier dont les poutres principales ont un entraxe de 9,40 m, l'architecte a conçu un chevêtre massif de 8,00 m de hauteur.

Les piles ont été réalisées avec des grues à tour de 12 t de capacité.

**Le tablier**

**Préfabrication des prédalles**

Pour respecter les délais de réalisation, demathieu & bard a choisi de réaliser le hourdis à l'aide de prédalles participantes. Celles-ci portent longitudinalement sur les pièces de pont et les consoles, et, transversalement, sur les poutres principales.

La distance entre pièces de pont est de 4,00 m sauf pour les pièces de pont adjacentes aux culées pour lesquelles la distance est de 5,00 m.

Ces prédalles sont de deux types :

- prédalles entre poutres principales;
- prédalles s'appuyant sur les consoles.

Ses pièces de pont avec des semelles supérieures horizontales ont été prévues. Cette solution engendre un

hourdis et des prédalles entre poutres principales d'épaisseur variable – 250 mm au droit des poutres principales et 380 mm dans l'axe du hourdis.

Cela entraîne un poids des prédalles plus important car l'épaisseur varie de 120 mm au droit des pièces de pont à 170 mm dans l'axe du tablier, mais cette solution permet de réduire leur flèche à mi-portée au bétonnage du hourdis de manière significative.

La préfabrication a été faite sur l'aire de l'installation générale. Les prédalles sont ensuite stockées à proximité de la culée C7.

### Pose des prédalles

La pose des prédalles est faite avec deux chariots de pose pouvant être couplés. Le premier chariot permet de transporter une grue mobile à flèche treillis Kobelco BM 500 permettant de poser des prédalles de 15 t. Le second est prévu pour amener les prédalles sur leur lieu de pose.

### Bétonnage du hourdis

Le bétonnage du hourdis est fait conformément aux « Recommandations pour la maîtrise de la fissuration des dalles » du Setra. Les règles particulières à la résistance du béton au décoffrage ne sont pas applicables puisqu'il n'y a pas de décoffrage. Il reste cependant à ne pas solliciter en traction du béton à jeune âge. Un bétonnage par plots a donc été prévu, en commençant par les plots situés en travées et en terminant par ceux sur appuis.

### Appareils d'appui

Les appareils d'appui sont du type à pot. Les calculs faits pendant l'étude d'A.P.O.A. ont montré qu'il était préférable de mettre en place des appareils d'appui fixes longitudinalement en tête des piles P2 à P5 pour mieux répartir les efforts longitudinaux.

Sur les piles P2 à P5, les appareils d'appui ont une capacité de 15000 kN, 14000 kN sur les piles P1 et P6 et 4 000 kN sur les culées.

## ■ Charpente métallique

### Choix de la méthode de lancement de la charpente

La forme en S du tablier en plan suppose de lancer le tablier par les deux extrémités. Le point d'inflexion étant sensiblement au milieu du tablier, le lancement se fait par deux moitiés du tablier.

Le tracé en plan comprend des clothoïdes, c'est-à-dire des courbes de rayon continûment variable.

Le lancement doit se faire sur une courbe de rayon



Photo 7

Chariots et grue mobile pour la pose des prédalles sur la charpente métallique  
Carriages and mobile crane for placing precast slabs on the steel structure

| Appuis             | C0   | P1   |      | P2   |      | P3   |      | P4   |      | P5   |      | P6   | C7   |      |      |      |      |      |
|--------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| N° Plots           | 1    | 2    | 3    | 4    | 5    | 6    | 7    | 8    | 9    | 10   | 11   | 12   | 13   | 14   | 15   | 16   | 17   | 18   |
| Longueur plot (m)  | 33,0 | 24,0 | 24,0 | 28,0 | 24,0 | 28,0 | 24,0 | 24,0 | 28,0 | 28,0 | 24,0 | 28,0 | 24,0 | 24,0 | 24,0 | 28,0 | 24,0 | 33,0 |
| Jours de bétonnage |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
| J1                 | ■    |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
| J2                 |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
| J3                 |      |      | ■    |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
| J4                 |      |      |      | ■    |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
| J5                 |      |      |      |      | ■    |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
| J6                 |      |      |      |      |      | ■    |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
| J7                 |      |      |      |      |      |      | ■    |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
| J8                 |      |      |      |      |      |      |      | ■    |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
| J9                 |      |      |      |      |      |      |      |      | ■    |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
| J10                |      |      |      |      |      |      |      |      |      | ■    |      |      |      |      |      |      |      |      |
| J11                |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      | ■    |      |      |      |      |      |      |      |
| J12                |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      | ■    |      |      |      |      |      |      |
| J13                |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      | ■    |      |      |      |      |      |
| J14                |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      | ■    |      |      |      |      |
| J15                |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      | ■    |      |      |      |
| J16                |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      | ■    |      |      |
| J17                |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      | ■    |      |
| J18                |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      | ■    |

Figure 9

Phases de bétonnage du hourdis  
Deck section concreting stages



Photo 8

Franchissement d'une culée  
Crossing an abutment

A89 – Conception et réalisation du viaduc de l'Elle

Photo 9

Treuil et mouflage  
Winch and pulley blocks



Photo 10

Accrochage du mouflage  
sur la culée C0  
Attachment of pulley  
blocks on abutment C0



Photo 11

Appui provisoire  
sur l'aire de lancement  
Temporary support  
on the launching area



constant. URSSA et son bureau d'études IOA Lexiq ont donc proposé de faire le lancement suivant deux cercles permettant de ne pas avoir un écart entre la position théorique et la position réelle ne dépassant pas  $\pm 225$  mm. Après chaque phase de lancement, le tablier est déplacé transversalement pour le remettre dans sa position théorique avant de faire le montage du tronçon suivant.

Pour éviter des terrassements importants dans des terrains rocheux, les plates-formes ont été calées à des niveaux correspondants au niveau des couches de forme. Cette solution permet de faire la totalité des travaux de gros œuvre des culées, mais avec l'inconvénient de la hauteur nécessaire de calage sur les premières piles.

La pente moyenne du tablier étant de 3,5 % descendant de C0 vers C7, la pente moyenne du lancement est de 4,5 % en descendant à partir de C0 et de 2,5 % en montant depuis C7.

L'effort de lancement maximum pour les deux demi-tabliers de 1200 t environ chacun, a été pris égal à 10 % du poids propre, y compris les effets dus à la pente longitudinale du tablier.

Le déplacement de la charpente a nécessité de mettre en œuvre sur chaque plate-forme, à l'arrière, un treuil pouvant développer un effort de 120 t avec un mouflage six brins pour le lancement et sur la plate-forme côté C0, un treuil de retenue pouvant reprendre un effort maximum de 53 t.

La vitesse du vent pendant le lancement a été limitée à 30 km/h.

L'effort transversal maximum sur les chaises pendant le lancement est pris égal à 40 t.

L'effort transversal maximum de recentrement pouvant être nécessaire à la fin d'une phase de lancement a été pris égal à 52 t.

Une procédure de suivi des déplacements des têtes des piles a été suivie pendant les phases de lancement des demi-tabliers pour s'assurer du respect des flèches maximales calculées à chaque phase d'avancement (cf. tableau I).

Le souhait de lancer le tablier en passant au-dessus des culées a imposé des hauteurs de camarteaux impor-

Tableau I

Flèches maximales calculées des piles pendant le lancement de la charpente métallique pour un effort  $H_{max}$  =

Calculated maximum pier deflection during launching of the steel frame for a force  $H_{max}$  =

| Piles   | P2   | P3   | P4 | P5   |
|---|------|------|----|------|
| Flèches maxi calculées en tête des piles (mm) | 38,7 | 71,5 | 80 | 42,8 |

Photo 13

Lancement de la charpente à partir des deux culées  
*Launching the frame from the two abutments*



Photo 12

Palée provisoire avec guidage transversal et vérinage  
sur une pile

*Temporary bent with cross guides and jacking on a pier*

tantes qui vont en décroissant sur les piles les plus proches du centre de l'ouvrage.

Charge maximale sur un appui pendant le lancement : 260 t. Ce dernier s'est fait presque symétriquement à partir des deux plates-formes.

Le démontage des avant-becs (d'une longueur de 30 m environ) doit se faire alors que les demi-tabliers ont dépassé les piles P3 et P4. Les avant-becs se trouvent alors à plus de 100 m au-dessus de l'Elle.

Cette opération a nécessité l'amenée d'une grue mobile télescopique Demag AC 500 pour démonter des pièces à 100 m au-dessus du ruisseau.

Le soudage des poutres principales de la charpente a demandé un réglage des dénivellations du tablier sur les différentes têtes de pile pour assurer la continuité angulaire de la charpente dans cette section et vérifier que la déformée de la charpente est la même que si l'ouvrage avait été réalisé sur cintre.

Après mise sur appuis provisoires, la verticalité des piles a été vérifiée et, si nécessaire, les têtes de piles ont été remises à leurs positions théoriques.

La mise sur appuis définitifs a été faite après le bétonnage du hourdis.

### Le tablier

Les éléments du tablier ont été réalisés dans une usine d'URSSA à Vitoria-Gastiez.

Chaque poutre longitudinale a été découpée en 18 tronçons de longueur variant entre 22 m et 32,9 m.

Le réglage des éléments en cours de fabrication et au montage tient compte des contreflèches calculées.

Le contrôle de la construction a été confié par Setec aux Laboratoires des Ponts et Chaussées de Bordeaux et de Toulouse.



Photo 14

Montage de la charpente  
métallique à l'arrière  
de la culée C7

*Erection of the steel frame  
at the rear of abutment C7*



Photo 15

Dernier démontage  
de l'avant-bec sur la pile P3  
*Final dismantling  
of the launching nose on pier  
P3*

A89 – Conception et réalisation du viaduc de l'Elle

Figure 10  
 Planning simplifié  
 du viaduc  
 Simplified planning chart  
 for the viaduct

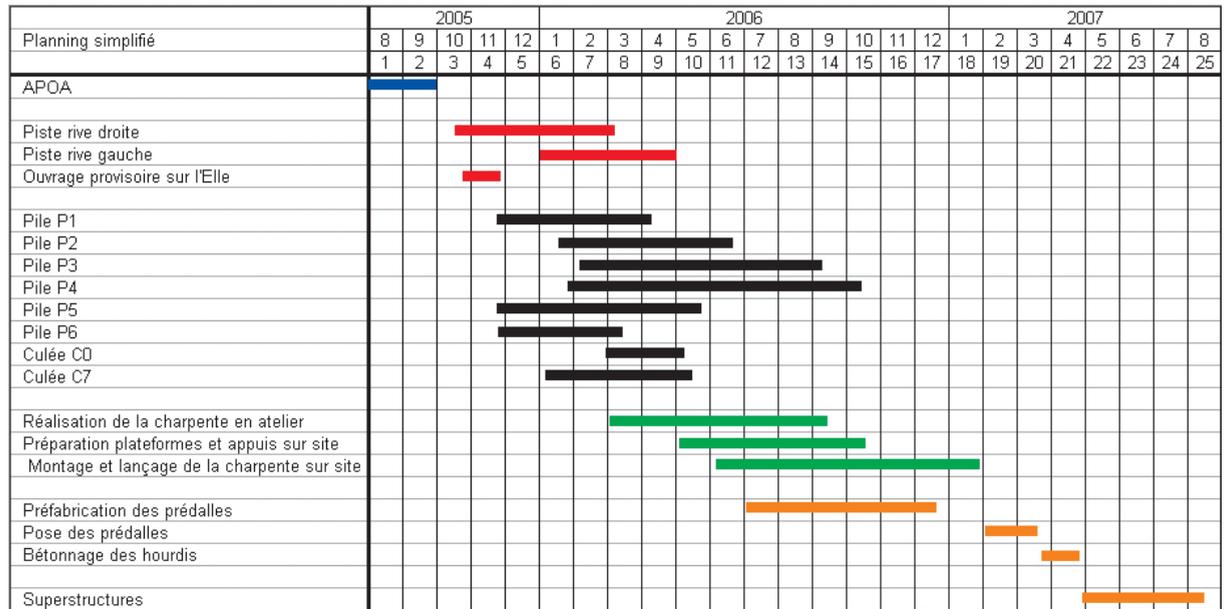


Photo 16

Tronçon de la poutre principale dans l'atelier  
 Section of the main beam  
 in the workshop



Photo 17

Le viaduc terminé dans la vallée de l'Elle  
 The completed viaduct in Elle Valley



**Études de la charpente métallique**

Les études de dimensionnement de la charpente métallique ont été faites par IOA Lexiq. Elles ont été contrôlées par Ipson. Pour valider les hypothèses et le dimensionnement de la charpente métallique, le maître d'œuvre en charge de la conception a confié la validation finale des études au Setra.

**Méthodes d'exécution de la charpente métallique**

Les méthodes de construction et les plans de réalisation des différentes parties de la structure, ainsi que le contrôle externe, ont été faits par le bureau d'études URSSA.

Le contrôle final des plans de réalisation a été confié par le maître d'œuvre chargé de la conception au bureau d'études MIO.

**Tolérances sur la charpente**

Les études de la charpente dans son état final sont faites en supposant qu'à la fin de la construction, elle est dans un état identique à celui qu'elle aurait si elle était réalisée sur cintre général. Cette hypothèse, basée sur le théorème de congruence, suppose que l'ensemble des opérations de réalisation de la charpente – en usine et sur site – conserve la continuité de forme prévue par le bureau d'études dans ses calculs de contreflèches.

Les tolérances de fabrication de la charpente indiquées dans le fascicule 66 du CCTG sont celles de la norme NF P 22-810.

Pour le profil en long, avec une portée  $T > 20000$  mm, on doit vérifier un écart maximum par rapport au profil en long théorique en millimètre :  $Cf \leq 10 + T/2000$ , soit pour une portée de 80 m,  $Cf \leq 50$  mm. Le projet de norme européenne devrait borner supérieurement cet écart à 35 mm.

À cet écart de profil en long mesuré sur les poutres principales peut s'ajouter un écart sur les pièces de pont et les consoles.

Les prédalles préfabriquées suivent le nivellement de la charpente réalisée, y compris les armatures des BN4 qui sont ancrées dans ces pièces. Le nivellement des poteaux de BN4 suit le profil optimisé. Il en résulte un écart sur les valeurs des distances théoriques entre les répartiteurs de BN4 et les cadres  $\varnothing 12$  prévus dans le « Guide technique GC des barrières H2 et H3 » du Setra.

Il est donc prudent de choisir des douilles d'ancrage de 250 mm pour des ouvrages qui ne sont pas construits sur cintre général. Setec a choisi de mettre en œuvre des barrières BN4-16 au lieu des barrières BN4. Elles ne sont pas couvertes par la norme XP P 98-421. Elles n'ont donc pas de marquage NF. ■

#### LES PRINCIPALES QUANTITÉS

- Béton des puits : 975 m<sup>3</sup>
- Béton des semelles : 2445 m<sup>3</sup>
- Béton des élévations des culées : 840 m<sup>3</sup>
- Béton des élévations des piles : 5650 m<sup>3</sup>
- Armatures des appuis : 1500 t
- Béton des prédalles du tablier : 1170 m<sup>3</sup>
- Béton du hourdis coulé en place : 1600 m<sup>3</sup>
- Béton des longrines de BN4 : 133 m<sup>3</sup>
- Armatures du tablier : 680 t
- Charpente métallique : 2365 t
- Connecteurs : 17,8 t
- Peinture : 21510 m<sup>2</sup>

#### Délai d'exécution

25 mois (cf. figure planning simplifié)

#### Prix HT de l'ouvrage (montant marché)

20898822 euros dont 5665994 euros pour la charpente métallique

#### ABSTRACT

##### A89 -

#### Design and construction of the Elle viaduct

J.-L. Jolin, A. Bourg, J. Mossot,  
J. Daquin, J. Dubeuf

*The Elle viaduct is located on the section that will complete the motorway link via the A89 between Bordeaux and the A20 west of Brive-la-Gaillarde.*

*This 474-metre long structure crosses the Elle stream at a maximum height of 100 m.*

*To meet the various programme constraints, the consortium chose to build a composite single-deck structure of total width 19.40 m. Due to its "S" horizontal alignment with variable curvature, a seven-span structure had to be provided for, with launching from both ends.*

*The architect designed a structure inserted as simply as possible in an almost symmetrical V-shaped valley while trying to evoke through its shape the woods covering the valley floor. Pier height variations meant that thicker cross sections were required. To achieve this, the architect chose to show through a sharp variation the necessary changes in constant pier cross sections according to their height. The deck's support on each pier is marked by a powerful cross-head beam emphasising its function.*

#### RESUMEN ESPAÑOL

#### Autopista A89 - Diseño y realización del viaducto sobre el valle de Elle

J.-L. Jolin, A. Bourg, J. Mossot, J. Daquin  
y J. Dubeuf

*El viaducto sobre el valle de Elle está ubicado en el tramo que permitirá acabar el enlace de autopista por la A89 entre Burdeos y la A20 por el Oeste de Brive-la-Gaillarde.*

*Esta obra de una longitud de 474 metros salva el arroyo de Elle a una altura máxima de 100 metros.*

*Para respetar los distintos imperativos del programa la agrupación ha optado por la ejecución de una estructura en monotablero mixto de 19,40 metros de anchura total. Su trazado en plano en S con una curvatura variable ha precisado prever una obra de 7 vanos con un lanzamiento por ambos extremos.*

*El arquitecto ha diseñado una obra que ocupa de la forma más simple posible un valle en V casi simétrico intentando recordar por su forma los bosques que ocupan el fondo del valle. Las variaciones de altura de las pilas precisan un incremento de sus secciones. Para tal menester, el arquitecto ha optado por marcar mediante una variación neta los cambios necesarios entre secciones constantes de las pilas según sus alturas. El apoyo del tablero sobre cada pila va señalado por una potente losa transversal que permite destacar su cometido.*

Au nord-ouest de Moscou (Russie), le nouveau pont autoroutier construit sur la Moskova le long du parc de la Forêt d'argent est un ouvrage hors du commun dont Freyssinet a réalisé les études de modélisation et installé les haubans.

# Un pont high-tech en Russie

De tous les chantiers moscovites actuels, qui sont légion, celui de l'autoroute Krasnopresnenskaya (près de 1,3 milliard d'euros de coût global), qui relie le centre-ville au boulevard périphérique et à l'autoroute conduisant à Riga, est l'un des plus impressionnants. De nombreux ouvrages exceptionnels sont en effet construits sur son parcours, en particulier à la hauteur du parc de la Forêt d'argent, où son tracé emprunte un tunnel à deux niveaux de 1 700 m de long et 14 m de diamètre environ (galerie réservée à la circulation automobile en partie supérieure, au métro en partie inférieure), et surtout le pont Serebryany Bor, qui constitue le couronnement architectural du projet (photo 1).

Long de 1 100 m avec un pont principal de 800 m, cet ouvrage unique en son genre est composé d'un tablier suspendu par l'intermédiaire de haubans à une arche monumentale qui culmine à 102 m de hauteur.

« C'est un projet original en tout point, juge Boris Artukhov, directeur opérationnel de Freyssinet Russie, d'une part en raison de la disposition inédite des haubans sur la travée centrale (420 m de portée et 45 m de large) d'autre part pour la position de l'ouvrage sur le fleuve, puisqu'il est construit dans le lit même de la Moskova, qu'il suit au lieu de la franchir perpendiculairement. »

Inhabituelle, cette configuration a été dictée par l'interdiction formelle d'empiéter sur le parc de la Forêt d'argent, qui est une zone naturelle protégée. Ainsi, l'arche prend appui sur les berges du quartier résidentiel



Photo 1

Culminant à plus de 100 m de haut, le pont de Serebryany Bor est un ouvrage à la géométrie complexe où la disposition des haubans, inédite, a mis à l'épreuve les capacités de calcul de plusieurs logiciels

*Peaking at a height of over 100 m, Serebryany Bor Bridge is a structure of complex shape whose novel stay cable arrangement tested the computing capacity of several software programs*



Photo 2

Six mois ont été nécessaires pour assembler l'arche, dont les éléments (de 10 x 11 m pour la section courante et de 10 x 5 m en clé de voûte) ont été mis en place à la grue

*Six months were needed to assemble the arch, whose elements (measuring 10 x 11 m for the continuous section and 10 x 5 m at the keystone) were moved into position by crane*

de Krylatskoye sur une rive et repose dans le fleuve de l'autre côté, à quelques centimètres seulement de la berge du parc.

Tous deux métalliques, le tablier et l'arche ont été construits simultanément. Installé sur des appuis provisoires distants de 7 m en attendant d'être haubané, le tablier (large de 45 m et haut de 3,2 m) a été mis en place par poussage, à l'exception des parties courbes qui ont dû être posées à la grue. En parallèle, des pieux réalisés par jet-grouting ont été fondés jusqu'à 8 à 10 m de profondeur pour ancrer les deux jambes doubles de l'arche. Au total, six mois ont été nécessaires pour assembler celle-ci, dont les éléments (de 10 x 11 m pour la section courante et de 10 x 5 m en clé de voûte) ont été mis en place à la grue (photo 2).

Le tablier et l'arche étant achevés, les opérations de haubanage ont pu commencer en février 2007.

« C'est un ouvrage hors du commun, explique Boris N. Monov, ingénieur en chef du bureau d'études Gyprotransmost, et la disposition des haubans a dû être optimisée. D'importants calculs ont donc été effectués à l'aide de plusieurs programmes informatiques (Cosmos, Solidworks, etc.), et de nombreux essais ont été réalisés en soufflerie ». La géométrie complexe de l'ouvrage, dont le tablier présente par exemple une pente de 2 % (soit un dénivelé de 8 m) entre les extrémités ouest et est, a nécessité un haubanage sur mesure avec des câbles de longueurs différentes dont les unités varient de 20 à 45 torons en fonction de leur emplacement, et qui sont enfilés dans des gaines de couleur rouge dotées d'une

# lisière d'un parc naturel



**Christophe Blanc**  
Directeur commercial  
Export  
Freyssinet



Photo 3

Le haubanage a commencé avec la mise en place des quatre premiers câbles, longs de 14 m, au droit de l'arche et s'est poursuivi en remontant vers la clé de voûte

*Cable staying began with the installation of the first four cables, 14 m long, at the arch level, and continued moving up toward the keystone*



Photo 4

Les haubans ont été mis en tension à l'aide du procédé Isotension breveté par Freyssinet

*The stay cables were placed under tension by the Isotension process patented by Freyssinet*

spirale hélicoïdale pour lutter contre les effets du vent et de la pluie.

« En cours d'exploitation, le pont aura à subir des écarts de températures de près de 20 °C dans la journée au cours de certaines périodes de l'année, souligne M. Konikh, le directeur général de la société Organizator, maître d'ouvrage délégué. C'était donc un ouvrage délicat à réaliser et c'est pourquoi nous avons fait appel à Freyssinet pour modéliser l'arche et installer les haubans. » (photos 3 et 4).

Le haubanage a commencé avec la mise en place des quatre premiers câbles, longs de 14 m, au droit de l'arche et s'est poursuivi en remontant vers la clé de voûte.



Photos 5 et 6

Pour faciliter l'ajustement des haubans et corriger les déviations angulaires que risquait de susciter la forme complexe de l'arche, Freyssinet a développé un système d'ancrage sphérique. Un système de guidage laser spécifique a par ailleurs été mis au point et a permis d'installer très précisément les 72 haubans en seulement huit semaines

*For easier adjustment of the stay cables and to correct the angular deviations likely to be created by the complex shape of the arch, Freyssinet developed a spherical anchoring system. A specific laser guiding system was developed, moreover, allowing the 72 stay cables to be installed very precisely in only eight weeks*

« Pour faciliter l'ajustement des haubans et corriger les déviations angulaires que risquait de susciter la forme complexe de l'arche, nous avons développé un système d'ancrage sphérique. Nous avons également mis au point un système de guidage laser qui nous a permis d'installer très précisément les 72 haubans en seulement huit semaines », indique Christophe Blanc, directeur commercial export de Freyssinet.

Des amortisseurs du type IRD (Internal Radial Damper), les plus puissants de la gamme Freyssinet, ont par ailleurs été mis en place sur les câbles les plus longs (200 m) pour absorber les vibrations photos 5 et 6.

Un pont high-tech en lisière d'un parc naturel en Russie

▶ Avant que les appuis provisoires soient déposés et que les haubans soient définitivement mis en tension, il reste à assembler, sur le tablier, la structure métallique du restaurant panoramique qui sera boulonnée au sommet de l'arche. Il ne restera plus dès lors qu'à installer l'ascenseur d'accès au restaurant et à appliquer la couche de peinture rouge de finition de l'arche – et le pont pourra prendre son service au début de l'année 2008 (photo 7). ■



Photo 7

Vue générale de l'ouvrage achevé  
General view of the completed structure

LES PRINCIPAUX INTERVENANTS

**Maître d'ouvrage**

Municipalité de Moscou

**Maître d'ouvrage délégué**

Organizator

**Architecte**

M. Chumakov

**Conception générale et avant-projet sommaire**

Mostovik

**Bureau d'étude principal**

Metrogyprotrans

**Bureau d'étude d'exécution et vérification**

Gyrotransmost

**Bureau d'étude aérodynamique**

Gypostroymost Saint-Pétersbourg

**Entreprise générale**

Mosmetrostroy

**Entreprise adjudicataire du pont**

Mostotrest

**Fournisseur de l'arc métallique**

Mostovik

ABSTRACT

*A high-tech bridge on the edge of a natural park in Russia*

Ch. Blanc

Built on the Moskova, along the Silver Forest Park, Serebryany Bor Bridge, which is one of the most outstanding new structures in the Russian capital, is to open in early 2008. 1100 m long with an 800-m main bridge, it is formed of a deck suspended by means of stay cables from a metal arch having a peak height of 102 m and weighing 5000 tonnes. The deck (45 m wide and 3,2 m high), metallic like the arch, was moved into position by pushing, except for the curved parts. The arch elements were installed by crane, in six months. The cable staying had to be made-to-measure, with cables of various lengths (ranging from 20 to 45 tendons depending on their location), fitted with red-coloured ducts. Modelling of the arch and cable staying was awarded entirely to Freyssinet. The 72 stay cables were installed in only eight weeks using a laser guiding system developed by Freyssinet. IRD type dampers were installed on the longest cables (200 m) to absorb vibrations.

RESUMEN ESPAÑOL

*Un puente high-tech en límite de un parque natural en Rusia*

Ch. Blanc

Construido sobre el río Moscova, a lo largo del parque del Bosque de plata, el puente Serebryany Bor figura entre las nuevas obras más destacadas de la capital de Rusia y debe abrir a principios del año 2008. Con una longitud de 1100 m y un puente principal de 800 m, este puente va compuesto por un tablero suspendido por mediación de tirantes a un arco metálico que culmina a 102 m de altura y un peso de 5000 toneladas. El tablero (anchura de 45 m y altura de 3,2 m), metálico como el arco, se ha implementado mediante la técnica de pretensado, salvo las partes en curva. Los elementos del arco se han instalado por medio de una grúa, en un plazo de 6 meses. Se ha tenido que ejecutar un arriostramiento a medida, con cables de distinta longitud (que oscilan entre 20 y 45 cordones acorde a su emplazamiento) dotados de cubiertas de color rojo. La modelización del arco y el arriostramiento se han adjudicado en su totalidad a Freyssinet. Los 72 tirantes fueron instalados en solo 8 semanas mediante un sistema de guiado por láser elaborado por Freyssinet. Se han tendido amortiguadores de tipo IRD en los cables de mayor longitud (200 m).

# Ouvrage d'art sur la rivière des Pluies et ses protections de berges à la Réunion

**Philippe Juillien**  
*Directeur de travaux*  
 demathieu & bard

**Victorien Chambon**  
*Ingénieur direction technique*  
 GTOI

**Philippe Raffin**  
*Directeur technique génie civil*  
 Colas

**Jacques Daquin**  
*Responsable du service méthodes*  
 demathieu & bard

**Jacques Dubeuf**  
*Service méthodes outils spéciaux*  
 demathieu & bard

**Jacques Mossot**  
*Directeur scientifique*  
 demathieu & bard



**Figure 1**  
 Image de synthèse de l'ouvrage terminé  
 Synthesis image of the completed structure

**Le pont sur la rivière des Pluies à La Réunion, situé près de l'aéroport Roland Garros à Gillot, concentre plusieurs difficultés de réalisation :**

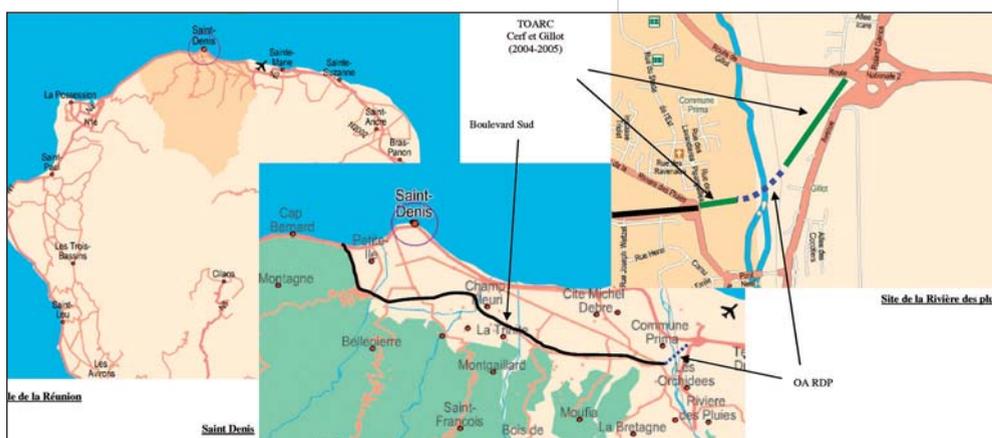
- **un environnement délicat : des fondations dans un substratum fait d'un empilement de couches géologiques très contrastées (basalte très dur et scories avec plusieurs nappes d'eau), un climat tropical pouvant provoquer en période cyclonique des variations importantes du niveau de la rivière et nécessitant des règles de maîtrise des eaux;**
- **une définition géométrique du tablier en béton précontraint délicate à réaliser : un tablier de 30,80 m de largeur, composé de deux caissons de 4 m de hauteur mis en place chacun par poussage, ayant un rayon en plan dans l'axe de 300 m, un rayon parabolique en élévation de 3000 m et un dévers moyen de 2,5 % reposant sur des appuis avec des biais différents.**

**Une mise en place précise des méthodes de réalisation tant des appuis en rivière que du tablier poussé a permis de maîtriser ces différentes contraintes.**

L'ouvrage d'art de la rivière des Pluies et ses protections de berges permettent le franchissement de la rivière des Pluies, délimitant les communes de Saint-Denis et de Sainte-Marie situées au nord de l'île de la Réunion (974). Il finalise le tracé du « boulevard Sud de Saint-Denis », projet initié dans les années 1980. Cette opération offrira un itinéraire alternatif à celui du front de mer pour relier la route du Littoral (RN1) à l'aéroport Roland Garros de Gillot (RN2), fluidifiant ainsi le trafic qui ralentit quotidiennement et parfois paralyse l'économie de l'île. Totalisant cent quatre-vingt-treize mètres de longueur développée, le tablier accueillera les circulations piétonnes, cyclistes, routières et ferroviaires (tram-train).

## ■ Contexte - Déroulement du projet

Dans le cadre de l'opération du boulevard Sud de Saint-Denis, le projet de l'ouvrage d'art de la rivière des Pluies et ses protections de berges est la solution complexe de la mise en équation de contraintes peu compatibles comme :



**Figure 2**  
 Localisation du site sur le boulevard Sud  
 Site location on the southern boulevard

Ouvrage d'art sur la rivière des Pluies et ses protections de berges à la Réunion

Figure 3  
Vue en plan  
du projet  
Plan view  
of the project

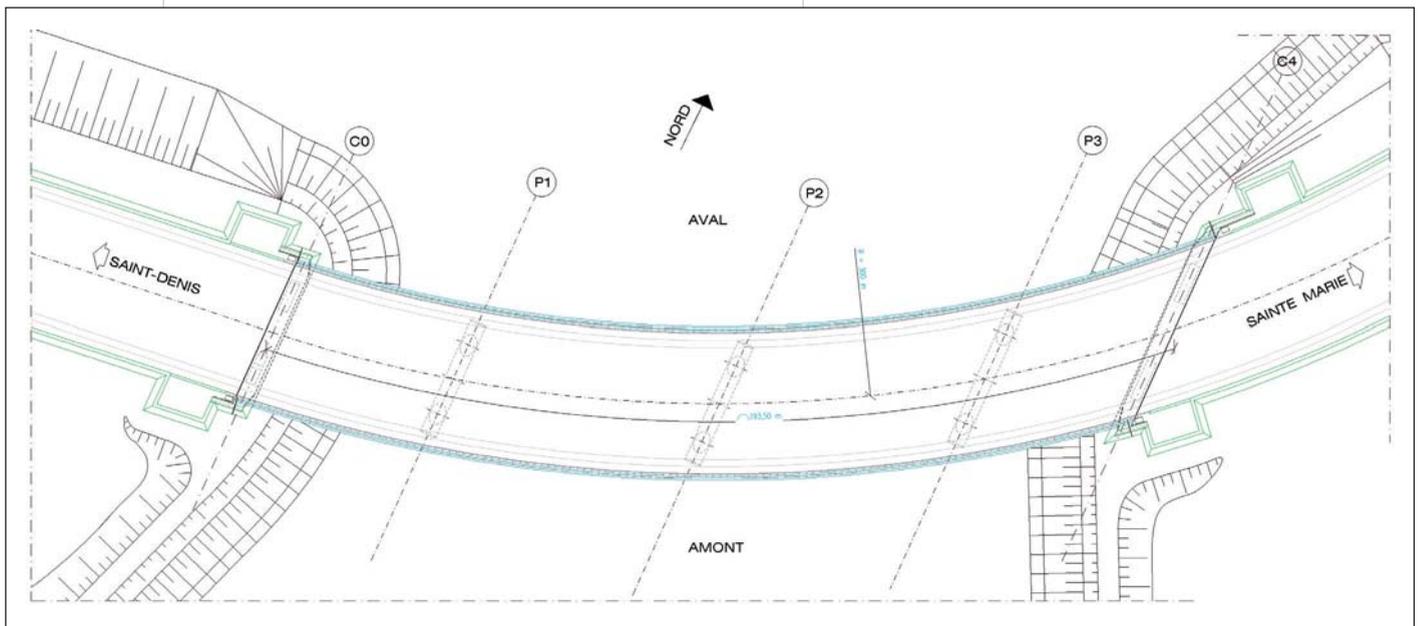
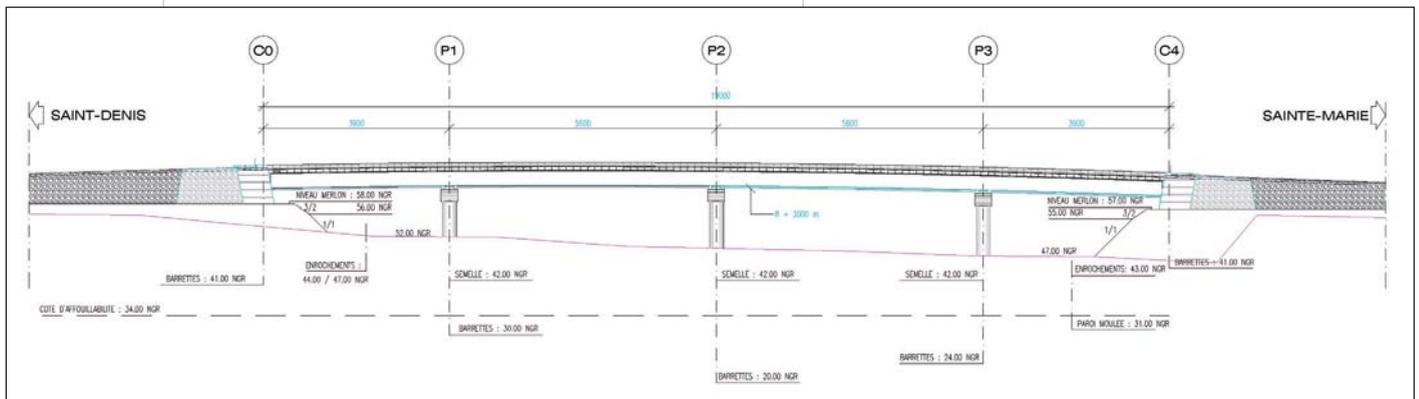


Figure 4  
Coupe  
longitudinale  
Longitudinal  
section



- le comportement binaire de la rivière des Pluies (crues rapides et violentes, régression du niveau du lit de la rivière, affouillement...);
- le tracé routier dans un contexte urbanisé, où les points d'entrée et de sortie étaient déjà réalisés, limitant ainsi les possibilités de simplification géométrique de l'ouvrage;
- la destination de l'ouvrage, devant supporter les circulations piétonnes, cyclistes, routières et ferroviaires (tram-train).

Les études préliminaires ont été commandées par la maîtrise d'ouvrage au bureau d'études Thales pour l'aspect structurel et au groupement de bureaux d'études Hydrétudes - Eaux, Torrents et Rivières de montagne - Compagnie Nationale du Rhône pour l'aspect hydraulique. Elles ont permis la résolution de ce problème en définissant un tablier de grande largeur (30,80 m), courbe en plan ( $R = 300$  m) et en élévation ( $R = 3000$  m), appuyé sur cinq appuis fondés sur barrettes : trois en rivière à fûts elliptiques parallèles à

l'écoulement, et deux sur berges, protégés des affouillements par une paroi moulée et une carapace en enrochements liés.

Pendant ces études préliminaires, certaines variantes ont été envisagées comme la réalisation d'un tablier mixte, l'intégration d'une travée supplémentaire (soit un ouvrage de 235 m de long), limitant les protections de berges à leur strict minimum, ou encore la définition de protections de berges pouvant résister à des crues centennales (soit environ 600 ml de protection). Ces dernières n'ont pas été retenues par la maîtrise d'œuvre qui a arrêté le projet, dans le dossier de consultation des entreprises, à l'étude des travaux suivants :

- réalisation du tablier en béton précontraint par la méthode du poussage afin de limiter les travaux en rivière;
- réalisation des fondations profondes anti-affouillements supports des appuis de l'ouvrage;
- réalisation de 400 ml de protection de berges anti-affouillements.

## ■ Présentation générale

### Projet du dossier de consultation des entreprises

Au moment de la consultation des entreprises, l'ouvrage a été dimensionné pour recevoir des convois de tram-train, transports en commun en site propre (TCSP). Le projet initial prévoyait un TCSP sur pneus sur une voie de 3,50 m de largeur avec la possibilité d'intégrer un TCSP en mode ferré mais dans ce cas avec une voie de 8 m de large.

Le convoi TCSP est assimilable à un chargement de type Bc. Le convoi TCSP ferré correspond à une charge d'environ 90 t en charge, ce qui correspond à une charge répartie de 3 t/ml.

Dans cette phase du projet, la hauteur du tablier était de 3,45 m.

En phase d'appel d'offres, la paroi moulée avait un profil en « T », encastré en pied et libre en tête. L'ouvrage était fondé sur pieux. Les chevêtres des piles étaient réalisés sur une forêt de tours d'étaie.

Les caissons étaient poussés par travée suivant un profil à dévers constant, courbe en plan et elliptique en élévation, moyennant la mise en œuvre et le démontage après utilisation d'une précontrainte antagoniste.

### Adaptation du projet pour tenir compte des méthodes de construction

Le groupement d'entreprises Grands Travaux de l'Océan Indien (mandataire, filiale de Colas), Demathieu & Bard et Solétanche Bachy Fondations (cotraitants) a été déclaré adjudicataire du marché de « l'ouvrage d'art de la rivière des Pluies et ses protections de berges » le 30 août 2005. La maîtrise d'œuvre du projet, commandé par la Région et cofinancé par l'Union européenne, a été confiée à la DDE de la Réunion, Service des Grands travaux.

