

# TRAVAUX

REVUE TECHNIQUE DES ENTREPRISES DE TRAVAUX PUBLICS

**OUVRAGES D'ART. VIADUC LEZ-LIRONDE. INCENDIE SOUS UN PONT A TOURS. PONT CITADELLE A STRASBOURG. PASSERELLE DU GRAND LARGE. APPUIS EN RIVIERE DU DEUXIEME PONT SUR LE WOURI. CONSTRUCTION D'UN PONT SUR LE RHIN - LIGNE D DU TRAMWAY DE STRASBOURG. RENFORCEMENT DU VIADUC DE CHASSE-SUR-RHONE SUR L'AUTOROUTE A7N. VIADUC DE LA GRANDE CHALOUPE. VIADUC DU VIDOURLE. COUVRIR LES GRANDES INFRASTRUCTURES DE TRANSPORT EN MILIEU URBAIN**

N°923 AVRIL/MAI 2016



LE PONT CITADELLE  
À STRASBOURG  
© EGIS

**LES TRAVAUX**  
**PUBLICS** FEDERATION  
NATIONALE





**Assurer** ses risques professionnels, c'est bien.  
Être conseillé et accompagné, c'est mieux !

Avec SMABTP, à chaque métier son contrat sur mesure et son conseiller spécialisé.

Votre conseiller expert vous recommande **Atout TP** qui couvre tous les risques des **entreprises de TP** en un seul contrat : pour la protection de toutes vos activités et de vos engins en circulation ou au travail. L'offre s'adapte et se module à chaque type de chantier et en fonction du profil de votre entreprise. Vous obtenez aussi un soutien et des aides dans vos démarches de prévention des accidents.

Et parce que chaque profession est unique, nous déclinons nos solutions d'assurance par métier depuis près de 160 ans.

**Notre métier : assurer le vôtre**



Découvrez toutes nos solutions d'assurance de personnes (dirigeants et salariés), de biens professionnels et d'activités.

[www.groupe-sma.fr](http://www.groupe-sma.fr)



**SMABTP**  
BÂTIR L'AVENIR AVEC ASSURANCE

SMABTP, société mutuelle d'assurance du bâtiment et des travaux publics, société d'assurance mutuelle à cotisations variables, entreprise régie par le Code des assurances. RCS PARIS 775 684 764 - 114 avenue Emile Zola - 75739 PARIS Cedex 15



Directeur de la publication  
Bruno Cavagné

Directeur délégué  
Rédacteur en chef  
Michel Morgenthaler  
3, rue de Berri - 75008 Paris  
Tél. +33 (0)1 44 13 31 03  
morgenthalerm@fntp.fr

Comité de rédaction  
Hélène Abel (Ingerop), David  
Berthier (Vinci Construction France),  
Sami Bounatirou (Bouygues TP),  
Jean-Bernard Detry (Setec), Philippe  
Gotteland (Fntp), Jean-Christophe  
Goux-Reverchon (Fntp), Laurent  
Guilbaud (Saipem), Ziad Hajar  
(Eiffage TP), Florent Imberty  
(Razel-Bec), Claude Le Quéré (Egis),  
Stéphane Monleau (Soletanche Bachy),  
Jacques Robert (Arcadis), Claude  
Servant (Eiffage TP), Philippe Vion  
(Systra), Michel Morgenthaler (Fntp)

Ont collaboré à ce numéro  
Rédaction  
Monique Trancart, Marc Montagnon

Service Abonnement et Vente  
Com et Com  
Service Abonnement TRAVAUX  
Bât. Copemic - 20 av. Édouard Herriot  
92350 Le Plessis-Robinson  
Tél. +33 (0)1 40 94 22 22  
Fax +33 (0)1 40 94 22 32  
revue-travaux@cometcom.fr

France (9 numéros) : 190 € TTC  
International (9 numéros) : 240 €  
Enseignants (9 numéros) : 75 €  
Étudiants (9 numéros) : 50 €  
Prix du numéro : 25 € (+ frais de port)  
Multi-abonnement : prix dégressifs  
(nous consulter)

Publicité  
Rive Média  
2, rue du Roule - 75001 Paris  
Tél. 01 42 21 88 02 - Fax 01 42 21 88 44  
contact@rive-media.fr  
www.rive-media.fr

Directeurs de clientèle  
Bertrand Cosson - LD 01 42 21 89 04  
b.cosson@rive-media.fr  
Carine Reininger - LD 01 42 21 89 05  
c.reininger@rive-media.fr

Site internet : [www.revue-travaux.com](http://www.revue-travaux.com)

Édition déléguée  
Com'1 évidence  
Siège :  
101, avenue des Champs-Élysées  
75008 PARIS  
Tél. bureaux : +33 (0)2 32 32 03 52  
revuetravaux@com1evidence.com

La revue Travaux s'attache, pour l'information  
de ses lecteurs, à permettre l'expression de  
toutes les opinions scientifiques et techniques.  
Mais les articles sont publiés sous la  
responsabilité de leurs auteurs. L'éditeur  
se réserve le droit de refuser toute insertion,  
jugée contraire aux intérêts de la publication.

Tous droits de reproduction, adaptation, totale  
ou partielle, France et étranger, sous quelque  
forme que ce soit, sont expressément réservés  
(copyright by Travaux). Ouvrage protégé ;  
photocopie interdite, même partielle  
(loi du 11 mars 1957), qui constituerait  
contrefaçon (code pénal, article 425).

Editions Science et Industrie SAS  
9, rue de Berri - 75008 Paris  
Commission paritaire n°0218 T 80259  
ISSN 0041-1906

## HUMILITÉ ET RÉALISME DANS LE CALCUL DES PONTS



© DR

Les ponts figurent au nombre des structures de génie civil les plus simples et les plus pures. Les éléments qui ne participent pas au fonctionnement mécanique ont peu d'influence sur la perception visuelle d'un pont et ne représentent qu'une faible partie de son coût. La conception générale n'a que faire de calculs complexes. Une conception saine utilise les matériaux de façon rationnelle et efficace. Le cheminement des forces internes est alors simple, direct et lisible. L'ingénieur n'a pas besoin d'aller au-delà de la règle de trois pour déterminer dès l'origine les principales dimensions et quantités.

Pour les études détaillées, on recourt à des outils plus puissants et des méthodes plus élaborées. L'ordinateur devient indispensable. Même pour des ouvrages simples, on doit produire des justifications systématiques en tout point sous de multiples cas de charges. L'analyse du comportement dynamique sous le vent ou le séisme, l'étude des contraintes dans les zones singulières, la représentation des phases de construction ou encore l'effet de non-linéarités ne sont accessibles qu'à l'aide de l'ordinateur et de logiciels spécialisés.

Bien sûr, on cherche par ces calculs à représenter au plus près la réalité, ne serait-ce que par souci d'économie. Mais le raffinement des méthodes et des

modèles de calcul rend les études longues et complexes. Pour un ouvrage neuf, il vaut souvent mieux consommer un peu plus de matière que renchérir les études et retarder les travaux. Les règles de justification usuelles, celles des Eurocodes par exemple, constituent un juste milieu entre ces différents impératifs.

Il est illusoire de vouloir représenter de manière précise un phénomène alors même que les paramètres qui le caractérisent ne sont pas connus avec exactitude. Il y a un peu plus de quarante ans, ont été introduites des règles pour évaluer les effets des gradients thermiques et des redistributions par fluage dans les ponts construits par encorbellements successifs. Ces règles s'appuyaient sur des modèles simples, voire grossiers, mais leur application a permis d'éviter les désordres fréquemment rencontrés auparavant. Bien plus, les perfectionnements apportés depuis à la connaissance et à la modélisation de ces phénomènes n'ont pas modifié de façon substantielle les dimensionnements issus des méthodes grossières. C'est que la simple prise en considération d'un phénomène est souvent bien plus importante que sa modélisation détaillée.

Il est des cas où l'on a besoin de plus de finesse et de précision. C'est par exemple pour évaluer la capacité portante d'un ouvrage existant. On veut d'une part reconstituer au mieux l'état réel des sollicitations et d'autre part mobiliser les réserves de résistance offertes par les capacités de redistribution et d'adaptation qui échappent aux méthodes classiques. Il peut aussi s'agir de maîtriser la géométrie de construction d'un tablier : il faut de la précision pour n'être ni trop haut ni trop bas. Mais si la géométrie est satisfaisante en fin de construction, la prévision des déformations ultérieures d'un tablier en béton reste très incertaine. De nombreux exemples nous montrent que l'on ne sait pas aujourd'hui représenter convenablement l'effet du comportement à long terme des matériaux. Et ce n'est pas faute d'essais en laboratoires, de recherches théoriques et de mesures sur ouvrages réels. Cela ne peut qu'inciter l'ingénieur à la modestie et à la prudence face à la modélisation de phénomènes complexes et évolutifs.

### EMMANUEL BOUCHON

INGÉNIEUR GÉNÉRAL OUVRAGES D'ART  
MINISTÈRE DE L'ENVIRONNEMENT, DE L'ÉNERGIE ET DE LA MER

# OUVRAGES D'**ART**

IMAGINER  
CONCEVOIR  
CONSTRUIRE



LIGNE D DU TRAMWAY DE STRASBOURG - CONSTRUCTION DU PONT SUR LE RHIN © ARCADIS





04 ALBUM

08 ACTUALITÉ

17 **ENTRETIEN AVEC ISABELLE ALFANO**  
INTERROUTE & VILLE POUR LA PREMIÈRE FOIS À PARIS



18 **ENTRETIEN AVEC MICHEL VIRLOGEUX ET JEAN-FRANÇOIS KLEIN**  
PONT YAVUZ SULTAN SELIM SUR LE BOSPHORE - 9 SEMAINES POUR UN RECORD DU MONDE

22 **GROUPE GAGNERAUD :**  
QUAND INDÉPENDANCE ET RÉACTIVITÉ  
RIMENT AVEC PÉRENNITÉ



28

**LE VIADUC LEZ-LIRONDE**  
Du déplacement de l'autoroute A9 à Montpellier



36

**INCENDIE SOUS UN PONT FRANCHISSANT LES VOIES FERRÉES**  
À Tours



42

**LE PONT CITADELLE À STRASBOURG**  
Un exercice d'équilibre



50

**PASSERELLE DU GRAND LARGE**  
Le chantier



60

**DEUXIÈME PONT SUR LE WOURI**  
Les appuis en rivière



68

**LIGNE D DU TRAMWAY DE STRASBOURG**  
Construction du pont sur le Rhin



78

**RENFORCEMENT DU VIADUC DE CHASSE-SUR-RHÔNE**  
Sur l'autoroute A7N



84

**CONSTRUCTION DU VIADUC DE LA GRANDE CHALOUPE**  
Nouvelle Route du Littoral



92

**LGV CNM**  
Viaduc du Vidourle



100

**COUVRIR LES GRANDES INFRASTRUCTURES DE TRANSPORT EN MILIEU URBAIN**  
État de l'art et propositions issues du projet de recherche ANR « Canopée »