Dans son offre, le groupement a proposé :

- de réduire la fiche de la paroi moulée et de la tenir en tête par des tirants actifs, permettant l'optimisation des quantités et des rendements, ainsi que la simplification du profil en « T » en un profil rectangulaire;
- de fonder la protection de berge rive gauche directement sur le substratum rocheux (non affouillable), permettant d'optimiser le linéaire de paroi moulée;
- de fonder l'ouvrage sur barrettes, permettant l'optimisation des outils et des rendements;
- de réaliser les chevêtres à l'aide d'un outil spécifique limitant au maximum la vulnérabilité de ces phases vis-à-vis des crues;
- de réaliser une précontrainte de poussage intérieure

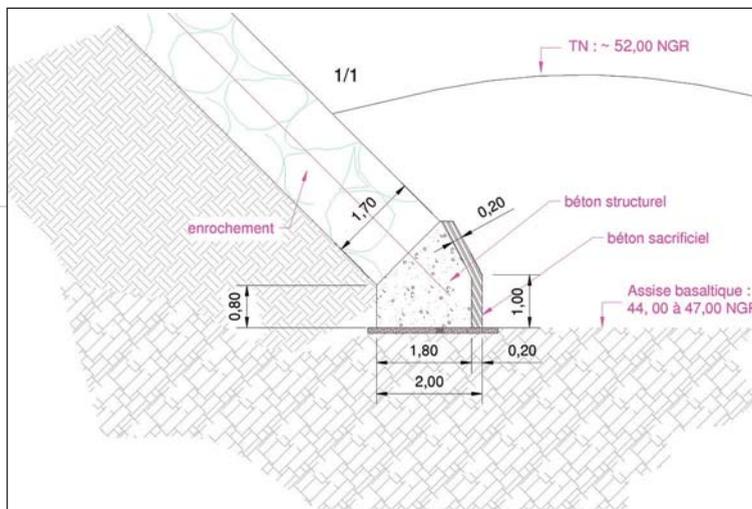


Figure 5

Protection de berge en rive gauche fondée sur du basalte

*Left bank protection based on basalt*

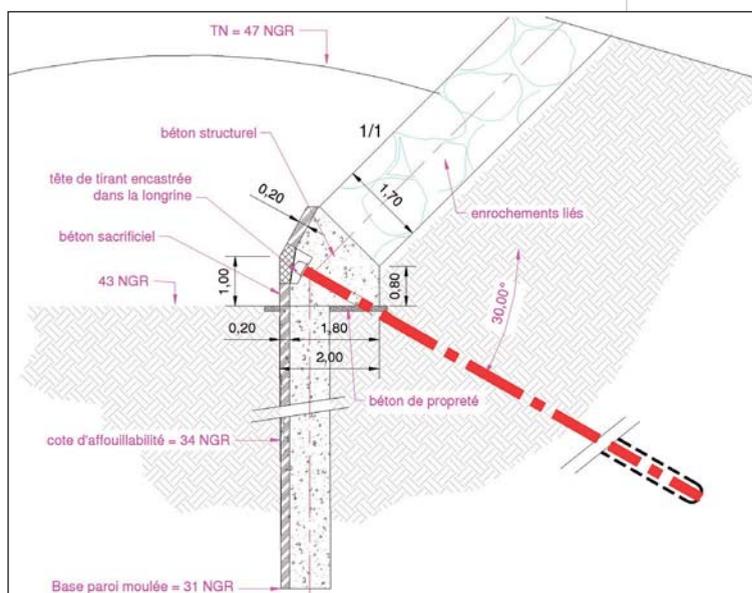


Figure 6

Protection de berge en rive droite fondée sur une paroi moulée avec tirant (cote d'affouillement : 34,00 m NGR)

*Right bank protection based on a diaphragm wall with tie anchor (undermining level : 34,00 m NGR)*



Photo 1

Réalisation des murs de soutènement en rive gauche  
*Construction of retaining walls on the left bank*

Ouvrage d'art sur la rivière des Pluies et ses protections de berges à la Réunion

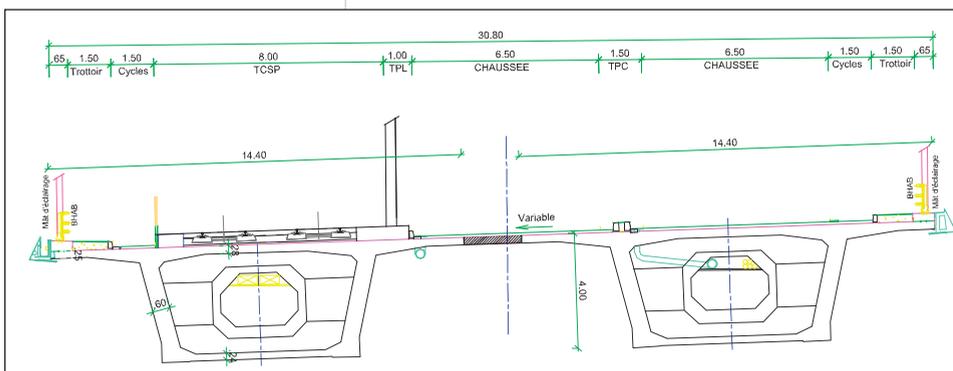


Figure 7

Coupe transversale type du tablier pour le TCSP fret  
 Typical deck cross section for reserved right-of-way freight transport



- au béton (précontrainte centrée), permettant la suppression de la précontrainte antagoniste et l'optimisation des quantités de précontrainte;
- de pousser les caissons par demi-travée suivant une courbe dans un plan incliné, permettant la réalisation par poussage et l'optimisation du banc de préfabrication.

L'ordre de service de commencer les 29 mois de travaux a été donné le 17 janvier 2006, après une période de préparation de 3 mois.

Les caractéristiques principales du projet sont les suivantes :

- l'axe du tablier est tracé sur un cercle de 300 m en plan et sur un rayon parabolique de 3000 m en élévation. La pente transversale est de 2,5 % constante;
- le tablier est composé de deux caissons précontraints de 14 m de large, 3,45 m de haut, clavés sur 2 m en partie centrale;
- chaque caisson, de 190 m est divisé en 27 voussoirs, répartis en sept tronçons de poussage, constituant quatre travées (39 - 56 - 56 - 39);
- les cinq appuis, communs aux deux caissons, sont parallèles à l'écoulement de la rivière. Ils interceptent l'axe du tablier suivant un biais variant de 52,90 gr à 93,22 gr;
- chaque pile en rivière, est fondée sur huit barrettes de 150 x 280 cm de section;
- la culée C0, en rive gauche, est fondée sur quatre barrettes de 100 x 280 cm de section;
- la culée C4, en rive droite, est fondée sur cinq barrettes de 100 x 280 cm de section;
- les berges sont protégées par 400 ml d'enrochements liés, dont 190 ml sont fondés sur basalte en rive gauche et 210 ml sont fondés, en rive droite, sur une paroi moulée de 1 m d'épaisseur reprise en tête par une longrine de couronnement tirantée tous les 3,50 m;
- les remblais d'accès à l'ouvrage sont soutenus par 200 ml de murs de soutènement en béton armé

d'épaisseur variable, inclinés à 17 % et dont la hauteur varie de 9 à 17 m;

- le lit de la rivière, au droit du projet, oscille entre 47 et 52 m NGR pour un niveau d'affouillabilité déterminé à 34 m NGR – cote conditionnant les niveaux d'assise des ouvrages.

**Autres particularités du site**

L'île de la Réunion a été créée par une activité volcanique de point chaud, d'où une grande hétérogénéité des sols rencontrés sur des sites restreints. Elle est actuellement située dans une zone de sismicité nulle.

L'île est située dans une zone soumise aux cyclones 5 mois par an (15 novembre - 15 avril). Ce qui se traduit par des vents cycloniques d'intensité de l'ordre de 250 km/h et des précipitations atteignant 1800 mm en 24 heures, 3929 mm en 72 heures (record mondial) et 4829 mm en 96 heures (record mondial) conduisant à des crues rapides et violentes.

Ces particularités ont été intégrées aussi bien en phase d'avant-projet qu'en phase d'exécution, en considérant :

- des quantités de déroctage, de trépanage voire de minage;
- une pression de vent de service de 4000 N/m<sup>2</sup> en phase de construction et en phase d'exploitation
- une gestion toute particulière de la maîtrise des eaux avec :
  - > la limitation des travaux en rivière,
  - > la canalisation du cours d'eau dans un chenal de dérivation,
  - > et la matérialisation du seuil d'alerte de 30 m<sup>3</sup>/s au-delà duquel la rivière doit être évacuée.

**Adaptation du projet pour tenir compte du TCSP fret**

Une fois le marché attribué, le mode de chargement a changé pour tenir compte d'un convoi TCSP fret de 220 t.

Ce nouveau type de charges a nécessité de redimensionner le tablier et de bloquer à l'aval le convoi de fret pour ne pas risquer une décompression sur un appareil d'appui.

Les calculs justifiant la résistance de l'ouvrage ont conduit à une nouvelle coupe transversale du tablier dont la hauteur a été portée à 4 m.

**Maîtrise des eaux**

À la Réunion, les régimes des cours d'eau sont fortement variables et imprévisibles, et tout particulièrement celui de la rivière des Pluies. Son régime courant oscille autour de 1 m<sup>3</sup>/s. Il peut aisément et rapidement

atteindre les 650 m<sup>3</sup>/s (crue décennale), voire les 1100 m<sup>3</sup>/s (crue centennale), remodelant ainsi le lit au gré des événements pluvieux. C'est pourquoi le principe de « maîtrise des eaux » est à l'origine des principaux choix de conception et de réalisation.

En phase d'avant-projet, une étude sur modèle réduit a permis de mettre en évidence la spécificité de l'écoulement de la rivière des pluies lors de crues :

- régression du niveau du lit au droit du projet;
- formation d'un bras vif d'environ 140 m de large;
- hauteur d'eau modeste conduisant à de très fortes vitesses (10 m/s) et au charriage de blocs de plus d'un mètre cube;
- formation anarchique d'antidunes de grande ampleur causant les affouillements maxima.

Les analyses des résultats de cette étude ont permis d'arrêter :

- la cote des plus hautes eaux à 60,00 m NGR, conditionnant le calage de l'intrados du tablier;
- la cote d'affouillabilité maximale à 34,00 m NGR, déterminante dans la définition des niveaux d'assise des ouvrages;
- le niveau de réalisation des semelles des piles à 42,00 m NGR, lié à la régression du niveau du lit de la rivière;
- la géométrie et la composition des protections de berges;
- l'orientation et la géométrie des appuis;
- le principe de protection des parties d'ouvrage soumises aux crues par une épaisseur de béton sacrificiel (barrettes, semelles et fûts de piles, longrines supports d'enrochement);
- le principe de canalisation de la rivière, bien en amont du projet, dans un chenal de 25 m de large et 2 m de haut;
- la méthode de réalisation de l'ouvrage par poussage, limitant ainsi les travaux en rivière.

En phase d'exécution, comme le précise le marché : « les travaux doivent être effectués hors d'eau pour avoir des conditions de travail satisfaisantes... ». La maîtrise des eaux revêt alors deux aspects : la gestion des nappes souterraines d'accompagnement et la gestion du bras vif de la rivière des Pluies.

Les nappes d'accompagnement sont liées au bras vif. Elles sont donc directement proportionnelles à ce dernier. Elles se caractérisent par des venues d'eau sur les plates-formes des piles (42 m NGR) et de la paroi moulée (43 m NGR), terrassées sous le niveau du bras vif (47 m NGR). La combinaison de tranchées drainantes et de puits de pompages (deux par fouille) en périphérie des plates-formes permet un maintien hors d'eau des travaux, dans la mesure où le bras vif s'écoule normalement. La problématique de la gestion du bras vif nous conduit à optimiser les demandes spécifiées dans le



Photo 2

Chenal de dérivation avec passage busé (débit 1 m<sup>3</sup>/s) avec tablier sur la pile P2, chevêtre de la pile P1 en cours de réalisation et culée C0  
*Diversion channel with pipe culvert (delivery 1 cu.m/s) with deck on pier P2, head of pier P1 undergoing construction and abutment C0*



Photo 3

La rivière des Pluies en crue. Débit d'environ 500 m<sup>3</sup>/s  
*The "River of Rains" in flood. Flow rate about 500 cu. m/s*

marché pour les rendre compatibles avec la réalité du chantier, d'où :

- la réalisation d'un principe de dérivation unique et figé entre les piles P3 et P2, basé sur un profil en travers type intégrant la notion de « surchenal ». Ce dernier, d'un débit capable de 60 m<sup>3</sup>/s, permet d'absorber le débit d'alerte de 30 m<sup>3</sup>/s. Associé à la section initiale, le débit peut atteindre 250 m<sup>3</sup>/s avant de sortir du chenal et de réellement menacer les travaux en rivière;
- l'abandon du principe de surveillance de la rivière à l'aide d'échelles limnimétriques, car :
  - > les échelles existantes ne sont plus exploitables,
  - > la précision sur la corrélation « hauteur d'eau - débits » n'est pas suffisante,
  - > basé sur la connaissance de la morphologie du lit de la rivière, il nécessite d'être recalibré après chaque crue, même modeste;
- la télésurveillance du chenal de dérivation au droit du chantier avec une caméra couleur haute définition consultable via internet;

Ouvrage d'art sur la rivière des Pluies et ses protections de berges à la Réunion



- la surveillance de la montée des eaux à l'aide de deux capteurs, reliés à une centrale d'alerte téléphonique, installés et calibrés sur le passage busé du chenal;
- l'installation d'une sirène d'alerte (type sirène de caserne de pompiers) permettant de donner l'ordre d'évacuer le lit de la rivière;
- la mise en place d'une procédure de sécurité vis-à-vis des crues se résumant en trois étapes.

**Étape 1 :** réception et prise de connaissance, par le « Chargé de la surveillance des crues », des avis de fortes pluies transmis au chantier par Météo France. Transmission, par fax, d'une copie de ce dernier à la MOE et au CSPS. Information immédiate de tout l'encadrement de chantier, y compris l'encadrement des sous-contractants travaillant en rivière.

**Étape 2 :** le niveau d'eau de pré-alerte est atteint (→ 25 m<sup>3</sup>/s). Le message de pré-alerte est transmis automatiquement par téléphone.

**Étape 3 :** surveillance humaine du niveau d'eau dans le « surchenal » durant les horaires de travail → **dès le débordement**, le « Chargé de la surveillance des crues » déclenche, ou donne l'ordre de déclencher, la sirène d'alerte, ce qui conduit au **repli** immédiat de tous les postes en rivière. En dehors des horaires de travail, la caméra de surveillance se substitue au vigile

■ **La géologie du site**

L'île de la Réunion a été créée par une activité volcanique de point chaud. Elle forme un immense cône de 7000 m de haut dont 4000 m sont sous-marins. La géologie de sa partie émergée n'a pas plus de quelques

centaines de milliers d'années. À comparer aux centaines de millions d'année qui ont été nécessaires pour modeler les sols des continents. Elle se caractérise par une hétérogénéité peu commune liée à la combinaison d'une activité volcanique importante (une des plus soutenue sur terre), d'une érosion forte et d'une multitude de glissements de terrain.

La phrase type, qui conclut tout rapport géotechnique, « les résultats de ces études ne sont valables qu'au droit des sondages », prend tout son sens et rappelle que nous sommes relativement désarmés face à ce mille-feuille géologique, composé d'alternance de basalte (plus ou moins altéré) et de scories.

Malgré des campagnes géotechniques poussées :

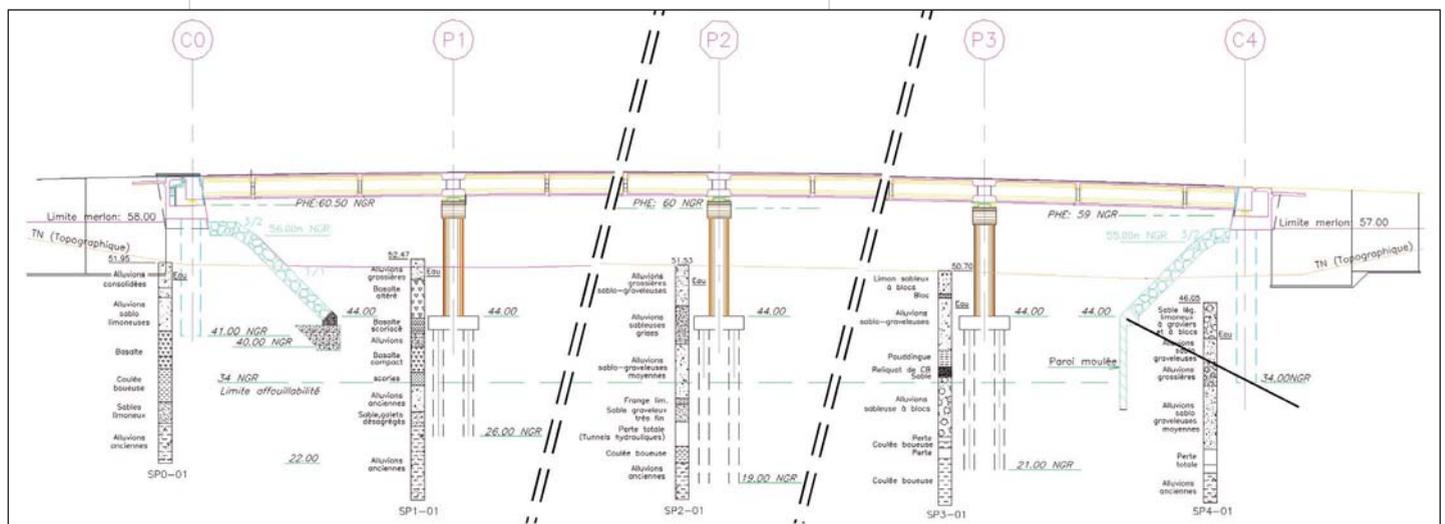
- étude de faisabilité géotechnique de mai 2001;
  - diagnostic géotechnique de février 2003;
  - étude de faisabilité géotechnique de décembre 2004;
  - étude de faisabilité géotechnique de mars 2005;
  - synthèse géotechnique de mai 2005;
  - sondages mécaniques de septembre 2005,
- qui ont permis d'identifier sur le papier :

- un faciès géologique tourmenté composé d'alluvions sablo-graveleuses, de sables, de limons, de poudingues plus ou moins cimentés, d'alluvions anciennes plus ou moins cimentées, de coulées boueuses plus ou moins altérées et de basalte plus ou moins fracturé;
- une hydrologie complexe dont le fonctionnement est basé sur des chenaux hydrauliques et sur trois nappes superposées, une nappe superficielle entre étiage et 38,60 m NGR, une nappe moyenne entre 19,00 et 38,20 m NGR et une nappe inférieure entre 8,80 et 21,2 m NGR, dont les débits de perméabilité sont de l'ordre de 0,1 m<sup>3</sup>/s,

le chantier n'a pu que vérifier et subir l'imprévisibilité du sous-sol réunionnais, se traduisant par :

- l'augmentation de 25 % des quantités de gros bétons

Figure 8  
Coupe  
géologique  
du site  
Geological  
section  
of the site



- et bétons cyclopéens prévus pour asseoir sur le toit rocheux les murs de soutènement;
- la diminution de 83 % des quantités de déroctage prévues pour le terrassement des protections de berges;
- l'augmentation de 284 % des quantités de déroctage prévues pour le terrassement des appuis;
- l'ajustement, au fur et à mesure des terrassements, du niveau d'assise de la protection berge jusqu'à 47 m NGR alors qu'il était prévu à 44 m NGR;
- l'augmentation de 840 % des quantités de trépanage, dont la proportion initiale était de 17 % des quantités de forage;
- le recalage altimétrique des barrettes (moins 3 m sur P3 et moins 5 m sur P1) sur la base de forages de reconnaissance complémentaires;
- la nécessité de préfracturer à l'explosif le matériau au droit des barrettes de la pile P1.

Ces aléas géologiques ont nécessité une grande réactivité afin d'ajuster les moyens matériels, les moyens humains et l'organisation du chantier pour limiter leurs incidences sur les délais et les coûts.

### ■ Terrassements en fonction du phasage des travaux

Les spécificités du site de la rivière des Pluies ont également des incidences sur l'approche des terrassements, leurs phasages et leur omniprésence tout au long du chantier. En lien avec les problématiques de maîtrise des eaux et d'explosion des quantités de trépanage, les terrassements consistent à :

- réaliser des rampes d'accès en rivière;
- dériver le bras vif entre les piles P3 et P2;
- monter un remblai armé de 10 m de haut, avec des nappes de géotextile non tissé, au droit de la culée C4, permettant la réalisation de cette dernière et du premier banc de poussage en parallèle de la protection de berge. En d'autres termes, il permet de sortir la paroi moulée du chemin critique et donc de limiter les incidences des faibles cadences de forage liées à la dureté des sous-sols rencontrés;
- aménager les plates-formes à 47 m NGR de la paroi moulée et des piles, nécessaires aux travaux de fondations profondes;
- réaliser des plates-formes, hors d'eau (drainées et pompées), à 42 et 43 m NGR, de la paroi moulée et des piles, permettant la construction des semelles d'appui des piles et des enrochements liés de la protection de berge;
- monter les remblais au gré des besoins du génie civil, avec des caractéristiques de compactage dignes d'une plate-forme autoroutière, soit un EV2 de 80 MPa et un rapport de compactage inférieur à 1,6;

- rétablir les accès en rivière, le chenal de dérivation et toutes les plates-formes de travail après chaque crue destructrice.

La combinaison de la maîtrise des eaux, de la géologie du site et des délais alloués à la réalisation de ce chantier conduit à un optimum technico-économique qui se traduit au travers du phasage suivant.

#### Phase 1

- Travaux préparatoires.
- Rampes depuis le remblai du chantier côté Gillot.
- Préparation des plates-formes pour les installations de chantier.
- Évacuation des déblais « poubéliens ».
- Sondages mécaniques complémentaires.

#### Phase 2

- Installation de chantier.
- Création de la rampe d'accès à la rivière depuis les installations amont côté Gillot.
- Dévoisement du bras vif entre P2 et P3 – aménagement du chenal de dérivation et mise en service de son système de surveillance (caméra, capteur de niveau, alarme, sirène et procédure de sécurité vis-à-vis des crues).

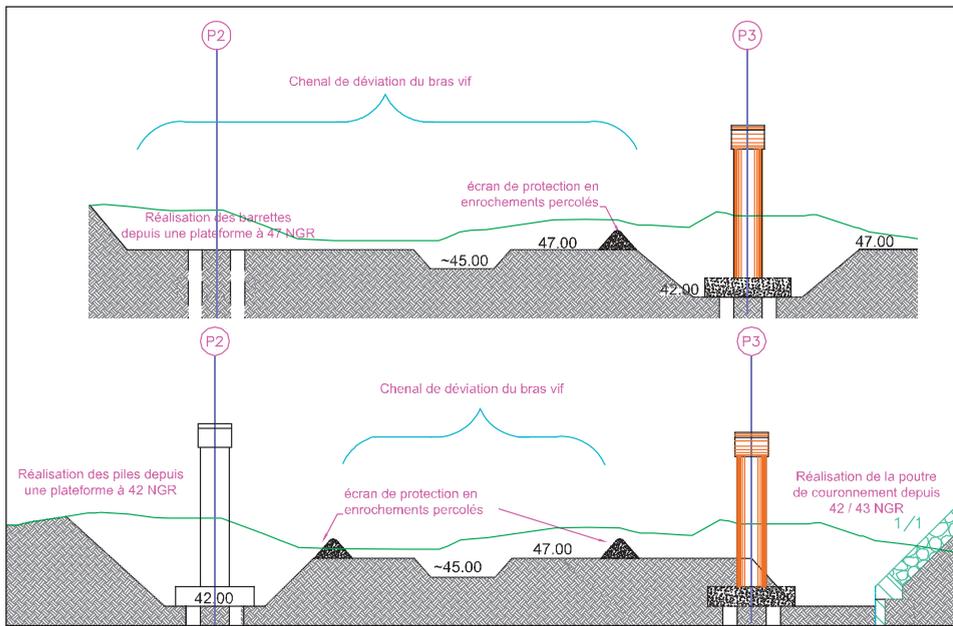


Photo 4

Pile P3, protection de berge en rive droite avec enrochements liés et remblai armé de 10 m de hauteur en rive droite

*Pier P3, right bank protection with bound riprap and reinforced backfill 10 m high on the right bank*

Ouvrage d'art sur la rivière des Pluies et ses protections de berges à la Réunion



**Figure 9**  
Principe de gestion des terrassements pour garantir les travaux en toute sécurité et le maintien du chenal entre P2 et P3

*Earthworks management technique to ensure work in complete safety and maintenance of the channel between P2 and P3*

**LE CHANTIER EN QUELQUES CHIFFRES**

- 32 mois de délai, dont : 3 mois de période de préparation et 29 mois de travaux
- 35760619 € HT de travaux, dont 72 % pour la partie « ouvrage d'art » et 28 % pour la partie « protection de berges »
- 180000 m<sup>3</sup> de terrassement, dont 55 % pour l'ouvrage et 45 % pour les protections des berges
- 2165381 kg d'acier passif, dont :
  - > 8 % pour les fondations profondes
  - > 16 % pour les appuis
  - > 33 % pour les tabliers
  - > 26 % pour les soutènements
  - > 17 % pour les protections des berges
- 28025 m<sup>3</sup> de béton (B30, B35, B45 et B60), dont :
  - > 8 % pour les fondations profondes
  - > 18 % pour les appuis
  - > 23 % pour les tabliers
  - > 27 % pour les soutènements
  - > 24 % pour les protections des berges
- 26629 m<sup>2</sup> de coffrage (ordinaire, fin, architecturé) dont :
  - > 14 % pour les appuis
  - > 55 % pour les tabliers
  - > 28 % pour les soutènements
  - > 3 % pour les protections des berges
- 261516 kg de précontrainte dont :
  - > 73 % de précontrainte longitudinale intérieure (12T15S)
  - > 22 % de précontrainte longitudinale extérieure (19T15S)
  - > 4 % de précontrainte transversale (voussoirs sur culée)



**Phase 3**

- Réalisation de la plate-forme à 47,00 m NGR pour la paroi moulée et la pile P3.
- Préparation de la plate-forme sous les murs, côté C4.
- Création de la rampe d'accès à la rivière depuis les installations aval.

**Phase 4**

- Démarrage de la paroi moulée (zone sous emprise de l'ouvrage côté C4).
- Réalisation des semelles des murs de soutènement côté C4.
- Aménagement des accès côté C0.
- Terrassement de la plate-forme pour réaliser la longrine d'assise de la protection de berge côté C0.
- Installation d'une grue à tour (12 t au mât) côté C0.

**Phase 5**

- Suite de la paroi moulée côté C4.
- Démarrage de la plate-forme à 43,00 m NGR nécessaire à la réalisation de longrine tirantée en tête de paroi moulée.
- Terrassement des pistes d'accès aux piles P2 et P1.
- Aménagement de la plate-forme à 47 m NGR de la pile P2.
- Réalisation des barrettes sous la pile P3.
- Suite longrine d'assise de la protection de berge côté C0.
- Démarrage des semelles des murs de soutènement côté C0.

**Phase 6**

- Élévations des murs de soutènement côté C4.
- Plate-forme à 42 NGR de la pile P3 et réalisation de sa semelle.
- Montage du remblai armé au droit de la culée C4.
- Réalisation des barrettes sous C4.
- Construction de la culée C4 et de l'aire de poussage du tablier aval (grue à tour de 16 t au mât).
- Réalisation des barrettes sous la pile P2.
- Terrassement de la plate-forme à 47 m NGR pour la pile P1.
- Suite des semelles des murs côté C0 et démarrage de leurs élévations.
- Démarrage des enrochements de la protection de berge côté C0.

**Phase 7**

- Suite de la paroi moulée côté C4.
- Démarrage de la longrine en tête de paroi moulée et

des enrochements liés y étant associés (sous l'emprise du tablier).

- Réalisation des fûts de la pile P3.
- Réalisation de la semelle de la pile P2.
- Réalisation des barrettes sous la pile P1.
- Fin des semelles, murs côté C0 et suite de leurs élévations.
- Suite des enrochements de la protection de berge côté C0.
- Démarrage des remblais entre murs et sous la culée C0.

### Phase 8

- Suite de la paroi moulée côté C4.
- Suite de la longrine en tête de paroi moulée et des enrochements liés y étant associés (sous l'emprise du tablier).
- Réalisation du chevêtre de la pile P3.
- Réalisation des fûts de la pile P2.
- Terrassement de la plate-forme à 42 m NGR pour réaliser la semelle de la pile P1.
- Élévation des murs côté C0.
- Protection de berge côté C0.
- Début du poussage tablier aval.

### Phase 9

- Fin de la paroi moulée côté C4.
- Fin de la longrine en tête de paroi moulée et suite des enrochements liés y étant associés.
- Réalisation du chevêtre de la pile P2.
- Réalisation des fûts de la pile P1.
- Réalisation des barrettes de la culée C0.
- Suite élévation des murs côté C0.
- Suite protection de la berge côté C0.

### Phase 10

- Suite de la protection de berge côté C4.
- Réalisation du chevêtre de la pile P1.
- Réalisation de la culée C0.
- Fin élévation des murs côté C0.
- Fin de la protection de berge côté C0.

### Phase 11

- Accostage du tablier aval sur C0.
- Banc de poussage amont.
- Réalisation du tablier amont.
- Fin de la protection de berge rive droite.
- Précontrainte extérieure.
- Clavage central.
- Finalisation des culées.
- Finalisation des remblais d'accès à l'ouvrage.



Photo 5

Réalisation des fûts de pile

Execution of pier shafts

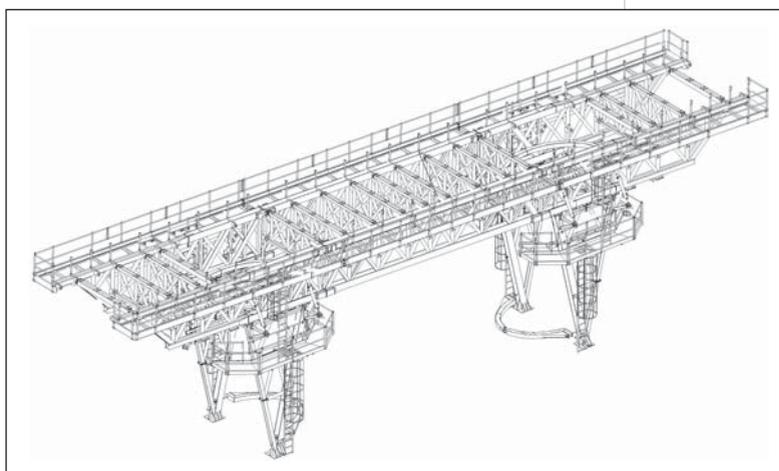


Figure 10

Outil coffrant du chevêtre

Crosshead beam sectional formwork

- Remise en état du site.
- Finitions.
- Repliage.

Nota : la construction du tablier (caisson aval puis caisson amont) a lieu en parallèle de la réalisation de ces tâches.

### ■ Les appuis

Les piles sont fondées sur barrettes. Elles se composent d'une semelle rectangulaire, de deux fûts elliptiques de section pleine, et d'un chevêtre matricé.

Les semelles en C35/45 et les fûts en C60/70 intègrent une épaisseur de béton sacrificielle protégeant les noyaux structurels des agressions mécaniques accompagnant les crues.

La géométrie des fûts et du chevêtre ainsi que leur orientation garantissent le bon écoulement de la rivière.

Le niveau d'assise de 42,00 m NGR est situé en dessous du niveau du bras vif. La réalisation des semelles nécessite donc la canalisation et le pompage des nappes d'accompagnement dont le débit, fonction de celui du bras vif, a conduit à l'utilisation en continu de une à deux pompes de 350 m<sup>3</sup>/h.

Les fûts, d'environ 14 m de haut, sont réalisés par levées de 3,00 m avec un outil coffrant métallique grimpeur, à raison d'une levée par jour.

Ouvrage d'art sur la rivière des Pluies et ses protections de berges à la Réunion

Photo 6

L'outil coffrant du chevêtre pendant une crue  
Crosshead beam sectional formwork during a flood



Figure 11

Coffrage type d'une culée  
Typical formwork for an abutment

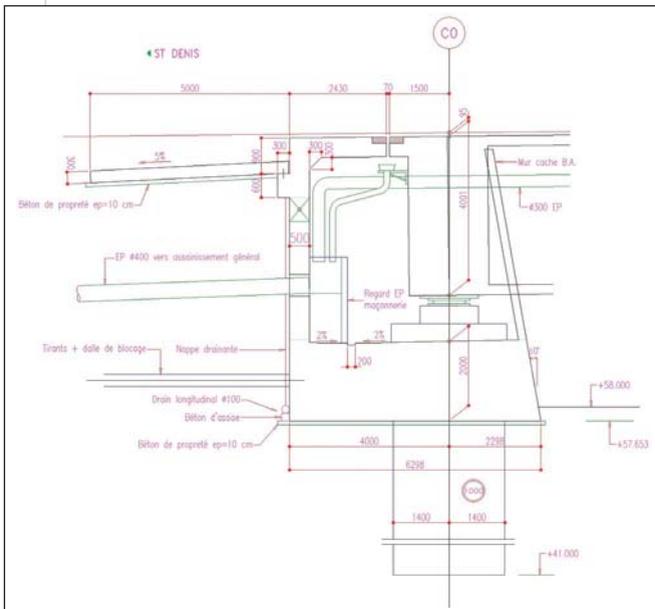
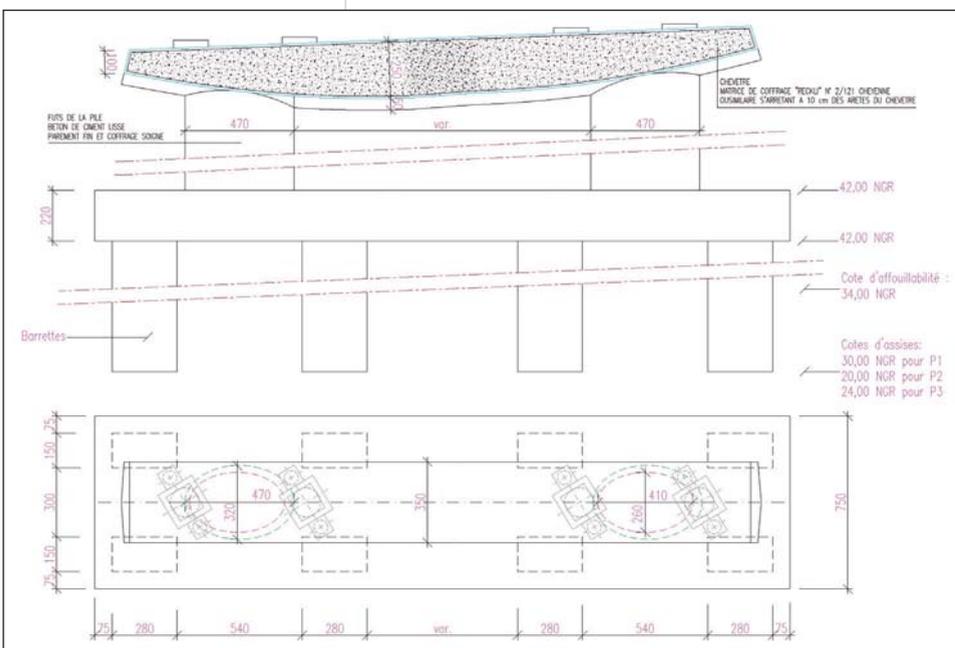


Figure 12

Fondations et coffrage d'une pile  
Foundations and formwork for a pier



Les chevêtres, 3,50 x 3,50 x 30,00 m de dimensions hors tout, sont réalisés à l'aide d'une plate-forme métallique treillis appuyée sur la semelle de part et d'autre des fûts, limitant ainsi les risques liés à la rivière. Les culées sont fondées sur barrettes. Elles se composent d'un sommier trapézoïdal et de murs retours matricés. Leurs faces sont inclinées à 17 %. Les poussées des terres appliquées sur l'écran de 7 m de haut, que constituent le sommier et le mur garde-grève, sont reprises par une dalle de frottement liée au sommier par l'intermédiaire de quatre tirants en béton armé.

À noter, la combinaison « biais de 52,90 gr/appuis communs aux tabliers » a conduit à la réalisation d'une culée de 56 m de long au fonctionnement mécanique complexe en rive droite (C4).

■ Le tablier

Géométrie

La géométrie du marché n'est pas poussable. Une surface n'est poussable que si la surface de glissement est superposable à elle-même au cours du déplacement du tablier. Les surfaces poussables peuvent être :

- poussage sur une surface plane;
- poussage sur une surface conique;
- poussage sur une hélice.

Le groupement a proposé d'adapter la surface de glissement pour la rendre poussable.

Pour cela nous avons fait passer un plan par trois points. Le plan est incliné de 5,1° par rapport à la verticale et le rayon du cercle de l'axe est de 298,9 m.

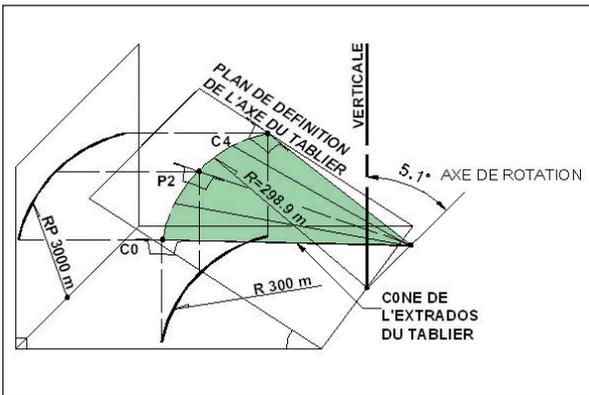
L'inclinaison de l'axe de rotation induit que la surface supérieure conique a un dévers variable par rapport au dévers prévu de 2,5 % constant.

Cependant cette variation est faible, et dans la limite de ce qui est admissible en appliquant l'ICTAAL. Les calculs ont donné les valeurs limites de 2,25 % et 2,98 % avec une valeur moyenne de 2,5 %.

Cette géométrie particulière avec un faible rayon et le biais des appuis entraîne une répartition très dissymétrique des charges entre les deux poutres principales de l'avant-bec. La poutre côté aval reprend 78 % de la charge totale de l'avant-bec.

Choix de la méthode de réalisation du tablier

La méthode de réalisation reprise sur cet ouvrage est celle que demathieu & bard avait mise au point pour la réalisation du doublement du viaduc Jules Verne à Amiens (cf. Travaux n° 793 de janvier 2003) et du doublement du viaduc de Méribel-Jonage de l'A432.



**Figure 13**  
Définition de la géométrie du tablier  
*Specification of deck shape*

Le principe de cette méthode est de réaliser le tablier en section complète. Le découpage du tablier se fait par voussoirs et le poussage par tronçons d'une longueur d'environ une demi-travée. Chaque tronçon se termine par un déviateur placé au quart de travée dans lequel sont ancrés les câbles nécessaires au poussage. La géométrie particulière de l'ouvrage ne permet pas de réaliser le déviateur en fin de tronçon en même temps que la section courante. Nous avons dû adapter la méthode pour réaliser chaque tronçon en trois voussoirs au lieu de deux ce qui augmente le délai de réalisation du tablier.

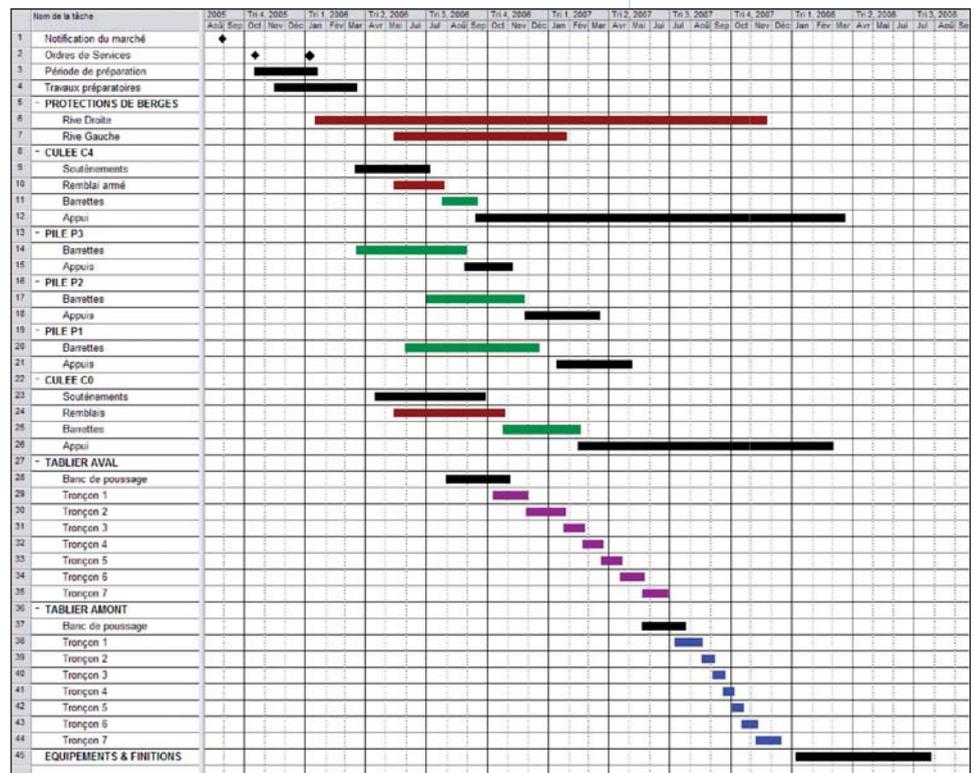
### Aire de préfabrication

L'aire de préfabrication comprend les deux bancs de poussage nécessaires à la réalisation des deux caissons du tablier. Pour des raisons d'encombrement de l'avant-bec et de courbure en plan du tablier, le premier banc de poussage réalisé est celui du côté aval. Celui du côté amont est réalisé à la fin du poussage du caisson aval.

Une grue à tour Potain MD365B L16 avec une flèche de 60 m est montée sur l'aire de préfabrication. La réussite de l'opération de poussage est conditionnée par la qualité de réalisation de la surface de glissement du banc de poussage. La géométrie de cette surface est une surface conique, de pente variable sur la longueur de l'ouvrage autour d'une pente moyenne nulle. Le service Méthodes de la Direction scientifique de demathieu & bard a donc donné au chantier les coordonnées de cette surface, de part et d'autre de la poutre de 50 cm de large sur laquelle glisse le caisson, tous les mètres. La définition de cette surface a été faite à l'aide d'un modèle 3D définissant à la fois la surface du banc de



**Photo 7**  
Montage des coffrages du caisson  
*Erection of caisson formwork*



**Figure 14**  
Planning  
*Planning chart*

**PLANNING PRÉVISIONNEL DES TRAVAUX**

- Notification du marché : 30 août 2005
- Ordre de service de la période de préparation : 17 octobre 2005
- Ordre de service travaux : 17 janvier 2006
- Dernier poussage des caissons : 13 décembre 2007
- Montant du marché : 35760619 € HT

Ouvrage d'art sur la rivière des Pluies et ses protections de berges à la Réunion

Photo 8

Avant-bec de 36 m  
36-metre launching nose



Figure 15

Comparaison des efforts de poussage (coefficients de frottement) mesurés et calculés

Comparison of measured and calculated pushing forces (coefficients of friction)

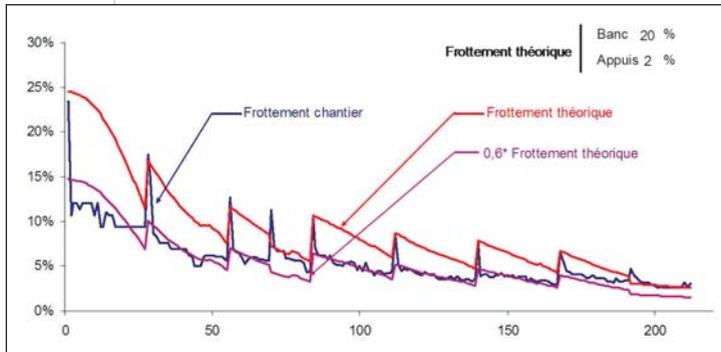
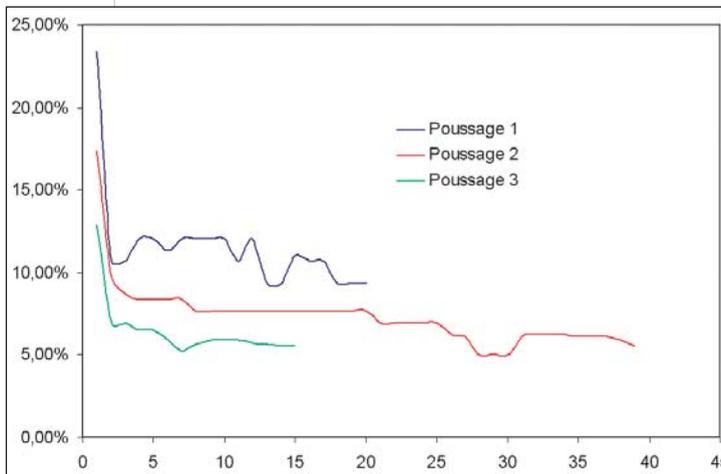


Figure 16

Coefficients de frottement globaux calculés en pourcentage du poids total

Overall coefficients of friction calculated as a percentage of the total weight



poussage mais aussi les appuis de glissement sur les culées et les piles.

Matériel de poussage

Avant-bec

Pour réaliser ce tablier il a été nécessaire de redimensionner l'avant-bec. Sa hauteur a été portée à 4,80 m. Le poids de l'avant-bec est de 100 tonnes, 51 t pour les poutres principales et 49 t pour les pièces annexes (contreventement, pièces d'accostage...).

La longueur de l'avant-bec est de 36 m.

Par ailleurs, la géométrie particulière du tablier a nécessité d'adapter la position transversale de l'avant-bec et sa forme pour la rapprocher des courbes théoriques : cassure angulaire à l'encastrement de l'avant-bec sur le tablier et nouvelle cassure angulaire à mi-longueur de l'avant-bec.

LES PRINCIPAUX INTERVENANTS

**Maître d'ouvrage**

Région Réunion

**Maître d'œuvre**

Direction départementale de l'Équipement de la Réunion - Service des Grands Travaux - Cellule Études et Travaux neufs n° 4

**Conception de l'ouvrage d'art**

Thales Engineering & Consulting

**Conception des protections**

Hydrétudes - Ingénierie de l'eau

**Architectes**

Pierre-Guillaume Dezeuze, Yves Faup et Frédéric Zirk

**Bureau d'études techniques du maître d'œuvre**

Sabe et M. Combault (consultant)

**Entreprises**

Groupement GTOI (mandataire - filiale Colas) - demathieu & Bard - Solétanche Bachy Fondations

**Bureaux d'études techniques de l'entreprise**

- Bureau d'études techniques interne de Solétanche Bachy Fondations pour la partie fondations profondes et paroi moulée tirantée en tête
- Société d'études et de conception d'ouvrage d'art (Secoa) pour les autres parties d'ouvrage

**Autres intervenants missionnés par le groupement**

- Méthodes principales : Direction scientifique demathieu & Bard
- Géotechnique - Terrassement - Techniques routières : Direction technique Colas Océan Indien
- Béton : fabrication chantier, centrale de secours Lafarge Sobex
- Armatures passives : SAMT
- Précontrainte : Spie Batignolles Technologies
- Barrières de sécurité : Comely
- Corniches et équipements métalliques : TCMI
- Appareils d'appui et joints de chaussée : Etic
- Outils coffrants des piles : Eurocoffrage
- Outils coffrants du tablier : Simpra



Photo 9

Un banc de poussage au cours d'un poussage  
*A pushing bench during a pushing operation*

Pour pouvoir respecter le délai de construction, il est nécessaire de continuer la réalisation des caissons, même en période cyclonique. L'avant-bec a donc été vérifié pour qu'il puisse reprendre la pression de 4000 N/m<sup>2</sup> à l'ELS. Cette contrainte nous a conduits à renforcer son contreventement.

### Vérins pousseurs

Les vérins pousseurs s'appuient sur les longrines du banc de poussage grâce à des vérins de blocage serrant ces poutres en béton armé. Les vérins pousseurs développent chacun 250 t. Il est possible d'en placer un ou deux par système pousseur.

La détermination des efforts de poussage a été faite en supposant des coefficients de poussage égaux à :

- sur le banc de poussage : 15 % ± 5 %;
- sur les appuis de glissement : 3 % ± 2 %.

Il convient d'ajouter l'effet de la pente longitudinale à ceux dus au frottement.

Ces calculs ont montré qu'il devait être possible de limiter l'effort de poussage à 500 t sous réserve de prendre des précautions.

Pour valider ces calculs, le chantier a fait un suivi des efforts de poussage.

Par ailleurs, la distance entre l'île et la France métropolitaine et le temps nécessaire pour acheminer du matériel, a conduit le chantier à prévoir du matériel supplémentaire. On peut constater :

- que l'effort de poussage subit un accroissement important au début du poussage d'un tronçon. Cela montre un phénomène de raidissement de la graisse sous pression avant déplacement du tablier disparaissant dès que le tablier a avancé d'un mètre environ (baisse de 40 % en moyenne);
- que l'effort de poussage mesuré en pourcentage du poids poussé diminue au fur et à mesure de l'avance-



Photo 10

Ensemble du site vu depuis l'aire de préfabrication  
*General view of the site from the prefabrication area*



Photo 11

Les deux caissons avant le dernier poussage  
*The two caissons before the last pushing operation*

ment du tablier traduisant l'augmentation du poids sur les appuis ayant des coefficients de frottement faibles.

L'effort de poussée est repris par frottement du banc de poussage et par accrochage du banc sur la culée C4.

De même la pente longitudinale du tablier nécessite de prévoir un système de vérins de freinage pour bloquer tout risque de déplacement du tablier à chaque fin de poussage d'un tronçon.

### Butées transversales

Les butées transversales jouent deux rôles :

- guider le tablier au fur et à mesure de l'avancement du tablier;
- bloquer tout déplacement transversal du caisson pendant une période cyclonique.



Ouvrage d'art sur la rivière des Pluies et ses protections de berges à la Réunion

► L'effort maximum de guidage transversal de 80 t a été calculé sur la culée C4 pendant le poussage du tablier. Sur les autres appuis, cet effort ne dépasse pas 22 t. Pendant une période cyclonique, les efforts transversaux à reprendre sur les piles atteignent 142 t à l'ELS. Cet effort est repris en augmentant le frottement entre le tablier et les appuis de glissement et en améliorant la résistance des butées transversales. ■

■ **Références**

- AFGC – Guide des ponts poussés – Presse de l'École nationale des Ponts et Chaussées.
- Jacques Mossot, Jean-François Weber, Iliès Amami, Jacques Daquin – Le doublement du viaduc Jules Verne à Amiens. Un pont de 943 m de long réalisé en 15 mois – *Travaux* n° 793, janvier 2003.

**ABSTRACT**

***Bridge over the "River of Rains" and its bank protection on Reunion Island***

*Various authors*

*The bridge over the "River of Rains", located near Roland Garros Airport at Gillot on Reunion Island, faces several construction problems :*

- *A difficult environment : foundations in a substratum consisting of a stack of highly contrasting geological layers (very hard basalt and scoria with several aquifers), and a tropical climate which during the cyclone season can cause major variations in the river level and requires water control rules;*
- *A geometric design of the prestressed concrete deck that was difficult to execute : a deck 30,80 m wide, consisting of two caissons 4 m high, each moved into position by pushing, having a plane radius of 300 m in the axis, a parabolic radius of 3000 m in elevation and a mean slant of 2.5 % resting on supports with different slants.*

*By precisely establishing the methods for execution of both the supports in the river and the pushed deck, it was possible to master these various constraints.*

**RESUMEN ESPAÑOL**

***Obras de fábrica sobre el río de las Lluvias y sus protecciones de márgenes en La Reunión***

*Autores diversos*

*El puente sobre el río de las Lluvias en La Reunión, ubicado cerca del aeropuerto Roland Garros en Gillot, concentra varias dificultades de realización :*

- *un entorno delicado : diversas cimentaciones en un sustrato formado por un apilamiento de capas geológicas sumamente contrastadas (basalto muy duro y escorias con varias aguas subterráneas), un clima tropical que puede provocar en periodo ciclónico variaciones importantes del nivel del río y que precisan diversas reglas de control de las aguas;*
- *una definición geométrica del tablero de hormigón pretensado bastante específica de realizar : un tablero de 30,80 m de anchura, formado por dos cajones de 4 m de altura, cada uno instalado por empuje, que presentan un radio en plano en el eje de 300 m, un radio parabólico en elevación de 3,000 m y una sobreelevación media de 2,5 % sobre apoyos con distintos esviajes.*

*Una implantación precisa de los métodos de ejecución tanto de los apoyos en el río como del tablero empujado ha permitido dominar estas diferentes restricciones.*

# Architecture des ouvrages A, D, F et G sous maîtrise

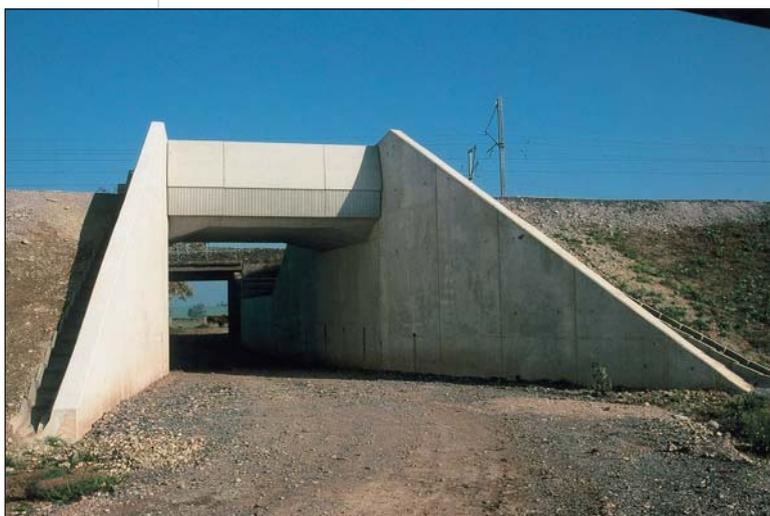
**La qualité architecturale des ouvrages d'art qui ponctuent la LGV Est, récemment mise en service, est capitale pour une perception satisfaisante de la ligne.**

**Pour les 150 ouvrages divers des tronçons sous maîtrise d'œuvre SNCF-Inexia, je me suis attaché à ce que les ponts expriment clairement l'image de marque que véhicule le TGV : modernité, vitesse, puissance et sécurité.**

**Un vocabulaire clair et fort a été décliné sur tous les ouvrages : ponts-rails, ponts-routes et viaducs en béton ou à structure mixte.**

Photo 1

Pont-rail à une travée. Ce sont les plus nombreux, les plus modestes et les plus réussis  
*Single-span railway bridge. These are the most numerous structures, the smallest and the most successful*



Anticipant les décisions du Grenelle de l'Environnement, RFF a relancé la construction du dernier tronçon de la LGV Est européenne entre Baudrecourt et Strasbourg. Le maître d'ouvrage achète les terrains en Alsace, établit les marchés des géomètres et enclenche la phase Projet des études afin que les travaux puissent démarrer en 2010, comme l'a annoncé le président de la République.

L'aspect architectural des ouvrages à construire est figé depuis 8 ans puisqu'ils faisaient partie de l'avant-projet étudié pour la totalité de la ligne et approuvés lors de l'attribution des marchés de maîtrise d'œuvre. Le lot 35 du tronçon G, conçu par la SNCF-INEXIA, outre les inévitables ouvrages courants, ne comporte que des viaducs de dimensions modestes. Formant un ensemble cohérent, ils sont homogènes avec les ponts réalisés sur les tronçons mis en service en juin 2007.

Très vite les 300 km de la ligne à grande vitesse Est sont en train de se faire oublier : les aménagements

paysagers cicatrisent les déblais, accompagnent les talus et intègrent la voie dans la nature environnante. Seuls les nombreux ouvrages d'art attirent l'attention des riverains et des populations qui ne prennent pas, ou peu, le TGV, mais qui en croisent souvent le tracé. Avec la silhouette très dynamique des trains, les ponts de dimensions diverses sont les éléments déterminants dans la perception de la nouvelle ligne. C'est dire à quel point leur conception architecturale est importante pour que, s'ils sont appréciés, la ligne soit acceptée. Les équipes de maîtrise d'œuvre en ont été bien conscientes puisqu'elles ont toutes fait appel à des architectes de talent et à l'expérience confirmée (Ch. Lavigne pour Coyne & Bellier, A. Spielmann pour Scetauroute, etc.)<sup>1</sup>.

Pour ma part, j'ai été associé dès 1993 à la SNCF pour le dessin des ouvrages significatifs au stade de l'enquête d'utilité publique. Je me suis attaché à ce que la conception architecturale des ouvrages exprime clairement l'image de marque que véhicule le TGV, c'est-à-dire : modernité, vitesse, puissance et sécurité. Cela se traduit par une architecture dynamique et forte, sans mièvrerie ni détails anecdotiques.

Mais l'aspect final n'est pas le seul critère à prendre en compte. L'architecte doit également tenir compte d'autres contraintes telles que :

- une pérennité assurée, découlant autant de la conception que de la qualité de l'exécution ;
- la recherche du moindre coût, tant à la construction qu'à l'exploitation ;
- les contraintes statiques et dynamiques ainsi que les équipements propres aux lignes à grande vitesse, totalement différents de ceux des ouvrages routiers.

Les solutions sont apparues petit à petit, au cours d'une collaboration dense et efficace avec le bureau d'études SNCF-INEXIA. C'est ainsi qu'a été mise au point une grammaire pour les constituants des nombreux ouvrages courants, puis la conception des grands ouvrages.

L'homogénéité entre les 150 ouvrages des tronçons sous maîtrise d'œuvre de la SNCF-INEXIA est donnée par une grammaire très compacte définissant les piles, les culées, les murs en ailes et les parements. Elle est surtout apportée par des corniches pleines constantes pour tous les ouvrages. Outre son rôle classique d'about du tablier, les corniches pleines bloquent les déplacements du ballast et tiennent lieu d'écran phonique.

1. La mise au point du projet architectural des ouvrages d'art du TGV sous maîtrise d'œuvre de la SNCF a été effectuée de juillet 1999 à février 2000, avant qu'une concertation ait pu se faire entre les architectes désignés en vue de déterminer une « architecture de la ligne LGV Est ».

Il est intéressant de noter qu'en raison d'un budget très serré et de contraintes identiques, les solutions proposées par les différents architectes sont assez homogènes, bien davantage que sur la ligne Sud.

# d'art de la LGV Est. Tronçons d'œuvre de la SNCF-INEXIA

Jean-Louis Jolin  
Architecte

Pour ce faire, elles sont déclinées en plusieurs hauteurs : 1 m, 1,50 m, 2 m et 2,50 m au-dessus de la voie.

## ■ Les ouvrages courants en béton

On distingue, dans les ouvrages courants, les ponts-routes chevauchant la LGV et les ponts-rails portant la LGV.

### Les petits ponts-rails (P.Ra)

Ils n'ont qu'une travée avec une corniche-écran prise entre deux murs en ailes encadrant fortement le passage. Simplifiés au maximum, ils s'intègrent avec modestie dans le long talus de l'infrastructure. Pour cette raison ce sont les plus réussis (photo 1).

### Les ponts-rails à plusieurs travées (P.Ra)

Ce sont les ponts-rails, sous lesquels passent les rive-rains tout au long du tracé, qui déterminent l'image de marque de la ligne.

Ces ouvrages généralement petits dans le paysage, ont été simplifiés. Ils comportent des piles puissantes et fluides grâce à un large arrondi qui souligne le passage. Leur parement est lisse ou cannelé suivant la nature des voies franchies. Le groupe corniche – garde-corps forme un ensemble dont la forme fuselée évoque celle des rames du TGV. Sa hauteur est justifiée par la protection aux projections de ballast et par son rôle d'écran phonique. Il est constitué par des panneaux préfabriqués associant le béton clair désactivé à une bande cannelée (photo 2).



Photo 2

Pont-rail à trois travées. Ici, une corniche de 1,50 m au-dessus de la voie, affirme franchement le rôle de ce modeste ouvrage

*Three-span railway bridge. Here, a 1.50-m cornice above the track asserts frankly the role of this modest structure*

## Les ponts-routes (P.Ro)

Portant une route qui passe au-dessus de la ligne, ils ne seront vus que par les conducteurs des trains. Pour cette raison, ils sont simplifiés au maximum. L'intervention de l'architecte n'est perceptible que par l'équilibre des proportions et par les murets d'extrémité en forme d'oreilles. Leur rôle est de caler l'ouvrage dans sa brèche et – surtout – de permettre un raccordement satisfaisant avec les clôtures qui ceignent le domaine ferroviaire.



Photo 3

Viaduc de la Théroanne. Des couples de piles lenticulaires avec des chevêtres en forme de pirogue portent des poutres PRAD de 22,50 m de portée. Puissant, l'ouvrage reste transparent

*Théroanne Viaduct. Twin lenticular piers with canoe-shaped crosshead beams carry prestressed beams of span length 22,50 m. Powerful, the structure remains transparent*

## ■ Les grands ouvrages en béton

Chaque cas particulier est résolu par un ouvrage singulier résultant des différentes contraintes. On retrouvera, pour chacun, des lignes épurées et tendues, soulignées par le même groupe corniche-écran.

### Le viaduc de la Théroanne (tronçon A - Lot 12) – Seine-et-Marne

Long de 322 m, il franchit la vallée plate et boisée de la Théroanne, au nord de Meaux, au moyen de poutres préfabriquées en béton (PRAD) de 22,50 m de portée. Elles reposent sur de solides chevêtres en forme de pirogue portés chacun par deux fûts de section lenticulaire (photo 3).

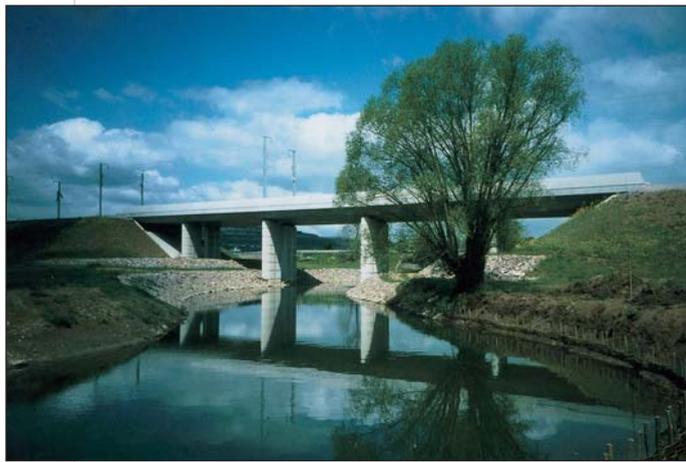
Entreprises : GTM – Sogea

Architecture des ouvrages d'art de la LGV Est. Tronçons A, D, F et G sous maîtrise d'œuvre de la SNCF-INEXIA

Photo 4

Viaduc sur la Seille.  
L'ouvrage en béton, dérivé des ponts courants s'intègre parfaitement dans la courbe de la rivière avec des piles effilées soigneusement cannelées

*Viaduct over the Seille. The concrete structure, derived from standard bridges, fits perfectly into the curve of the river with carefully fluted slender piers*



© Photo J.-L. Jollin

Photo 5

Viaduc de Benoîte-Vaux.  
Les piles dissymétriques se répondent comme des mains en prière. Elles portent un classique bipoutre métallique à peine visible à l'ombre de la corniche

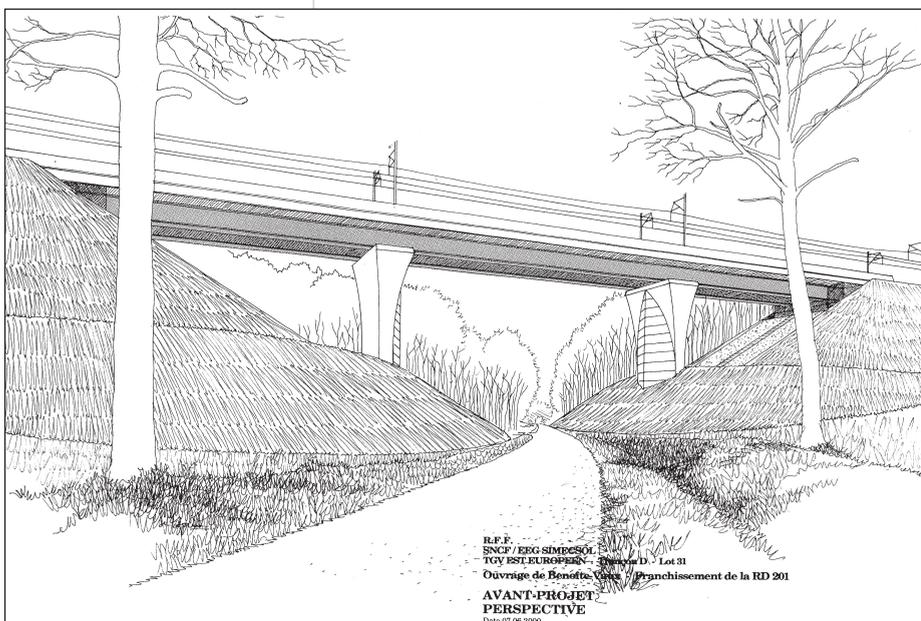
*Benoîte-Vaux Viaduct. The asymmetric piers match one another like hands joined in prayer. They carry a conventional steel double-girder hardly visible in the shadow of the cornice*



© Photo J.-L. Jollin

Figure 1

Viaduc de Benoîte-Vaux  
*Benoîte-Vaux Viaduct*



**Le viaduc sur la Seille (tronçon F - Lot 34a) - Moselle**

L'ouvrage, long de 76 m avec cinq travées, est directement issu des ponts-rails en béton. Il s'intègre particulièrement bien dans la courbe de la rivière. Les piles et la corniche, identiques à celles du viaduc sur l'autoroute A31 tout proche, sont également bienvenues (photo 4).  
Entreprise : Demathieu & Bard

**Les ouvrages métalliques**

**Le viaduc de Benoîte-Vaux (tronçon D - Lot 31) - Meuse**

Dans la Meuse, juste après la Voie Sacrée, la LGV passe très près du couvent de Benoîte-Vaux célèbre dans la région pour ses pèlerinages. La ligne franchit la modeste RD 201 dans un site vallonné et boisé au moyen d'un ouvrage mixte - bipoutre de 86 m de longueur, par trois travées de portées modestes : 26 m - 34 m - 26 m, avec un tirant d'air de 15 m. La structure métallique en bipoutre de 2,00 m de hauteur est parfaitement classique. Peinte en vert foncé, elle se fait oublier à l'ombre du tablier. Les piles constituent l'élément le plus original de l'ouvrage. Elles se font face, posées au tiers inférieur de talus très rapprochés. Modelées comme des sculptures elles sont dissymétriques et se répondent comme des mains en prière.

Les parements latéraux et arrières, s'évasant en courbes tendues, sont nets et lisses. Un dièdre, sur les parements se faisant face, présente une structure striée qui rejoint en forme d'ogive le volume lisse de la pile (photo 5 et figure 1).

Entreprises : Fougerolle - Ballot - Eiffage

**Les passerelles de la Meuse (tronçon D - Lot 31) - Meuse**

Deux passerelles métalliques assurent la continuité des cheminements piétons dans la forêt d'Argonne. Au droit du chemin des Pèlerins, le déblai, aux talus pentés à 2/3, est large d'une vingtaine de mètres en pied, avec un tirant d'air de 6 à 7,50 m. La passerelle 31272 franchit les 30 m entre culées béton en une seule portée. Le déblai, à l'aplomb du chemin d'Aventure est plus profond, de 8 à 13 m avec des talus presque verticaux. Avec deux piles intermédiaires, la passerelle 31300 franchit 49 m en trois travées. Les deux passerelles larges de 2,00 mètres utiles ont une structure identique avec poutres latérales formant garde-

corps et entretoises qui portent un platelage en béton.  
 Entreprises : Fougerolle – Ballot – Eiffage

### Le viaduc sur l'autoroute A31 (tronçon F - Lot 34 a) - Moselle

Prévu au départ en structure béton armé, l'ouvrage résulte d'une variante. L'entreprise a proposé une structure mixte en raison des sujétions de construction sur une autoroute très passante.

C'est un bipoutre de conception classique, long de 105 m en cinq travées. Les piles, effilées aux extrémités, sont cannelées verticalement. Le coffrage très soigné donne un excellent résultat. La corniche est le modèle standard de 1 m de hauteur.

Entreprise : Demathieu & Bard

### Le viaduc de Baudrecourt (tronçon F - Lot 34 b) - Moselle

C'est l'ultime ouvrage de la ligne actuelle, au droit de son raccordement avec la voie ferrée Réding - Luxembourg qui passe en remblai dans la vallée très plate et souvent inondée de la Nied. L'ouvrage, en saut-de-mouton et portant une voie unique, enjambe en 286 m avec un biais très prononcé une voie nouvelle et les deux voies existantes au moyen de six travées de 35 - 42 - 63 - 63 - 45 et 38 m (photos 6 et 7 et figure 2). La volonté de limiter la hauteur du remblai dans un terrain de très mauvaise qualité et l'étroitesse de l'ouvrage, ont conduit très vite à la solution de structure acier à poutres latérales. Les poutres sont de hauteur constante pour les quatre travées d'extrémités et se bombent légèrement pour les plus grandes portées centrales qui franchissent les voies ferrées. Les abouts sont inclinés et renforcés optiquement par une crête qui en dynamise la silhouette. L'ensemble est laqué vert réséda (RAL 6011 agréé par l'AQPA) qui se marie bien avec les couleurs du paysage alentour.

Les piles en béton ont été traitées comme des sculptures. Elles s'évasent, d'une base en losange à une tête orthogonale dédoublée, grâce à des paraboloïdes hyperboliques. Tous les mètres un baguettage en creux met en valeur le mouvement du volume qui exprime bien le concept de force et de dynamisme lié à la LGV Est (photo 8).

Entreprises : GTM Génie Civil – Eiffage – Deschiron – Chantiers Modernes – Campenon Bernard

### Le viaduc de Bourgalstroff (tronçon G - Lot 35 à venir) - Moselle

Il fait partie des ouvrages du tronçon G qui sera mis en œuvre en 2010 pour terminer la LGV Est vers Strasbourg.



© Photo J.-L. Jolin



© Photo J.-L. Jolin

Photos 6 et 7

Viaduc de Baudrecourt. La hauteur des poutres latérales, constante pour les travées d'extrémité, se bombe pour franchir les voies ferrées Baudrecourt Viaduct. The height of the side girders, constant on the end spans, swells to cross the railway tracks

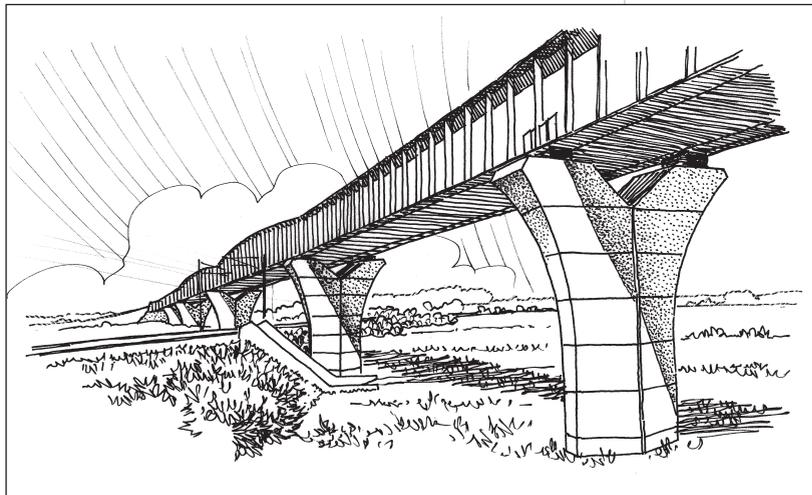
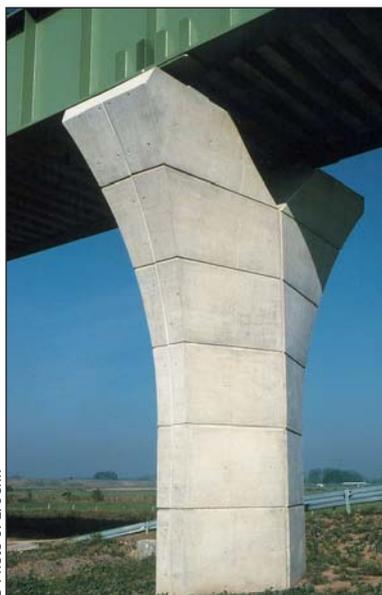


Figure 2

Viaduc de Baudrecourt Baudrecourt Viaduct



© Photo J.-L. Jolin

Photo 8

Viaduc de Baudrecourt. Les piles ont été traitées comme des sculptures dont la forme exprime le concept de force et de dynamisme lié à la LGV Est Baudrecourt Viaduct. The piers have been treated like sculptures whose shape expresses the concept of strength and dynamism associated with the East High-Speed Train Line

Architecture des ouvrages d'art de la LGV Est. Tronçons A, D, F et G sous maîtrise d'œuvre de la SNCF-INEXIA

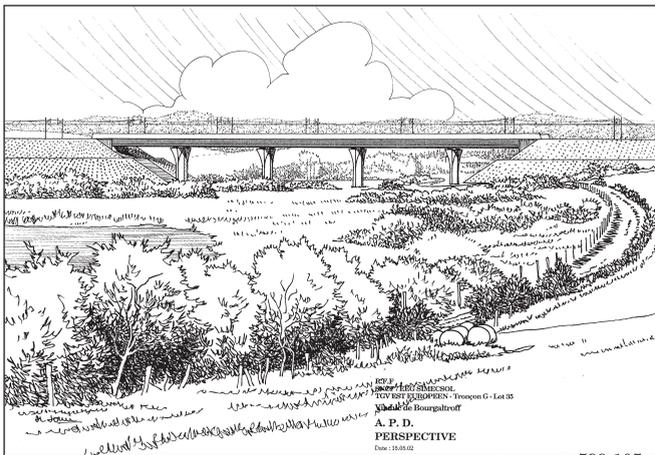


Figure 3  
Viaduc de Bourgaltruff  
Bourgaltruff Viaduct

► C'est un ouvrage de 195 m qui franchit la vallée du ruisseau de Bourgaltruff entre deux étangs. Le tablier est un ouvrage mixte classique, bipoutre avec cinq travées de 2,70 m de haut, laqué vert foncé. Les piles puissantes, hautes de 14 à 16 m, dans l'esprit de celles de Benoîte-Vaux mais symétriques, s'évasent par des courbes développables d'une base en losange à un chapiteau rectangulaire (figure 3).

**Le viaduc du canal des Houillères (tronçon G) - Moselle**

Également sur le tronçon G la LGV franchira le canal des Houillères, au nord de l'étang du Stock dans un site très boisé. L'ouvrage ne comporte qu'une seule travée de 33,50 m. Avec une structure mixte à quatre poutres de 1,50 m de hauteur, peintes en vert foncé. ■

**ABSTRACT**  
*Architecture of engineering structures for the East High-Speed Train Line. Sections A, D, F and G under SNCF-Inexia project management*

J.-L. Jolin

*The architectural quality of the engineering structures along the East High-Speed Train Line, recently put into operation, is capital for a good perception of the line.*

*For the various 150 structures on the sections under SNCF-Inexia project management, I endeavored to ensure that the bridges clearly express the image conveyed by the high-speed train : modernity, speed, power and safety.*

*A clear, strong theme was deployed on all the structures : railway bridges, road bridges and viaducts of concrete or composite structure.*

**RESUMEN ESPAÑOL**  
*La arquitectura de las obras de fábrica de la LGV Este. Tramos A, D, F y G bajo dirección del proyecto de la SNCF-Inexia*

J.-L. Jolin

*La calidad arquitectónica de la obras de fábrica a lo largo de la línea de alta velocidad Este, recientemente puesta en servicio, es primordial para una percepción satisfactoria de la línea.*

*Para las 150 obras de fábrica diversas de los tramos bajo dirección del proyecto SNCF-Inexia, me he dedicado a que los puentes expresan claramente la imagen de marca que representa el TGV : modernidad, velocidad, potencia y seguridad.*

*Un vocabulario claro y potente se ha declinado en todas las obras : puentes ferroviarios, puentes viarios y viaductos de hormigón o de estructura mixta.*

# Le pont Renault sur le grand bras de la Seine entre Boulogne-Billancourt et l'île Seguin



**Jean-Bernard Datry**  
Directeur  
Setec TPI



**Syvie Ezran**  
Ingénieur en chef  
Setec TPI

**Le pont Renault franchit le grand bras de la Seine à Boulogne-Billancourt. Il relie l'île Seguin à la ville, et participe ainsi à la reconquête des friches industrielles laissées par les usines Renault. La conception architecturale de l'ouvrage laisse une large place aux cheminements piétons, et les niveaux décalés de la chaussée et des trottoirs permettront aux promeneurs d'avoir une perception inhabituelle de la Seine et des berges avoisinantes. A la fois pont, passerelle et pont industriel, il transporte de nombreux réseaux et devient ainsi le véritable cordon ombilical de l'île. D'une géométrie complexe tout en restant d'une évidence technique, le tablier, réalisé en charpente métallique, a été acheminé depuis les ateliers du constructeur, en Belgique, puis mis en place, depuis la Seine, au moyen de plates-formes élévatoires et de barges de forte capacité.**

## ■ Présentation du projet

### Historique

La Ville de Boulogne-Billancourt a retenu au mois de mai 2003, à l'issue d'un concours d'ingénierie et d'architecture regroupant les architectes Zaha Hadid, Chris Wilkinson et Barto + Barto, le groupement Setec TPI (mandataire) – Atelier Barani pour réaliser la conception et la maîtrise d'œuvre du nouveau pont

sur le grand bras de la Seine, entre les nouveaux quartiers situés en rive droite et l'île Seguin (figure 1).

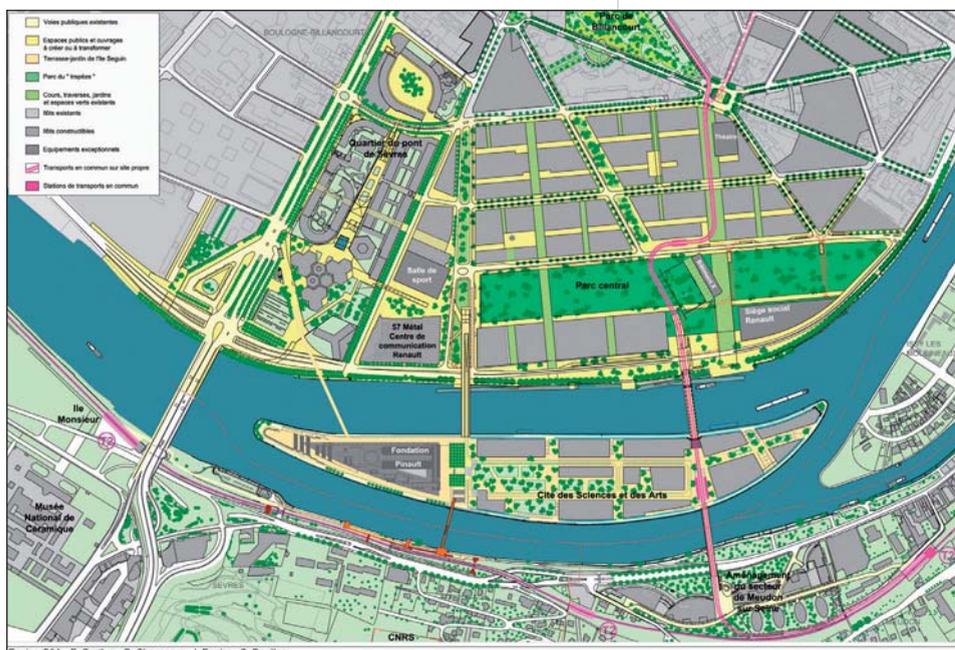
Ce pont relie l'île Seguin, en cours de cession par Renault à Boulogne-Billancourt, et viendra compléter les ouvrages existants : le pont Daydé (1928) et le pont Siebert (1932) qui seront affectés aux circulations douces (piétons et cyclistes) et au tramway.

Le projet a été conduit entre les mois de septembre 2004 et de février 2005. La consultation des entreprises a eu lieu au printemps 2005. Le marché de travaux a été attribué à Bouygues-Victor Buyck Steel Construction en septembre 2005 et l'ordre de service de réaliser les travaux a été délivré le 9 décembre 2005.

### Organisation de la maîtrise d'ouvrage

En phases d'études préliminaires complémentaires et d'avant-projet, le maître d'ouvrage était la Ville de Boulogne Billancourt, assisté de la société Icade G3A qui était maître d'ouvrage délégué et mandataire. La mission d'assistance à la maîtrise d'œuvre était assurée par Scetauroute, Infraplan pour les aspects de planning et le bureau d'études Alto pour les réseaux de chauffage et de froid urbains.

Lors des phases de projet, de dossier de consultation des entreprises et de travaux, par avenant daté du 14 septembre 2004, la maîtrise d'ouvrage est transférée à la SAEM Val de Seine Aménagement. L'assistance technique à la maîtrise d'ouvrage est assurée par Icade G3A, Scetauroute et le bureau d'études Béture Environnement pour les réseaux de froid et de chauffage urbains. La mission de contrôle technique est



**Figure 1**  
Plan de masse  
Layout plan

## Le pont Renault sur le grand bras de la Seine entre Boulogne-Billancourt et l'île Seguin

Tableau I

| Appuis   | Programme de l'ouvrage<br>Toit craie dure | Campagne Fondasol (2004)<br>Toit craie compacte             |
|----------|---|---|
| Culée C0 | + 3.00 m NGF                              | +1.00 m NGF (moy compacte)<br>- 6.00 m NGF (très compacte)  |
| Pile P1  | + 4.00 m NGF                              | - 4.00 m NGF (très compacte)                                |
| Pile P2  | + 10.00 m NGF                             | - 4.00 m NGF (moy compacte)<br>- 6.00 m NGF (très compacte) |
| Culée C3 | + 10.00 m NGF                             | - 4.00 m NGF (moy compacte)<br>- 6.00 m NGF (très compacte) |



assurée par Socotec. La mission d'OPC de la ZAC est confiée à Cicad. La mission de CSPS est assurée par BECS en phases de projet et de dossier de consultation des entreprises, et par Normatest, puis Véritas en phase travaux.

### ■ Particularités techniques du projet

#### Reconnaitances géotechniques

La campagne de reconnaissances géotechniques, effectuée au droit des appuis du pont, a mis en évidence un approfondissement du toit de la craie compacte par rapport aux hypothèses du programme de l'ouvrage, notamment en rive droite (cf. tableau I).

La prise en compte de ces résultats conduit à augmenter la longueur des fondations profondes en conséquence (tableau II).

Cette campagne géotechnique a également permis de déterminer la profondeur des palplanches constituant le batardeau sous P1, afin d'en assurer l'ancrage dans la craie imperméable.

#### Réseaux

Le maître d'ouvrage a conduit une enquête réseaux auprès des concessionnaires. Une étude minutieuse des raccordements des réseaux, tant en rive droite qu'en rive gauche, de leur mise en place et de leur entretien dans l'ouvrage a été effectuée préalablement à l'engagement des travaux. Les réseaux de chauffage et de froid urbains, de gaz, d'électricité, de télécoms et réseaux et d'éclairage public de l'île Seguin sont mis en place par les concessionnaires au fur et à mesure de l'achèvement des tronçons.

Les réseaux d'eaux usées, d'eau potable et de gaz ont été intégrés au projet de l'ouvrage. Ils sont également réalisés par le constructeur du pont.

| Appuis   | Arase inférieure des pieux<br>Projet                |
|----------|---|
| Culée C0 | 0,00 m NGF  |
| Pile P1  | - 5,00 m NGF  |
| Pile P2  | - 5,00 m NGF<br>Barrettes réalisées avec le parking |
| Culée C3 | - 5,00 m NGF<br>Barrettes réalisées avec le parking |

Tableau II

### ■ Exigences architecturales

#### Conception architecturale

Les séquences spatiales structurent l'architecture de l'ouvrage. Il est mince et effilé sur le cours, ramifié sur le quai, déployé sur la Seine. Si la surface ne laisse rien transparaître des efforts structurels, la sous-face les révèle, alors que son profil les rend lisibles dans le site. Les codes de lecture habituels entre la structure d'un pont et son usage sont ici troublés et décalés par des situations particulières :

- en vue lointaine depuis les quais, les différences de niveau des circulations masquées par les garde-corps mettent en scène de façon spectaculaire le mouvement coloré des piétons, des cyclistes et des automobiles. Leurs silhouettes apparaissent dans leur intégralité, découpées dans le ciel au-dessus de l'extrados;
- l'ambivalence dans la définition du pont est certaine. Est-ce un pont-passerelle ou une passerelle-pont? Sans doute les deux en fonction des périodes d'usage. Mais c'est aussi un pont industriel, au vu de la grande quantité de réseaux embarqués, véritable cordon ombilical de l'île;
- la sous-face, capitale pour un ouvrage urbain prend en compte et résume cette ambivalence. Elle a l'aspect d'un pont routier dans sa partie centrale alors que les structures latérales finement tendues vers les extrémités dessinent le passage progressif de la tôle blanche et massive aux tôles ajourées qui contiennent les réseaux, jusqu'aux planches de bois des rives circulées.

L'architecture globale du pont mixe et fusionne l'image d'un pont routier, d'un objet technique et d'une passerelle piétonne. Elle les décline de façons différentes lorsqu'elle frôle et touche l'espace urbain ou lorsqu'elle se projette dans l'espace naturel de ce quartier de Boulogne.

## Les entrées en terre

L'ouvrage a fait l'objet d'une étude architecturale minutieuse visant à définir l'itinéraire et l'insertion du tablier dans les berges de la Seine.

La culée de l'île s'inscrit dans la continuité du mur du quai. Les appareils d'appui sont protégés par un habillage démontable en éléments de tôle peinte tramés sur le principe du mur de quai et de teinte métallisée au choix de l'architecte. Le parement de la culée est réalisé par un autre marché, dont l'objet est la réalisation du pourtour de l'île.

La culée rive droite : les trottoirs de la culée sont revêtus de pierre dure calcaire et sont en continuité des sols avec le cours Seguin. Les voiles de la culée sont réalisés en béton architectonique.

La pile principale située dans l'emprise de l'estacade est réalisée en béton brut.

Les voiles inclinés créés dans l'estacade autour de la pile P1 sont en béton brut. La partie supérieure reçoit un couronnement en béton. Les soutènements latéraux intègrent un dispositif d'éclairage de type projecteur encastré. Cette découpe du quai est bordée par un dispositif de garde-corps dans l'épaisseur du sol type « emmarchements en saut-de-loup dont le raccord avec le voile incliné est à faire en concertation avec le concepteur en charge des aménagements de la zone.