## AU PASSAGE DE LA GRANDE CHALOUPPE LA NOUVELLE ROUTE DU LITTO- RAL A LES PIEDS DANS L'EAU

**EIFFAGE GC** est mandataire du groupement comprenant Razel-Bec, Saipem et Nge Contracting qui réalise, sous maîtrise d'œuvre Egis, cet ouvrage en mer de 239 m à 4 travées érigé au droit de la ravine de la Grande Chaloupe sur l'île de La Réunion. Le tablier, large de 29 m, est constitué d'un mono-caisson à 4 âmes en béton précontraint construit par encorbellements successifs. L'exécution de l'ouvrage allie préfabrication et béton coulé en place à l'équipage mobile. Les Pétrels de Barau, espèce aviaire endémique, sont les témoins attentifs des prouesses techniques des constructeurs et l'objet de leurs meilleurs soins. **(voir article page 84).**



© EIFFAGE GÉNIE CIVIL









## LE VIADUC LEZ-LIRONDE ENJAMBE TROIS OBSTACLES AVEC ÉLÉGANCE

### **BOUYGUES TPRF,**

en groupement avec Zwahlen & Mayr, construit aux abords de Montpellier, pour Vinci Autoroutes, ce viaduc qui franchit successivement le Lez, rivière connue pour ses crues furieuses, une avenue menant aux plages et la Lironde qui est le canal de débordement du Lez.

Cet ouvrage de 560 m s'inscrit dans le cadre de la restructuration de l'A9. Il comporte un double tablier mixte à ossature à inertie variable. Cette conception lui confère une grande finesse de ligne allégeant son impact visuel dans le paysage, en réponse à la demande de l'agglomération montpelliéraine.

(voir article page 28).



© BOUYGUES TPRF

© GEORGES BARTOLI

# RETOUR D'EXPÉRIENCES SUR LA LOI ALUR

**La loi Alur de 2014 traite des sols pollués sur des friches industrielles en reconversion. Les retours de son application sur le terrain contribuent à faire évoluer les textes.**



Dépollution, par bioterrorisme pendant neuf mois (2015-2016), de 2 000 m<sup>3</sup> de terres contenant des hydrocarbures totaux (HCT) sur la Zac Rouen Innovation Santé à Rouen (Seine-Maritime) sous maîtrise d'ouvrage de l'Établissement public foncier Normandie.

Il ne faut pas avoir peur de la pollution d'un terrain : c'est un des points qui ressortent de la conférence sur la répercussion de la loi relative à l'accès au logement et à un urbanisme rénové (Alur) sur les projets immobiliers, en janvier à Paris.

« Nous ne parlons plus de dépollution mais de réhabilitation, nous sommes dans une politique d'acceptabilité d'un risque par rapport à un usage futur, a d'emblée posé Patricia Savin, avocate associée du cabinet DS. Nous regardons la source de pollution et ses voies de transfert qui pourraient atteindre l'usage ou non, ceci afin de minorer le coût de la réhabilitation. Il faut bien anticiper l'usage futur pour ne pas avoir d'exigences trop élevées. »

La conférence a synthétisé douze réunions tenues en province sur l'impact de l'article 173 de la loi Alur du 24 mars 2014 (n°2014-366). Cette loi vise à reconstruire la ville sur la ville, par exemple à bâtir des logements sur des terrains délaissés au lieu d'accaparer des terres agricoles. Usines et industries désaffectées, en centre-ville, sont des parcelles de choix, à condition d'en maîtriser la pollution.

À fin 2015, peu d'acteurs s'étaient saisis du nouveau texte. La loi Alur a été élaborée à partir d'expériences comme celle

de l'agglomération de Lille (Nord) qui, depuis 2010, récupère des friches pour densifier son territoire.

## → Dénicher les sources d'information

Aujourd'hui, les retours de terrain font encore évoluer le texte. À Rosny-sous-Bois (Seine-Saint-Denis), deux aménageurs s'intéressent à 30 000 m<sup>2</sup> proches du centre-ville. Problème : une pollution aux hydrocarbures, métaux, sulfates, etc. Autre difficulté : l'éventail des acteurs concernés par l'article 173. « Les propriétaires (SNCF-RFF) veulent céder le terrain mais sans s'occuper de la dépollution, relate Gilles Delteil, responsable hygiène, sécurité, environnement à Socotec, co-organisateur de la conférence. Les installations classées pour la protection de l'environnement (ICPE) sont aux mains de trois exploitants qui veulent bien dépolluer mais uniquement pour leur activité, pas sur la période antérieure (guerre). La direction régionale et interdépartementale de l'environnement et de l'énergie ne s'adresse qu'aux exploitants. Les acquéreurs potentiels envisagent un changement d'usage et une réhabilitation nécessaire et suffisante. »

Deux décrets appliquant l'article 173 de la loi Alur sont parus. Le premier, n°2015-1353 du 26 octobre 2015, concerne le dispositif de secteur d'infor-

mation des sols (SIS). Ce document est créé s'il y a changement d'usage du terrain, par exemple, de l'industriel au logement. Il concerne les sites à risque de pollution avéré, potentiel ou à diagnostiquer. Il synthétise toutes les informations concernant les sols et les fait connaître au public. Toutes les sources sont sollicitées y compris celles des collectivités locales et des propriétaires. « Un inventaire historique peut relater une pollution, souligne Aurélien Louis, chef du bureau du sol et du sous-sol à la direction générale de la prévention des risques (DGPR). Le SIS figure au plan local d'urbanisme. Il donne lieu à arrêté préfectoral. »<sup>(1)</sup>

## → Exceptions au SIS

La loi prévoit des exclusions à l'obligation de créer un SIS. Les ICPE et les installations nucléaires de base sont régies par une police spécifique et donc, localisées, mais cela n'exclut pas les pollutions anciennes, d'où l'utilité des archives. Le risque de pollution est également pris en compte dans les secteurs à servitude d'utilité publique. Il n'y aura pas non plus de SIS si un usage futur sensible n'est pas du tout envisageable. Enfin, l'absence de SIS ne dédouane pas de s'occuper d'une pollution si elle est incompatible avec l'occupation envisagée d'une parcelle.