La pile P2 est également en béton brut. Un soin particulier est apporté au raccord en partie basse avec le revêtement en pierre des futurs emmarchements sur le cours Seguin menant au parking enterré.

Les bétons de ces ouvrages sont particulièrement soignés. L'aspect, les finitions, et la teinte de ces différents ouvrages sont le plus homogène possible, notamment au droit des reprises de bétonnage. Le béton est brut de décoffrage, sans enduit ni ragréage et de teinte claire. Les coffrages sont particulièrement soignés et calepinés (banches et écarteurs) pour obtenir une finition parfaitement lisse.

## Les accès

La structure des escaliers d'accès est constituée de trois PRS en acier métallisé à chaud et peint dans une teinte gris métallisé. Les marches et les paliers sont réalisés en lattes de bois de même essence que le platelage du pont. Les nez de marches présentent une bande

antidérapante constituée d'une résine polymère sablée. Un soin tout particulier est accordé au raccord avec les revêtements futurs du cours Seguin pour l'accès aval et du quai pour l'accès amont en concertation avec les architectes et urbanistes en charge de l'opération.

L'ascenseur amont, côté quai, est habillé de tôles inox sur la face d'accès et de métal sous forme de panneaux constitués de fer en U galvanisés et peint comme les PRS des escaliers sur les trois autres faces.

L'ascenseur aval, côté parvis, est habillé de tôles inox sur la face comportant les portes également en inox, et ce sur toute la hauteur de la superstructure. Les trois autres faces sont constituées de panneaux de verre opa-lescent. La couverture de l'édicule ainsi que la cabine sont vitrées.

## Le tablier

En sous-face, le caisson en tôle peinte ton clair est prolongé sous les trottoirs par des « capots » habillant les réseaux. Réalisés en tôle peinte de même teinte que le caisson, ces capots sont démontables et espacés les uns des autres suivant le rythme des garde-corps. Également décollés du caisson ils forment ainsi des plaques ou écailles suspendues qui se différencient sans ambiguïté de la masse du caisson.

Les garde-corps de la travée de rive sont constitués de poteaux en acier peint entretoisés, implantés suivant le rythme de 210 cm de la structure du pont, d'une main courante en inox brossé et de filières en câbles d'acier inoxydables espacés de 15 cm et tendus par des ridoirs. Ils suivent la pente du pont variant de 0 à 9,8 %.

Les garde-corps de la travée située sur la Seine sont en bois et sont fixés en extrémité des encorbellements. Ils sont composés de poteaux d'acier peint de même teinte que la charpente métallique apparente, d'un remplissage horizontal en tasseaux bois dans la même essence que le platelage, et d'une main courante également réalisée en bois de même essence.

Le trottoir haut le long de la chaussée, dans la continuité de celui de la travée rive droite, est en pierre dure de type calcaire de type « beige classico » finition grenailée.

Le trottoir en contrebas est constitué d'un platelage bois. Les trottoirs hauts et bas sont séparés par des gradins en platelage bois de même essence qui disparaissent progressivement lorsque les deux niveaux se rejoignent.

Le maître d'œuvre a établi, préalablement à la consultation des entreprises, un prototype d'étude du platelage bois afin de comparer les essences de bois utilisables : chêne, tali, courbaril, bangkirai, maçaranduba, teck. Le maître d'ouvrage a choisi, après examen de quelques mois de vieillissement sur le site, le tali. Les

### LES PRINCIPALES QUANTITÉS

- Béton pour appuis (hors barrettes et pieux) : 1950 m<sup>3</sup>
- Aciers de charpente : 2000 t
- Béton pour pieux forés : 500 m<sup>3</sup>

## Le pont Renault sur le grand bras de la Seine entre Boulogne-Billancourt et l'île Seguin



planches de bois du platelage de la circulation basse, de par leur finition brut de sciage, leur largeur, et la mise en place d'une bande de résine polymère antidérapante, permettent un confort d'utilisation face au phénomène de glissance.

La chaussée en revêtement clair est bordée de trottoir en pierre dure calcaire.

La passerelle amont est équipée de deux garde-corps verticaux constitués de poteaux métalliques et d'un remplissage en bois. Les garde-corps sont équipés de mains courantes fixées sur lisse haute métallique.

### Éclairage

**Balisage des voies routières et des trottoirs le long de la chaussée** : il est réalisé au moyen de bornes éclairantes espacées de 140 cm permettant un éclairage rasant côté chaussée et côté trottoir.

**Éclairage de la circulation basse** : il se fait à partir de la main courante par un couple d'appareils de type appareils à encastrer équipés de leds à chaque montant vertical du garde-corps selon la trame de 210 cm de la structure du pont.

Orientés vers le platelage bois, ils ne sont pas perceptibles de l'extérieur et ne participent pas à l'éclairage de mise en valeur.

**Éclairage de la pile P1** : l'éclairage de mise en valeur du pont se fait à partir de la pile P1 au moyen d'appareils équipés de lampe de type iodures métalliques, encastrés dans les voiles béton autour de la pile.

Le tablier reçoit un éclairage indirect par une série de cinq appareils orientés vers la surface de l'eau proche de la pile et par une autre série de cinq autres appareils orientés vers un point plus éloigné au centre du fleuve. L'ensemble de ces dispositions concourt à mettre en valeur la silhouette du pont. La courbe de l'extrados est ponctuée de points lumineux constitués par les bornes, et la courbe de l'intrados en métal peint en blanc reçoit le reflet de la seine éclairée depuis les rives.

### ■ Description technique de l'ouvrage

#### Données géométriques et fonctionnelles

##### Tracé en plan

Le tracé en plan de l'ouvrage est rectiligne, de gisement 41,3451 grades.

##### Profil en long

Le profil en long respecte les valeurs maximales et minimales en angle rentrant et saillant imposé par les normes pour une vitesse de référence de 60 km/h.

### Profil en travers

Le profil en travers permet le passage de la circulation automobile sur deux voies, des cyclistes et des piétons de chaque côté de la chaussée.

Les largeurs fonctionnelles sont les suivantes :

- sur les travées 1 et 2 :
  - > trottoirs bas : 2 x 2,30 m,
  - > emmarchements : 2 x 1,20 m,
  - > trottoirs hauts, de part et d'autre de la chaussée : 2 x 3,20 m,
  - > chaussée : 2 x 3,00 m ;
- sur les travées 2 et 3 :
  - > trottoirs : 2 x 2,30 m,
  - > chaussée : 2 x 3,00 m.

La largeur totale de l'ouvrage est donc variable. Elle varie de 19,40 m au droit de la culée C0, à 10,60 m au-delà de la file 63.

Le dévers de la voie routière est de 2 % vers l'extérieur. La pente des trottoirs hauts est de 1 %. Les trottoirs bois sont horizontaux.

### Gabarit routier

Le gabarit de la RD1, quai de Stalingrad, est de 4,90 m y compris revanche de 0,15 m, mesuré perpendiculairement au plan de la chaussée.

### Gabarit fluvial

L'intrados de l'ouvrage doit être disposé à une cote supérieure à 34,80 m, tant en phase de construction qu'en phase définitive.

La hauteur de la passe navigable varie donc de 6,35 m par rapport aux PHEN à 8,05 m par rapport à la RN.

### Données générales

#### Données hydrauliques

Les niveaux à prendre en compte sont les suivants :

- plus basses eaux navigables : 26,25 NGF ;
- retenue normale : 26,75 NGF ;
- plus hautes eaux navigables : 28,45 NGF ;
- crue centennale : 31,55 NGF ;
- crue chantier : 29,35 NGF.

#### Conditions de navigation

Le grand bras de la Seine est utilisé pour la circulation des péniches de l'aval vers l'amont. Le chenal de navigation de 60 m est centré sur le grand bras. Il présente un gabarit fixé à 34,80 m NGF.

Toute implantation de palées provisoires en Seine et leur système de protection doivent recevoir l'accord du Service de la Navigation de la Seine. Les ouvrages provisoires doivent être protégés des chocs de bateau par des moyens appropriés, ducs d'Albe et glissières, disposés en amont et en aval des ouvrages, le sens de circulation des péniches étant dans le sens Rouen – Paris.

| Parties d'ouvrages                            | Classe d'exposition    |
|---|------------------------|
| Semelles de fondation : accès amont, culée C0 | XA2, XC2, XD2, XF3 (F) |
| Fondations profondes : tous ouvrages          | XA2, XC1, XD2, XF3 (F) |
| Voiles contre terre : culée C0                | XA2, XC2, XD2, XF3 (F) |

Tableau III

| Parties d'ouvrages                   | Classe d'exposition    |
|--------------------------------------|------------------------|
| Semelles de fondation, embase        | XA2, XC1, XD2, XF3 (F) |
| Béton immergé pour fondation pile P1 | XA2, XC1, XD2, XF3 (F) |

Tableau IV

### Déviations de la RD1

#### Déviations de la chaussée

La construction de l'ouvrage de franchissement de la Seine, entre Boulogne-Billancourt et l'île Seguin, nécessite la déviation d'une portion de la RD1 afin de libérer l'emprise nécessaire à l'exécution de la fouille de la pile P1 de l'ouvrage, aux installations chantier et leur accès par la RD1.

La déviation de la RD1 emprunte une portion des terrains dits « du trapèze » Renault, en limite d'emprise. Les caractéristiques géométriques de la déviation doivent respecter les valeurs maximales et minimales imposées par les normes.

#### Réseaux des concessionnaires sous la RD1

Les travaux de réalisation de l'ouvrage ont des interférences avec les réseaux des concessionnaires existants sous la RD1.

On recense dans l'emprise des travaux les réseaux suivants :

- réseaux de récupération des eaux pluviales de la RD1 et collecteur d'égout principal Sevesc;
- réseaux d'adduction d'eau potable CGE Ø 800, Ø 500, Ø 100 AEP et Ø 100 protection incendie;
- réseaux EDF HT, MT, et BT;
- réseaux fibre optique Neuf Télécom;
- réseaux GDF Ø 110 MPB, Ø 200 Renault, Ø 200 GDF et Ø 100 HP;
- réseaux éclairage public de la RD1;
- réseaux Siter;
- réseaux Renault.

La présence de ces réseaux nécessite l'intervention d'entreprises extérieures qui réalisent les travaux de déviations des réseaux suivants :

| Parties d'ouvrages                    | Classe d'exposition    |
|---------------------------------------|------------------------|
| Superstructures : Pile P1 et culée C0 | XA2, XC4, XD1, XF1 (F) |

| Parties d'ouvrages  | Classe d'exposition    |
|---|------------------------|
| Longrine des dispositifs de retenue, bordures de trottoir | XA2, XC2, XD2, XF4 (F) |

| Parties d'ouvrages  | Classe d'exposition    |
|---------------------|------------------------|
| Culée C3<br>Pile P2 | XA2, XC2, XD2, XF2 (F) |

- réseaux EDF HT, MT et BT;
- réseaux Siter.

La déviation de la RD1 et des réseaux comprend les travaux suivants :

- la reconstitution de la chaussée ou du trottoir, de constitution et de caractéristiques au moins équivalentes à l'existant, pour les tranchées de réseaux réalisées par des entreprises extérieures;
- la dépose de l'éclairage existant sur l'emprise des travaux;
- la fourniture et la pose d'un éclairage provisoire le long de la déviation de la RD1 pour le maintien en exploitation de cet axe;
- la démolition du regard et de la galerie d'accès à l'ovoïde Sevesc situé au droit de la fouille de la pile P1;
- la réalisation d'un nouveau regard et d'une nouvelle galerie d'accès à l'ovoïde SEVESc en dehors de l'emprise des travaux.

### Conditions climatiques et d'environnement

#### Classe d'exposition à l'environnement climatique

Les classes d'exposition à l'environnement climatique auxquelles sont soumises les différentes parties en béton de l'ouvrage sont précisées ci-dessous, conformément à la définition de la norme EN 206-1 :

- bétons enterrés de plus d'un mètre (tableau III);
- bétons totalement immergés (tableau IV);
- bétons partiellement immergés (tableau V);
- bétons sans contact avec le sol, non immergés, même partiellement, et soumis aux eaux de ruissellement de chaussée (tableau VI);
- bétons sans contact avec le sol, non immergés, même partiellement, et non soumis aux eaux de ruissellement de chaussée (tableau VII).

Tableau V

Tableau VI

Tableau VII

Le pont Renault sur le grand bras de la Seine entre Boulogne-Billancourt et l'île Seguin

Figure 2  
Coupe type du tablier  
Typical section of the deck



à l'exception des pièces facilement remplaçables pour lequel le niveau requis est le niveau B : bordures en béton le long de la chaussée.

Description de l'ouvrage terminé

Conception générale

L'ouvrage de franchissement du grand bras de la Seine est un ouvrage à trois travées. Il est appuyé sur une culée inscrite dans le quai haut de l'île Seguin, une pile située en rive droite de la Seine, en bordure du quai Stalingrad, une pile et une culée situées au droit d'un parking de 600 places environ dont les phases de réalisation sont simultanées avec le pont. La structure porteuse est constituée d'un caisson de hauteur variable, à trois travées dissymétriques, supportant la chaussée et la piste cyclable, les trottoirs étant situés en contrebas par rapport à la chaussée. La hauteur du caisson porteur, fine du côté Boulogne, augmente progressivement en allant vers l'appui médian, puis s'affine à nouveau sur le socle de l'île, sur lequel il vient affleurer.

La répartition des travées est la suivante :

- 96,60 m au-dessus de la Seine ;

Niveau de prévention vis-à-vis des risques liés à l'alcali-réaction

Il est fait référence ci-après aux notations et aux dispositions figurant dans le document « Recommandations pour la prévention des désordres dus à l'alcali-réaction » du LCPC de juin 1994, officialisé par la circulaire du Sétra du 24 janvier 1995.

Le niveau de prévention vis-à-vis des risques liés à l'alcali-réaction est le niveau C. Ce niveau de prévention s'applique à toutes les parties principales de l'ouvrage,

Figure 3  
Coupe transversale sur appui P1  
Cross section on support P1

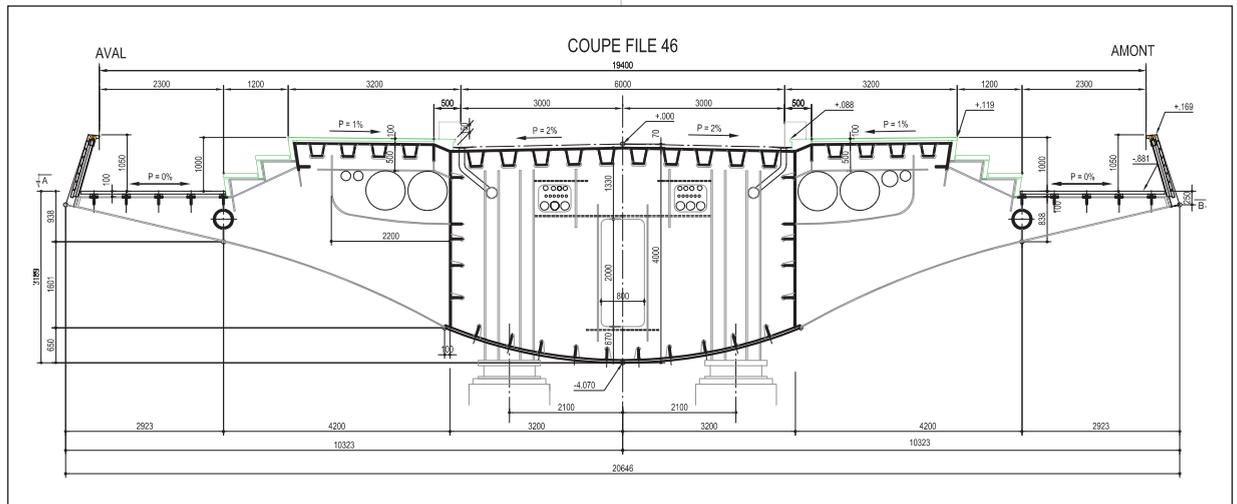
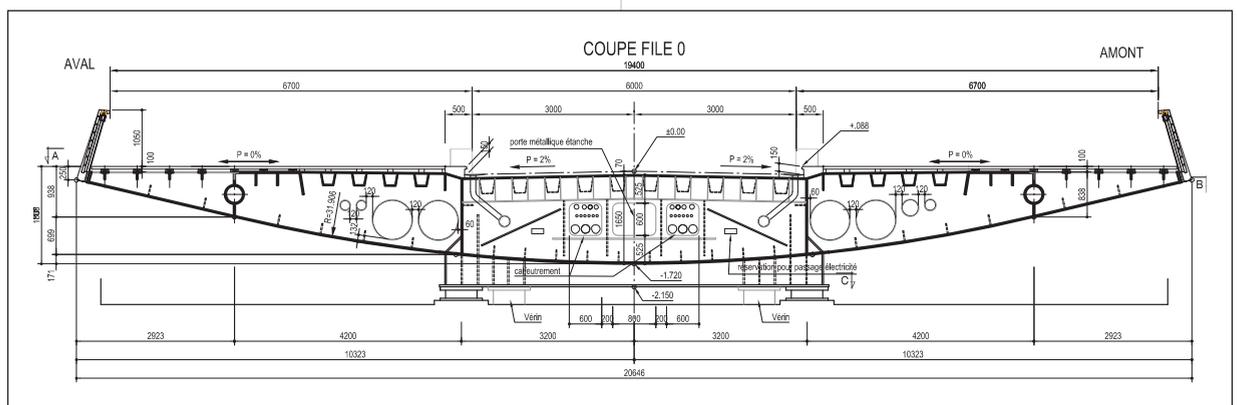


Figure 4  
Coupe sur appui C0  
Section on support C0



- 67,20 m au-dessus du quai Stalingrad;
- 41,80 m pour l'ouvrage de raccordement.

La longueur totale est de 205,60 m (figure 2).

Afin de dégager le gabarit de navigation tout en permettant l'inscription d'une hauteur de section suffisante dans la section d'appui, le profil en long de la chaussée routière est constitué d'une parabole ( $R = 1670,311$  m) dont la tangente horizontale est située sur la file 46 et la pente maximale, en file 0, est de 3,4 %.

Et pour respecter les pentes maximales acceptables par les PMR, le profil en long du trottoir, situé en contrebas de la chaussée, est constitué d'une parabole ( $R = 2860,775$  m) ayant son sommet sur la même file 46 et dont la pente maximale est de 3,40 %.

L'intrados de la travée principale est calé au niveau du gabarit de navigation. Il est constitué de deux droites et d'une parabole  $R = 1202$  m.

Ainsi, la hauteur du tablier varie de 1,65 m à l'appui sur l'île Seguin à 4,00 m sur la file 46. La descente côté Boulogne s'effectue, au niveau de la chaussée, par une parabole ( $R = 787,589$  m) prolongée par une droite à 9,8 %.

Le trottoir bas est :

- prolongé jusqu'à l'ascenseur et un escalier situés au voisinage de la file 64 à l'aval; cet accès se trouve sur le parvis, en vis-à-vis du bâtiment de communication Renault (57 Métal);
- interrompu en amont, au droit du quai Stalingrad, sur lequel il descend par l'intermédiaire d'une passerelle parallèle au quai située entre les files 48 et 49, d'un escalier et d'un ascenseur.

Le trottoir haut, situé de part et d'autre de la chaussée, se prolonge sur la rampe jusqu'au cours de l'île Seguin par laquelle il permet :

- l'accès des cyclistes;
- l'accès direct des piétons;
- le passage de sécurité nécessaire aux usagers de la voie routière.

L'accès des piétons, cyclistes et personnes à mobilité réduite est donc simultanément possible.

Le profil en travers est symétrique sur le fleuve et à l'arrivée sur le parvis de l'île Seguin, afin de donner une largeur plus généreuse aux circulations douces (piétons et cyclistes) sans privilégier l'amont ou l'aval de l'île. Au-delà du quai Stalingrad, le profil en travers dissymétrique permet la liaison avec le 57 Métal et la liaison avec le quartier du pont de Sèvres.

### Tablier

Le calage de l'intrados et de l'extrados résulte d'une analyse méticuleuse des contraintes de profil en long et des gabarits à ménager sous l'ouvrage. La hauteur de la section est variable, la loi de variation étant ainsi compatible avec la variation des sollicitations. De 1,65 m à l'appui sur l'île Seguin (culée C0) elle s'é-

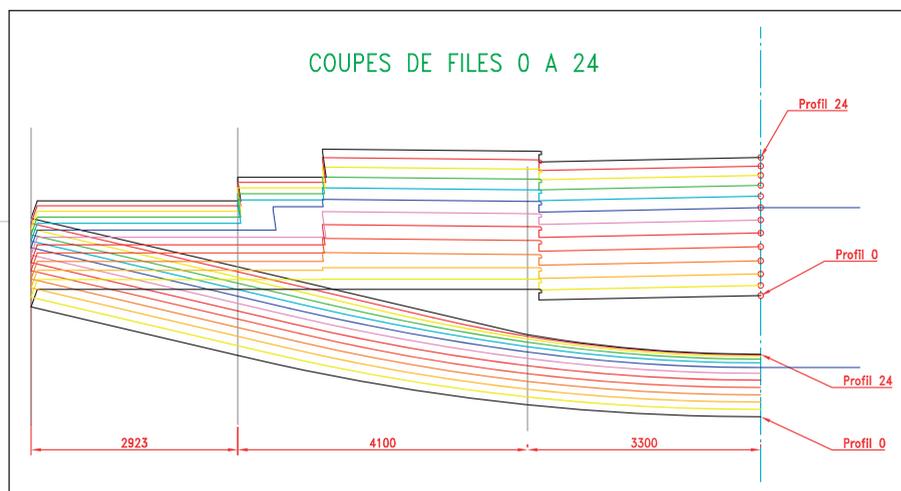


Figure 5

Évolution de la géométrie des sections des files 0 à 24

Change in section shape of rows 0 to 24

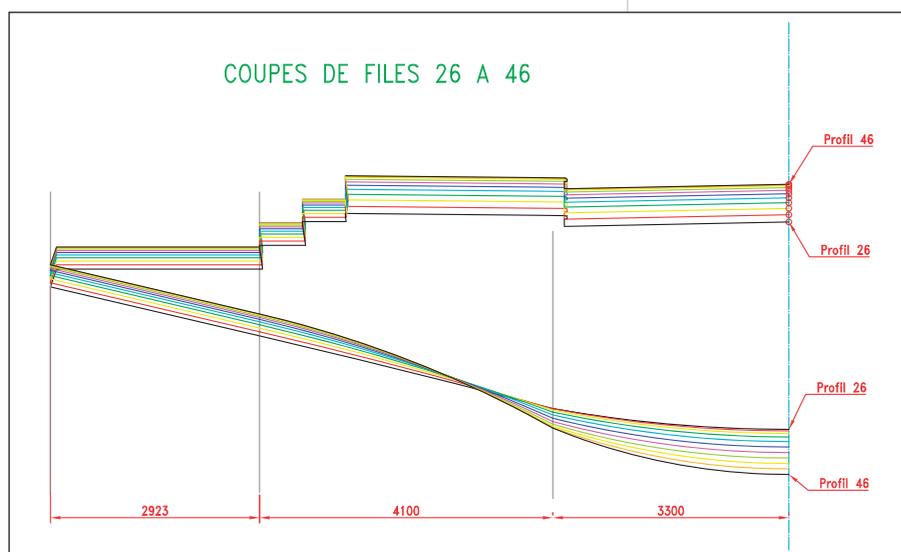


Figure 6

Évolution de la géométrie des sections de 26 à 46

Change in shape of sections 26 to 46

paissait à 4,00 m au niveau de la berge et s'amincit à nouveau à 2,05 m au niveau de l'appui P2 (file 78). Le profil reste ensuite constant jusqu'à la culée C3.

La section transversale est un caisson de largeur constante dont les encorbellements sont variables en fonction des différentes séquences de l'ouvrage.

La largeur entre âmes du caisson est de 6,40 m, la largeur de la table supérieure étant portée à 12,40 m pour recevoir, de part et d'autre, l'ancrage des bordures de béton et des bornes de sécurité et les trottoirs hauts. Les âmes sont verticales et la géométrie de l'intrados est en arc de cercle de rayon variable (figures 3 et 4).

La courbure de la tôle de fond augmente progressivement de l'appui C0 à l'appui P1, puis diminue à nouveau, selon une loi de variation identique, de P1 à P2. Au-delà de P2, la géométrie du caisson porteur est constante jusqu'à la culée C3. Le tracé des sections a donné lieu à un travail géométrique méticuleux inspiré de l'architecture navale (figures 5 et 6).

Le pont Renault sur le grand bras de la Seine entre Boulogne-Billancourt et l'île Seguin

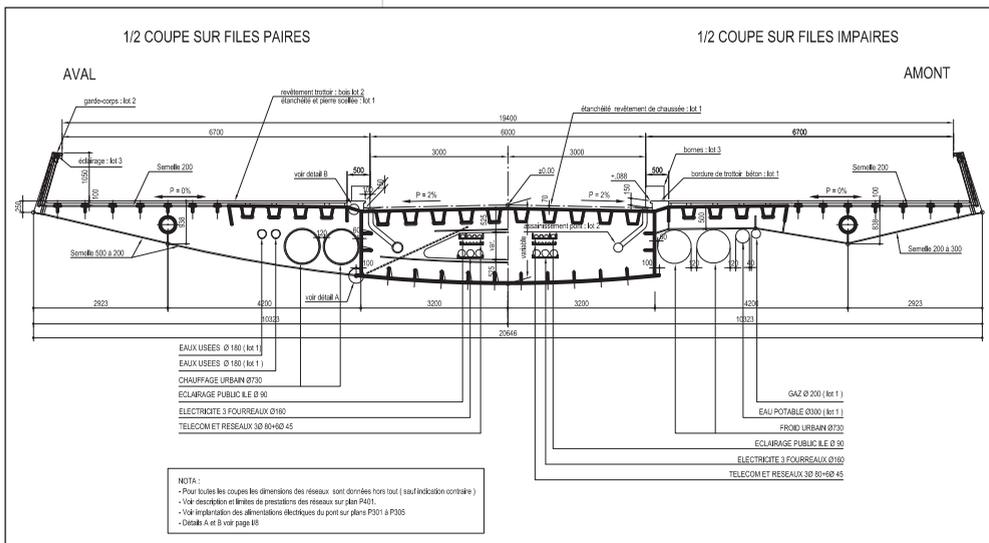


Figure 7  
Coupe type sur la travée 1  
Typical section on span 1

Le raidissage intérieur du caisson est réalisé par :

- des diaphragmes, espacés tous les 4,20 m, constitués de tôles planes raidies de 12 mm d'épaisseur;
- de diagonales, en V inversé, constituées d'UAP 200 assurant la rigidité en torsion;
- de raidisseurs en plats, perpendiculaires à l'intrados, destinés à assurer la stabilité de la tôle de fond. Le choix des plats permet un découpage aisé compte tenu de la géométrie finale de l'intrados : double courbure du profil, contre-flèches;
- de raidisseurs longitudinaux des âmes, en plats ou en augets, destinés à assurer leur stabilité en service ou en construction (figure 7).

Le platelage supérieur est constitué d'une dalle orthotrope. L'épaisseur de la tôle supérieure varie de 14 à 26 mm sous la chaussée et les trottoirs. L'épaisseur des augets est constante et égale à 8 mm sous la chaussée et les trottoirs.

La tôle de fond, dont le rayon varie linéairement avec l'abscisse, est constituée d'une tôle d'épaisseur variable selon les travées de 14 mm à 60 mm.

Les épaisseurs des âmes sont égales à 18 mm en section courante. Les âmes sont plus épaisses à l'arrivée sur la culée C0 où la hauteur de l'ouvrage n'est plus que de 1,65 m (photo 1).

Les diaphragmes sont renforcés au droit des appuis définitifs. Ils sont constitués :

- de caissons aux extrémités C0 et C3 afin de permettre le déplacement de la réaction d'appui par rapport à la section d'extrémité. Ce caisson renforcé permet également de transférer les charges des appuis sous les âmes en C3 où il a été nécessaire de les écarter pour éviter le décollement d'appui sous les sollicitations de torsion;



Photo 1

Vue (retournée) du raidissage interne du tablier  
View (reversed) of deck internal stiffening

- des diaphragmes raidis en P1 et P2. L'opération de vérinage pour changer les appareils d'appui à pot d'élastomère peut être considérée comme exceptionnelle. Un chevêtre en acier, appuyé sur les semelles de fondation de ces appuis, permettra la mise en place des vérins sous les âmes ou sous les diaphragmes. Les appuis de béton sont donc calculés pour recevoir ces charges occasionnelles.

Les encorbellements latéraux sont de deux types :

- toutes les files paires, des poutres primaires en profil reconstitué soudé épousent le contour de l'intrados et de l'extrados de l'ouvrage. Le tracé de ces encorbellements tient compte de la variation de hauteur du caisson, de l'embranchement et du tracé des réseaux;
- toutes les files impaires, une poutraison secondaire appuyée sur une poutre tubulaire située au pied des embranchements et sur l'âme du caisson permet l'appui du platelage bas, des embranchements de bois et des augets sous dalle orthotrope, d'une hauteur réduite à 230 mm, et dont la portée est alors de 2,10 m (photo 2).

Dans la rampe d'accès située entre P2 et C3, l'encorbellement latéral est constitué de profils identiques dont, à raison d'un sur deux, l'un est encastré sur les diaphragmes espacés de 4,20 m et l'autre, simplement appuyé sur la poutre de rive et l'âme des caissons.

La géométrie de l'intrados en travée de rive est donnée par des arceaux non structurels, destinés à supporter la tôle d'habillage qui est démontable, toutes les dispositions étant prises pour que les arceaux ne participent pas à la flexion locale des encorbellements.

Les encorbellements latéraux sont revêtus, en partie

| Appuis      | Mouvements    |              |
|-------------|---------------|--------------|
|             | Longitudinaux | Transversaux |
| C0 – Amont  | libre         | fixe         |
| C0 – Aval   | libre         | libre        |
| P1 – Amont  | fixe          | fixe         |
| P1 – Aval   | libre         | libre        |
| P2 – unique | libre         | fixe         |
| C3 – Amont  | libre         | fixe         |
| C3 – Aval   | libre         | libre        |

Tableau VIII

basse et sur les emmarchements, par un platelage bois. Ce platelage est posé longitudinalement dans l'embranchement et transversalement sur le trottoir bas. Le trottoir haut est revêtu de dalles de calcaire, scellées sur le platelage qui est protégé par une résine, de type Baytec ou similaire. Ce trottoir haut présente une pente de 1 % dirigée vers la chaussée pour permettre l'écoulement des eaux.

La circulation d'une nacelle de type ARC 160/180 est possible depuis le trottoir haut. Aussi, les réseaux situés sous les encorbellements sont accessibles depuis l'extérieur. Ce type de nacelle pourra être utilisé également pour les visites périodiques de l'intrados du tablier.

### Dispositifs d'appui du tablier sur les piles

Le tablier repose sur les piles par l'intermédiaire d'appareils d'appui à pots d'élastomère. Les conditions de déplacement sont imposées par le schéma de dilatation retenu pour l'ouvrage (tableau VIII).

Les dimensions des plaques de glissement sont adaptées aux déplacements du tablier sous l'enveloppe des déplacements obtenus pour chacun des cas de charges.

### Culée C0

#### Description

La culée C0 est une boîte creuse, appuyée sur des fondations profondes. Elle est constituée d'une semelle en U, de poteaux, d'un chevêtre, d'un mur arrière garde-grève et de deux voiles latéraux de forme trapézoïdale. En face avant, elle reçoit un mur de béton préfabriqué réalisé en continuité du mur de quai. Un plancher nervuré couvre l'espace situé entre le talus arrière et le chevêtre. Cette culée est visitable depuis le mur de berges. L'espace entre le tablier et la culée est fermé par une tôle métallique, galvanisée et peinte, appuyée sur des supports en profilés.

À l'intérieur de la culée, sont prévus les passages pour l'ensemble des réseaux et leurs dispositifs de suspen-



Photo 2

Variation des larges encorbellements

Variation of the broad cantilevers

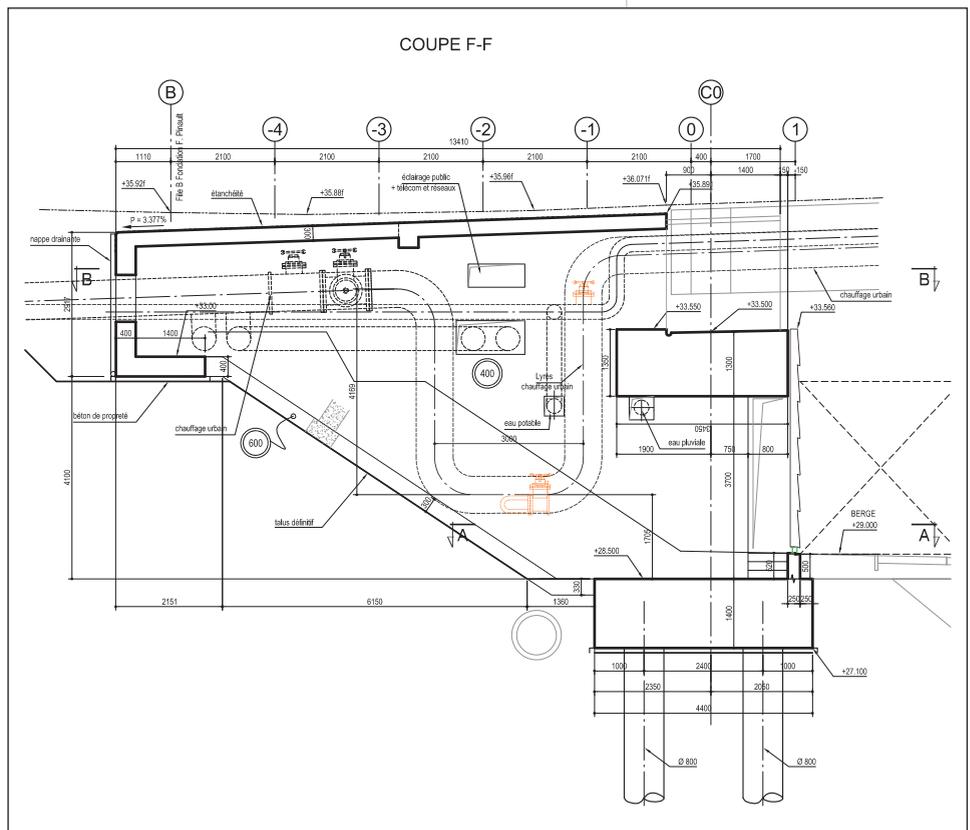


Figure 8

Culée C0

Abutment C0

sion. Le sommier est directement accessible depuis une passerelle métallique, permettant ainsi l'accès au tablier, aux appareils d'appui et aux descentes d'eau. Un escalier en béton armé adossé au talus intérieur, permet l'accès à la berme haute et à la passerelle d'entretien.

Le plancher haut de la culée est recouvert d'une étanchéité. Cette dernière reçoit une protection provisoire, en attendant la mise en œuvre du revêtement définitif du parvis de l'île.

Les fondations sont profondes et ancrées dans la craie saine. Les sondages réalisés à l'emplacement de la culée C0 laissant penser que le toit de la craie saine est rencontré vers la cote 1 m NGF. Les pieux sont ancrés d'au moins un diamètre dans le substratum (figure 8).

Le pont Renault sur le grand bras de la Seine entre Boulogne-Billancourt et l'île Seguin

Photo 3  
La pile P1  
Pier P1



des pieux, de la semelle et des fûts se fait à l'abri d'un batardeau de palplanches ancré dans la craie de transition.

Préalablement à la construction de cette protection, la démolition de l'estacade n° 3, de l'abri antiaérien, des tirants et des massifs d'ancrages situés dans l'emprise du batardeau est nécessaire. Pour effectuer ces travaux, il faut dévier, au préalable, le quai de Stalingrad et les réseaux existants (photo 3).

**Pile P2**

La pile P2 est une simple colonne, munie en tête d'un appareil d'appui à pots d'élastomère. Cet appareil permet le glissement du pont dans le sens longitudinal. Il est fixé dans le sens transversal.

La fondation de cet appui est liée au projet de parking. Les réactions horizontales apportées par le tablier sont reprises par les planchers du parking. Les barrettes de fondation sont réalisées dans le cadre des travaux du parking.

La semelle de fondation est solidaire de la couverture du parking et reçoit, en périphérie, les coupleurs destinés à recevoir les aciers de liaison.

La mise au point de cet appui demande donc que soit connu le projet définitif du parking et du phasage de ses travaux par rapport aux travaux de fondations du pont.

Les vérins nécessaires au relevage du pont prennent appui sur la semelle de fondation, par l'intermédiaire d'un chevêtre en acier. Ceux-ci peuvent être positionnés sous les âmes ou sous le diaphragme d'appui.

**Culée C3**

Cette culée est une boîte rectangulaire creuse appuyée sur des files de barrettes, qui sont réalisées dans le cadre des travaux du parking. Les files de barrettes ont été aménagées pour permettre leur inscription dans une trame de parking. La longueur et le nivellement ont été adaptés pour permettre l'inscription de la partie supérieure dans le projet de parvis.

La culée comprend :

- en face avant, un mur de front, percé par l'entrée du parking;
- de part et d'autre du passage central, deux galeries recevant les différents réseaux humides et permettant :
  - > leur séparation et leur distribution sous la voirie,
  - > la mise en place des lyres de dilatation des tuyaux d'eau surchauffée et d'eau glacée;
- une galerie de visite et d'entretien permettant l'accès au tablier et aux appareils d'appui;
- un passage central par lequel transitent les réseaux secs.

L'ensemble est réalisé en voiles de béton armé. Les ouvrages de serrurerie sont en acier galvanisé.

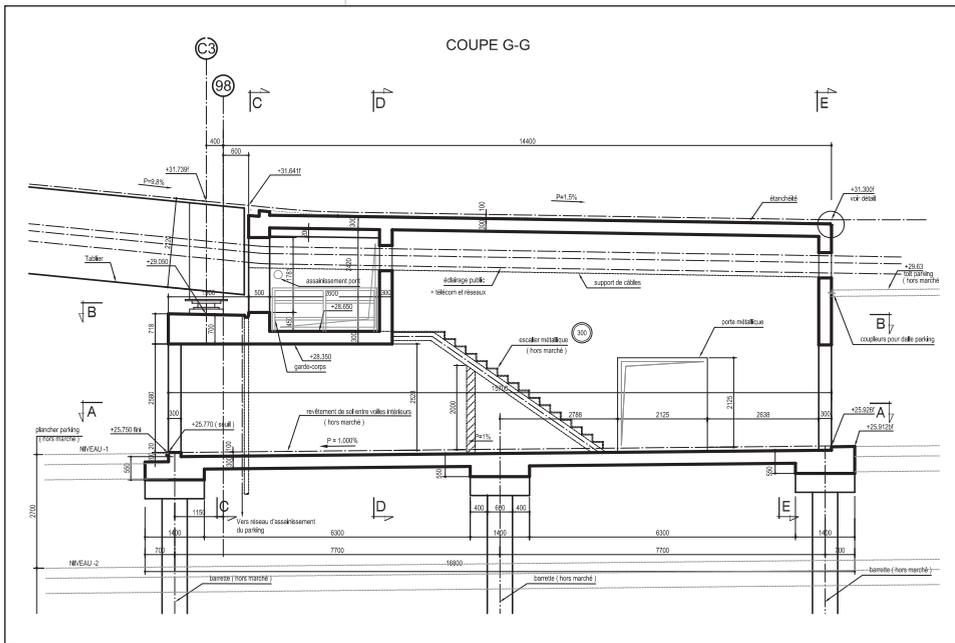


Figure 9  
Culée C3  
Abutment C3

**Pile P1**

Située en rive du quai de Stalingrad, cette pile est constituée de deux fûts trapézoïdaux en béton armé, reposant sur un chevêtre de liaison, puis une semelle de fondation.

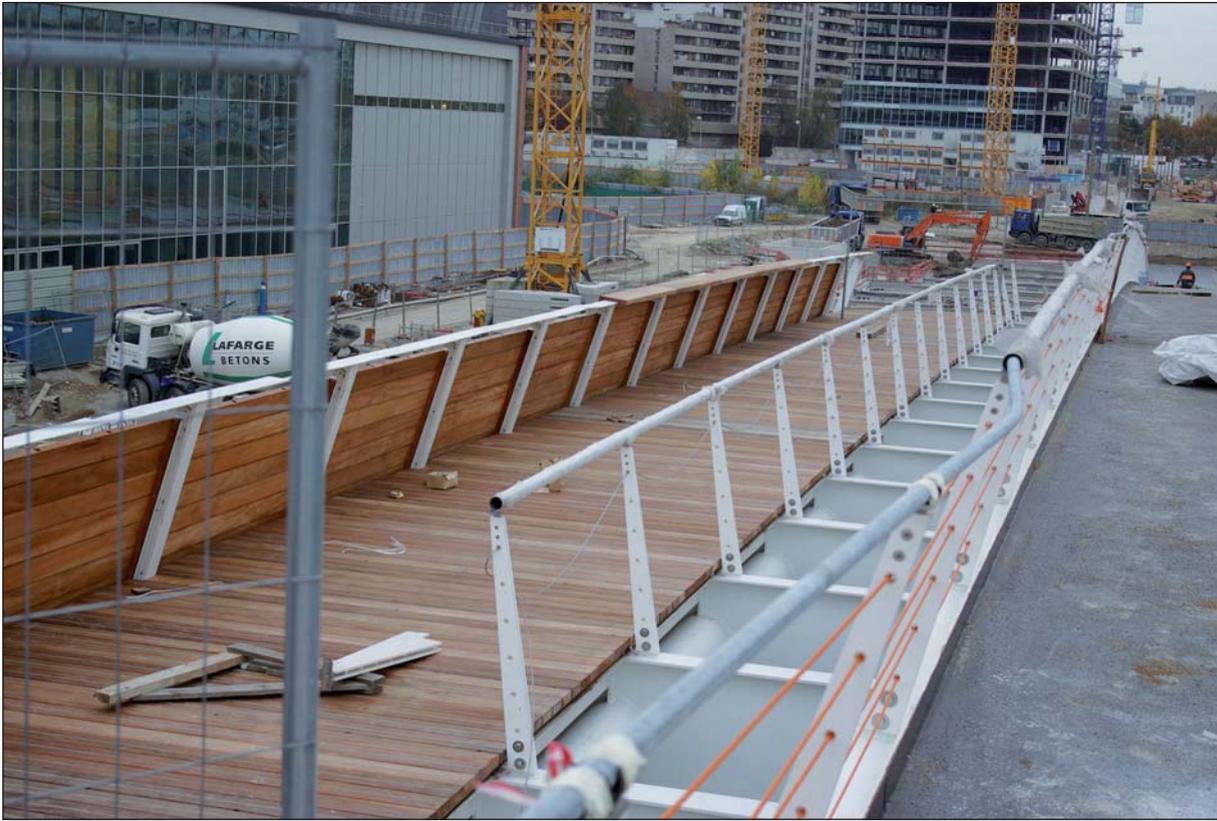
L'appui P1 repose sur quatre pieux forés de gros diamètre, ancrés dans la craie saine.

En rive de la semelle, des murs de soutènement soutiennent les terres sur trois côtés et constituent une engravure dans le quai destinée à mettre en valeur l'appui principal du pont.

Les voiles d'appui reçoivent en tête les appareils d'appui à pots d'élastomère.

Le vérinage du tablier est de préférence réalisé sous les âmes du pont. Les appuis définitifs étant situés dans l'emprise du caisson, ils ne sont pas un obstacle à la mise en place des dispositifs de levage qui sont situés sous les âmes et dont les charpentes provisoires prennent appui sur la semelle de fondation.

Compte tenu de la proximité du fleuve, la réalisation



**Photo 4**  
 Les superstructures en cours de montage  
*The superstructure in course of assembly*

La construction de la culée comprend la fourniture et la mise en place de coupleurs, destinés à permettre le raccordement des structures aux planchers du parking, qui reprennent les efforts horizontaux et l'escalier extérieur. Le couronnement des barrettes est réalisé jusqu'à une reprise de bétonnage verticale, avec aciers longitudinaux en attente des structures du parking. Le remblaiement en arrière de la culée sur la portion de dalle de couverture du parking est exécuté après les travaux d'étanchéité, la pose des réseaux. Les détails d'exécution intègrent les dispositions retenues par les concessionnaires pour assurer la dilatation et le raccordement des réseaux (figure 9).

### Équipements de l'ouvrage d'art

#### Chaussée

Elle est revêtue d'une étanchéité épaisse de 7 centimètres, compatible avec les dalles orthotropes, selon un système agréé par le Sétra. Les granulats sont choisis de façon à obtenir une couleur claire.

#### Trottoirs

Les trottoirs hauts de part et d'autre de la chaussée sont revêtus de dalles de calcaire scellées au mortier sur la tôle de platelage.

Les trottoirs bas et les gradins sont réalisés en bois. Parallèlement aux études de projet et au DCE, le maître d'ouvrage a fait réaliser un prototype de platelage bois. Ce prototype a permis de choisir le tali parmi les essences évoquées précédemment (photo 4) :

#### Bornes

La chaussée est séparée des trottoirs par une bordure en béton, ton pierre, sur laquelle sont fixées des bornes en fonte moulée recevant le balisage longitudinal de la chaussée et des trottoirs hauts. Elles constituent le guidage optique et physique de la chaussée. Ces bornes sont posées au pas de 2,10 m pour éviter le

| Type de réseau            | Diamètre               | Nombre            | Commentaires                                 |
|---------------------------|------------------------|-------------------|--|
| Eau potable               | DN 250                 | 1                 | PN 16 bars                                   |
| Assainissement eaux usées | DN 150                 | 2                 | Refolement PN 10 bars                        |
| Gaz                       | Fourreau Ø 200         | 1                 | Fourreau positionné à l'extérieur du caisson |
| Chauffage urbain          | Ø 400                  | 2                 | Conduites Ø 273 mm calorifugées              |
| Froid urbain              | Ø 560                  | 2                 | Conduites Ø 457 mm calorifugées              |
| Électricité HTA           | Fourreaux Ø 160        | 6                 |  |
| Télécoms et réseaux       | Fourreaux Ø 80 et Ø 45 | 6 Ø 80 et 12 Ø 45 |  |
| Éclairage public de l'île | Fourreau Ø 90          | 2                 |  |

**Tableau IX**

franchissement occasionnel d'un véhicule. Leur résistance et leur ancrage sont déterminés pour un choc de 100 kN appliqué à 0,40 m de la surface de la chaussée.

#### Garde-corps

Le garde-corps latéral est constitué de poteaux d'acier, fixés directement en bout des encorbellements au pas de 2,10 m. La main courante et la face inclinée sont réalisées en bois, dans la même essence que le platelage. En partie haute et sous la main courante, le garde-corps reçoit l'appareil d'éclairage des trottoirs bas.

Le garde-corps des travées de rive, situé de part et d'autre du trottoir haut, est constitué de poteaux en acier entretoisés, d'une main courante en tube d'acier inoxydable et de filières en câbles d'acier inoxydable tendu par des ridoirs.

#### Réseaux sous ouvrage

Le pont sur le grand bras de la Seine assure le passage de réseaux devant à terme alimenter l'île Seguin et dont la nomenclature est reportée sur le tableau IX.

Le pont Renault sur le grand bras de la Seine entre Boulogne-Billancourt et l'île Seguin



Un certain nombre de ces réseaux doit être opérationnel dès la livraison de l'ouvrage. Ils sont donc embarqués au fur et à mesure de la construction des tronçons de tablier, et raccordés dès achèvement des opérations de mise en place du tablier (photo 5).



Photo 5  
Réseaux embarqués sous le tablier  
Networks on the bridge under the deck

Éclairage de l'ouvrage

L'éclairage à mettre en œuvre permet d'assurer les fonctionnalités suivantes :

- le balisage des chaussées circulées et des trottoirs le long de la chaussée;
- l'éclairage des trottoirs en surlargeur;
- l'éclairage des marches;
- l'éclairage de l'accès amont :
  - > la plate-forme d'accès située devant l'ascenseur,
  - > l'escalier,
  - > la passerelle;
- l'éclairage de l'accès aval :
  - > la plate-forme d'accès aval située en extrémité de tablier et d'escalier,
  - > la zone entre les deux ascenseurs;
- l'éclairage sur la pile P1;
- l'éclairage fonctionnel :
  - > éclairage intérieur du pont,
  - > éclairage des culées C0 et C3.

L'éclairage est de couleur blanche. Les critères photométriques concernant les trottoirs et les voies circulées à respecter sont les suivants :

- trottoirs en surlargeur (espaces piétonniers) :
  - > éclairage moyen  $E_{\text{moy}}$  après dépréciation de 10 à 15 lux,
  - > pas de critère d'uniformité;

- trottoirs le long de la chaussée (espaces piétonniers) :
  - > éclairage moyen  $E_{\text{moy}}$  après dépréciation de 10 à 15 lux,
  - > uniformité générale d'éclairage  $U_{\text{oe}} \geq 0,4$ ;
- chaussée (pour une voie) :
  - > luminance moyenne  $L_{\text{moy}}$  après dépréciation de 1,5 à 2  $\text{cd/m}^2$ ,
  - > uniformité générale de luminance  $U_{\text{ol}} \geq 0,2$ ,
  - > uniformité longitudinale de luminance  $U_{\text{L}} \geq 0,6$ ,
  - > éblouissement d'incapacité  $T_i \leq 10$ .

Balisage des voies routières et des trottoirs le long de la chaussée

Ce balisage, permettant d'éclairer à la fois la chaussée et les trottoirs le long de cette chaussée, est rasant et est réalisé par des bornes cylindriques en bordure de trottoir.

L'orientation de l'appareil est définie pour obtenir le meilleur compromis de respect des critères d'éclairage et du contrôle d'éblouissement exposé précédemment.

Chaque borne est composée de trois parties :

- un puits de lumière comprenant un projecteur équipé d'une lampe de type iodures métalliques d'une puissance de 35 W;
- un réflecteur approprié permettant de partager le flux lumineux sur la chaussée et le trottoir (2/3 sur la chaussée et 1/3 sur le trottoir);
- une enveloppe en fonte moulée protégée contre la corrosion.

L'appareillage électrique est inclus dans le projecteur.

Éclairage des trottoirs en surlargeur et des escaliers

L'éclairage des trottoirs inférieurs est réalisé à partir de la main courante du garde-corps extérieur par des couples d'appareils encastrés dans le garde-corps permettant d'obtenir l'impression d'une ligne continue d'éclairage. Le pas d'implantation de ces couples d'appareils est de 2,10 m.

Éclairage des marches

L'éclairage de chaque marche est réalisé à partir d'un appareil encastré dans la marche.

Éclairage des accès amont (escaliers, ascenseur et passerelle)

Les accès font l'objet d'un éclairage de mise en valeur et destiné à assurer la sécurité du public.

Éclairage de la pile P1

L'éclairage de mise en valeur du pont à partir de la pile P1 est réalisé par des appareils encastrés dans le voile béton équipés de lampe de type iodures métalliques de puissance 70 W.

Ces appareils sont encastrés dans le voile béton. Le tablier reçoit un éclairage indirect par une série de cinq appareils orientés vers la surface de l'eau proche de la pile et par une autre série cinq appareils orientés vers un point plus lointain.

Les bases des piles bénéficient de l'éclairage de ces appareils en partie basse.

#### Éclairage fonctionnel

Un éclairage fonctionnel est mis en œuvre :

- à l'intérieur du pont au pas de 4,20 m, permettant une circulation aisée dans le tablier central;
- dans les locaux techniques concernés;
- dans les couloirs des culées.

Cet éclairage est complété par un éclairage ponctuel :

- au droit de chaque porte d'accès;
- au droit du déshumidificateur.

Il est réalisé par des réglettes étanches type fluo d'une puissance de 18 W ou 36 W.

Des blocs autonomes sont également installés. Un réseau de prises de courant est mis en œuvre pour permettre un complément d'éclairage et assurer l'alimentation d'outils de faibles puissances.

#### Dispositifs d'accès, de visite et d'entretien

L'accès à l'intérieur de l'ouvrage se fait :

- au niveau de C0, par une porte aménagée dans le mur de quai, puis par un cheminement jusqu'au pied de talus, un escalier béton adossé au talus intérieur de la culée creuse, une galerie et une porte aménagée dans l'entretoise d'appui.

La galerie est pourvue d'un garde-corps et permet l'accès aux appareils d'appui et aux emplacements des vérins;

- au niveau de la culée C3, par un cheminement depuis le parking, un escalier métallique et une galerie fermée par une porte donnant accès au pont et aux appareils d'appui;
- entre la pile P1 et la pile P2, au voisinage du profil 71 et entre la pile P2 et la culée C3, au voisinage du profil 81, deux trappes de visite permettent l'accès

direct au tablier. L'accès à l'intrados est prévu par des nacelles à bras déporté circulant sur les trottoirs hauts. À titre conservatoire, deux percements Ø 20 mm permettant de fixer des suspentes sont prévus tous les 4,20 m, en partie intérieure des encorbellements latéraux, à 0,20 m des âmes. La charge utile est de 2 x 5 t par point de fixation;

- en sous-face des travées 2 et 3, selon plans, par des ouvertures étanches et verrouillées, en intrados de l'ouvrage, pour permettre l'amenée des matériels et des équipements directement depuis le parvis.

#### Surveillance, repères topométriques

Des repères de nivellement sont prévus :

- au niveau de chaque appui, au moyen de cibles, collées sur les assises en béton : culée C0 (deux unités), pile P1 (une cible sur chaque fût), pile P2, culée C3 (deux unités);
- au niveau du tablier, de part et d'autre de l'ouvrage, sur chaque axe d'appui (files 0, 46, 78 et 98) et au point de déformation maximal de chaque travée sous charge d'exploitation.

#### Mode de construction de l'ouvrage

##### Construction des piles

Les travaux de construction de ce nouveau pont sur la Seine comprennent la démolition de l'estacade, de l'abri antiaérien des usines Renault et ses tirants d'ancrage, et du perré préalablement à la réalisation du batardeau. La pile P1 est réalisée à l'abri d'un batardeau en palplanches métalliques, ancré dans la craie, qui en constitue le fond relativement étanche. Il est arasé à la crue conventionnelle de chantier. La paroi située contre le quai est munie de tirants d'ancrage, destinés à équilibrer la poussée due aux terres.

En fin de travaux, ce batardeau est arasé au niveau de la face supérieure de la semelle, afin de ne pas constituer une gêne à la navigation, et en arrière des murs de soutènement solidaires de la pile.

La semelle de la pile P1 reçoit les dispositifs provisoires d'appui des charpentes métalliques en cours de montage ainsi que les supports destinés au vérinage ultérieur du tablier.

La pile P2 est construite selon des procédés traditionnels. La semelle de fondation prend appui sur des barrettes, réalisées préalablement dans le cadre des travaux du parking. Elle est munie de coupleurs sur les faces verticales, pour permettre l'ancrage ultérieur des planchers du parking. Les étanchéités sur dalle sont à la charge du parking.

##### Construction des culées

La culée C0 est construite depuis la berge. Les terrassements généraux sont réalisés dans le cadre des travaux

#### COÛT DE L'OUVRAGE

##### Décomposition par lot

- Lot 1 - Génie civil : 4 400 000 euros
- Lot 2 - Charpente métallique, garde-corps métallique et platelage bois : 7 640 000 euros
- Lot 3 - Éclairage, distribution électrique et ascenseur y compris option bornes : 1 000 000 euros

##### Total

13 040 000 euros HT (avril 2005)

### Le pont Renault sur le grand bras de la Seine entre Boulogne-Billancourt et l'île Seguin

Photo 6

Transport sur barge des travées 2 et 3 (avril 2007)

*Barge transport of spans 2 and 3 (April 2007)*



Photo 7

Pose du tronçon sur la Seine (juin 2007)

*Placing the section on the Seine (June 2007)*



des berges. L'accès à la berge basse est réalisé par une rampe, située en amont de la culée.

La culée C3 est réalisée en fouille ouverte. Les fondations profondes, en barrettes, sont réalisées préalablement dans le cadre des travaux du parking. L'étanchéité de la fouille est assurée par la paroi moulée du parking, également réalisée au préalable. Après achèvement du génie civil, les parements de béton sont protégés, et la culée est remblayée jusqu'au niveau du chevêtre. Le compactage des remblais doit permettre l'assise des palées provisoires nécessaires pour le montage du tablier. Le niveau de terrassement (30,50 NGF) est choisi de façon à recouvrir les attentes des profondés en béton armé, également réalisés au préalable.

#### **Construction du tablier**

Les concepteurs ont étudié deux méthodes de mise en œuvre :

- la première consiste à pousser le tablier complet depuis une plate-forme réalisée en rive droite, au nord de la RD1 ;
- la seconde méthode consistait à poser à la grue, sur palées provisoires, les tronçons situés entre la Seine et la culée C3, puis à acheminer, par des barges de forte capacité, la travée principale, munie ou non de ses encorbellements, et de ses réseaux.

Plusieurs constructeurs ont retenu, lors de l'appel d'offres, l'approvisionnement de la totalité du tablier par la Seine.

Cependant le groupement Bouygues, VBSC, ETDE a proposé une méthode originale consistant à livrer le tablier en trois colis par la Seine au moyen de barges de forte capacité puis à transférer les trois travées à l'aide de plates-formes élévatrices ou Kamags, circulant sur les berges. Les colis ont été chargés le 8 avril 2007 sur deux barges. Celles-ci ont remonté les canaux belges jusqu'à la mer du Nord. Puis, à partir du 10 avril, elles ont longé les côtes belges puis françaises jusqu'au Havre. Elles ont enfin embouqué la Seine le 15 avril 2007. Les opérations de montage ont eu lieu du 29 avril au 1<sup>er</sup> mai 2007 pour les deux premiers tronçons à terre, puis répétées le 23 juin 2007 pour la travée sur la Seine (photos 6 et 7).

#### **Libération des appuis provisoires**

En fin de montage, les appuis provisoires sont retirés, et le tablier est déposé sur ses appuis définitifs. Cette opération est réalisée après mise en place de la travée P2-C3.

#### **Contraintes de franchissement de la Seine**

La mise en œuvre de tronçon de tablier par transport fluvial a nécessité l'obtention par l'entreprise de toutes les autorisations nécessaires auprès des services concernés : Service de la navigation de la Seine et Port Autonome de Paris.

#### **Contraintes de franchissement des routes**

Les phases de mise en œuvre du tablier ont reçu l'accord des Services techniques de la Ville de Boulogne-Billancourt et des Services techniques du Conseil général des Hauts-de-Seine et des Services de la DDE des Hauts-de-Seine.

#### **Calendrier d'exécution**

La durée totale du chantier est de 25 mois, y compris marge pour aléas, intempéries normalement prévisibles et opérations de réception, hors pose de l'accès aval sur la dalle du parking souterrain.

Le calendrier des travaux suppose une parfaite coordination avec les travaux du parc de stationnement.

Après achèvement du tablier métallique, de ses superstructures et des raccordements de réseaux, les travaux du parking peuvent être repris. Ils sont entrepris de préférence en sous-œuvre, toute précaution devant être prise pour assurer la protection du tablier et la sécurité des usagers qui empruntent ultérieurement le pont.

Cependant, la réalisation des terrassements sous le

pont, l'approvisionnement du béton à la pompe et la stabilisation des parois par des bandes de planchers butonnés sont des opérations extrêmement délicates à réaliser autour de l'ouvrage en service, en termes de phasage et de sécurité.

## Calculs justificatifs

### Les calculs généraux

Ces calculs ont été conduits avec le logiciel Pythagore® de Setec TPI. Compte tenu de la grande largeur ouverte au public et de l'étroitesse de la chaussée, les calculs en service prennent en compte l'enveloppe des charges cumulées des charges piétonnes et routières réglementaires, et des charges pour passerelles :

- charge générale de piéton sur les trottoirs : Pi1.  
Charge de 150 kg/m<sup>2</sup> de l'article 13-1 du fascicule 61 - Titre II, concomitante avec les charges routières (enveloppe des charges A, Bc et Bt), et affectée aux éléments des lignes médianes des trottoirs hauts, gradins, et trottoirs bas;
- charge générale de passerelle piétons : Pi2.  
Il s'agit de la charge piétonne a(1) définie à l'article 13-2 du fascicule 61 - Titre II appliquée en toute section à la largeur totale du tablier.

La charge est affectée aux éléments de la ligne médiane chaussée, avec les excentricités convenables, ainsi qu'aux lignes de chargement des trottoirs (figures 10 et 11).

Les épaisseurs mises en œuvre à l'avant-projet sont satisfaisantes en service et les contraintes longitudinales extrêmes obtenues à l'ELU sont de l'ordre de 250 MPa dans les zones comprimées et de 280 MPa dans les zones tendues.

### Stabilité des tôles aux états limites ultimes

Une vérification au voilement des tôles comprimées raidies conformément à l'Eurocode 3 partie 1-5 « Règles supplémentaires pour les plaques planes, raidies ou non, chargées dans leur plan » XP ENV 1993-1-5 de décembre 2000, a été effectuée.

Aux états limites ultimes, la vérification de la résistance d'une section transversale doit prendre en compte les effets suivants :

- les contraintes longitudinales  $\sigma_{x,Ed}$  en tenant compte du traînage de cisaillement et du voilement de la plaque;
- les contraintes transversales  $\sigma_{z,Ed}$  en tenant compte de leur répartition et du voilement de la plaque;
- les contraintes de cisaillement  $\tau_{Ed}$  en tenant compte du voilement de la plaque;
- les effets combinés des contraintes longitudinales, transversales, et de cisaillement agissant dans la même section transversale le cas échéant.

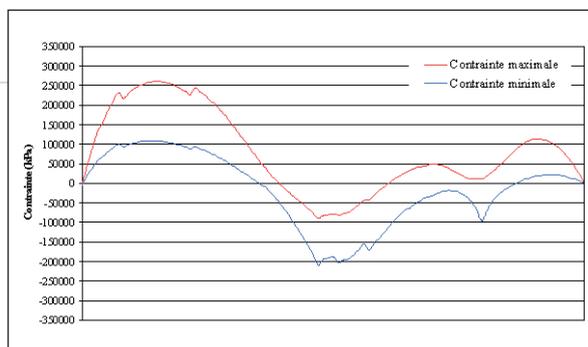


Figure 10

Contraintes normales en fibre supérieure à l'ELU

Normal stresses on the topside at ULS

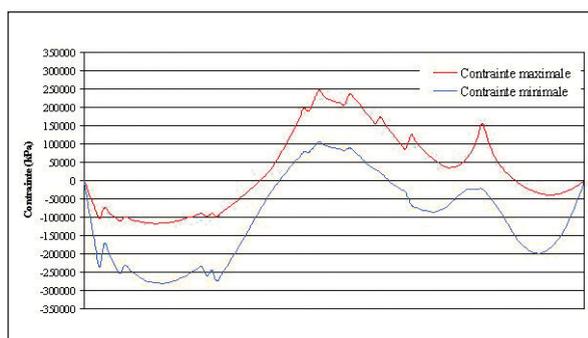


Figure 11

Contraintes normales en fibre inférieure à l'ELU

Normal stresses on the underside at ULS

Cette vérification est effectuée de la manière suivante :

$$\eta_1 = \frac{\sigma_{x,Ed}}{f_{yd}} \leq 1,0$$

$$\eta_2 = \frac{\sigma_{z,Ed}}{f_{ywd}} \leq 1,0$$

$$\eta_3 = \frac{\tau_{Ed}}{\chi_v f_{ywd}} \leq 1,0$$

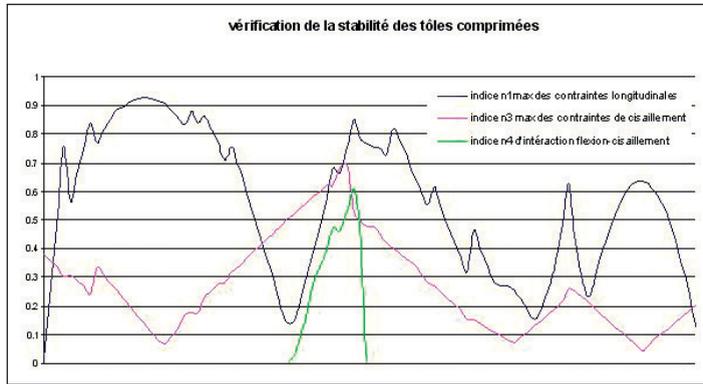
$$\eta_4 = \eta_1 + \left[ 1 - \frac{M_{f,Rd}}{M_{pl,Rd}} \right] [2\eta_3 - 1]^2 \leq 1,0$$

où  $f_{yd}$  est la limite d'élasticité de calcul  $f_y / \gamma_{M1}$  ou  $\gamma_{M0}$  selon l'ENV 1993-1-1 : 1992 avec  $\gamma_{M0} = 1,0$  car les produits en acier utilisés portent la marque NF et  $\gamma_{M1} = 1,1$  pour des sections de classe 4 – les indices supplémentaires  $f$  et  $w$  faisant respectivement référence à la semelle et à l'âme –  $\chi_v$  est la fonction de résistance au cisaillement,  $M_{f,Rd}$  le moment résistant plastique de calcul d'une section transversale composée uniquement des semelles, et  $M_{pl,Rd}$  la résistance plastique de la section transversale (indépendamment de la classe de section transversale). Les quatre coefficients sont calculés directement par le programme Pythagore® (figure 12).

Parallèlement, une vérification classique à l'aide des abaques de Klöppel a été conduite.

Le pont Renault sur le grand bras de la Seine entre Boulogne-Billancourt et l'île Seguin

Figure 12  
Coefficients  
n1, n3, n4  
Coefficients  
n1, n3, n4



Tableaux X à XIII

|                     | Ouvrage à vide | Ouvrage chargé à 70 kg/m <sup>2</sup> |
|---------------------|----------------|---------------------------------------|
| f <sub>1</sub> (Hz) | 0.75           | 0.730                                 |
| M <sub>1</sub> (t)  | 898            | 968                                   |

|                     | Ouvrage à vide | Ouvrage chargé à 70 kg/m <sup>2</sup> |
|---------------------|----------------|---------------------------------------|
| f <sub>2</sub> (Hz) | 1.687          | 1.630                                 |
| M <sub>2</sub> (t)  | 451            | 483                                   |

|                     | Ouvrage à vide | Ouvrage chargé à 70 kg/m <sup>2</sup> |
|---------------------|----------------|---------------------------------------|
| f <sub>3</sub> (Hz) | 2.003          | 1.932                                 |
| M <sub>3</sub> (t)  | 939            | 1003                                  |

|                     | Ouvrage à vide | Ouvrage chargé à 70 kg/m <sup>2</sup> |
|---------------------|----------------|---------------------------------------|
| f <sub>4</sub> (Hz) | 2.540          | 2.449                                 |
| M <sub>4</sub> (t)  | 420            | 460                                   |

**Comportement dynamique**

Les vérifications du comportement dynamique du pont au passage des piétons ont été conduites conformément aux recommandations du guide pour la prise en compte du comportement vibratoire des passerelles rédigé par l'AFGC et le Sétra. Cette étude confirme l'existence de deux modes propres critiques pour les travées 2 et 3.

Les quatre premiers modes propres globaux (de fréquence propre f<sub>i</sub>, et de masse généralisée M<sub>i</sub>), sont les suivants :

- mode global 1 : flexion longitudinale de la travée 1 (tableau X);
- mode global 2 : flexion longitudinale des travées 2 et 3 (tableau XI);
- mode global 3 : flexion horizontale et torsion de la travée 1 (tableau XII);
- mode global 4 : flexion longitudinale de la travée 3 (tableau XIII).

L'expérience acquise récemment sur divers ouvrages réservés aux piétons invite les concepteurs à une grande

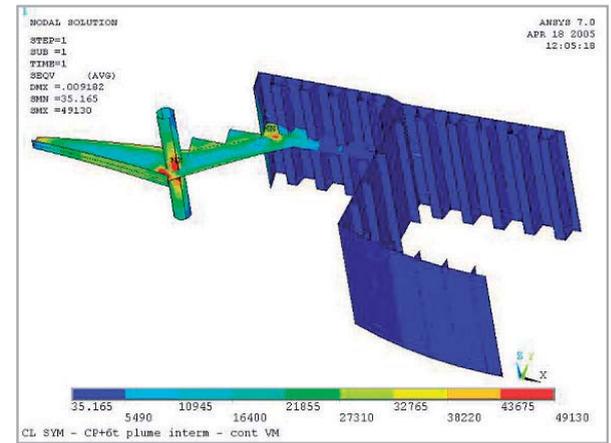


Figure 13

Contraintes de Von Mises dans un encorbellement secondaire (roue de 6 t)

Von Mises stresses in a secondary cantilever (6-tonne wheel)

vigilance vis-à-vis des phénomènes dynamiques. Les cas plus récents mettent en particulier en évidence les risques d'inconfort liés aux déplacements transversaux et les phénomènes de synchronisation de la marche des piétons qu'ils peuvent engendrer.

**Vibrations verticales de la structure**

Les calculs dynamiques effectués conduisent, pour les modes propres critiques 2 et 4 de vibration de la structure, à des accélérations verticales respectives de 1,4 m/s<sup>2</sup> et 1,17 m/s<sup>2</sup>. Ces valeurs appartiennent à la plage de confort minimum [1 m/s<sup>2</sup>; 2,5 m/s<sup>2</sup>] et seront donc ressenties par les usagers.

Pour maîtriser le comportement de la structure sur les travées de rive 2 et 3, on pourra utiliser des amortisseurs à masse oscillante accordée. Une masse de l'ordre de 3 % de la masse généralisée de chaque mode considéré, placée au ventre de la déformée modale considérée, est active sur une gamme de fréquences suffisamment large pour être efficace que l'ouvrage soit chargé ou non. La décision de mettre en place ces amortisseurs sera prise à l'issue des essais dynamiques réalisés lors des épreuves de chargement.

**Vibrations horizontales de la structure**

Le calcul dynamique effectué pour le mode propre 3 de la structure (flexion horizontale de la travée 1) conduit à une accélération horizontale maximale très faible, appartenant à la plage de confort maximum.

**Les calculs de détails**

**Calcul des encorbellements**

Le modèle étudié, pour la zone de grande hauteur, comporte deux plumes primaires et une plume secondaire attachées sur un demi-caisson. Le calcul spatial a



**Photo 8**  
Les encorbellements  
Cantilevering

confirmé le bon comportement des plumes sous l'effet de la charge concentrée de 6 tonnes et de la charge piétonne répartie, aussi bien en statique qu'en dynamique (figure 13).

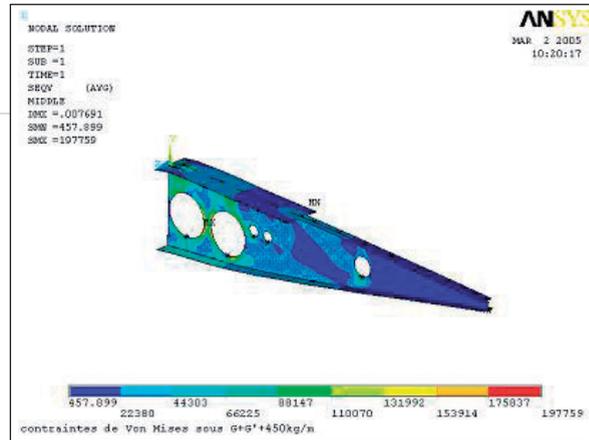
Le modèle étudié, pour la zone de faible hauteur, comporte uniquement une console primaire percée au passage des réseaux. Le calcul spatial a confirmé le bon comportement de la console sous l'effet des charges statiques et en dynamique. Les déformations de l'encorbellement sous charge d'exploitation restent très faibles (4 mm). La contrainte équivalente de Von Mises est maximale entre les deux évidements pour le passage des réseaux de chaud et froid urbains, ou elle atteint 277 MPa. Toutefois cette disposition a été modifiée par l'entreprise lors de l'exécution pour réaliser un percement unique (figure 14).

#### Vérification de la stabilité du fond de caisson à double courbure

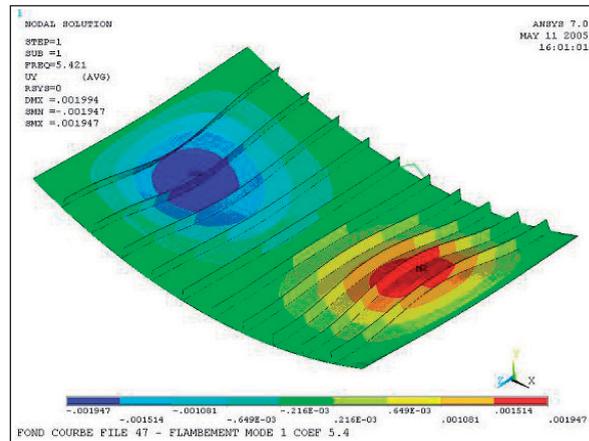
La stabilité des tôles courbes a été étudiée à partir de la recherche des modes de flambement des raidisseurs de la tôle de fond.

Le calcul proposé permet de justifier la résistance (poussée au vide) et la stabilité du fond courbe :

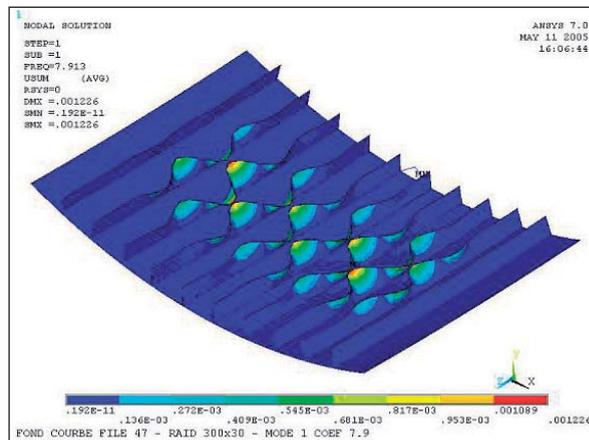
- modélisation du fond doublement courbe (sphérique) entre deux diaphragmes;
- dix raidisseurs longitudinaux;
- conditions d'appui aux bords :
  - > sur la section transversale (diaphragme) : poutre indéformable,
  - > sur le profil en long (âme) : appuis simples orientés suivant la courbure;
- effort de compression appliqué suivant la courbure qui correspond à une contrainte uniforme de 250 MPa (valeurs ELU), valeur maximale calculée issue du modèle général (figures 15 et 16).



**Figure 14**  
Contrainte de Von Mises dans les encorbellements de faible hauteur  
Von Mises stresses in low-height cantilevers



**Figure 15**  
Stabilité de la tôle de fond  
Stability of the back plate



**Figure 16**  
Mode de flambement des raidisseurs des tôles courbes  
Buckling mode of curved plate stiffeners

**Photo 9**  
Vue d'ensemble  
Overview



### Le pont Renault sur le grand bras de la Seine entre Boulogne-Billancourt et l'île Seguin

L'étude est conduite simultanément sur la tôle de fond et les raidisseurs. La poussée au vide engendré par la courbure du profil en long a montré la nécessité de renforcer le raidissage dans la zone d'appui. La stabilité du fond de caisson, très comprimé, est assurée.

#### Le marché de travaux

Le marché est décomposé en trois lots techniques :

- lot 1 : génie civil et mandataire du groupement;
- lot 2 : charpente métallique, garde-corps métalliques et platelage bois;
- lot 3 : éclairage, distribution électrique et ascenseur.

L'ensemble des trois lots donne lieu à un marché unique, passé à un groupement d'entrepreneurs groupés conjoints. La commission d'appel d'offres a choisi l'offre économiquement la plus avantageuse conformément aux critères d'attribution suivants :

- valeur technique de l'offre;
- moyens mis en œuvre par l'entreprise pour la réalisation du chantier;
- prix des prestations.

Les candidats pouvaient présenter une offre comportant des variantes par rapport aux spécifications des cahiers des charges qui ne sont pas désignées ci-après comme des exigences minimales à respecter et/ou des spécifications qualifiées d'intangibles :

- données fonctionnelles;
- contraintes architecturales et aspect de l'ouvrage;
- espacement et position des raidisseurs transversaux du caisson;
- platelage orthotrope sous la chaussée et superstructures du tablier.

La consultation des entreprises a été lancée le 28 février 2005. La date de remise des offres était fixée au 25 avril 2005.

À l'issue de cette consultation le marché de travaux a été passé au groupement Bouygues, Victor Buyck Steel Construction et ETDE. L'ordre de service de commencer les travaux a été donné le 9 mars 2006. L'achèvement des travaux du pont est prévu en janvier 2008. L'accès aval et l'ascenseur seront, quant à eux, livrés fin 2008, après achèvement du parking souterrain situé en rive droite de la Seine. ■

Crédit photographique :  
Franck Terlin pour Setec TPI et Jean-Bernard Datry.

#### ABSTRACT

#### *Renault Bridge on the large arm of the Seine between Boulogne-Billancourt and Seguin Island*

J.-B. Datry, S. Ezran

*Renault Bridge crosses the large arm of the Seine in Boulogne-Billancourt.*

*It links Seguin Island to the town, and thus contributes to reclamation of the industrial waste land left by the Renault factories. The architectural design of the structure makes extensive provision for pedestrian paths, and the staggered levels of the pavement and footpaths will allow walkers to have an exceptional view of the Seine and the adjacent river banks. Serving as both a vehicle bridge, a foot bridge and an industrial bridge, it carries a large number of networks and thus becomes the veritable umbilical cord of the island. Of complex shape while at the same time technically obvious, the deck, executed in a steel structure, was transported from the workshops of the manufacturer in Belgium, then moved into position, from the Seine, by high-capacity lifting platforms and barges.*

#### RESUMEN ESPAÑOL

#### *El puente Renault sobre el grande brazo del río Sena entre Boulogne-Billancourt y la isla Seguin*

J.-B. Datry y S. Ezran

*El puente Renault salva el gran brazo del Sena en Boulogne-Billancourt.*

*Este puente pone en comunicación la isla Seguin con la ciudad, y participa así a la reconquista de los solares industriales abandonados por las plantas Renault. El establecimiento del concepto arquitectónico de la obra permite dejar un amplio paso para los peatones, y los distintos niveles de la calzada y de las aceras permitirán a los paseantes tener una percepción inhabitual del Sena y de los márgenes circundantes.*

*Simultáneamente puente, pasarela y puente industrial, permite el transporte de numerosas redes y pasa así a ser el verdadero cordón umbilical de la isla. Presentando una geometría compleja pero permaneciendo de una evidencia técnica, el tablero, ejecutado en armazón metálico, fue transportado desde los talleres del constructor, en Bélgica, e instalado, desde el Sena, por medio de plataformas elevadoras y de gabarras de elevada capacidad.*

# La selle multitube pour structures câblées : une technologie multi-avantage

Grâce aux propriétés mécaniques de la protection contre la corrosion du toron Cohestrand, Freyssinet a mis au point en parallèle, une selle de déviation à hautes performances, appelée selle multitube, permettant de garantir une qualité identique entre la partie libre du câble et cette zone de déviation au droit de la selle notamment sans discontinuité de la protection contre la corrosion contrairement aux solutions traditionnelles.

Cette selle multitube est composée d'un faisceau de tubes de déviation individuels assurant le passage de chaque Cohestrand constituant le câble. Ces tubes individuels sont logés à l'intérieur d'un tube général en acier de grand diamètre et l'espace entre les tubes individuels est rempli en usine d'un coulis de ciment spécial à haute résistance (résistance en compression à 28 jours > 130 MPa).

Les applications possibles : passages en selles de haubans dans les pylônes, les passages en selles de câbles porteurs de ponts suspendus, les déviations de câbles en précontrainte extérieure, et les passages en selles de câbles de ponts extradossés.

Développées à partir d'une idée simple : rendre les câbles continus dans la traversée des pylônes afin de simplifier leur conception et de réduire leurs dimensions, les selles de haubans ont trouvé dès 1977 une illustration de leur intérêt architectural dans les lignes élancées du pont de Brotonne. Les premiers systèmes mis en œuvre, dérivés de la précontrainte, ne donnaient pourtant pas entière satisfaction, car l'injection au coulis de ciment des câbles dénudés au niveau de la selle interdisait un éventuel remplacement individuel des torons et ne suffisait pas à garantir ceux-ci durablement contre la corrosion. D'autres problèmes, plus structurels se posaient du fait de la courbure imposée au hauban au passage de la selle et parce que les câbles ne sont pas conçus pour transférer des charges dans leur partie courante.

Afin de pallier ces inconvénients et de répondre au cahier des charges du pont de Sungai Muar (Malaisie, cf. infra), qui exigeait de meilleures performances en terme de longévité, Freyssinet a mis au point la selle multitube de haubans au début des années 2000. « Cette solution a pu voir le jour grâce au développement préalable du "toron cohérent", ou Cohestrand, un toron dont la gaine de polyéthylène totalement adhérente aux fils



Photo 1

Selles multitubes du pont de Sungai Muar en Malaisie  
*Multitube saddles of Sungai Muar Bridge in Malaysia*



Photo 2

Vue générale du pont de Sungai Muar, Malaisie  
*General view of Sungai Muar Bridge, Malaysia*

d'acier permet la transmission des efforts différentiels par frottement à l'interface PEHD-tube, explique Erik Mellier, le directeur technique de Freyssinet » (photos 1 et 2).

Sa seconde caractéristique, qui découle de la précédente, est l'utilisation de tubes métalliques non injectés au contact avec les torons, accueillant individuellement les torons. Ces « multitubes » intégrés à une structure en béton fibré haute performance permettent de reprendre les efforts de compression radiaux transmis par chaque toron, mais ceux-ci restent libres dans leur tube avant tension, et leur remplacement individuel devient possible.

Récompensée par la médaille de bronze du Prix de l'innovation Egis en 2003, la selle multitube a vu depuis



**Erik Mellier**  
Directeur technique  
Freyssinet



**Guy Sevoz**  
Ingénieur structures  
câblées  
Freyssinet



**Ivica Zivanovic**  
Directeur technique  
adjoint  
Freyssinet

La selle multitube pour structures câblées : une technologie multi-avantage

Figure 1  
Écorché de la selle multitube  
Phantom view  
of the multitube saddle



Photo 3  
Vue générale du pont extradossé de Shindae en Corée du Sud  
General view of Shindae curved bridge in South Korea

ses applications se développer (figure 1). En 2006, elle a été mise en œuvre au Vietnam (pont Nga Tu So – huit selles), et en 2007 à quatre reprises : au Soudan (pont El Mek Nimir – 12 selles), en Corée du Sud (pont Shindae – 16 selles; pont Po Nam – six selles) et en Lettonie à Riga (cf. infra).

Sur le plan architectural cette technique se révèle bien adaptée aux ouvrages de dimensions moyennes, « car elle permet de concevoir des ouvrages dont les pylônes restent à l'échelle du pont », souligne Erik Mellier. Cette spécificité ouvre également des perspectives pour les grands ouvrages à une époque où l'on cherche plus que jamais à intégrer les ouvrages dans leur environnement. Mais le grand avantage de la technique sur les

systèmes concurrents, toujours basés sur les injections au coulis de ciment, dans un contexte où la longévité revient au goût du jour, c'est qu'elle permet d'offrir les mêmes qualités de durabilité et de tenue à la fatigue et aux intempéries que les haubans des grands ouvrages.

■ La première application : le pont de Sungai Muar

Situé dans le sud de la péninsule malaise, le pont de Sungai Muar, conçu par Jean Muller International, est un ouvrage à la fois terrestre et fluvial. Large de 21,4 m et long de 632 m, avec une travée centrale de 132 m et deux travées de rive de 66 m appuyées sur des piles intermédiaires pour la traversée fluviale, il est prolongé de part et d'autre du fleuve par deux rampes d'accès comprenant chacune six travées. Ses fondations sont assurées en rive par des pieux préfabriqués en béton précontraint (600 mm de diamètre sur 40 m de profondeur) et dans le lit du fleuve par des tubes métalliques battus (1 m de diamètre sur 50 m de profondeur).

Si le tablier fait preuve de plus d'originalité avec son caisson en béton précontraint de 2,5 m de hauteur constante aux âmes extérieures fortement inclinées, les véritables avancées techniques de l'ouvrage résident dans son haubanage, assuré par 14 haubans (avec des unités variant de 37 à 75H15 sur chaque pylône) disposés en une nappe centrale.

Première spécificité : tous les câbles sont enfilés dans des gaines en PEHD (polyéthylène haute densité) de couleur jaune, conçues et fournies par Freyssinet. Formulée avec des additifs antioxydants, la couche externe de la gaine du hauban bénéficie d'une protection sacrificielle contre la photo-oxydation d'une durabilité supérieure à celle d'une gaine PEHD noire standard.