Le SIS est perçu comme un empêchement d'aménager et un dépréciateur de terrain. Il doit être porté à la connaissance de l'acquéreur. « Les risques ne doivent pas faire peur, répond Aurélien Louis. La pollution n'est pas forcément grave et elle se gère. Mieux vaut ne pas la cacher. » Une circulaire va différencier le changement d'usage du changement de destination, d'utilisation et même de consistance.

Le second décret porte sur le dispositif de tiers demandeur (n°2015-2004 du 18 août 2015). Il sert à accélérer la reconversion de friches. En effet, un certain nombre de propriétaires de terrain ou d'exploitants ne tiennent pas à endosser des conflits ultérieurs liés à une pollution mal maîtrisée.

Le tiers demandeur, un aménageur par exemple, se substitue à eux mais doit, en contrepartie, présenter des garanties financières, ceci en cas de défaillance<sup>(2)</sup>. Dans la pratique, l'exploitant ne serait responsable que sur ses obligations initiales (industrielles) et non sur celles liées à l'aménagement futur.

## → Garantie par tranche

À fin 2015, le dispositif ne figure que dans un seul dossier, selon Socotec. L'État se demande s'il faut l'améliorer. « A été introduite la notion de tranches de projet afin de réduire la garantie à apporter, informe Aurélien Louis.

La garantie se limite à une tranche, le projet avance. Cela implique la notion de tiers demandeur partiel, avec vente, après aménagement, sur une partie de la friche seulement. L'industriel peut conserver la dépollution, par exemple celle au mercure très délicate à traiter. »

« La vigilance est le maître-mot sur le passé industriel, a conclu Frédéric Levy, avocat associé de DS. Un propriétaire peut être jugé négligent au moment de l'achat, ou s'il a caché quelque chose ensuite ou s'il n'est pas intervenu. Avec la loi Alur, nous sommes dans une approche de compromis, de rencontre avec ceux qui vont construire la ville. » ■

<sup>(1)</sup> Aurélien Louis a changé de poste depuis (cf. Nominations).

<sup>(2)</sup> Voir aussi Travaux n°906, juin 2014, page 8.

## DEUX GUIDES

**Le guide sur les secteurs d'information sur les sols (SIS) à destination des collectivités locales est attendu au 1<sup>er</sup> semestre. Le bureau du sol et du sous-sol du ministère de l'Environnement veut ainsi préciser leur participation à un SIS : apport de connaissances sur le risque de pollution d'un terrain, intégration dans les documents d'urbanisme, permis de construire, etc.**

**En novembre, un guide sur la définition et la création de SIS à l'intention des services de l'État, a été publié par le Bureau de recherches géologiques et minières.**

**Guide BRGM téléchargeable sur : [http://www.developpement-durable.gouv.fr/spip.php?page=doc&id\\_article=46060](http://www.developpement-durable.gouv.fr/spip.php?page=doc&id_article=46060).**



## EUROPAN SE PENCHE SUR LES VILLES PRODUCTIVES



Lors de la dernière édition d'Europan, projet d'abri de chantier associé à d'autres activités à Goussainville (Val-d'Oise).

Le prochain concours Europan a pour thème les villes productives : comment concilier habitat et sites de production que ce soit de nourriture, d'énergie, de services, de produits industriels. Les candidatures sont à remettre avant fin juin. Europan met en relation des urbanistes de moins de 40 ans et des collectivités territoriales, ces dernières leur offrant un secteur à explorer.

Cette manifestation qui en est à sa 14<sup>e</sup> édition, a été créée en 1988 par le ministère de l'Équipement<sup>(1)</sup>. Elle a pris une dimension européenne en 2010. La 13<sup>e</sup> édition s'est close fin 2015 : 49 sites dans 15 pays ont été soumis à la réflexion d'équipes pluridisciplinaires (1 305 réponses). En France, les dix territoires retenus ont suscité 316 projets<sup>(2)</sup>. Le thème d'Europan 13 était la ville adaptable sous trois angles : l'auto organisation plutôt que l'État providence ; le partage versus la ségrégation ; la conception d'un projet et non d'un objet. L'équipe de l'architecte Florent Vidalig,

lauréat pour la restructuration du village de Goussainville (Val-d'Oise), a fait du chantier une véritable étape du changement, à commencer par un abri associé à d'autres activités. « *Le chantier est un processus d'activation du territoire,* » est-il écrit dans sa présentation. Le site était proposé par Goussainville et la communauté d'agglomération Roissy Porte de France.

### → Trois communes rurales

Citons également la réflexion sur trois communes corréziennes - Argentat, Turenne et Ussel - avec la Direction départementale des territoires de Corrèze. Archipel, agence d'architectes lauréate, y a détecté des îles spécialisées (logement, équipement, centre, etc.) et les a considérées comme « *des espaces de partage nécessaires en milieu rural.* »

### → Intégrer une base militaire

L'agglomération de Metz (Moselle) a proposé l'intégration d'un ancien aérodrome militaire dans le tissu urbain. Le jury d'Europan a couronné l'équipe de Laeti-

tia Lafont, architecte-urbaniste, pour la qualité de sa programmation sur le site, sa capacité à trouver l'essentiel sans dénaturer les lieux et à tisser des liens avec les franges de la base.

Deux villes - Moulins (Allier) et Vernon (Eure) - ont soumis aux candidats des berges de fleuve. Saint-Brieuc avec l'Établissement public foncier de Bretagne a participé au concours pour donner une cohésion entre le centre et une friche proche de la mer.

Ces territoires, après cette première mise en jambes urbanistique, font l'objet d'études plus poussées, les lauréats d'Europan pouvant concourir aux étapes ultérieures.

**En savoir plus sur :**  
[www.europanfrance.org](http://www.europanfrance.org) ■

<sup>(1)</sup> Cf. *Travaux* n°909, octobre 2014, p. 8.

<sup>(2)</sup> Bondy, Bordeaux, Goussainville, La Corrèze, Marne-la-Vallée, Metz métropole, Montreuil-sous-Bois, Moulins, Saint-Brieuc, Vernon.

## UN TÉLÉPHÉRIQUE PLUS URBAIN

Le téléphérique a du mal à se développer en ville.

Les obstacles sont d'ordre réglementaires<sup>(1)</sup> mais pas uniquement. Un consortium a lancé un projet de recherche et développement pour le rendre plus attractif. Baptisé I2TC - Interconnexions transports en commun et technologies câblées - il va s'intéresser à l'augmentation de la vitesse et à celle du nombre de voyageurs embarqués. Il est question d'atteindre 5 000 personnes par heure comme dans les tramways. L'accès sera adapté aux handicapés. L'équipe voudrait aussi recevoir des tracés non rectilignes.

Le consortium réunit Eiffage Métal (chef de file), Poma (cabines), RATP, CDVIA (conseil), l'université Paris I Panthéon-Sorbonne, l'Ensta Paristech, l'École centrale de Lyon et The Vibrant Project (numérique).

I2TC qui coûte 4,3 millions d'euros, reçoit un financement du Fonds unique interministériel. Il a été labellisé par les pôles de compétitivité Advancity et LUTB.

<sup>(1)</sup> Cf. *Travaux* n°921, janvier-février 2016, page 11.

## 5 MILLIARDS D'EUROS POUR LE RÉSEAU FERRÉ EXISTANT

Près de 5 milliards d'euros vont être dépensés en 2016 pour l'entretien et le renouvellement du réseau ferré. La maintenance courante reçoit 2,3 milliards et la régénération, 2,6 milliards. À elle seule, l'Île-de-France en accapare un quart (1,3 milliard). SNCF Réseau<sup>(1)</sup> veut ainsi stopper le vieillissement des voies. Leur âge moyen est de 33 ans.

Cette modernisation entraîne la création de 350 postes. Mais cela ne suffit pas. « *Un recours accru à des méthodes innovantes est indispensable,* » écrit Alain

Vidalies, secrétaire d'État chargé des transports.

### → Train haute performance

Le gestionnaire du réseau ferré a déjà utilisé des grues capables de poser des aiguillages pré-assemblés dans un environnement étroit, et à des trains usines qui renouvellent 1 km de voie par jour<sup>(2)</sup>. En 2017, elle devrait disposer d'un train haute performance destiné aux zones denses de la région parisienne.

Par ailleurs, le secrétaire d'État s'est engagé à mieux informer les usagers des

opérations de maintenance. En 2015, 4,7 milliards d'euros avaient permis de renouveler 1 000 km et de changer 400 aiguillages.

**Carte des principaux chantiers 2016 à la page :** [http://www.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/Chantiers\\_2016.pdf](http://www.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/Chantiers_2016.pdf) ■

<sup>(1)</sup> Epic né de la fusion de RFF, SNCF Infra et la Direction de la circulation ferroviaire au 1<sup>er</sup> janvier 2015.

<sup>(2)</sup> Cf. *Travaux* n°915, juin 2015, page 13.



Medellin (Brésil) a fait installer des télécabines en 2004 puis en 2015-2016.

## PROJETS AUTOUR DES FUTURES GARES

Les futures gares du Grand Paris Express stimulent les opérations d'urbanisme. Ainsi l'Établissement public d'aménagement Plaine de France couvrant le Val-d'Oise et la Seine-Saint-Denis, a-t-il lancé sept projets. Parmi eux, citons celui autour du pôle gare Triangle de Gonesse (Val-d'Oise) sur la ligne 17 (à réaliser) qui accueillera des entreprises internationales, du tertiaire, de la recherche et développement, de la formation, etc. À Sevran (Seine-Saint-Denis), l'ouverture de deux gares en 2023 suscite la transformation du quartier de la gare RER actuelle, du centre-ville et du quartier Montceleux.

## ÉNERGIES MARINES : RECOURS LIMITÉS

Les recours contre de futures productions marines d'électricité ont été limités par le décret n°2016-9 du 8 janvier, relatif aux ouvrages de production et de transport d'énergie renouvelable en mer.

Seule la Cour administrative d'appel de Nantes a désormais la compétence de premier ressort pour juger les recours contentieux, ce qui devrait diviser par deux le délai de jugement, selon le Syndicat des énergies renouvelables.

Autre disposition pour accélérer les projets : le délai pour s'y opposer est de quatre mois après publication de l'autorisation et non plus de six mois après mise en service.

## LABEL VERT

Deux sociétés ont été retenues par le ministère de l'Environnement pour délivrer le label Transition énergétique et écologique pour le climat : Novethic et EY France. Le label distingue des investisseurs et des sociétés de gestion de portefeuilles finançant l'économie "verte".

## ENGINS BTP : REPRISE DES VENTES EN 2016

Le marché des machines du BTP pourrait atteindre un point bas en 2016 avant de redevenir positif en 2017-2018, selon le Syndicat des entreprises internationales des matériels de travaux publics, mines et carrières, bâtiment et levage (Seimat).

Toutes catégories confondues, la hausse du nombre d'unités vendues serait de 5% cette année pour atteindre 35 500 contre 33 892 en 2015.