Autre singularité, plus décisive, les haubans sont supportés au niveau des pylônes par des selles de déviation innovantes. Cette disposition, qui simplifie la conception des pylônes et améliore l'esthétique générale de l'ouvrage, a été rendue possible par l'utilisation des « selles multitubes » mises au point par Freyssinet et Jean Muller International et du toron breveté Cohestrand de Freyssinet. Ces selles multitubes permettent un guidage individuel des torons composant le câble et suppriment les problèmes d'usure par frottements intertorons.

En outre, le montage est aisé : il s'effectue toron par toron sans nécessiter le recours à de gros moyens. Les torons sont parfaitement classés et restent tous parallèles entre eux sans possibilité de croisement. La substitution d'un toron par un nouveau est toujours possible que ce soit en cours de construction ou en service si



Photo 4

Stockage des selles multitubes sur le chantier du pont de Shindae en Corée du Sud

*Storage of multitube saddles on the construction site of Shindae Bridge in South Korea*

cela s'avérait nécessaire. Cela représente un avantage considérable vis-à-vis de la maintenance et de la sécurité de la structure.

### ■ Le pont extradossé de Shindae en Corée du Sud

En Corée du Sud, dans le district de Shindae (région de Kyongsang-bukto), la filiale sud-coréenne de Freyssinet a prêté son concours à la construction d'un ouvrage extradossé franchissant un cours d'eau sur l'axe Daejeon-Geumsan (photo 3).

D'une longueur de 246 m et d'une largeur variant de 20,57 m à 22,57 m, le pont possède deux travées d'approche de 45 m, deux travées haubanées de 78 m et un pylône haut de 12 m.

« La mise en place a été remarquablement rapide, soit un mois pour l'installation des seize haubans (composés



Photo 5

Nappe de haubans du pont de Riga (Lettonie)

*Riga Bridge stay cable bundle (Latvia)*

d'unités Cohestrand de trente et un torons), commente JY Kim, de Freyssinet Korea, grâce à l'utilisation des selles de haubans qui permettent aux câbles de traverser en continu le pylône » (photo 4).

### ■ Pont de Riga : une première sur un pont multitravée

Partagée en deux par le fleuve Daugava, large de plusieurs centaines de mètres à quelques kilomètres de son embouchure, Riga, la capitale lettone, achève la construction d'un ouvrage qui sera le premier pont multitravée réalisé avec des selles multitubes de haubans, variante proposée par Freyssinet en alternative à des selles injectées classiques initialement prévues (photos 5 et 6).

Long de 803 m, l'ouvrage est le maillon clé d'une nouvelle rocade destinée à désengorger les autres ponts de

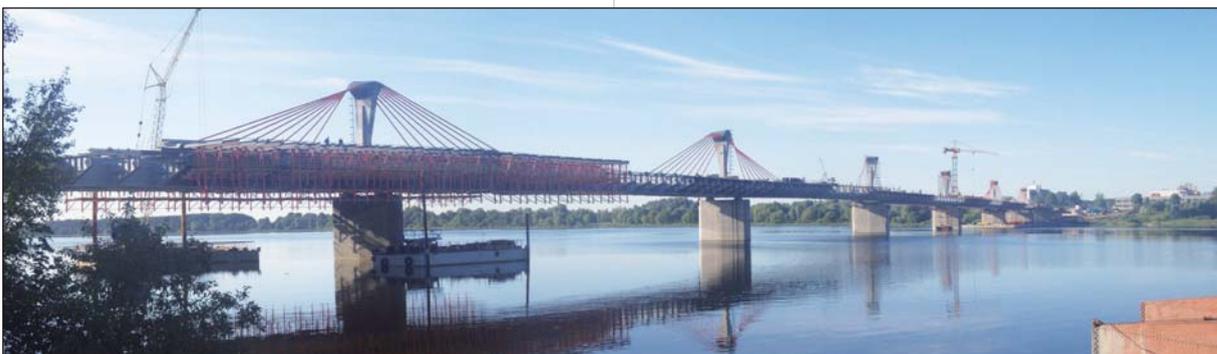


Photo 6

Vue générale du pont de Riga (Lettonie)

*General view of Riga Bridge (Latvia)*

## La selle multitube pour structures câblées : une technologie multi-avantage

la ville. Il est établi sur six piles espacées de 110 m, sur lesquelles a été poussé le tablier métallique, équipé comme à Millau d'un avant-bec soutenu par deux haubans fournis par Freyssinet.

Édifiés ensuite avant bétonnage du tablier, les six pylônes de 12 m de hauteur sont coiffés de huit selles supportant les câbles Cohestrand longs de 37 à 80 m, déployés en nappe centrale. La couleur orange choisie par la ville pour le tablier et les câbles a conduit Freyssinet à effectuer une campagne de test de résistance aux UV et de soudabilité pour les gaines de haubans. ■

### ABSTRACT

#### *The multitube saddle for cable-stayed structures : a technology with many advantages*

*E. Mellier, G. Sevoz, I. Zivanovic*

*Given the corrosion protection mechanical properties of the Cohestrand strand, Freyssinet has developed in parallel a high-performance deviation saddle, called the multitube saddle, capable of ensuring identical quality between the free part of the cable and this deviation area on the saddle, in particular without discontinuity of corrosion protection, unlike the traditional solutions.*

*This multitube saddle consists of a bundle of individual deviation tubes through which are passed all the Cohestrands forming the cable. These individual tubes are inserted inside a main steel tube of large diameter, and the space between individual tubes is filled in factory with a special high-strength grout (compressive strength at 28 days > 130 MPa).*

*Potential applications : saddle supports for stay cables on towers, saddle supports for the suspension cables of suspension bridges, external prestressing cable deviations, and saddle supports for the cables of curved bridges.*

### RESUMEN ESPAÑOL

#### *La silla multitubo para estructuras cableadas : una tecnología multiventajas*

*E. Mellier, G. Sevoz e I. Zivanovic*

*Mediante las propiedades mecánicas de la protección contra la corrosión del cable Cohestrand, Freyssinet ha elaborado en paralelo, una silla de desviación de elevado rendimiento, denominada silla multitubo, que permite garantizar una calidad idéntica entre la parte libre del cable y esta zona de desviación a la altura de la silla, y fundamentalmente, sin discontinuidad de la protección contra la corrosión de manera opuesta a las soluciones convencionales.*

*Esta silla multitubo va formada por un haz de tubos de desviación individuales que permiten el paso de cada Cohestrand que constituyen el cable. Estos tubos individuales van dispuestos en el interior de un tubo general de acero de gran diámetro y el espacio entre los tubos individuales se llena en fábrica con una lechada de cemento especial de elevada resistencia (resistencia en compresión de 28 días > 130 MPa).*

*Las posibles aplicaciones : tendidos en sillas de tirantes en las torres, tendidos en sillas de cables portadores de puentes colgantes, desviaciones de cables pretensados exterior, y los tendidos en sillas de cables de puentes extradados.*

# La poutre ITE<sup>®</sup>, une alternative aux poutrelles enrobées

## Le triplement du pont Pinel à Rouen

**Depuis plus de 35 ans, le tablier en poutrelles enrobées est la seule et unique solution qui s'offre à l'ingénieur pour franchir une voie circulée avec une épaisseur minimale.**

**Grâce aux progrès techniques accomplis par les BFUP depuis leur apparition il y a 10 ans, d'autres solutions s'ouvrent aujourd'hui au concepteur. C'est le cas de la poutre ITE<sup>®</sup>, réalisée en BSI/Ceracem et utilisée pour la première fois à Rouen (76) pour le réaménagement du pont Pinel, à proximité du nouveau pont levant Gustave Flaubert.**

### ■ Le contexte

À l'ouest de Rouen, le franchissement de la Seine par le pont levant Gustave Flaubert, relie désormais l'autoroute A150, située au nord, et la rocade sud de l'agglomération.

Cette opération nécessite le réaménagement de plusieurs voies routières et en particulier l'élargissement du pont Pinel, ouvrage modeste en poutrelles enrobées franchissant trois voies ferrées (photos 1 et 2).

L'étude de ce projet a mis en évidence qu'il existait une alternative économique aux solutions classiques de tabliers à poutrelles enrobées, à savoir des poutres en BFUP (Béton fibré à ultra-hautes performances) dotées d'avantages au moins équivalents.

### ■ Le domaine d'emploi des ponts-routes en poutrelles enrobées classiques

#### Influence des contraintes de site

D'une manière générale, pour concevoir un franchissement, l'ingénieur dispose de toute une panoplie de solutions techniques associant différents matériaux (béton, acier...) et différentes formes (poutres, dalles caissons, etc.). Lorsque les contraintes deviennent fortes, le choix des solutions se resserre jusqu'à n'offrir qu'un choix très réduit.

Ainsi, pour réaliser un tablier très mince au-dessus de voies ferrées ou routières en service et dans une gamme de portée jusqu'à 25 m, seule la solution en poutrelles enrobées s'avère convenir (nous écarterons ici les tabliers à poutres latérales peu appréciés en site urbain).

Ce type d'ouvrage à poutrelles enrobées est également privilégié lorsque l'utilisation d'étais ou cintres

est impossible. Il a largement fait ses preuves depuis plus de 35 ans et donne toute satisfaction. La réalisation sans échafaudage, par grutage de nuit, de tabliers très minces est ainsi unanimement appréciée.

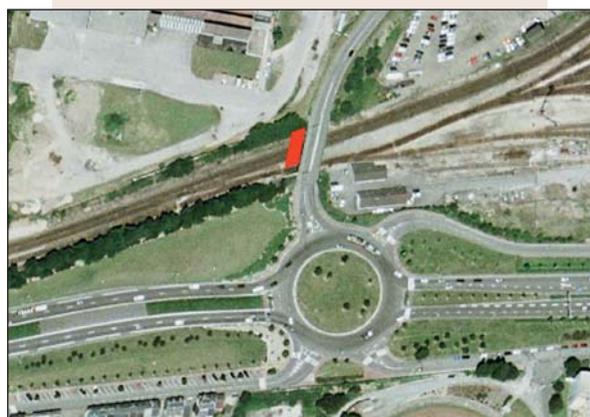
#### Des données économiques modifiées

La hausse continue du prix de l'acier est venue depuis ces dernières années modifier l'économie des solutions, mais surtout les délais plus longs d'approvisionnement ont contraint les entreprises à rechercher des techniques alternatives offrant les mêmes qualités et la même pérennité. De ce constat est né le concept de poutre ITE<sup>®</sup> (poutre en I à Talon Élargi).

### ■ La poutre ITE<sup>®</sup>

#### Principe

Il s'agit d'une poutre préfabriquée en T inversé réalisée en BFUP et précontrainte par fils adhérents. Sa conception s'inscrit dans une démarche de recherche à long terme démarrée en 1997 dans le cadre de la



**Younès El Gourari**  
Eiffage TP Agence  
Normandie

**Nicolas Fabry**  
**Ziad Hajar**  
**Marco Novarin**  
**Alain Simon**  
**Thierry Thibaux**  
Direction Technique  
Eiffage TP

**Sandrine Chanut**  
**René Sale**  
Recherche et  
Développement  
Eiffage TP

**Daniel De Matteis**  
**Pierre Marchand**  
**Aude Petel**  
CTOA - DGO  
Sétra

#### Photos 1 et 2

Plans de situation  
du pont Pinel

Pinel Bridge  
location plans

La poutre ITE®, une alternative aux poutrelles enrobées.  
Le triplement du pont Pinel à Rouen

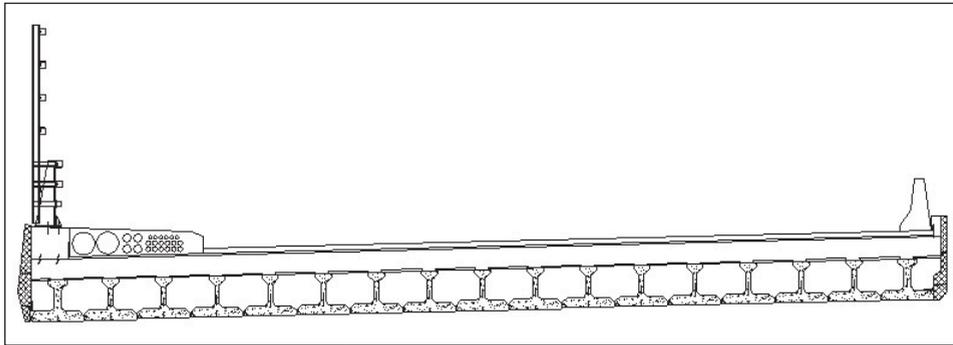


Figure 1

Coupe transversale, solution variante avec poutres ITE®  
Cross section of variant solution with ITE® beams

Description de la poutre

La poutre standard utilisée pour le pont Pinel a une hauteur hors tout de 62 cm et un talon de 80 cm de largeur; l'épaisseur de l'âme varie de 7 cm en section courante (figure 2), à 12 cm aux abouts.

Elle est fortement précontrainte par 28 torons T15 S tous situés dans le talon mais, en réalité, peu excentrés par rapport au centre de gravité de la section. Son poids est de 12 t.

Hormis les aciers de connexion avec la dalle supérieure, la poutre ne comporte aucun acier passif.

Dans le cas du pont Pinel (voir paragraphe « Pose des poutres ») qui possède un biais important (64 grades), les deux poutres de rive ont les mêmes caractéristiques mais les âmes sont épaissies de 7 à 10 cm en section courante et de 12 à 15 cm aux abouts.

Le BSI/Ceracem, béton fibré à ultra-hautes performances du groupe Eiffage

Le BFUP utilisé pour la fabrication des poutres ITE® est le BSI/Ceracem développé par le groupe Eiffage. Ce béton fibré de résistance caractéristique à 28 jours supérieure à 165 MPa en compression peut être formulé de différentes manières suivant son utilisation. Pour les poutres ITE® la formule est identique à celle utilisée pour la construction de l'auvent du péage de Millau à savoir :

- 2360 kg de Prémix sec;
- 45 kg de superplastifiant;
- 195 l d'eau;
- 200 kg de fibres métalliques (longueur 20 mm, diamètre 0,3 mm).

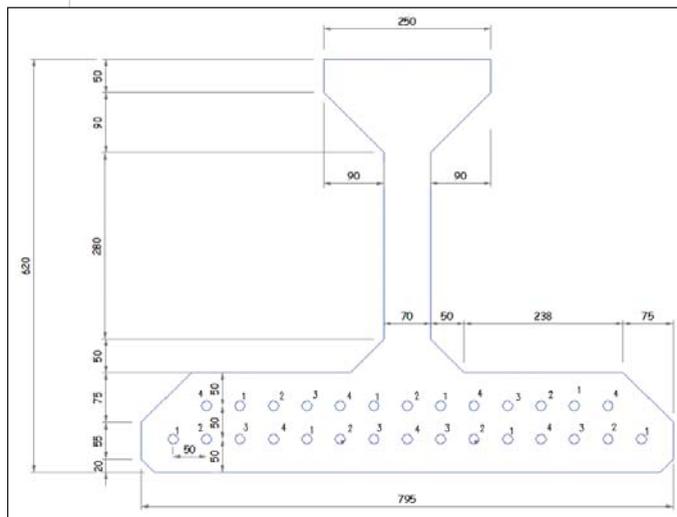
Le Prémix qui comprend le ciment, les granulats et les ultra-fines est préparé et conditionné en usine (Sika France) sous contrôle qualité puis livré à l'unité de pré-fabrication.

■ La comparaison avec les poutrelles enrobées classiques

Le guide Setra-SNCF des ponts-routes à tabliers en poutrelles enrobées publié en 1995, donne les limites d'élanement des poutrelles seules ainsi que l'élanement total (poutre + hourdis) pour une travée isostatique. Si l'on compare ces ratios avec ceux des poutres ITE® et PRAD on obtient les résultats donnés dans le tableau I. Ce dernier montre les performances des poutres ITE® en termes d'élanement sont identiques aux poutrelles métalliques enrobées mais leur mise en œuvre comporte des avantages supplémentaires

Figure 2

Coupe transversale d'une poutre (section standard)  
Pinel Bridge - Cross section of a beam (standard section)



| Type                      | Portée    | Travées      | Elancement poutre seule | Elancement poutre + hourdis | Poids propre au m <sup>2</sup> |
|---------------------------|-----------|--------------|-------------------------|-----------------------------|--------------------------------|
| Poutrelles enrobées acier | 8 à 25 m  | Isostatiques | 1/40                    | 1/34                        | 1,85 t/m <sup>2</sup>          |
| Poutres ITE®              | 10 à 30 m | Isostatiques | 1/45                    | 1/34                        | 1,10 t/m <sup>2</sup>          |
| PRAD                      | 10 à 30 m | Isostatiques | ~ 1/24                  | 1/20                        |                                |

Tableau I

Comparatif de performances entre trois types de poutres  
Comparative performance of three types of beams

« Charte innovation ouvrages d'art ». À cette époque, deux concepts de tabliers de pont en BFUP avaient été proposés par le groupe Eiffage :

- un système de mini-caissons pour passages supérieurs autoroutiers, concrétisé par les ouvrages innovants de Bourg-lès-Valence (2001);
- un système de tabliers à dalle élégie pour suppression de passages à niveau dont les poutres ITE® s'inspirent en partie.

Dans le cas du pont Pinel, le matériau utilisé est le BSI/Ceracem, matériau développé par le groupe Eiffage en partenariat avec la société Sika.

La forme en T inversé permet aux talons des deux poutres d'être jointifs et de reconstituer une sous-face plane (figure 1). À la différence des poutrelles enrobées acier ou de poutres préfabriquées en béton intégrant des sous-faces jointives, l'espace entre les poutres est laissé vide ce qui augmente fortement le rendement géométrique. Un hourdis supérieur en béton armé classique est alors coulé sur des prédalles posées sur le dessus des poutres comme pour un tablier PRAD (Pont à poutrelles préfabriquées précontraintes par adhérence).

comme nous allons le voir plus loin. Dans certains cas l'allègement important du tablier ( $1,10 \text{ t/m}^2$  au lieu de  $1,85 \text{ t/m}^2$  pour une travée de 25 m, soit une réduction de poids de 40 %) peut se traduire par des économies pour les fondations.

Les poutres ITE® sont posées en une seule coupure de circulation (la nuit) minimisant la gêne pour l'utilisateur. Ces poutres étant jointives, la pose des prédalles, le ferrailage et le bétonnage du hourdis supérieur se déroulent de jour et en totale sécurité.

Le seul ferrailage à mettre en œuvre se résumant à celui du hourdis, aucune barre n'est à enfiler dans les trous à prévoir dans les âmes des profilés. Ces manipulations de barre posent en général des problèmes de sécurité et doivent être réalisées sous consignation caténaires.

En outre, à la différence des poutrelles enrobées qui nécessitent, du fait de leur souplesse, deux à trois phases de bétonnage avec un nettoyage délicat des surfaces de reprise, le hourdis supérieur des ponts à poutre ITE® représente un volume de béton très inférieur et est bétonné en une seule fois d'où un gain notable de délai.

## ■ Le pont Pinel, première application des poutres ITE®

### Présentation

L'ouvrage existant est constitué de deux tabliers accolés en poutrelles enrobées comportant chacun deux travées de 12,20 m et 14,80 m reposant sur murs-culées et fondations superficielles (photo 3). L'ouvrage projeté, accolé aux deux précédents, franchit les voies ferrées sans pile intermédiaire pour en simplifier la construction, d'où une portée de 27,40 m.

Dans le dossier de consultation, le tablier comportait 17 poutrelles HEB 700 de 27,40 m de portée disposées selon un biais de 64 grades. Le dévers transversal de 2,5 % du tablier de 14 m de large est repris en disposant les poutrelles verticales avec un léger décrochage de l'une par rapport à l'autre (figure 3).

La solution en BFUP présentée par Eiffage respecte en tout point la géométrie de l'ouvrage. Les poutres ITE® ont été légèrement décalées l'une par rapport à l'autre et complétées par un hourdis supérieur en béton classique C35/45 dont l'épaisseur varie de 21 à 32 cm pour respecter le profil en long parabolique (figure 4).

La construction de ce troisième tablier entraînant des travaux à proximité immédiate des voies et contre les appuis de l'ouvrage existant, le projet prévoyait de réaliser des culées sur rideau mixte en palplanches de type HZ. La plus grande légèreté du tablier en BFUP a permis d'optimiser cette partie d'ouvrage.



Photo 3

Vue générale de l'ouvrage existant

Pinel Bridge - General view of the existing structure

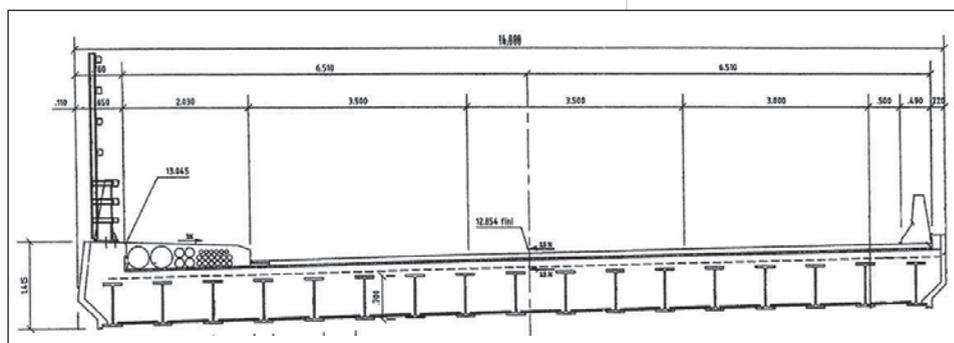


Figure 3

Coupe transversale de la solution remise à l'appel d'offres  
Pinel Bridge - Cross section of the solution submitted in the tender

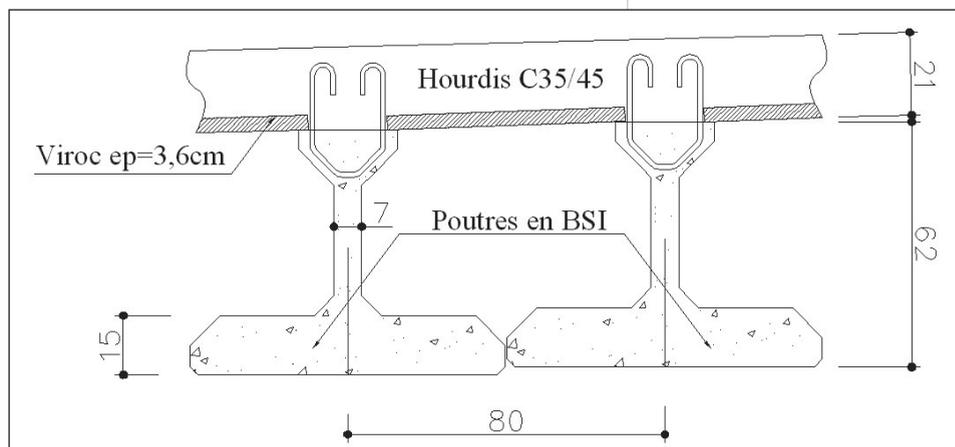


Figure 4

Coupe transversale de la variante avec poutres ITE®  
Pinel Bridge - Cross section of the variant with ITE® beams

### La poutre ITE<sup>®</sup>, une alternative aux poutrelles enrobées. Le triplement du pont Pinel à Rouen



Photo 4  
Pose des poutres  
*Placing the beams*

Les poutres sont reliées au droit des appuis par deux entretoises d'about qui sont coulées en même temps que le hourdis, le tout en béton classique C35/45. De ce fait, les extrémités des poutres préfabriquées présentent un biais égal à l'ouvrage, soit 64 grades.

#### Les travaux

##### Préfabrication des poutres

La préfabrication des poutres a été réalisée dans l'usine de la société néerlandaise Hürks Béton, partenaire de longue date du groupe Eiffage. L'usine d'Eindhoven, qui dispose d'installations ultramodernes et de puissants bancs à fils adhérents est spécialisée dans la fabrication de composants à haute valeur ajoutée pour le bâtiment et le génie civil; l'essentiel de sa production est constitué de bétons à hautes performances autoplaçants (B.A.P.).

La forme particulière de la section ITE avec son talon très large nécessite une procédure de fabrication très précise. Pour garantir le bon remplissage de la partie inférieure qui comprend 28 torons, le bétonnage est réalisé en deux phases :

- le talon seul avec la partie basse du coffrage en place;
- l'âme et le gousset supérieur après pose des panneaux d'âme et insertion des aciers de liaison avec le hourdis supérieur.

L'ensemble de l'opération se déroule en moins d'une heure, durée inférieure à la D.P.U., (durée pratique d'utilisation) du BSI.

#### LES PRINCIPAUX INTERVENANTS

##### Maître d'œuvre

État

##### Maître d'ouvrage

SIR Rouen (ex DDE 76)

##### Études

Études d'exécution

- Tablier : Eiffage TP STOA
- Appuis : Eiffage TP - Agence Normandie

Contrôle des études

- Tablier : Setra/CTOA/DGO
- Appuis : Cete Normandie - Centre DEIOA

Travaux

- Eiffage TP Agence Haute-Normandie
- Préfabrication des poutres : Hürks Béton

Contrôle des travaux

- SIR DE Rouen
- LRPC de Rouen

Le BSI étant autoplaçant, aucune vibration n'est nécessaire. Cependant, cette vertu ne dispense pas d'étudier et choisir la meilleure méthode de mise en place pour que les écoulements du béton fibré à travers les obstacles éventuels ne provoquent ni défauts locaux ni orientation préférentielle néfaste des fibres.

La prise du béton fait l'objet d'un suivi maturométrique systématique. Le décoffrage et la coupure des torons interviennent environ 24 heures après la fin du bétonnage lorsque le béton a atteint une valeur de résistance à la compression supérieure à 110 MPa sur cube (environ 100 MPa sur cylindre), sans étuvage.

Sous l'effet de la précontrainte, le taux de compression du BSI<sup>®</sup> atteint alors localement 52 MPa.

##### Épreuve de convenance

L'application des Recommandations provisoires AFGC-Setra (janvier 2002) relatives aux BFUP engendre un certain nombre d'essais préliminaires visant à vérifier que les matériaux et matériels employés sont conformes aux hypothèses de l'étude. Pour cela, on réalise un élément témoin représentatif de l'ouvrage réel qui permet de valider les moyens et méthodes de bétonnage et de mesurer ainsi le coefficient K relatif à la dispersion sur l'orientation des fibres.

En effet, tout flux de béton fibré, même autoplaçant, subit des effets d'orientation dans la benne, les conduits, la descente dans le coffrage. Contrairement aux idées reçues cette orientation préférentielle n'est pas recherchée car si elle est bénéfique dans un sens,

elle engendrera un déficit de résistance dans l'autre direction.

Un tronçon de poutre ITE® de 5 ml de longueur a donc été coulé pour vérifier ces paramètres et prélever les prismes destinés au calcul du coefficient K à l'aide de tests de résistance à la flexion.

Trois corps d'épreuve ont dû être réalisés pour caler les méthodes et obtenir des résultats conformes aux attentes. En particulier, il est apparu qu'un stockage de plusieurs mois des fibres en atmosphère humide pouvait perturber le système d'alimentation du malaxeur et augmenter l'anisotropie.

#### La pose des poutres (photo 4)

Les poutres ont été acheminées par train d'Eindhoven à Rouen, puis posées à la grue mobile de 300 t le 9 juin 2007. On notera à ce propos que dans le cas des poutrelles enrobées de grande longueur (25 à 30 m), la sensibilité au déversement impose en principe de poser les profilés par paires. Cette précaution est inutile pour la poutre ITE®, vu sa forme très rigide en T inversé. Le poids d'une poutre ITE® (12 t) est donc à rapprocher d'une paire de poutrelles HEB 700 (13,4 t).

Après pose des poutres, dont les talons sont jointifs, aucune autre interruption de trafic n'est nécessaire, ce qui réduit la gêne pour l'usager au minimum (photo 5).

### ■ Les études d'exécution

Les études d'exécution ont été réalisées pour la partie BFUP par le STOA, bureau d'études interne d'Eiffage TP avec un contrôle de la division Grands Ouvrages du Setra et pour la partie conventionnelle par le BET d'Eiffage TP Normandie avec un contrôle de la DEIOA du Cete Normandie-Centre.

Les justifications de la structure ont été menées suivant les Recommandations provisoires relatives à la conception et à la réalisation des structures en béton fibré à ultra-hautes performances, éditées par le Setra et l'AFGC en janvier 2002.

La structure du tablier, de conception classique en apparence (type PRAD), présente les particularités suivantes :

- l'absence d'aciers passifs dans les poutres préfabriquées en BSI;
- la prise en compte du caractère hybride de la section résistante du tablier (BFUP pour les ponts, et béton ordinaire pour le hourdis) et plus particulièrement le comportement du BSI à court et à long terme (retrait, fluage...);
- le biais relativement prononcé pour ce type de structures à poutres (biais de 64 grades) et dont l'influence se traduit par un accroissement des efforts de torsion notamment dans les poutres de rive.



Photo 5

Sous-face du tablier

Underside of the deck

Aussi les calculs d'exécution ont été menés à l'aide d'une modélisation en grillage de poutres en utilisant le logiciel ST1 du Setra.

Le modèle de calcul adopté permettait de simuler finement tant l'aspect particulier du matériau que les effets de répartition transversale et de torsion liés au biais mécanique.

Les justifications sous sollicitations normales sont analogues aux spécifications de la classe II du BPEL. Pour les justifications aux ELU, le calcul du moment résistant ultime des poutres est mené en négligeant la contribution des fibres. Vis-à-vis des sollicitations tangentées, la résistance au cisaillement est apportée principalement par les fibres, en l'absence d'armatures transversales conventionnelles. Les poutres de rives plus sollicitées (torsion, tranchant...) que celles courantes, présentent une âme élargie de 3 cm.

À l'issue de ce projet à une adaptation du logiciel PRAD-EL du Setra aux poutres préfabriquées en BFUP a été faite, ce qui devrait simplifier les études ultérieures.

#### LES PRINCIPALES QUANTITÉS

##### Tablier

- Surface : 380 m<sup>2</sup>
- BFUP (BSI/Ceracem) : 78 m<sup>3</sup>
- Béton C35/45 : 120 m<sup>3</sup>

##### Appuis

- Béton : 70 m<sup>3</sup>
- Palplanches : 85 t

### La poutre ITE<sup>®</sup>, une alternative aux poutrelles enrobées. Le triplement du pont Pinel à Rouen

#### ► ■ Conclusion

La construction d'un premier ouvrage en poutres ITE<sup>®</sup> dans le cadre du contournement ouest de Rouen a permis de valider le fait, qu'il existe aujourd'hui une alternative économique aux ponts à poutrelles métalliques enrobées dans la gamme de portée 20 à 30 m.

Pendant la construction, les travaux sur site sont simplifiés et la sécurité renforcée. En phase d'exploitation l'excellent comportement du BFUP aux agressions extérieures est un gage de pérennité de l'ouvrage et évite les interventions problématiques au-dessus des caténaires pour la peinture des sous-faces de profilés.

Cette première expérience d'utilisation de poutres ITE va se poursuivre par le doublement d'un pont à deux travées de 28,50 m de portée en site urbain au-dessus d'un faisceau de voies ferrées à Sarcelles.

Ainsi, dix ans après leur première utilisation en France, les BFUP, fruits des efforts constants de recherche-développement des entreprises et laboratoires, avec l'appui des Services techniques de l'État (DDE, Setra) peuvent offrir de nouvelles solutions alliant légèreté, durabilité et gêne minimale pour l'utilisateur. ■

#### ABSTRACT *The ITE<sup>®</sup> beam, an alternative to composite joists. Tripling Pinel Bridge in Rouen*

*Various authors*

*For over 35 years, the composite joist deck has been the only solution available to the engineer for crossing a trafficked road with a minimum thickness.*

*As a result of the technical progress achieved by ultra-high-performance fibre-reinforced concretes since their advent ten years ago, other solutions are now available to the designer. This is the case for the ITE<sup>®</sup> beam, made of BSI/Ceracem, used for the first time in Rouen (Normandy) for the renovation of Pinel Bridge, near the new Gustave Flaubert lift bridge.*

#### RESUMEN ESPAÑOL *Viga ITE<sup>®</sup>, una alternativa a las viguetas de hormigón. Puesta en triple vía del puente Pinel en Ruán*

*Autores diversos*

*Desde hace más de 35 años, el tablero con viguetas de hormigón constituye la única solución para los ingenieros para salvar un carril circulado con un espesor mínimo.*

*Gracias a los progresos técnicos conseguidos por los BFUP desde su aparición hace ya 10 años, otras soluciones se presentan en la actualidad para los responsables del concepto. Ocurre así para la viga ITE<sup>®</sup>, realizada en BSI/Ceracem y utilizada por vez primera en Ruán (76) para la ordenación del puente Pinel, en las cercanías del nuevo puente levadizo Gustave Flaubert.*

# Gamme Artéfac de Bonna Sabla : une nouvelle conception du génie civil



**Gilles Cros**  
Chef de projet  
Génie civil  
Bonna Sabla région  
Sud-Ouest

**Le génie civil d'ouvrages d'art est un segment de marché à fort potentiel de développement en matière de préfabrication. Bonna Sabla propose une approche nouvelle et originale du métier, avec son offre « Artéfac » de génie civil, une solution alternative au marché traditionnel du « coulé en place ». Cette offre apporte des avantages sur le plan économique et une qualité de réponse aux attentes des clients, qu'ils soient maîtres d'ouvrage publics ou privés. Tout au long des projets réalisés, Bonna Sabla propose des services d'accompagnement pour tous les produits de la gamme Artéfac. Le groupe s'implique dans toutes les démarches de qualité environnementale, dès la conception des ouvrages, dans les procédés de fabrication et tout au long des opérations sur le chantier.**

## ■ Innovation dans le génie civil préfabriqué sur mesure

Le métier du génie civil se tourne de plus en plus vers la qualité, les délais courts et le respect de l'environnement. La préfabrication en usine est une solution technique répondant à ces critères. Bonna Sabla s'est donné les moyens d'accompagner les maîtres d'ouvrage pour la réalisation d'ouvrages d'art de plus en plus importants en taille et en exigences techniques. Plus qu'un produit, un état d'esprit et une conception différente du génie civil se sont mis en place progressivement.

Une étape a validé les acquis dans ce domaine avec la création de la gamme « Artéfac ». Basée sur le principe de l'innovation, cette gamme est déclinée en quatre solutions techniques d'ouvrages :

- Artécadre, système constructif pour ponceaux préfabriqués;
- Artémur, voile de soutènement nervuré;
- Artécran, écran acoustique absorbant en béton poreux;
- Artéplus, corniches, habillages, couronnements, dalle de tablier de pont.

## ■ Une offre de produits et de services

Les principes d'exécution de ces éléments préfabriqués tiennent compte de cinq critères différents et systématiques dans cette gamme :

- le « sur-mesure » et l'adaptabilité.

Bien que s'appuyant sur des principes constructifs éprouvés, la volonté de l'entreprise est de proposer

aux donneurs d'ordres des produits pouvant s'adapter à un grand nombre de projets. Une solution sur mesure est ainsi définie pour chaque ouvrage. Le « sur-mesure » pouvant s'entendre au niveau de la géométrie, mais aussi par rapport aux sollicitations extérieures et à l'environnement immédiat de l'ouvrage;

- la qualité et la pérennité.

Garantir un produit de qualité constante, en conformité avec le cahier des charges, est une motivation présente dès la conception des ouvrages préfabriqués, mais également tout au long du process industriel de fabrication en usine. L'offre Artéfac allie les avantages de la conception de modèles uniques et dédiés à ceux d'une production industrielle maîtrisée et contrôlée en usine (photo 1);



Photo 1  
Fabrication en usine  
Manufacture  
in factory

## Consolis, premier groupe européen de produits préfabriqués en béton

Le rapprochement en 2005 du groupe finlandais Consolis et du français Bonna Sabla a fait du nouvel ensemble Consolis le premier groupe européen de produits préfabriqués en béton. Il offre à ses clients des solutions complètes pour la construction en leur proposant une gamme riche de plus de 100 000 références. Celles-ci vont des revêtements de sols et des murs aux traverses de chemin de fer, en passant par des produits pour l'industrie, l'assainissement et des éléments de structure pour ouvrages d'art.

Consolis conçoit et fabrique également des éléments pour le bâtiment.

Le développement international de Consolis s'est traduit par une forte présence en Europe, de la Finlande au Portugal et du Royaume-Uni à la Russie. Le groupe emploie plus de 8000 collaborateurs dans près de 100 usines et dispose d'autant d'agences commerciales, et des implantations en Afrique du Nord et en Asie, pour un chiffre d'affaires de 1,4 milliard d'euros. En France, Bonna Sabla est le numéro un de la fabrication des produits en béton manufacturés. La Division assainissement et matériaux de travaux publics regroupe les métiers principaux de l'assainissement et du génie civil. La Division environnement et matériaux de construction couvre les métiers de l'environnement, du gros œuvre bâtiment, du traitement des eaux, des conduites pression. Historiquement, le cœur de métier de l'entreprise est la canalisation et les regards. Depuis plusieurs années, le génie civil dit « traditionnel » se développe et représente pour le groupe d'importantes parts de marchés.

### Gamme Artéfac de Bonna Sabla : une nouvelle conception du génie civil

Photo 2

Ouvrage hydraulique  
Artécadre  
*Artécadre hydraulic  
structure*



Photo 3

Le procédé Artécadre  
permet de réaliser  
des formes complexes  
de grandes dimensions  
*The Artécadre process  
can be used to execute  
large, complex shapes*



► **• une offre basée sur les services et l'accompagnement.**

Un produit préfabriqué n'est véritablement fini que lorsqu'il a atteint son emplacement définitif sur le chantier et qu'il est pleinement opérationnel. En conséquence, ont été mis en place des services d'accompagnement parallèles à la production des produits préfabriqués : des aides à la gestion des projets, comme par exemple l'affectation d'un chargé d'affaires par projet responsable des relations entre le donneur d'ordres, les contrôleurs et l'entreprise de travaux. Ce chargé d'affaires est épaulé par un bureau d'études d'exécution, intégré à Bonna Sabla, disposant de moyens de conception, calculs et dessins dédiés uniquement à la préfabrication et à la réalisation des plans d'assemblage sur site. Il a en charge la coordination des intervenants : entreprise, bureau de contrôle et usine de préfabrication, et a pour objectif la bonne marche du projet dans son ensemble.

Le maillage national des sites de fabrication de l'entreprise permet une grande réactivité et les adaptations nécessaires aux décisions de chantier, dans l'objectif d'optimiser les délais et les coûts.



Photo 4

Éléments Artémur grande hauteur  
*Very high Artémur elements*

### ■ La gamme Artéfac®

#### Artécadre

C'est un système constructif pour ponceaux préfabriqués utilisés pour réaliser les ouvrages d'art (PI routiers, piétons...) ou pour réaliser des ouvrages hydrauliques (simples, multiples...) (photo 2).

Le principe consiste à reconstituer un caniveau grâce à deux piédroits préfabriqués en forme de « L », et posés en vis-à-vis. Ces piédroits sont clavés sur site par un radier, qui peut être soit préfabriqué, soit coulé en place. Sur ce caniveau reconstitué, on pose des dalles préfabriquées qui seront appuyées isostatiquement sur les piédroits, mais qui auront des liaisons entre elles coulées en place, sur leur longueur, afin de rendre monolithique le tablier fini.

Ce procédé tire son adaptabilité de sa mise en œuvre simple. Il permet de réaliser des formes complexes et de grandes dimensions, tout en restant rapide à fabriquer et à installer sur site. Les dimensions des pièces préfabriquées correspondent aux calepinages, conceptions et calculs effectués par le bureau d'études (photo 3).

Dans le cas général, l'ouverture des ouvrages peut être comprise entre 2,50 m et 10 m et sa hauteur peut varier de 0,75 m à 6 m. Les biais d'ouvrages atteignent 70 g, voire au-delà, sans difficultés particulières. L'autre avantage de la fabrication en usine reste la qualité intrinsèque des produits (dimensions, aciers, béton) mais aussi et surtout, la qualité et la diversité des parements réalisables.

Comme beaucoup de produits de la gamme, la fabrication dans des moules dédiés permet de réaliser des animations architecturales complexes et variées, avec



Photo 5

**Murs parementés**  
**Clad walls**

un large choix de couleurs, textures, et finitions des parements.

Ces produits Artécadre s'adaptent parfaitement aux autres produits de la gamme Artéfac.

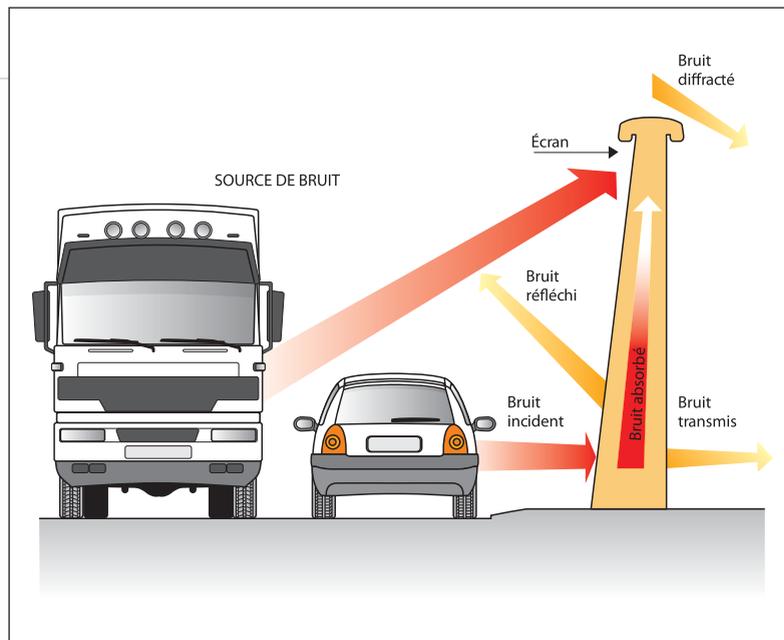
**Artémur**

Il permet de réaliser des murs de soutènement ou des piédroits d'ouvrages, souvent de grande hauteur. Le principe réside dans la réalisation d'un voile mince renforcé par des poteaux intégrés, donnant aux éléments le profil d'éléments nervurés. La structure verticale ainsi conçue sous la forme d'un « T » leur confère une grande résistance aux efforts (photo 4).