La famille du matériel compact - chargeuses, pelles - serait la plus dynamique avec une hausse de 9%, soit un millier de machines en plus (11 250/10 305).

Le matériel routier qui a beaucoup reculé en 2015 par rapport à 2014 (-27%), devrait regagner 4%, soit 400 engins environ (9 850/9 465), soutenu par l'activité autoroutière.

Hausses plus timides - de 1,5 à 2% - en matériel de terrassement (3 450/3 390), matériel pour béton (620/604) et de levage (10 330/10 128).



Le marché des mini pelles reste important.

La progression de 2016 sera peut-être supérieure grâce à la prolongation de la mesure de sur-amortissement au-delà du 15 avril (durée non précisée à début mars). Elle avait été instaurée par le ministre de l'Économie en avril 2015 pour un an.

### → Une mesure favorable

Cette mesure peut déclencher des achats en petites et moyennes entreprises mais « les clients restent prudents, ils n'achèteront que s'ils ont un réel besoin », souligne Jean-Marie Osdoit,

président du syndicat. *Les constructeurs n'arrivent pas à fournir suffisamment vite les engins commandés.* »

En 2015, les ventes avaient reculé de 17% par rapport à 2014 avec, pour les machines de terrassement et compactes, un premier trimestre à -33% suivi d'un redressement au 3<sup>e</sup> trimestre pour finir à +5% au quatrième.

Les loueurs ont moins investi en 2015 qu'en 2014. Par exemple, le marché des mini pelles a été réduit de 18% au total mais de 58% chez les loueurs. Même frilosité vis-à-vis de midipelles (-61%).

### → Intérêt du marché européen

Le secteur réalise un chiffre d'affaires de 2,4 milliards d'euros (2015) dont 900 millions dans le bâtiment, ce qui a conduit le Seimat à créer une commission bâtiment.

Au niveau mondial, les ventes de machines du BTP ont baissé de 5% en 2015. Vu les difficultés des pays émergents, les constructeurs se tournent vers le marché de l'Union européenne. ■

## ÉNERGIES NOUVELLES RENOUVELABLES : L'ÉOLIEN EN TÊTE



Parc de 7 éoliennes à mât en béton, 21 MW au total, à Melleran, Lorigné, Hanc et La-Chapelle-Pouilloux (Deux-Sèvres).

soit 23% de plus qu'en 2014, avec 10 312 MW. Un milliard et demi d'euros a été investi dans la filière.

En Europe, la France arrive en 4<sup>e</sup> position en puissance éolienne installée, derrière l'Allemagne avec 45 000 MW, l'Espagne, 23 000 MW (2014), et la Grande-Bretagne, 13 600 MW. La filière européenne dispose de 142 000 MW et a bénéficié de 26,4 milliards d'euros d'investissement. Le parc éolien mondial atteint 432 418 MW dont 145 104 en Chine et 74 500, aux États-Unis, selon le Syndicat des énergies renouvelables.

109 milliards de dollars (99 milliards d'euros) ont été dépensés l'année dernière en installations.

La puissance installée en énergie électrique d'origine solaire est plus modeste : 6 191 MW qui ont produit 7,4 TWh en 2015, soit 25% de plus qu'en 2014. Le ministère de l'Environnement continue d'organiser des appels d'offres, pour des installations de forte puissance, avec l'espoir de retombées économiques en France, notamment en fabrication de capteurs.

### → Certification photovoltaïque

La filière prépare une certification de service en conception, installation, exploitation et maintenance, à partir du label Alliance qualité photovoltaïque (AQPV) délivré par Certisolis depuis 2013.

En savoir plus sur : [www.enr.fr](http://www.enr.fr) ■



Centrale photovoltaïque de 3,4 MW à Saint-Restitut (Drôme) pour la Compagnie nationale du Rhône.



## PERCEMENT DU PROLONGEMENT NORD DE LA LIGNE 14



© HERVÉ PIRAUD

Entrée du tunnel à partir de la nouvelle station Pont Cardinet (Paris).

À mi-février, plus de 600 m du tunnel de prolongement vers le nord de la ligne de métro n°14 à Paris avaient été creusés. Il s'agit du premier lot infrastructures de l'allongement de la ligne qui, à terme, rejoindra la future ligne 15 nord, une des boucles du Grand Paris Express. Deux stations vont être créées sur ce trajet : Pont Cardinet (à l'est de la gare SNCF du même nom) et Porte de Clichy, à proximité de la station de métro existante sur la ligne 13. C'est d'ailleurs cette ligne qu'il s'agit de décharger, dans un premier temps. La ligne 14 va donc la doubler avant d'aller se connecter à la 15 à Saint-Denis-Pleyel (Seine-Saint-Denis).

Ces deux nouvelles stations sur la ligne 14 ont été en partie construites avant creusement du tunnel afin que leur radier serve de plate-forme de montage du tunnelier. Le premier tronçon à creuser - 1 590 m en cours - est parti de Pont Cardinet et descend vers Saint-Lazare. Puis le premier bouclier sera démonté. Un second aura, entre-temps, été installé à Pont Cardinet pour partir au nord, vers la Porte de Clichy, soit 560 m. Le tunnelier la traversera et continuera son chemin jusqu'à la station Clichy Saint-Ouen, soit 1 430 m (hors lot 1). Le marché de 3 580 m de tunnel et les deux stations, se termine en mars 2018.

Il s'élève à 220 millions d'euros. Eiffage Génie Civil est mandataire du groupement d'entreprises qui compte aussi Razel-Bec (groupe Fayat). Les fondations spéciales, déjà réalisées sous les stations, ont été confiées à Eiffage Fondations et à Sefi-Intrafor (Fayat). Maîtrise d'ouvrage : Stif, RATP ; maîtrise d'œuvre : Systra<sup>(1)</sup>.

### → Quartier et sous-sol encombrés

Ce chantier prend place dans le XVII<sup>e</sup> arrondissement de Paris, bien encombré par d'autres constructions - tribunal de grande instance, prolongement du tramway circulaire, Zac Clichy-Batignolles - et par des infrastructures proches : métro, RER C, collecteur d'égout de Clichy, boulevard périphérique et galerie de chauffage urbain. Sans oublier les immeubles, situés sur le parcours, surveillés pendant le percement.

### → 90-100 m par semaine

Le tunnel du prolongement de la ligne 14 trouve sa place dans deux couches géologiques : les sables de Beauchamp et des marnes et caillasses. Pont Cardinet descend à 20 m, et Porte de Clichy, à 30 m dans du marno-calcaire de Saint-Ouen. La couverture du tunnel se situe entre 20 et 40 m de profondeur. Le tunnelier Herrenknecht a un diamètre intérieur de 7,75 m (8,92 extérieur) et mesure 96 m de long. En janvier, il avançait de 90-100 m par semaine. ■

<sup>(1)</sup> Cf. Travaux n°916, juillet-août 2015, page 54 (station Pont Cardinet), page 69 (Porte de Clichy) ; Travaux n°921, janvier-février 2016, page 26.

## UNE SEULE TRIBUNE À LONGCHAMP

La première pierre du nouvel hippodrome de Longchamp (Paris) a été posée mi-mars. Le projet de modernisation a été conçu par Dominique Perrault, architecte, suite à un concours international. Le site de courses hippiques remonte à 1857.

La rénovation comprend la démolition des anciennes tribunes remplacées par une seule de 160 m de long, chapeautée par un espace panoramique en verre avec un porte-à-faux de 21 m. L'hippodrome pourra accueillir jusqu'à 70 000 personnes grâce à la construction de cinq bâtiments. France Galop a confié l'opération de 93 millions d'euros à Bouygues Île-de-France Ouvrages Publics pour une mise en service à l'automne 2017.



© FRANCE GALOP

À noter le porte-à-faux de 21 m en haut de la tribune.

## CENTRALE AU BIOGAZ

Bouygues Énergies & Services a commencé le chantier d'une centrale de gazéification de déchets à Belfast (Irlande du Nord) et la livre fin 2017. L'installation produira 100 GWh électriques par an grâce à une turbine à vapeur issue de la combustion de 150 000 tonnes de déchets du commerce et de l'industrie (technologie Biomass Power). Le contrat de 202 millions d'euros confié par le fonds Full Circle Generation va de la conception à l'exploitation-maintenance pendant dix-sept ans.

## FONDATIONS THERMOACTIVES

Des tubes en PVC ont été glissés au milieu des cages de ferrailage des parois moulées de deux stations du prolongement de la ligne de métro n°14, à Paris (cf. ci-contre). Ces tubes récupèrent la chaleur environnante, autour de 12°C, pour rafraîchir la station ou pour la chauffer avec l'aide d'une pompe à chaleur.

La RATP entend diminuer les dépenses de fonctionnement de ces locaux. Elle expérimente cette solution qu'elle appelle fondations thermoactives. En mode climatisation, l'eau circule d'un milieu froid - le sol jusqu'à 19 m sous le radier de la station - vers les murs de station dont elle absorbe la chaleur, puis elle redescend se refroidir, etc.

Les premiers tests confirment que 100% des besoins thermiques de Porte de Clichy seront couverts par les tubes dans 3 750 m<sup>2</sup> de parois, et 100% de ceux de Mairie-de-Saint-Ouen plus 40% d'un bâtiment au-dessus, grâce à 5 660 m<sup>2</sup> de parois.

## EUROVIA FERROVIAIRE AU CANADA

Début février, Eurovia a repris Rail Cantech, spécialisée dans l'ingénierie, la construction et la maintenance de réseaux ferrés, transport urbain et embranchements industriels.

Présente surtout au Québec et en Ontario, deux états du Nord-Est canadien, elle emploie 200 personnes et réalise 21 millions d'euros de chiffre d'affaires (2015). Rail Cantech intègre Eurovia Travaux ferroviaires.

## VINCI AIRPORTS EN IRAN

La levée progressive des sanctions internationales à l'égard de l'Iran ouvre des marchés aux entreprises. Vinci Airports a signé un protocole d'accord avec la société Iran Airports sur la concession de l'aéroport de Mashhad, 2<sup>e</sup> ville du pays située au Nord-Est, et de celui d'Ispahan, 3<sup>e</sup> ville à 340 km de Téhéran, la capitale.

« Cet accord est la première étape d'un processus qui devrait conduire à la mise en place de concessions en vue de la rénovation, l'extension et l'exploitation de ces deux aéroports courant 2016, » écrit le groupe Vinci.

L'aéroport de Mashhad a accueilli plus de 8 millions de passagers en 2014 et celui d'Ispahan, 2,6 millions.

Par ailleurs, la filiale de Vinci devait finaliser, au 1<sup>er</sup> trimestre, le rachat de Aeropuertos Dominicanos Siglo XXI (Aerodom) qui exploite six aéroports en République dominicaine.

## RENFORCEMENT DES FONDATIONS DU PONT D'IÉNA À PARIS



© ROMAIN SECCO

Cerclage des piles en maçonnerie avant forage des micropieux. À l'arrière-plan, la deuxième ligne de piles d'un élargissement du pont.

Le tassement de certaines piles du pont d'Iéna à Paris a été stoppé grâce à l'ajout de micropieux en béton. Le chantier de huit mois s'est terminé en mars avec la réfection de la chaussée.