Les Artémurs pourront être utilisés facilement sur des murs de soutènement de plus de 11 m de hauteur. Leur fabrication en usine, à plat dans des moules, permet une personnalisation de l'ouvrage grâce à un grand choix de traitements architecturaux, de couleurs et de textures à l'instar des Artécadres, qu'ils complètent souvent pour les murs d'entonnement, ou bien qu'ils remplacent lorsque les culées des ouvrages sont très hautes. Leur conception et principe de calcul permettent d'obtenir de grandes résistances avec des pièces légères (poids habituellement inférieur à 12 t).

Ces pièces viennent s'encaster dans une semelle coulée en place a posteriori, d'où une grande flexibilité et adaptabilité à de nombreux projets. Les Artémurs sont la réponse à la construction des murs à géométrie complexe (courbes, inclinés...) ainsi que les murs à parement architectural. Bonna Sabla prend à sa charge le calepinage et la conception des éléments, ainsi que la réalisation des plans d'exécution, de montage et des semelles coulées en place (photo 5).

L'originalité de ce procédé réside également dans la



**Figure 1**  
**Schéma de l'écran antibruit**  
*Diagram of the noise barrier*

réalisation des « têtes de mur » de différents types tels que des garde-corps, supports de glissière, murs antibruit, corniches caniveaux, bordures, etc.

La manutention et la pose de ces éléments, bien qu'aisées, font l'objet de spécifications particulières fournies par Bonna Sabla et complétées par une assistance technique sur chantier.

**Artécran**

La création de nouvelles infrastructures s'accompagne de plus en plus souvent d'études d'impact sur l'environnement. Les murs antibruit procurent aux riverains une protection contre les nuisances sonores liées au trafic. Ils stoppent les ondes sonores en les absorbant, évitant ainsi leur réflexion (figure 1).

Les murs de type Artécran apportent une réponse approuvée et éprouvée à ce problème, conformément aux normes en vigueur. Les éléments de murs sont constitués d'une couche de béton poreux à base d'argile expansée et de pouzzolane, ayant des propriétés d'absorption importantes (les plus élevées du marché), et d'une couche de béton armé classique, permettant de bloquer la transmission des ondes.

Le bon accrochage des deux couches de béton l'une sur l'autre confère à l'ensemble un comportement mécanique homogène. De plus, les matériaux constitutifs d'Artécran sont tous de type minéral, et sont donc par nature inaltérables et inertes vis-à-vis de l'environnement (de plus entièrement recyclables).

Les finitions et les parements de ce produit peuvent être personnalisés pour mieux s'intégrer dans leur environnement et répondre aux exigences architecturales.

L'adaptabilité du produit réside aussi dans la possibilité

### Gamme Artéfac de Bonna Sabla : une nouvelle conception du génie civil

Photo 6

Autoroute A62 à Toulouse :  
les formes et les couleurs  
des éléments Artécran s'adaptent  
au projet

*A62 motorway in Toulouse :  
the shapes and colours  
of the Artécran elements  
are adapted to the design*

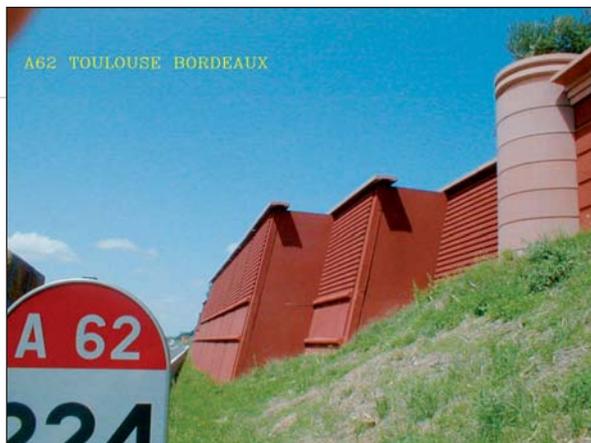
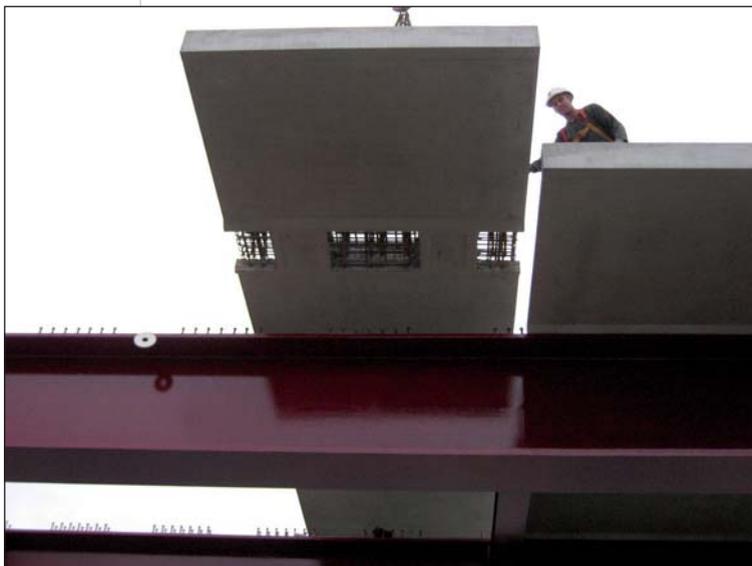


Photo 7

Dalles de pont  
colorées Artéplus, à  
Grenade-sur-Garonne

*Artéplus coloured  
bridge slabs in  
Grenade-sur-Garonne*



de choisir des modes de fixation et de mise en place de différents types : classiques, entre poteaux métalliques, ou bien, plus originales comme l'encastrement dans des semelles coulées sur site (photo 6).

#### Artéplus

De nombreux ouvrages différents peuvent être traités grâce aux trois produits de la gamme précédente. Toutefois ces ouvrages sont souvent agrémentés par des éléments préfabriqués, souvent architecturaux, destinés à une fonction à la fois technique et esthétique. Bonna Sabla a créé un nom générique pour ces produits : Artéplus.

Ces pièces sont réalisées dans des moules uniques et font l'objet de recherches connexes avec les donneurs d'ordres pour obtenir des qualités de parement, de texture et de géométrie élevées.

Cette gamme comprenant les corniches, les habillages, les couronnements, les dalles de tablier, est en perpétuelle évolution. Elle intègre les nouvelles techniques de réalisation des bétons et des moules.

Grâce à cette gamme de produits, Bonna Sabla est en mesure de participer à l'élaboration des projets,

conjointement aux maîtres d'œuvre et architectes pour définir des produits techniquement et économiquement réalisables (photo 7).

#### ■ Artéfac, des avantages majeurs pour les entreprises

Dans la grande majorité des cas, Bonna Sabla n'assure pas la pose des éléments de cette gamme. Ces produits sont donc distribués aux entreprises qui en assurent l'assemblage *in situ*. Celles-ci sont souvent de la catégorie des grands « génie civilistes » nationaux qui trouvent dans cette conception un intérêt majeur : les services associés à ces projets par Bonna Sabla, qui leur permettent de diminuer sensiblement leur encadrement et d'assurer plus facilement le suivi d'un plus grand nombre de chantiers ou d'ouvrages, tout en gardant une structure d'encadrement assez légère. De plus cette conception du génie civil limite considérablement pour elles les aléas de chantier et leurs incidences financières.

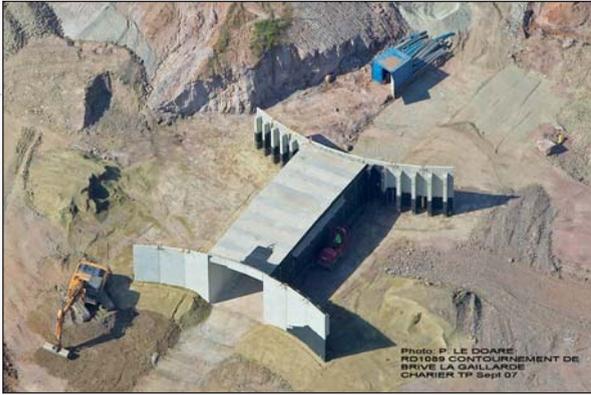
C'est d'ailleurs aussi le cas pour les structures de « génie civilistes » locaux, de taille plus modeste, mais qui, grâce à la gamme Artéfac, sont en mesure de répondre à des chantiers d'une plus grande importance, qu'ils n'auraient pas pu assumer par manque de moyens en « coulé en place ».

Enfin, les terrassiers routiers trouvent aussi leur intérêt pour ces produits. En effet, la simplicité de montage des éléments préfabriqués leur procure la possibilité de réaliser des ouvrages de taille modeste dans un lot de terrassements ou de routes. De plus, les délais d'intervention sur chantier étant réduits, les tâches de réalisation des ouvrages ne sont plus sur le chemin critique de leur organisation de chantier. Le phasage du chantier s'en trouve simplifié, entraînant de ce fait des réductions de coûts significatives.

#### ■ Des chantiers de référence

##### Le contournement Nord de Brive-la-Gaillarde en Corrèze

Cette opération lancée par le Conseil général de Corrèze est avant tout un chantier de terrassements, avec un profil de terrain particulièrement difficile qui a imposé à Charier TP (entreprise adjudicataire) le déplacement de volumes considérables de déblais et remblais. Le tracé comportait également quelques ouvrages d'art de taille importante dont la construction selon les techniques traditionnelles de génie civil aurait nécessité 3 à 4 mois, ce qui aurait rendu plus difficile l'organisation des phasages terrassements.



© P. Le Doaré / Charrier TP

Photo 8

Ouvrage en éléments Artéfacs sur le contournement Nord de Brive-la-Gaillarde

*Structure in Artéfacs elements on the Brive-la-Gaillarde northern bypass*

L'entreprise a donc fait le choix Artéfacs pour la construction de ces ouvrages, afin de réduire au maximum la durée d'intervention des équipes OA sur le chantier (de l'ordre de 3 semaines).

Pendant toute la période de conception des ouvrages et leur fabrication en usine, les emplacements réservés à ceux-ci étaient utilisés pour la circulation des engins de chantier (pas de pistes provisoires). Une fois la pose d'un ouvrage terminée, les engins pouvaient circuler directement sur l'ouvrage, car l'autre intérêt de la préfabrication en usine est d'éviter l'attente du séchage des éléments *in situ* (photo 8).

Le concept Artéfacs répondait à la majorité des besoins du chantier, mais l'un des ouvrages (PICF4) ne rentrait pas dans le cadre de la gamme traditionnelle des produits Artécadre. En effet, l'environnement extérieur à l'ouvrage imposait des contraintes importantes et inhabituelles pour ce type de PICF. La première de celles-ci était la hauteur du remblai au-dessus de l'ouvrage (plus de 4 m de haut pour 4 m de portée). Les dalles Artécadre classiques pleines auraient pu reprendre ces charges sans difficultés, mais le poids intrinsèque de ces éléments préfabriqués induisait lui-même une surcharge. La solution Bonna Sabla a été de réduire l'épaisseur moyenne de ces éléments selon le principe de la dalle nervurée afin d'en diminuer considérablement le poids (photos 9 et 10).

Les piédroits de l'ouvrage sont aussi fortement sollicités puisque très enterrés. La solution dans ce cas a été d'utiliser les murs nervurés Artémur qui répondent à des sollicitations extrêmes tout en restant légers et facilement manutentionnables. Mais l'utilisation sur le PICF4, bien que nécessaire, s'est avérée difficile pour l'entreprise de pose Charrier TP. En effet, un fort pourcentage du radier du PICF (de l'ordre de 5 %) autorisait mais ne facilitait pas la pose et les réglages des Artémurs. Le bureau d'études Bonna Sabla a donc choisi d'associer les avantages de la pose aisée des pié-



Photos 9 et 10

Éléments Artécadre et Artémur mis en œuvre sur le contournement Nord de Brive-la-Gaillarde

*Artécadre and Artémur elements installed on the Brive-la-Gaillarde northern bypass*



droits d'Artécadre, à ceux de la légèreté des Artémurs. Un nouveau produit était né : le piédroit en « L » nervuré.

Ce chantier respecte la philosophie de Bonna Sabla dans son approche du métier de génie civil :

- le sur-mesure et l'adaptabilité puisque sur l'ensemble du tracé quatre ouvrages ont été exécutés et aucun sur le même principe. Un des ouvrages, le PICF4 a même fait l'objet d'une création de produit;
- l'accompagnement de l'entreprise pour répondre aux contraintes du chantier et trouver des solutions adéquates;
- vis-à-vis du client donneur d'ordre, l'assurance du respect de la qualité et de la pérennité des ouvrages exécutés;
- des réductions de délai d'intervention de plus de deux mois sur certains ouvrages;
- une économie maîtrisée du fait d'un phasage simplifié pour la réalisation des remblais et de la diminution des aléas chantier (intempéries, etc.).

### Le BOH3 du quartier de Rangueil à Toulouse

La préfabrication est aussi une méthode d'exécution souvent retenue pour la réalisation de chantiers

Gamme Artéfac de Bonna Sabla : une nouvelle conception du génie civil



Photo 11

L'ouvrage BOH3 de Ranguel (Toulouse) en cours de construction

*BOH3 structure of Ranguel (Toulouse) undergoing construction*



urbains. Les avantages sont d'abord la limitation des nuisances sonores dans l'environnement immédiat du chantier. La préfabrication en usine permet en effet de limiter sur site la gêne dans le temps, mais aussi dans l'espace puisque les installations de chantier sont moins importantes. De plus, les constructions provisoires, telles que les blindages, les déviations... sont réalisées dans des délais plus courts pour une utilisation limitée dans le temps.

L'ouvrage du BOH3 de Ranguel se trouve sur un site hospitalier au cœur d'un quartier urbain, à proximité d'un parking et de chambres hospitalières. On comprend aisément l'intérêt de réduire le temps d'intervention sur site.

Pour des raisons de structures de fondations, la solution technique et économique retenue par Razel (mandataire) ne pouvait pas être un radier général du type Artécadre. La taille de l'ouvrage (10 m de portée, 6 m de hauteur) a imposé une solution avec dalles encastrées dans des piédroits type Artémurs, les semelles des piédroits et les clavages des dalles (poutres de torsion) sur les piédroits étant réalisés sur site (figure 2).

Pour assurer une parfaite liaison dalles-piédroits, les règles de l'art imposaient la mise en place d'un gousset aux extrémités des dalles, dans le but d'épaissir celles-ci au droit des piédroits. Cette conception, nouvelle dans la profession, s'accommodait parfaitement de la rigidité de la tête des piédroits. Bien que négligée dans les calculs, elle apportait un plus dans la conception de l'encastrement et garantit au maître d'ouvrage la pérennité de la solution.

Enfin, le choix de l'entreprise Razel s'est porté sur une

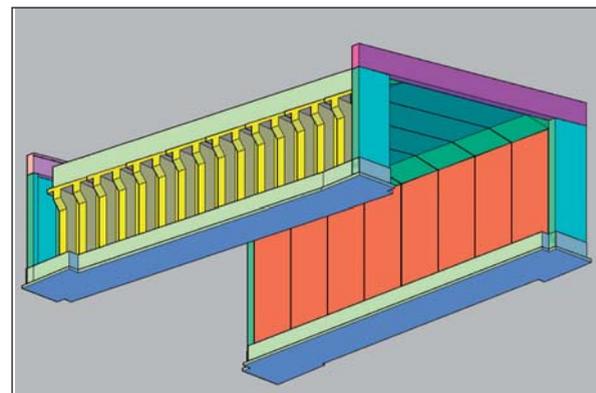


Figure 2

Représentation 3D et schéma structurel de l'ouvrage BOH3 de Ranguel (Toulouse)

*3D representation and structural diagram of the BOH3 structure of Ranguel (Toulouse)*

solution dalles à goussets sur piédroits Artémur. Cet ouvrage qui permet d'accéder à un parking, enjambe une route piétonne d'accès du public au bâtiment de l'hôpital. La géométrie étant très complexe (pente longitudinale, pente transversale, dévers, biais...), l'entreprise a recherché également une qualité esthétique (photo 11).

**La déviation de Bedous (Pyrénées-Atlantiques)**

Les ouvrages d'art de la déviation de la RN124 à Bedous conçus par Bonna Sabla visaient plusieurs objectifs :

- limiter la gêne occasionnée à la circulation routière, comme au voisinage;
- respecter des périodes courtes d'intervention sur chantier pour éviter les intempéries d'hiver en montagne;
- réaliser des bétons répondant aux normes contraignantes en altitude;
- garder et valoriser le côté architectural de ces ouvrages exposés à la vue des touristes dans un site protégé.

L'originalité de ce projet résidait dans la recherche d'une solution Artéfac commune pour l'ensemble des ouvrages de la déviation, tous différents les uns des autres : ouverture variant de 4 m à 10 m; conceptions PIPO, PICF, double cadre...; utilités différentes (pont routier, ouvrage de décharge, boviduc, ouvrage hydraulique). Le point commun étant le respect d'une intention architecturale et d'une qualité des bétons unique pour les cinq ouvrages.



Photo 12

Ouvrage en Artécadre double pour l'ouvrage de décharge OH4 de Bedous (Pyrénées-Atlantiques)

Structure in double Artécadre for Bedous outlet works OH4 (Pyrénées-Atlantiques region)

Les solutions retenues ont été :

- Artécadre simple pour les ouvrages de décharge OH7 et OH8, le boviduc et Artécadre double pour l'ouvrage de décharge OH4;
- murs Artémurs et dalles à goussets pour le PI9 (photo 12).

Si les conceptions, les principes de fonctionnement et de modélisation de calculs ont été spécifiques pour chacun d'eux, tous devaient observer des règles architecturales communes, dont une face avant cannelée et des corniches sur mesure (de la gamme Artéplus). ■

## ABSTRACT

### *Artéfac product range of Bonna Sabla : a new concept of civil engineering*

G. Cros, M. Catherin

*Bonna Sabla, a major player in industrial concrete prefabrication in France, is becoming organised to position itself on the civil engineering market in public works. In addition to the construction of conventional structures traditionally prefabricated, the company has created a product range called Artéfac which combines product quality and performance with an integrated support and structured service offering. The range takes the form of four products :*

- *Artécadre : prefabricated culvert construction technique;*
- *Artémur : ribbed supporting shear wall;*
- *Artécran : absorbent noise barriers;*
- *Artéplus : customised prefabrication.*

*By combining these items it is possible to build large civil engineering structures within tight deadlines and adapting to site conditions.*

*This range is constantly being developed and enriched by products which are now numerous and varied.*

## RESUMEN ESPAÑOL

### *Gama Artéfac de Bonna Sabla : un nuevo concepto de ingeniería civil*

G. Cros y M. Catherin

*Bonna Sabla, importante protagonista en la prefabricación industrial del hormigón en Francia, se organiza para posicionarse en el mercado de la ingeniería civil relativa a las obras públicas. Además de las realizaciones de estructuras convencionales y tradicionalmente prefabricadas, la empresa ha creado una gama de producto Artéfac que combina con la calidad y los rendimientos de los productos una oferta integrada de asesoría y de servicios estructurados. La gama se desglosa en cuatro productos :*

- *Artécadre : principio constructivo de alcantarillas prefabricadas;*
- *Artémur : pantalla de contención con nervaduras;*
- *Artécran : pantallas acústicas absorbentes;*
- *Artéplus : prefabricación a medida.*

*La combinación de estos elementos permite la realización de obras de fábrica de grandes dimensiones, según plazos reducidos y adaptándose a las condiciones de la obra.*

*Esta gama de producto se encuentra en constante evolución y se amplía mediante diversas realizaciones, hoy en día numerosas y variadas.*

Réalisé en 1980, le viaduc de Fozzières est un ouvrage type V.I.P.P. à trois travées, d'une longueur totale de 121,50 m, permettant le franchissement d'une route départementale et d'un ruisseau par l'autoroute A75 (sens Clermont-Ferrand → Béziers) dans l'Hérault (34) (photo 1).

Photo 1

Vue de l'ouvrage réparé  
View of the repaired structure



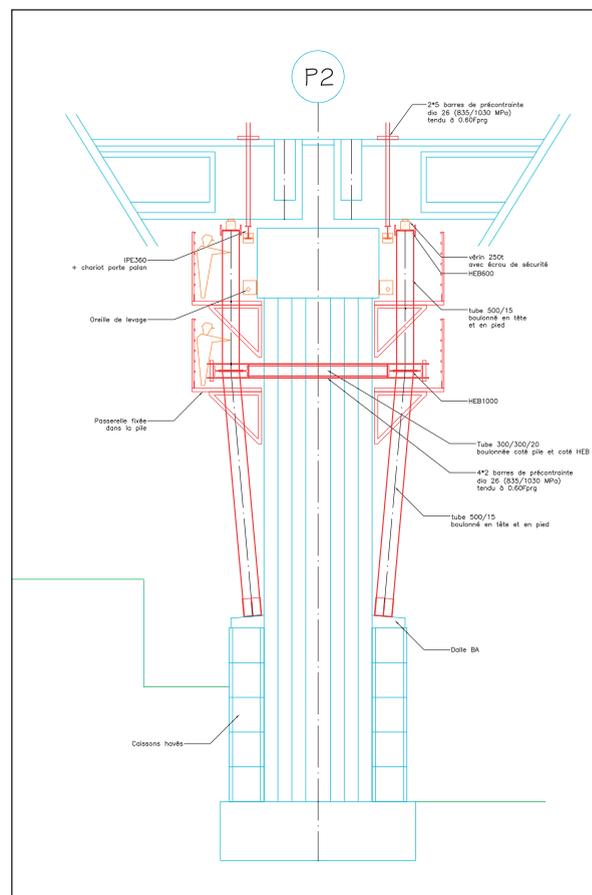
### Palée provisoire

Cette palée provisoire d'un poids total de 80 t, constituée d'un assemblage complexe de profilés métalliques (boulonnages, soudures diverses, brèlage par barres de précontrainte de tubes, HEB, IPE, etc.), était équipée de diverses plates-formes de travail et prenait appui sur les fondations existantes (figure 1, photo 2). Cette disposition a permis de s'affranchir de la réalisation d'un système de fondation provisoire initialement prévu en solution de base (micropieux et semelles). Les hauteurs des piles étant différentes, la semelle existante de la plus haute des deux piles a été rehaussée par un massif béton armé, afin de pouvoir réutiliser la palée provisoire en s'appuyant sur la fondation existante (figure 1).

Les 1000 t de poids propre du tablier ont été transférées des appuis existants de la pile concernée à la palée provisoire par l'intermédiaire de vérins hydrauliques situés en tête de la palée et contrôlés par automate.

Figure 1

Plan de principe de la palée provisoire  
Schematic drawing of the temporary bent



### Objet des travaux

Suite à différentes inspections détaillées menées par le CETE, une importante fissuration des chevêtres supérieurs des piles, ayant pour origine une réaction sulfatique différée (liée à l'exothermie lors de la prise du béton), a été mise en évidence.

Cette fissuration étant fortement évolutive, la recherche de solutions de réparation a abouti à la décision suivante : démolir puis reconstruire les chevêtres des deux piles à l'identique, en réalisant l'étalement préalable du tablier à l'aide de palées provisoires.

De plus, ces travaux ont été complétés par une remise à niveau des équipements de superstructures comprenant :

- le remplacement des joints de chaussée ;
- le remplacement de tous les appareils d'appui ;
- la mise en œuvre d'une corniche caniveau métallique assurant le recueil des eaux de la chaussée et le transfert des eaux du sud vers le nord, en direction de bassins de traitement des eaux de chaussée.

### Réalisation des travaux

Le remplacement à l'identique des chevêtres s'est effectué pile après pile, après transfert de charges du tablier sur une palée provisoire.

### QUELQUES CHIFFRES

- Démolition de béton armé : 450 t (225 t par chevetre)
- Béton : 180 m<sup>3</sup> (90 m<sup>3</sup> par chevetre) mis en œuvre en tête des piles, sous le tablier
- Palées provisoires métalliques : 80 t reprenant 1000 t de poids propre du tablier à vide
- Vérinage (système VerSOTM<sup>®</sup>) : 10 vérins de 200 t de 45 mm de course (par pile)
- Montant de la réparation : 1 172 500 €
- Durée des travaux : 7 mois

# viaduc de Fozières

**Samy Ammar**  
Ingénieur Travaux  
VSL France

**Fabien Cousteil**  
Ingénieur Méthodes  
VSL France

Les 10 vérins hydrauliques (au niveau des deux lignes d'appui, comportant chacune cinq poutres), de capacité 200 t, pression nominale de fonctionnement 700 bar, course 45 mm, étaient commandés par le système VerSO™ de VSL France (« Vérinage commandé et synchronisé par ordinateur »), qui permet de piloter de façon automatique et sécurisée le mouvement des vérins (capteurs de déplacements et capteurs de pression).

Afin de s'assurer du bon comportement de la palée provisoire lors du transfert de charge, un contrôle topographique a été mis en place.

## Démolition du chevêtre

Une fois le transfert de charge effectué, la phase délicate de démolition du chevêtre a pu être engagée.

Cette démolition s'est effectuée par sciage du chevêtre en blocs qui furent ensuite ripés et descendus au sol.

Le sciage horizontal et vertical des blocs a été effectué à l'aide d'une scie à câble, après mise en place des « oreilles de levage » (assemblage métallique), fixées sur les flancs du chevêtre par des tiges filetées scellées dans le béton existant, qui permettaient le ripage puis la descente des blocs (photo 3).

Les blocs ainsi découpés (de 15 t environ), ont été ripés (en dehors de l'emprise de la pile) par un système permettant la translation sur des poutres de roulement suspendues au tablier par des barres de précontrainte. Ils ont ensuite été descendus au sol par grue mobile, pour être démolis et évacués en centre de retraitement.



Photo 2  
Palée provisoire  
Temporary bent

## Réalisation du nouveau chevêtre

La cage d'armature du nouveau chevêtre (13 t), a été préfabriquée au sol et mise en place avec le même système de manutention, selon une cinématique inversée par rapport à la dépose des blocs (par la grue mobile puis le système de ripage des blocs) (figure 2).

Les 90 m<sup>3</sup> de béton C30/37 du nouveau chevêtre, connecté à l'existant par 88 scellements de HA32 en tête de pile (HA32 en deux parties, reliées par un système de coupleur, permettant ainsi la mise en place de la cage d'armature), ont été bétonnés à la pompe dans un coffrage réalisé par panneaux manportables, habillés de fourrures contreplaquées, assurant ainsi la qualité des parements. Un contrôle de température par l'intermédiaire de sondes a été mis en place lors du

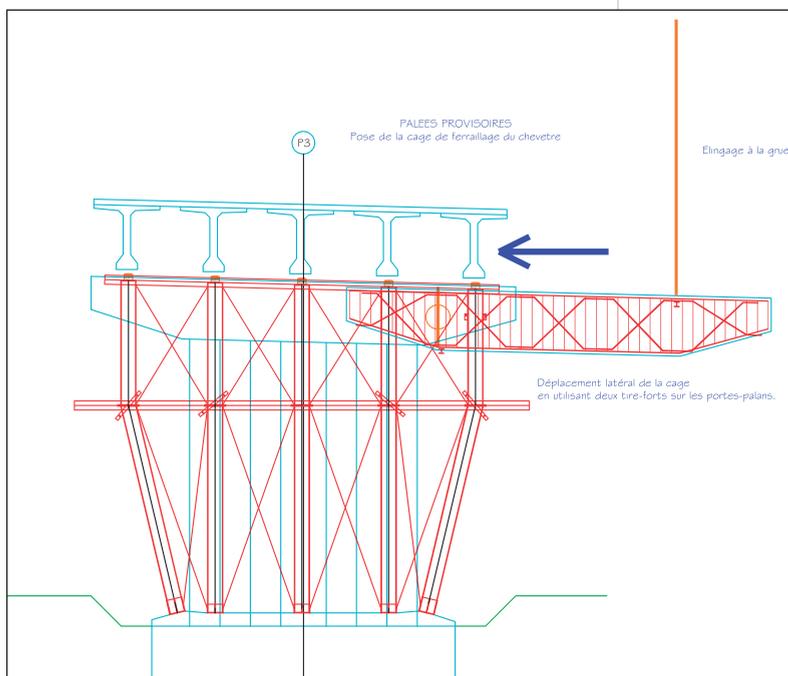


Figure 2  
Mise en place de la cage de ferrailage du nouveau chevêtre  
Installing the reinforcing cage for the new head



Photo 3  
Ripage d'un bloc de béton armé après sciage  
Sliding a block of reinforced concrete after sawing

### La réparation du viaduc de Fozières



Photo 4

Coffrage du nouveau chevetre  
Formwork for the new head

► coulage du béton (mesure de l'exothermie du béton) (photo 4).

Une fois la résistance du béton atteinte (contrôle par écrasements), et après la réalisation des nouveaux bossages et la pose des appareils d'appui, le tablier de l'ouvrage a été transféré sur ses nouveaux appuis. La palée provisoire a ainsi pu être déplacée à l'autre pile pour le remplacement du second chevetre.

Les travaux de réparation des bétons, de pose des corniches et des joints de chaussée ont été effectués en parallèle.

L'ouvrage a été remis en circulation après 7 mois de travaux. ■

#### LES PRINCIPAUX INTERVENANTS

##### **Maître d'ouvrage**

Ministère des Transports, de l'Équipement, du Tourisme et de la Mer

##### **Maître d'œuvre**

Direction interdépartementale des Routes Méditerranée

##### **Bureau de contrôle études**

CETE Méditerranée

##### **Entreprise générale**

VSL France

##### **Principaux sous-traitants**

- Locapal : palée provisoire
- Scie béton : découpe du béton armé des chevêtres
- RCA : joints de chaussées

#### ABSTRACT Repair of the Fozières Viaduct

S. Ammar, F. Cousteil

To restore the heads of the two piers of Fozières Viaduct, affected by strongly evolving cracking, VSL France placed the deck of the structure on a temporary bent.

The heads were cut up into blocks, then reconstructed so as to put the deck of the structure back on its new permanent supports. Various equipment and repair works were carried out in parallel during the seven months of work.

#### RESUMEN ESPAÑOL Reparación del viaducto de Fozières

S. Ammar y F. Cousteil

Con el fin de reconstituir de forma idéntica las traviesas de las dos pilas del viaducto de Fozières, que son objeto de una fisuración sumamente evolutiva, VSL France ha procedido a la puesta sobre pilotes provisionales del tablero de la estructura.

Las traviesas fueron cortadas en bloques, y a continuación reconstituidas, con objeto de volver a poner el tablero de la estructura sobre sus nuevos apoyos definitivos. Distintos trabajos de equipamiento y de reparación se han llevado a cabo en paralelo durante los siete meses de trabajo.

# Réhabilitation du pont de Labrau - Commune d'Allos (04)

**Sylvain Stocker**  
Conducteur de travaux  
de l'opération  
BRS

**Laurent Ullino**  
Chef de secteur  
BRS

Situé à 1800 m d'altitude, le pont de Labrau est un ouvrage en maçonnerie de 6,70 ml d'ouverture, 15,00 ml de long et 3,15 ml de large.

Il permettait aux piétons et charrettes le franchissement du Verdon situé dans une gorge encaissée (une vingtaine de mètres de profondeur).

Lors du développement de la station cet ouvrage a été doublé à l'amont par un pont en béton armé permettant le passage des véhicules et des piétons (figure 1).

Présentant des désordres structurels importants, fractures et fissures en intrados de voûte, joints de maçonnerie en mauvais état, déchaussement au droit des deux culées, cet ouvrage laissé par nos anciens menaçait à tout moment de s'effondrer. La commune d'Allos a donc décidé de lancer un programme de restauration tout en l'intégrant dans son plan d'aménagement de voie piétonne et cyclable au sein de la station de la Foux d'Allos.

Le programme de réparation a fait l'objet de deux phases distinctes : au printemps 2006 et au printemps 2007.

## ■ Printemps 2006 : mise en sécurité de l'ouvrage

Compte tenu du risque d'écroulement une ossature métallique provisoire a été mise en place, constituée par deux fermes en treillis de portée 19,20 ml et haute de 3,50 ml, à mi-hauteur, fixées sur des semelles en béton armé en tête de talus.

Photo 1

Ossature provisoire

Temporary frame



Ces deux fermes brêlées et contreventées dans le plan horizontal, permettaient de soulager la voûte en trois zones (une en clé et deux intermédiaires sur les flancs) (photo 1).

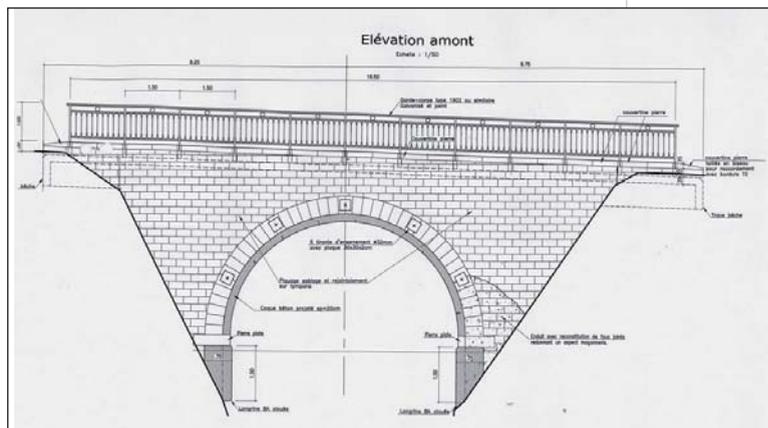


Figure 1  
Élévation des travaux à réaliser  
Elevation view of works to be performed

## ■ Printemps 2007 : réparation de l'ouvrage

### Les travaux de superstructures

Les opérations suivantes ont été effectuées :

- mise en œuvre de tirants passifs pour renforcer la paroi rocheuse sous les deux culées avec création de deux longrines béton armé de soutènement;
- réalisation d'une coque en béton projeté en face inférieure de voûte;
- rejointoiement des parapets et tirants d'enserrement.

### Les travaux de structure

Ils ont consisté à :

- couler un tablier béton armé;
- créer un système d'étanchéité par feuilles préfabriquées;
- poser un garde-corps type 1902;
- réaliser les travaux de voirie pour aménagement et sécurisation des accès.

La première difficulté, et non des moindres, a été d'accéder sous l'ouvrage de manière efficace et sécurisée.

Il a été décidé d'opter pour l'installation d'un complexe d'échafaudage tubulaire avec poutres treillis reprenant une plate-forme en partie basse. Ce complexe étant lui-même repris par la structure métallique provisoire. Cette prestation a été confiée à Dazin Diffusion spécialiste reconnu dans ce secteur (photo 2). Le problème d'accès levé, et compte tenu du contexte, il a fallu se doter de moyens à mettre en œuvre (technique et matériel) pour réaliser les travaux à partir d'une plate-forme légère. En concertation avec le bureau d'études Ares, l'entreprise a retenu du matériel



Photo 2

Échafaudage (Dazin Diffusion)  
Scaffolding (Dazin Diffusion)

### Réhabilitation du pont de Labrau - Commune d'Allos (04)

Photo 3

Forage des tirants  
Drilling for tension  
members



simple, léger, de faible encombrement mais éprouvé :

- marteaux T28 Montabert pour les forages montés sur des chariots de forage léger type CFL;
- machine à projeter voie sèche Meyco Piccola pour les travaux de béton projeté et de rejointoiement.

Compte tenu de toutes ces contraintes, le bureau d'études a pu définir les dimensionnements pour arriver aux solutions développées ci-après.

#### Première phase

Forage des tirants passifs à l'aide de barres Hischebeck 40/60 (longueur unitaire 1 ml à accouplement par manchonnage) équipée d'un taillant en croix carbure diamètre 70 mm. La rotopercussion est assurée par le marteau T28 Montabert monté sur CFL qui permet le guidage du forage. Vitesse de forage 1,50 ml/h. L'alimentation en air est assurée par un compresseur de 17000 l taré à 8 bars pouvant supporter l'utilisation de deux marteaux en parallèle.

Le forage ayant atteint la longueur définie, l'ensemble train de tiges et taillant est laissé en place. Après calfatage du forage, on injecte celui-ci à l'aide d'un coulis de ciment (de type CPA CEMI 52,5 ES) jusqu'à résurgence par l'évent mis en place en tête de forage. Reste

Photo 4

T28 sur CFL  
T28 on LFC



Photo 5

Ouvrage terminé. Vue amont  
Completed structure. Upstream view

alors à mettre en place les plaques de répartition (200 x 200 x 30) qui seront reprises par la longrine béton armé (photos 3 et 4).

#### Deuxième phase

Ferraillage des bèches ainsi que de l'intrados de la voûte. Le ferraillage a été coupé et façonné en usine puis assemblé sur le chantier suivant les plans remis par le bureau d'études. Les opérations de projection de béton à l'aide de la machine à projeter par voie sèche Meyco Piccola alimentée par un silo tampon posé en surface lui-même alimenté par des big-bags ont pu commencer alors. Le béton mis en place est un béton haute performance (Gunisec 40) de chez Socli. La technique de la voie sèche permet d'avoir des longueurs de tuyaux importantes sans risque d'obturation de ceux-ci. Le bétonnage fut effectué en deux passes de 10 cm. Le principal souci était de ramasser au fur et à mesure les pertes de projection pour ne pas surcharger la plate-forme de travail. Des coffrages ont été positionnés en rive pour réaliser une rive de voûte de bonne qualité.

#### Troisième phase

Nettoyage des parapets et piquage des joints maçonnés. Après soufflage des joints à l'air comprimé, rejointoiement mécanique à la machine à projeter voie sèche en utilisant un mortier haute performance à savoir le S522 VPI Technia. Les joints sont brossés au fur et à mesure de l'avancement pour donner du relief à la pierre et un aspect ancien.

#### Dernière phase

Elle consistait à réaliser cinq tirants d'enserrements traversant l'ouvrage de part et d'autre au niveau du bandeau afin d'éviter tous risques d'ouverture de l'ouvrage. C'est la technique du carottage diamant qui a été retenue permettant de ne pas soumettre l'ouvrage



Photo 6

Ouvrage terminé. Vue de côté  
Completed structure. Side view

à de fortes vibrations (a contrario de l'utilisation d'un marteau fond de trou) tout en contrôlant parfaitement la direction des forages. Suite aux carottages, des tiges Ischebeck 40/60 ont été mises en place et après calfatage, les forages ont été injectés au coulis de ciment. Des plaques de répartition (300 x 300 x 20) ont été placées au niveau des bandeaux et les écrous des tirants serrés après durcissement du mortier d'injection.

Restait alors à sabler la totalité de l'ouvrage pour faire ressortir ses pierres et lui redonner son lustre d'antan et à déposer la structure d'échafaudage ainsi que la structure métallique provisoire afin de permettre la poursuite des travaux de structure (photos 5 et 6).

Au total il a fallu près de 5 mois de travaux (entre juin et novembre 2007) pour donner à l'ancien pont de Labrau une seconde jeunesse, et l'arrivée des premières neiges n'a pas perturbé la fin de chantier.

Montant des travaux : 226 110,14 € TTC.

La réception effectuée le 30 novembre 2007, sans réserve, a donné entière satisfaction à la commune d'Allos. ■

#### LES PRINCIPAUX INTERVENANTS

##### Maître d'ouvrage

Mairie d'Allos

##### Maître d'œuvre, conseils

Omnis Structures Conseils - M. Peigue

##### Bureau études

Ares - M. Le Guillou

##### Entreprises

- Dazin Diffusion : accès et échafaudages
- Appia Alpes Sud : voirie et réseaux
- BRS : MM. Seddik et Bourhaleb (chefs de chantier)

## ABSTRACT

### Repair of Labrau Bridge - Allos district

S. Stocker, L. Ullino

Labrau Bridge, situated at an altitude of 1800 m, is a masonry structure with a clearance of 6,70 m, 15,00 m long and 3,15 m wide.

The district of Allos has initiated a programme to restore the structure and incorporate it in its plan for development of pedestrian and bicycle paths in the station of Foux d'Allos. The programme involved :

- Superstructure work :
  - > installation of passive tension members to reinforce the rock wall under the two abutments, and creation of two reinforced concrete supporting stringers,
  - > construction of a shotcrete shell on the underside of the vault. Repointing of surrounding parapets and tension members;
- Structural work :
  - > casting of a reinforced concrete deck,
  - > creation of a prefabricated sheet waterproofing system,
  - > installation of 1902 type guard rails,
  - > road works to improve and secure the approaches.

## RESUMEN ESPAÑOL

### Reparación del puente de Labrau - Municipio de Allos (04)

S. Stocker y L. Ullino

Ubicado a 1800 metros de altitud, el puente de Labrau es una obra de mampostería de 6,70 ml de luz, 15,00 ml de longitud y 3,15 ml de anchura.

El municipio de Allos ha iniciado un programa de restauración de la obra integrándola así en su programa de ordenación de vía de circulación peatonal y pistas para bicicletas en el marco de la estación de la Foux d'Allos. El programa ha sido objeto de :

- trabajos de superestructuras :
  - > implementación de tirantes pasivos para reforzar la pared de roca bajo los 2 estribos con creación de 2 vigas de hormigón armado de contención,
  - > ejecución de un casco de hormigón proyectado en pared inferior de bóveda. Nuevo relleno de las juntas de los pretiles y tirantes de acoplamiento;
- trabajos de estructura :
  - > relleno de un tablero de hormigón armado,
  - > creación de un sistema de hermeticidad mediante láminas prefabricadas,
  - > instalación de pretiles tipo 1902,
  - > trabajos en la vías de circulación para ordenación y protección de los accesos.

# ■ ■ ■ Rénovation partielle

Trois mois de travaux ont été nécessaires pour réhabiliter une partie de cet ouvrage hydroélectrique construit à la fin des années 1930.

La centrale électrique de Sabart, située sur le territoire de la commune de Quié, près de Tarascon-sur-Ariège (09), utilise les eaux du Vicdessos et de ses affluents, le Suc et le Siguier. La galerie d'aménée principale, longue de 13740 m, débouche dans une chambre de mise en charge qui alimente l'usine à partir de deux conduites forcées (diamètre 1550 mm) assurant une chute nette maximale de 221 m. La production d'énergie électrique s'effectue au travers de deux groupes (débit nominal de 8,5 m<sup>3</sup>/s par unité) type Francis double, à axe horizontal de 17 MW unitaire.

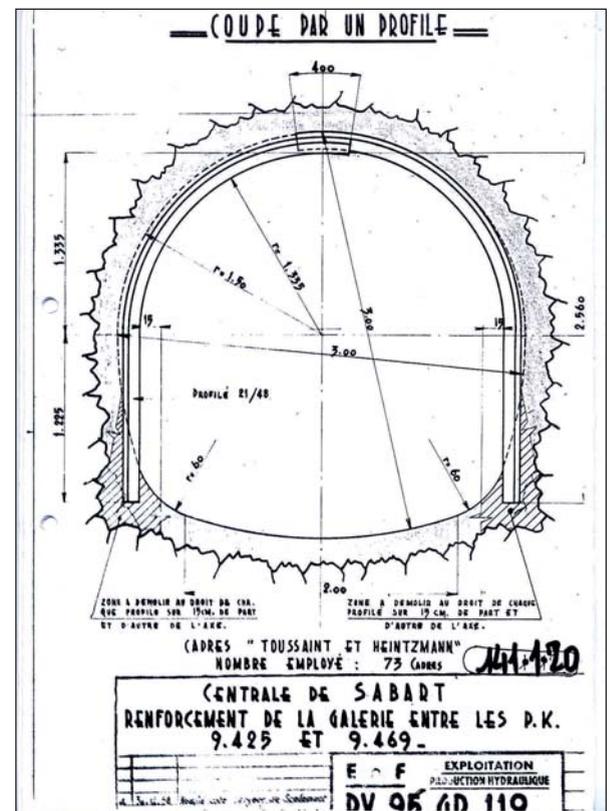
La galerie d'aménée principale, construite entre les années 1926 et 1929 en rive gauche du Vicdessos, entre la prise d'eau de Montréal à Auzat, à l'amont, et l'usine de Sabart, est également alimentée par les prises d'eau de Suc (PM 540) et de Siguier (PM 6454). L'objectif des travaux était d'assurer l'étanchéité de cet ouvrage béton ovoïde (3,00 x 3,00 m) à l'aval du PM 9500, dans une zone correspondant à des terrains soumis aux phénomènes de karstification où les enduits n'avaient été refaits que ponctuellement, en 1998.

Photos 1 et 2  
Enduit sur piédroits  
Rendering on side walls



Figure 1

Vue en coupe de la galerie  
Cross-section view of the gallery



# de la galerie de Sabart

Jean Viana  
Directeur  
ECM



Photo 3

Enduit sur voûte  
*Rendering on vault*

## ■ Conditions d'intervention étroites

Les travaux de réparation s'inscrivaient dans le cadre d'un programme d'entretien normal, les problèmes de fuites et de dégradations observés sur les bétons relevant d'un phénomène d'usure normale.

Dans la pratique, le projet était scindé en deux lots parfaitement distincts, cette séparation n'engendrant aucun problème de co-activité à l'intérieur de la galerie. Les travaux se déroulant en 2 x 8 nous avons dû, eu égard à l'isolement du site, créer une véritable base vie, commune aux deux entreprises, équipée de bungalows et d'un réfectoire, avec tous les problèmes de logistique que sous-tend une telle installation.



Photo 4

Ferrailage du radier  
*Reinforcement of the foundation raft*

L'accès à la galerie s'effectuant à travers les fenêtres qui ont servi à sa construction, des travaux de nettoyage préparatoires ont été nécessaires dans quelques zones particulières. Notamment au niveau de la fenêtre 16 à laquelle on parvient par l'intermédiaire d'une galerie d'une centaine de mètres de longueur, perpendiculaire à l'ouvrage principal.

Ce tronçon, brut de déroctage, qui n'avait pas servi depuis une vingtaine d'années a dû être préalablement débarrassé de tous les matériaux, issus de micro-éboulements, susceptibles d'entraver la progression des hommes et des machines. Le béton, élaboré à l'extérieur, était en effet transporté à l'intérieur de la galerie par l'intermédiaire de petits tombereaux autobasculants équipés de pots catalysés.



Photo 5

Génie civil prise d'eau  
*Water intake civil engineering*

### Rénovation partielle de la galerie de Sabart

► L'ensemble de ces opérations de nettoyage, effectuées à la mini-pelle, a nécessité parfois des interventions d'hélicoptage afin d'acheminer les machines dans les zones d'accès délicat.

Les travaux proprement dits, qui consistaient donc à rénover l'intrados, les piédroits et le radier de l'ouvrage, ont été réalisés en traditionnel après décapage à haute pression, entre 400 et 800 bars, du support dégradé.

Le béton et le mortier, appliqués en épaisseurs de 5 à 8 cm, ont été « adjuvantés » à l'acétate de polyvinyle afin que leur résistance soit compatible avec l'agressivité de l'eau. Sur le plan pratique, la galerie était ventilée au moyen d'une ventilation forcée afin d'autoriser l'emploi des matériels à moteur diesel, nos travaux ayant mobilisé une équipe d'une trentaine de personnes très qualifiées, habituées à intervenir dans les milieux humides. ■

#### FICHE TECHNIQUE

**Maître d'ouvrage**

EDF

**Maître d'œuvre**

EDF

**Entreprises**

ECM-Resirep

**Durée des travaux**

3 mois

**Montant du marché**

1,5 million d'euros (HT)

#### ABSTRACT *Partial renovation of the Sabart gallery*

*J. Viana*

*This project, which is part of the normal maintenance programme for the structure, involved repairing a part of the structure located in ground subjected to karstification phenomena. Given the site's isolation, a construction camp had to be created, with the equipment being sometimes brought in by helicopter transport in certain areas of limited accessibility.*

#### RESUMEN ESPAÑOL *Renovación parcial de la galería de Sabart*

*J. Viana*

*Esta obra, que se inscribe en el programa de mantenimiento normal de la estructura, consistía en reparar una de las partes de la estructura situada en los terrenos sometidos a fenómenos de karstificación. El carácter aislado del sitio ha precisado la creación de una base de vida, el transporte del material se efectúa a veces por helicóptero en ciertas zonas de accesibilidad restringida.*

*Resumé texte*

# RD 142 – Réfection des trois ponts des Aires de la ville de Pons en Charente-Maritime

**Michel Nicoli**  
Président  
BTPS Atlantique

**Christian Legouic**  
Direction  
des infrastructures  
du département  
Conseil général 17

**Ville de Pons**

Les travaux de réfection des trois ponts des Aires sur la commune de Pons en Charente-Maritime s'inscrivent dans une opération globale de remise en état de la RD 142 également appelée rue Charles de Gaulle.

La situation du chantier dans le périmètre d'un monument historique a nécessité que le projet soit confié à un groupement constitué d'un architecte, d'un bureau d'études routières et d'un bureau d'études de génie civil, en collaboration avec le service des infrastructures du Conseil général (17).

Ce chantier s'inscrit également dans le cadre du projet municipal « Pons cité médiévale » qui prévoit des travaux importants de réaménagement de la ville.

## ■ Une situation et une histoire exceptionnelles

La cité de Pons se dresse au cœur du vignoble du Cognac dominant la plaine vallonnée du pays de Haute-Saintonge. Construite sur la falaise rocheuse, elle constitue un promontoire escarpé surplombant les bas marécageux de la rivière la Seugne et son confluent la Soute.

Les origines de la ville remontent à la préhistoire. Établie sur un nœud de voies routières, blottie sur un éperon escarpé baigné à son pied par une rivière, elle est très rapidement envahie par les premières civilisations pastorales du Néolithique. Par la suite, le site sera occupé par un oppidum gaulois puis par les Romains. Le site devient un point stratégique pour le contrôle des voies de circulation traversant la zone marécageuse. Au VIII<sup>e</sup> siècle, on construit un château fort qui commandera les alentours. Au XII<sup>e</sup> siècle, le donjon rasé par Richard Cœur de Lion sera reconstruit quelques années plus tard par le seigneur de Pons. À la même époque, sont construits l'hôpital des Pèlerins et l'église St-Vivien, des sites considérés importants dans le pèlerinage vers St-Jacques-de-Compostelle. La cité sera ensuite convoitée par les Anglais et les Français et changera de camp à plusieurs reprises, puis elle sera ravagée par les guerres de Religion.

## ■ Des ouvrages de franchissement au cœur de la commune

Trois ouvrages situés dans la commune permettent à la RD 142 de franchir les différents bras de la rivière la

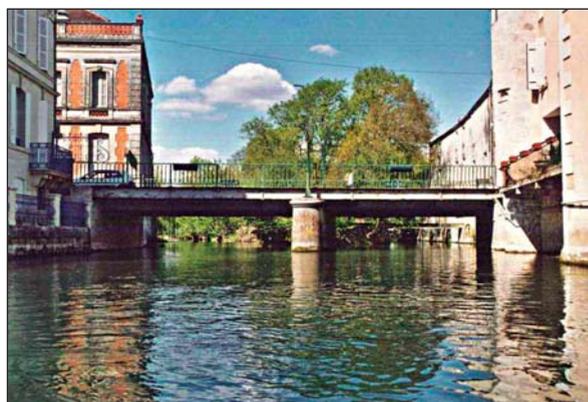


Photo 1

Ouvrage initial

Initial structure



Photo 2

Recépage de la maçonnerie de la pile existante

Cutting off the masonry of the existing pier

Seugne. L'origine de ces ponts est supposée antérieure au XIV<sup>e</sup> siècle.

Vers 1870, les ponts, jusqu'alors en voûtes de pierres, seront reconstruits avec l'avènement du chemin de fer. Les fondations seront conservées et les voûtes seront remplacées par des structures mixtes poutrelles acier - voûtains brique.

Les fondations de ces ouvrages ne sont pas connues, mais on suppose qu'elles sont superficielles ou constituées d'un platelage bois reposant sur des pieux de faible longueur.

- Pont n° 1 : portée d'environ 10 m, structure mixte poutrelles acier - voûtains brique.
- Pont n° 2 : deux travées, portées d'environ 20 m avec une pile intermédiaire en rivière, structure mixte reconstruite en 1982, poutrelles acier - tablier béton armé.
- Pont n° 3 : portée d'environ 9 m, structure mixte poutrelles acier - voûtains brique.

### RD 142 – Réfection des trois ponts des Aires de la ville de Pons en Charente-Maritime

Photo 3

Mise en place des poutres précontraintes (PRAD)

*Placing prestressed (bonded post-tensioned) beams*



Photo 4

Confection des bossages sur le chevêtre de la pile et habillage en pierre

*Making anchor blocks on the pier head and dressing with stones*



Photo 5

Pose des éléments préfabriqués des encorbellements courbes

*Placing the prefabricated elements of curved cantilevers*

Une étude comparative des différentes solutions possibles, allant de la réfection des ouvrages sans modification de la structure, jusqu'à la démolition partielle et reconstruction des ouvrages depuis les fondations, a montré qu'il était préférable de choisir cette dernière solution :

- démolition de la partie supérieure des culées et des piles pour mise en œuvre des chevêtres reposant sur des micropieux et habillage des chevêtres avec les pierres de récupération des démolitions;
- réalisation des tabliers avec des poutres précontraintes (PRAD);
- réalisation des trottoirs en encorbellement avec placage bois et pierres de taille sur les corniches.

#### ■ Déroulement et phasage des travaux

Du fait de l'obligation de maintenir en permanence la circulation des piétons et l'accès des riverains à leur domicile, il a fallu mettre en place un phasage des travaux.

#### ■ Inspection et réhabilitation

Lors des différentes visites d'inspection des ouvrages, de nombreux désordres ont été identifiés. Les principales pathologies qui ont conduit à la conception du projet de reconstruction des ouvrages sont les suivantes : nombreux points de corrosion sur l'ensemble de la structure métallique et en particulier des poutres de rives, forte corrosion au niveau des ancrages des poutres dans les culées, mauvais état des assemblages par rivets, oxydation des éléments métalliques, désordres dans les maçonneries, traces d'éclatement des pierres, disjointoiements, épaufrures, manque d'étanchéité du tablier.

### Phase 1 : travaux sur l'ouvrage n° 2 (le plus grand)

Démolition et reconstruction de l'ouvrage n° 2. La circulation piétonne se fait par une passerelle provisoire mise en place avant fermeture totale de l'ouvrage et positionnée dans le prolongement du trottoir existant. Les ouvrages n° 1 et n° 3 sont en service et ouverts à la circulation des véhicules légers et à la circulation piétonne, permettant ainsi de desservir les habitations et commerces voisins.

Les travaux se sont déroulés en plusieurs étapes :

- réalisation des micropieux dans les culées et la pile centrale;
- pose de la passerelle provisoire piétonne après réalisation de ses appuis provisoires;
- fermeture de l'ouvrage;
- dévoiement de tous les réseaux passant sous le pont et mise en place dans la passerelle;
- démolition de l'ouvrage existant;
- réalisation des terrassements au droit des nouveaux appuis, et soutènements provisoires au droit des habitations riveraines;
- réalisation des nouveaux appuis (chevêtres et sommiers sur culées et pile existante);
- réalisation du tablier posé sur appareils d'appuis afin de supprimer les vibrations dans les maisons attenantes;
- dans le même temps, habillage en maçonnerie des chevêtres et sommiers;
- réalisation des infrastructures du pont (corniches, étanchéité, trottoirs, bordures, chaussée et revêtements);
- mise en service de l'ouvrage et dépose de la passerelle provisoire piétonne et de ses appuis.

### Phase 2 : travaux simultanés sur les ponts n° 1 et n° 3

Démolition et reconstruction de l'ouvrage n° 1 et en parallèle, travaux sur l'ouvrage n° 3 par demi-chaussée (côté amont) :

#### FICHE TECHNIQUE

##### **Maître d'ouvrage**

Conseil général de Charente-Maritime (17)

##### **Maître d'œuvre**

Direction des Infrastructures, Conseil général de Charente-Maritime (17)

##### **Entreprise mandataire**

BTPS Atlantique, agence des Charentes - 17800 Pons

##### **Montant des travaux**

900000 euros TTC



Photo 6

Rejointoiement des maçonneries en pierre

*Repointing of stone masonries*

- l'ouvrage n° 1 est fermé à la circulation routière;
- la circulation piétonne se fait par une passerelle provisoire mise en place avant fermeture totale de l'ouvrage et positionnée dans le prolongement du trottoir existant;
- les ouvrages n° 2 et n° 3 sont en service et ouverts à la circulation des véhicules légers et à la circulation piétonne; les habitations et commerces voisins sont ainsi desservis;
- la circulation sur l'ouvrage n° 3 se fait en alternat par feux permettant ainsi de traiter la demi-chaussée de l'ouvrage (côté amont).

### Phase 3 : travaux simultanés sur les ponts n° 1 et n° 3

Achèvement des travaux sur l'ouvrage n° 1 et en parallèle, travaux sur la demi-chaussée de l'ouvrage n° 3 (côté aval). L'ouvrage n° 1 est fermé à la circulation routière.

La circulation piétonne se fait par une passerelle provisoire (cf. phase 2).

Les ouvrages n° 2 et n° 3 sont en service (cf. phase 2). La circulation sur l'ouvrage n° 3 se fait en alternat par feux permettant ainsi de traiter la demi-chaussée côté aval.

Les véhicules circulent sur le nouvel aménagement de l'ouvrage.

### ■ Un chantier aux difficultés et contraintes multiples...

L'environnement particulier du chantier a nécessité la mise en place de solutions techniques de sécurité,

### RD 142 – Réfection des trois ponts des Aires de la ville de Pons en Charente-Maritime

telles que l'utilisation d'éléments préfabriqués pour réduire les risques liés au travail au-dessus d'une rivière et les temps de séchage, ainsi que la mise en place d'un système d'étalement métallique suspendu sous l'ouvrage pour pose des dalles de trottoir.

De même, les équipes de travaux ont dû faire face à de nombreuses contraintes et difficultés :

- travaux en centre-ville (difficulté d'accès, forte circulation piétonne, zones de stockage des matériaux réduites au minimum...);
- travaux en surplomb de la rivière;
- travaux en contact avec le bâti existant : les maisons en bordure des ouvrages reposent sur les poutrelles métalliques des ponts;
- obligation de mettre en place une passerelle et de maintenir en permanence une circulation piétonne;
- obligation de démolir les ouvrages avec soin afin de pouvoir récupérer des pierres de l'ouvrage pour l'habillage des chevêtres;
- trottoirs en encorbellements de largeurs variables de 0 à 2,00 m;
- ouvrages biais avec des angles différents pour chaque pile et culée;
- délai d'exécution réduit (7 mois).

#### ■ ...mais valorisant pour la commune !

Notons que tout au long de l'avancement du chantier, l'entreprise BTPS s'attache à faire découvrir sur le terrain les métiers de génie civil aux étudiants du lycée technique de Pons, par le biais de visites régulières, orchestrées par le corps professoral de l'établissement. ■

#### ABSTRACT

##### *County road RD 142 – Repair of the three bridges of Aires in the town of Pons*

*M. Nicoli, Ch. Legouic, Town of Pons*

*The repair works on the three bridges of Aires in the Pons district of Charente-Maritime form part of an overall project for reconditioning of county road 142, also called Charles de Gaulle Street.*

*Since the site is located in the area of an historic monument, the project had to be entrusted to a consortium consisting of an architect, a highway engineering office and a civil engineering office, in cooperation with the infrastructure department of the « Conseil général » (County Council).*

*This project also forms part of the municipal project « Pons Mediaeval City », which plans major renovation works for the town.*

#### RESUMEN ESPAÑOL

##### *Carretera departamental RD 142 – Refacción de los tres puentes de los Aires de la ciudad de Pons (17)*

*M. Nicoli, Ch. Legouic y Ciudad de Pons*

*Los trabajos de refacción de los tres puentes de los Aires en el municipio de Pons en Charente-Maritime se inscriben en una operación global de reparación de la carretera departamental 142 también denominada calle Charles de Gaulle.*

*La situación de la obra en el perímetro de un monumento histórico ha precisado que el proyecto sea adjudicado a una agrupación formada por un arquitecto, una oficina de estudios viales y una oficina de estudios en ingeniería civil, en colaboración con el servicio de las infraestructuras de la diputación provincial (17).*

*Esta obra se inscribe además en el marco del proyecto municipal « Pons ciudad medieval » que proyecta diversos trabajos importantes de reordenación urbanística.*

# Reconstruction à l'identique d'une route en encorbellement

**Matthieu Zurdo**  
Directeur  
STPL

L'ouvrage, bâti en surplomb au cœur du village des Pennes-Mirabeau, a été entièrement démoli puis reconstruit en recréant l'aspect initial. Une intervention délicate, en site urbain, qui a nécessité des moyens de protection importants ainsi que l'utilisation de techniques constructives à l'ancienne.

La fontaine de Vento (cf. encadré « Un aqueduc taillé dans la roche »), qui domine l'actuelle place Léon Depeyres au cœur de la commune des Pennes-Mirabeau, est un ouvrage classé figurant au patrimoine des Monuments Historiques. Lorsque les experts de l'Association des Fontainiers de France viennent l'ausculter, en début d'année 2007, ils constatent que si son état justifie bien quelques travaux de rénovation, le danger potentiel vient surtout de la route en encorbellement, construite dans les années 1920, qui la surplombe. La chaussée est en effet partiellement affaissée par endroits, l'ensemble de la structure métallique laissant apparaître, suite à la corrosion des aciers, d'importants désordres. L'origine de ces problèmes, qui n'a pas été formellement identifiée, est probablement due à des fuites dans la conduite d'eau potable qui alimente la commune ou d'une mauvaise qualité des aciers initiaux.

## ■ Démolition à la petite cuillère

Devant cette configuration à risque, le bureau d'études décida donc de lancer un projet de mise en sécurité de



Photo 1

La route de 3 m de largeur est un ouvrage en encorbellement qui surplombe la place Léon Depeyres au cœur de la commune des Pennes-Mirabeau. The road, 3 m wide, is a cantilever structure overhanging Léon Depeyres square in the heart of the Pennes-Mirabeau district

la route en balcon, l'ampleur des dysfonctionnements justifiant alors une destruction pure et simple suivie d'une reconstruction à l'identique.

Dans la pratique, l'ouvrage initial de 21,40 m de long et 3 m de large, se présentait sous la forme d'une structure mixte en acier et voûtains en briques. Il reposait simplement sur la roche, côté falaise, la partie en encorbellement étant constituée, quant à elle, d'une poutre métallique lancée entre deux poteaux fonte, en tête, le troisième appui, pratiquement central, étant formé par la fontaine en pierres de taille.

Des traverses métalliques, entre lesquelles étaient réalisés des voûtains en briques remplis de tout-venant, venaient compléter l'ensemble. La première phase des travaux, qui consistait donc en une démolition totale de l'existant, a nécessité de sécuriser l'ensemble du site

Photo 2

La structure repose sur trois appuis principaux, dont la fontaine de Vento, un ouvrage classé figurant au patrimoine des Monuments historiques

The structure rests on three main supports, including the Vento Fountain, a structure classified as a national heritage Historic Monument

## Un aqueduc taillé dans la roche

Si les habitants de la commune des Pennes-Mirabeau sont aujourd'hui alimentés par l'eau de la Durance, amenée par le canal de Marseille, ils ne disposaient au XVIII<sup>e</sup> siècle que des eaux de pluie recueillies dans des citernes. En 1762, le marquis Louis Nicolas de Vento décide d'améliorer ce confort spartiate en conduisant, jusqu'au village, une source qui lui appartenait, celle-ci coulant dans le vallon de la Marthe, au nord de la commune. Il faudra pour cela construire un aqueduc souterrain de 400 toises (environ 800 m), contournant les collines, le canal creusé à ciel ouvert étant ensuite couvert d'une voûte de pierre en plein cintre, dans laquelle seront pratiqués des regards à intervalle régulier.

La principale difficulté de cet ouvrage, gigantesque pour l'époque, fut la taille obligée d'une galerie de 16 toises (environ 32 m) dans le rocher, sous les remparts, sur une distance d'une centaine de mètres. Pas de guidage laser, bien entendu, les mineurs qui travaillaient simultanément au nord et au midi en suivant la direction de leur boussole opérant néanmoins une jonction quasi parfaite, sur la même ligne, avec un très léger décalage altimétrique.



## Reconstruction à l'identique d'une route en encorbellement

Photo 3

L'étroitesse des ruelles a fortement compliqué les conditions d'accessibilité la grue automotrice ayant dû accéder au chantier en marche arrière

*The narrow alleyways greatly complicated access conditions; the self-propelled crane had to enter the construction site in reverse gear*



Photo 4

Le squelette métallique est constitué d'une poutre longitudinale principale IPE 400, assemblé en deux morceaux, et d'un réseau de poutrelles transversales secondaires en IPE 300

*The metallic skeleton consists of an IPE 400 main longitudinal beam, assembled in two pieces, and a system of secondary cross joists in IPE 300*



Photo 5

L'ouvrage, entièrement démoli, a été reconstruit à l'identique en faisant appel à des techniques d'assemblage métallique à l'ancienne

*The structure, after being completely demolished, was restored using traditional steel assembly techniques*

eu égard à son caractère urbain. Un échafaudage de 6 m de hauteur, entièrement bâché et capable de reprendre 1 t/m<sup>2</sup> a ainsi dû être installé, la voie située sur la partie rocheuse, étant maintenue en circulation durant tous les travaux. La structure en encorbellement n'étant pas capable de reprendre le poids d'une pelle équipée d'un BRH, la démolition s'est déroulée à la main, au brise-roche hydraulique, les 40 m<sup>3</sup> de matériaux étant également évacués manuellement, à la petite cuillère!

### ■ Rivetage à l'ancienne

La reconstitution du mur de soutènement, côté falaise, a nécessité l'exécution d'un coffrage bois fin et minutieux afin de pouvoir épouser la forme du rocher, l'ouvrage étant par ailleurs ancré au moyen de barres HA (diamètre 14 mm) implantées tous les 20 cm.

Afin de retrouver son aspect initial, en pierres de taille,

le béton (C30/37) a reçu un traitement manuel en parement bouchardé.

La structure métallique a également fait l'objet d'une attention particulière au niveau des assemblages mécaniques visibles, tous les rivets, forgés à l'ancienne en atelier, étant rivetés à chaud en respectant les techniques de l'époque. Le squelette métallique, réalisé en partenariat avec Atekam, est formé de deux parties qui ont été assemblées en place, au moyen d'une grue automotrice de 120 t.

L'étroitesse des ruelles a, il faut le souligner, fortement compliqué les conditions d'accessibilité, l'engin n'ayant pu accéder au chantier qu'en exécutant une marche arrière sur environ 300 m.

Chacun des deux morceaux de l'ossature est lui-même constitué d'une poutre principale en IPE 400 revêtue d'une tôle de 15 mm soudée, avec goussets et contreventements sur toute la longueur. Les 17 voûtains ont été recréés à l'aide de coffrages circulaires en demi-lune, fabriqués spécialement pour le chantier, venant



Photo 6

La reconstitution du mur de soutènement, côté falaise, a nécessité l'exécution d'un coffrage bois fin et minutieux afin de pouvoir épouser la forme du rocher

*Reconstruction of the retaining wall, on the cliff side, required the delicate, meticulous execution of wooden formwork to match the shape of the rock*

prendre appui sur les IPE 300 qui forment l'ossature transversale de la structure, le système d'échafaudage étant utilisé comme dispositif d'étaie.

À signaler que les travaux de réhabilitation de la fontaine, qui faisaient l'objet d'un marché particulier, ont été menés concomitamment, cette particularité nécessitant un phasage particulier et précis avec l'entreprise spécialisée en charge du projet. ■

#### FICHE TECHNIQUE

**Maître d'ouvrage**

Commune des Pennes-Mirabeau

**Maître d'œuvre**

BR Ingénierie Méditerranée

**Bureau de contrôle**

Veritas

**Coordonnateur SPS**

AASCO

**Entreprises**

Groupe STPL-ADS

**Durée des travaux**

3 mois

**Montant du marché**

268000 euros (HT)

### ABSTRACT Restoration of a cantilever road

M. Zurdo

*The renovation works on this cantilever road, which overhangs the central square of Pennes-Mirabeau district, required complete demolition of the structure and the establishment of site safety conditions. The steel frame, consisting of two sections formed of a main beam in IPE 400 and a cross system in IPE 300, was assembled in situ employing traditional riveting techniques. For identical reconstruction of the structure, moreover, special formwork had to be produced to recreate the shape of the jack arches and restore the original appearance of the retaining wall.*

### RESUMEN ESPAÑOL Reconstrucción de manera idéntica de una carretera en voladizo

M. Zurdo

*Los trabajos de rehabilitación de esta carretera en voladizo, que domina la plaza mayor del municipio de Les Pennes-Mirabeau, precisaron la demolición total de la obra así como la puesta en seguridad del emplazamiento. La estructura metálica, compuesta por dos tramos formados por una viga principal en IPE 400 y de una red transversal en IPE 300, fueron ensamblados in situ recurriendo a diversas técnicas de remachado según el método antiguo. Por otra parte, la reconstrucción de manera idéntica de la obra ha precisado la ejecución de encofrados especiales con objeto de volver a crear la forma de las bovedillas y permitir así reencontrar el aspecto inicial del muro de contención.*

# Réhabilitation d'une à Florange en Moselle

**La cokerie de l'usine de Florange d'ArcelorMittal a fait l'objet d'importants travaux de maintenance. La cheminée surtout, haute de 125 m, présentait d'impressionnants signes de fatigue.**

**C'est la société Etandex qui a emporté l'appel d'offres lancé par ArcelorMittal et qui a exécuté les travaux de réparation et de renfort.**

**Les conditions d'accès, les vents violents, les panaches de vapeurs intermittents, l'importance des mesures de sécurité ont créé des contraintes importantes.**

**Le professionnalisme des équipes, l'importance des moyens déployés, la rigueur de la préparation du chantier et la coopération efficace avec le maître d'ouvrage ont permis d'éviter les mauvaises surprises et les contretemps.**

**E**n 2007, la cokerie de l'usine de Florange d'ArcelorMittal a fait l'objet d'importants travaux de façon à en garantir la pérennité jusqu'en 2025.

La cheminée qui permet d'évacuer les fumées de la batterie de 64 fours a été longuement inspectée : si les analyses par thermographies ont montré que les parois internes étaient saines, en revanche, la paroi extérieure était fortement dégradée à cause des conditions climatiques et des panaches de vapeur émanant de la tour d'extinction, située à proximité.

Cette tour, haute de 125 m, date de 1978. Elle présentait d'impressionnants signes de fatigue :

- béton fortement dégradé principalement sur la partie basse, sur laquelle un filet de protection avait été posé;
- fissures importantes dans le béton;
- parties métalliques abîmées : échelles à crinoline et plates-formes intermédiaires.

C'est la société Etandex qui a emporté l'appel d'offres lancé par ArcelorMittal et qui a exécuté les travaux. Ceux-ci se sont achevés en janvier 2008.

## ■ Plate-forme

Compte tenu de l'ampleur des travaux à réaliser et des contraintes drastiques de sécurité, la seule option possible en termes d'échafaudage consistait à monter une plateforme élévatrice autour de la cheminée, coulissant sur des mats scellés dans la cheminée et accessible par lift.

Avant de monter la plate-forme, il a fallu protéger les équipements situés au pied de la cheminée contre la

chute d'outils ou de gravats. Un échafaudage de pied a été installé avec un renfort conséquent en partie haute. Ensuite, la plate-forme a été montée par étape :

- un premier mât a été placé et fixé sur la cheminée;
- une demi-plate-forme a été montée à l'aide d'une grue puis est venue coulisser sur le mât en place;
- un deuxième mât a été coulé dans la demi-plate-forme et fixé sur la cheminée;
- la plate-forme a été finalisée;
- les éléments de mats ont ensuite été rajoutés au fur et à mesure jusqu'à atteindre le sommet.

## ■ Purge des bétons

La première étape des travaux consistait à purger les bétons dégradés. Deux difficultés sont apparues :

- un filet de protection avait été mis en place sur la partie la plus exposée au panache (au sud) afin d'éviter la chute des morceaux de béton. Pour définir les zones à traiter et pour pouvoir les réparer, il fallait enlever ce filet sans mettre en cause les conditions de sécurité;
- il fallait aussi s'assurer que la purge des bétons abîmés et la mise à nu des aciers n'allait pas fragiliser la tour pendant la durée des travaux.

La mise en sécurité de la tour pendant la durée des travaux s'est donc faite en deux étapes :

- le filet de protection a été remplacé petit à petit par des cerces afin de maintenir provisoirement les blocs de béton;
- un phasage précis des travaux, établi sur la base d'un calcul complet de la structure, a permis de traiter les zones les unes après les autres sans fragiliser la tour qui est exposée à des vents violents.

### Photo 1

**Paroi extérieure de la cheminée. Zone très dégradée avant les travaux**

*Outer skin of the chimney. Area in very poor condition before the works*



# cheminée de cokerie

Jean-Noël Louchart  
Directeur d'Exploitation  
Etandex

Une fois les cerces en place, les morceaux de béton qui se détachaient et les parties cloquées ont pu être démolis à l'aide de burineurs. Une équipe Etandex est alors intervenue afin de dégager les aciers à l'aide d'une machine ultra-haute pression de 2500 bars. Tout de suite après le passage de l'UHP, le ferrailage existant a été traité pour éviter son oxydation.

## ■ Réparation des bétons

Après la démolition des bétons dégradés, il a fallu reconstituer le ferrailage sur les zones purgées : les armatures horizontales ont été changées et les verticales ont été renforcées. Chaque nœud de ferrailage a été ligaturé et des connecteurs ont été réalisés à partir de Ø 6 coudés de 20 cm scellés dans la cheminée.

Le renfort par béton projeté s'est fait principalement de nuit à cause de la température élevée de la cheminée. Entre chaque passe, les bétons ont été soigneusement lavés au nettoyeur HP pour nettoyer le support des résidus de la cokerie et permettre une bonne hydratation de la passe précédente.

Etandex a choisi d'effectuer ces réparations par projection par voie humide en trois étapes principales :

- réalisation d'un gobetis qui sert à créer une bonne accroche pour le mortier de réparation et qui est projeté sur le support à l'aide d'un sablon;
- projection du mortier de réparation en plusieurs passes (au moins deux intermédiaires et une finition compte tenu de l'épaisseur moyenne : 15 cm). Après chaque projection, le béton est égalisé à l'aide d'une taloche crantée;
- projection d'une dernière couche de béton finie à la taloche.

## ■ Traitement des fissures

Pour traiter les fissures du béton, la cheminée a dû être nettoyée et la peinture de la cheminée décapée à la machine UHP. L'injection des fissures a permis de rétablir la continuité du béton. La haute température du béton a empêché l'utilisation des résines souvent utilisées pour ce type de travaux.

La première étape a consisté à installer les éléments pour l'injection de ciments ultrafins dans les fissures. Ces dernières ont été cachetées pour empêcher les débordements du coulis.

Pour éviter la dessiccation du coulis, les fissures ont été abondamment injectées d'eau.

Les fissures importantes où le béton se délitait ont été traitées par calfeutrement : repiquage de la fissure puis application à refus de latex et d'un mortier de réparation.



Photo 2  
Purge des bétons  
Concrete bleeding



Photo 3  
Paroi extérieure  
de la cheminée une fois  
les bétons purgés  
Outer skin  
of the chimney once  
the concrete has been  
bled

## ■ Protection des bétons

Les dernières étapes du chantier ont consisté à :

- appliquer un inhibiteur de corrosion sur l'ensemble de la paroi pour protéger les aciers de ferrailage qui n'avaient pas été mis à nu;
- rétablir l'état de surface de la cheminée « crevassé » par les décapages à l'UHP, à l'aide d'un lissage à la résine époxy thixotropée;
- remettre en peinture la cheminée avec une résine PU aliphatique capable de résister au panache de vapeurs qui l'entourent régulièrement.

## ■ Conclusion

Si les travaux de réparation menés par Etandex sur ce chantier étaient classiques, l'environnement de travail

## Réhabilitation d'une cheminée de cokerie à Florange en Moselle



Photo 4

Plate-forme élévatrice et panache de vapeur  
*Lifting platform and steam plume*

l'était par contre beaucoup moins : les conditions climatiques et d'accès à 125 m de haut, les panaches de vapeurs intermittents, les mesures de sécurité drastiques, ont représenté des contraintes importantes. Le professionnalisme de nos équipes, l'importance des moyens déployés, la rigueur de la préparation du chantier et la coopération efficace avec le maître d'ouvrage ont permis d'éviter les mauvaises surprises et les contretemps. ■

### ABSTRACT

#### *Repair of a coking plant chimney at Florange, Moselle*

J.-N. Louchart

*The coking plant of ArcelorMittal's Florange factory has undergone extensive maintenance work. The chimney in particular, 125 m high, showed impressive signs of fatigue.*

*The company Etandex won the tender invited by ArcelorMittal and performed the repair and strengthening work.*

*The access conditions, violent winds, intermittent steam plumes and significant safety measures generated major constraints.*

*The professionalism of the personnel, the extensive resources deployed, the rigorousness of site preparation and effective cooperation with the owner made it possible to avoid unpleasant surprises and problems.*

### RESUMEN ESPAÑOL

#### *Reparación de una chimenea en una fábrica de coque en Florange en el departamento de Mosela*

J.-N. Louchart

*La fábrica de coque en la planta de Florange de ArcelorMittal ha sido objeto de importantes trabajos de mantenimiento, sobre todo, la chimenea, con una altura de 125 m, presentaba impresionantes signos de fatiga.*

*La licitación lanzada por ArcelorMittal se ha adjudicado a la empresa Etandex que ha ejecutado los trabajos de reparación y de refuerzo.*

*Las condiciones de acceso, vientos violentos, neblinas intermitentes, importancia de las medidas de seguridad han venido a crear diversos imperativos importantes. El profesionalismo de los equipos, la importancia de los medios desplegados, el rigor de la preparación de la obra y la eficaz cooperación con la entidad contratante han permitido evitar las malas sorpresas y los contratiempos.*

# Lifting pour le pont d'Ebebda au Cameroun



**Georges Oliete**  
Directeur de Chantier  
Razel

**Ce chantier de réparation assez classique, situé sur le grand fleuve camerounais, se distingue par des conditions logistiques difficiles qui réclament des capacités d'anticipation rigoureuses. Autre contrainte : l'environnement météo qui nécessite un contrôle rigoureux pour l'application des produits.**

**L**e chantier du pont d'Ebebda s'inscrit dans le cadre d'un important projet de réhabilitation qui comporte trois autres ouvrages : deux viaducs de 100 et 150 m de longueur, sur la route de Bangangté (chef-lieu du département de Ndé dans la province de l'Ouest), et le viaduc sur le Noun (150 m), à la périphérie de Foubot (chef-lieu du département de Mbapit, sur l'axe Bafoussam-Foumban).

Il s'agit d'un projet pilote, mené par le gouvernement camerounais; le potentiel des ouvrages à réhabiliter, étant estimé à environ 1 000 ponts sur l'ensemble du territoire. Le pont d'Ebebda est, à ce titre, un chantier stratégique et de loin le plus important puisqu'il représente 60 % du montant total du marché (7,7 millions d'euros TTC financés par le groupe bancaire allemand KfW), la durée des travaux étant de 20 mois pour l'ensemble des quatre ouvrages.

## ■ Approvisionnements difficiles

Il s'agit d'une structure en béton précontraint de 1020 m de longueur, construit par Colas GTE en 1982, comportant 30 travées qui enjambent la Sanaga, le plus grand fleuve du Cameroun.

Ce chantier de réparation classique est assez important en termes de surface (38 000 m<sup>2</sup>) et de volumes de produits appliqués (cf. encadré « Les principales quantités »), l'objectif principal étant de lutter contre les désordres provoqués par le phénomène de carbonatation.

L'accès s'effectue par l'intermédiaire de passerelles sur piles et de passerelles sur travées. Ces équipements sont réalisés sur place par l'entreprise locale Cométal, de Douala, à laquelle a également été sous-traité le

### LES PRINCIPALES QUANTITÉS

- Sika Ferrogard 903 : 15 t
- Sika Monotop 610 AC : 700 kg
- Sikatop 107 : 31 t
- Sikatop 122F : 20 t
- Sikatop 121 surfacage : 17 t
- Sikagard 550 W : 17 t



Photo 1

L'important projet de réhabilitation en cours comporte également deux viaducs de 100 et 150 m de longueur, sur la route de Bangangté

*The major renovation project underway also includes two viaducts of length 100 and 150 m, on the Bangangte road*



Photo 2

Le pont d'Ebebda est un ouvrage de 1020 m, construit par Colas GTE en 1982, qui enjambe la Sanaga, le plus grand fleuve camerounais

*Ebebda Bridge is a 1020-m structure, built by Colas GTE in 1982, straddling the Sanaga, the largest river in Cameroon*



Photo 3

Les travaux assez classiques consistent à réparer les bétons dégradés après passivation des aciers apparents et protection des armatures par un inhibiteur de corrosion

*The works, fairly conventional, involved repairing the deteriorated concrete after passivation of the apparent steels and protection of the reinforcements with a corrosion inhibitor*



Photo 4

L'accès s'effectue par l'intermédiaire de passerelles sur piles et de passerelles sur travées, équipements réalisés sur place par l'entreprise Cométal de Douala

*Access is achieved via walkways on piers and walkways on spans, this equipment being produced on the spot by the firm Cométal from Douala*

### Lifting pour le pont d'Ebebda au Cameroun

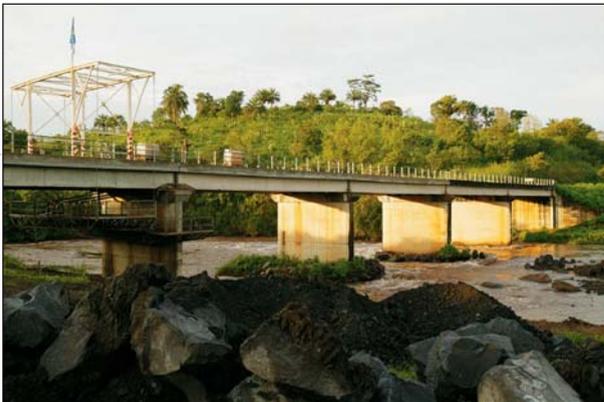


Photo 5

Les travaux réalisés sur le viaduc sur le Noun nécessitent, en plus, la mise en place d'enrochements afin d'éviter les problèmes d'affouillements

*The works carried out on the viaduct over the Noun also required the placing of riprap to avoid undermining problems*

montage. Un camion nacelle est également employé pour permettre d'accéder aux endroits difficiles, à l'aplomb des corniches, mais aussi pour effectuer les travaux de nettoyage à l'avancement.

Dans la pratique les travaux consistent à appliquer un inhibiteur de corrosion (Ferrogard 903) destiné à protéger les armatures, le liquide migrant dans le béton pour venir se fixer sur les aciers. Dans les zones dégradées les armatures apparentes sont passivées à l'aide de Monotop 610 AC. Les réparations étant effectuées par un mortier projeté adapté à l'épaisseur à reprendre, le chantier fait ainsi appel à quasiment toute la gamme des solutions de réparation Sika.

Au niveau des appuis, constitués chacun de deux piles, l'intervention nécessite la mise en œuvre d'un batardeau étanché en partie inférieure par l'intermédiaire d'un bouchon immergé de 15 à 20 cm d'épaisseur.

La principale difficulté des travaux se situe au niveau logistique, les quatre chantiers devant être menés de front alors que chacun d'eux est distant d'une centaine de kilomètres. Les besoins doivent être anticipés afin de gérer les approvisionnements en provenance de l'Hexagone, la moindre commande nécessitant des délais de quatre mois minimum entre la confirmation et la réception.

Autre difficulté majeure : la météo, car les produits sont très sensibles à l'humidité. Chaque intervention nécessite la mise en œuvre de procédures de contrôle strict par hygromètre. ■

#### LES PRINCIPAUX INTERVENANTS

##### **Maître d'ouvrage**

Ministère des Travaux Publics du Cameroun

##### **Maître d'œuvre**

RRI/Rodcom

##### **Entreprise**

Razel

#### ABSTRACT

##### *Face-lift for Ebebda Bridge in Cameroon*

G. Oliete

*This pilot project, carried out by the government of Cameroon, could eventually concern a thousand bridges throughout the country. The works, fairly conventional from the technical viewpoint – steel passivation and repair of deteriorated areas – came up against major logistic problems due to procurement constraints and the distance between the various construction sites.*

#### RESUMEN ESPAÑOL

##### *Lifting para el puente de Ebebda en Camerún*

G. Oliete

*Este proyecto piloto, llevado a cabo por el Gobierno de Camerún, podría referirse a plazo a unos miles de puentes en la totalidad del territorio. Los trabajos, relativamente convencionales desde el punto de vista técnico – pasivación de los aceros y reparación de las zonas deterioradas – tropiezan con importantes dificultades logísticas en consideración a las restricciones de aprovisionamiento y la distancia entre las distintas obras.*