Le pont de 155 m qui relie la tour Eiffel au palais du Trocadéro était plus étroit quand il a été ouvert en 1814. Ce premier ouvrage, en maçonnerie, constitue aujourd'hui la partie centrale du pont. Ses quatre piles reposent chacune sur une centaine de pieux en bois.

Lors de l'exposition universelle de 1937, il est élargi par deux ouvrages parallèles,

en béton armé habillés d'un parement en pierre et fondés sur pieux en béton armé.

L'affaissement de plusieurs centimètres de trois des quatre piles centrales entraîne la rotation des poutres métalliques reliant l'ouvrage d'origine et ses deux extensions.

Le chantier de reprise des fondations s'est déroulé en deux phases.

Tout d'abord, sous l'eau, les pieux en bois ont été repérés afin qu'ils ne soient pas traversés par les futurs micropieux en béton. Avant forage, chaque pile a été

consolidée par trois cerclages associés à des tirants de précontrainte.

### → Micropieux de 46 m

La seconde phase a eu lieu à partir du dessus du tablier central. Douze micropieux ont été coulés par pile. Chacun reprend une charge de 325 tonnes. Ils sont ancrés à 46 m de profondeur dans les marnes dites de Meudon.

Spie Fondations, chargée des travaux, a procédé selon la méthode suivante : carottage de 220 mm de diamètre à travers la maçonnerie sur la hauteur de chaque pile (14 m), forage du micropieu en 200 mm sur 46 m de profondeur, injection d'un coulis de scellement dans le forage, pose d'une armature tubulaire de 140 mm en 20 mm d'épaisseur et injection complémentaire sous pression.

### → 1,3 million d'euros

Pendant les forages, des mesures topographiques vérifiaient que les mouvements dans le pont ne dépassaient pas un certain seuil.

Maîtrise d'ouvrage et maîtrise d'œuvre : ville de Paris dont la section ouvrages d'art du service du patrimoine de voirie. Mission géotechnique, supervision des travaux : Geos. Coût de la reprise en sous-œuvre du pont par micropieux : 1,3 million d'euros HT. ■

## PLATE-FORME LOGISTIQUE FER-ROUTE

Le futur hôtel logistique Chapelle inter-national à Paris devra supporter de fortes charges. Les marchandises arriveront par voie ferrée et seront transférées sur poids lourds. Sogaris Paris le construit sur une zone SNCF du 18<sup>e</sup> arrondissement, en bordure de voies, appartenant à la Société nationale des espaces ferroviaires. Le chantier a commencé en septembre dernier par la dépollution des sols et devrait se terminer en août 2017, une fois les 42 000 m<sup>2</sup> de plancher exécutés. Pour respecter les délais, un planning de coactivité a été établi.

Le tunnel ferroviaire, où se tient le transfert de marchandises des wagons aux camions, comporte une structure poteaux-poutres dont un portique avec poutre à inertie variable de 17,50 m de portée, se terminant par un porte-à-faux de 5,50 m pour un pont roulant. Son plancher est réalisé en prédalles et poutres précontraintes. La structure du

tunnel est reprise par des fondations sur 383 pieux de 15 m de profondeur.

### → Protéger des vibrations

L'hôtel logistique fait l'objet de mesures de protection aux vibrations. Des appuis acoustiques sont posés sous et autour

des fondations. La structure des niveaux logistiques et celle des bureaux, écoles professionnelles, etc., située au-dessus, seront indépendantes. GCC a remporté le lot gros-œuvre (démolition, béton, charpentes métal et bois). ■



© GCC/JEAN-CLAUDE NDIAYE

Le bâti doit résister aux charges du transfert de marchandises du rail à la route.



### MISE AUX NORMES DU TUNNEL DU CHAT



© CONSEIL DÉPARTEMENTAL DE SAVOIE

Galerie de sécurité parallèle au tunnel du Chat (Savoie) au début de son creusement, en juillet 2015.

Le creusement de la galerie de sécurité du tunnel du Chat (Savoie) touche à sa fin (mai). Débuté à l'explosif en juin 2015, il sera suivi de travaux de bétonnage et d'équipement jusqu'à fin 2016. Cette galerie de 1,5 km de long fera office, en temps normal, de voie piétonne et cyclable sous le mont du Chat (1 500 m), massif situé à la pointe sud de l'arc du Jura (avant-pays savoyard). Actuellement, le tunnel ouvert en 1932 est interdit aux piétons et aux vélos. Il se situe sur la RD 1504, à l'ouest du lac du Bourget, sur les territoires de Saint-Jean-de-Chevelu (côté lac) et de Bourdeau, à quelques kilomètres de Yenne, au nord-ouest de Chambéry. Le conseil départemental de Savoie, qui en a hérité de l'État en 2006, a procédé à une mise à niveau de sa sécurité en 2007-2008. Mais c'est insuffisant pour être conforme à la circulaire interministérielle du 25 août 2000. En cas d'incendie, la galerie servira à évacuer les occupants du tunnel et

pourra être empruntée par les véhicules de pompiers (gabarit 3 m de haut par 3,50 m de large).

Parallèle au tunnel, à une trentaine de mètres, elle communique avec lui par 4 couloirs (issues de secours). Elle comporte des stations de ventilation aux deux entrées reliées aux 14 conduits de désenfumage du tunnel, des caméras, un câble de communication par radio, une conduite et des poteaux incendie, un passage pour les réseaux, etc. Les stations de ventilation sont encastées dans la roche et cachées par la végétation.

#### → Parements et chaussée en béton clair

Courant 2017, suivra la rénovation du tunnel, lui aussi de 1,5 km. Son gabarit routier sera le même - 6,50 m de large par 4,30 m de haut. Les tôles de piedroits seront remplacées par des parements en béton, ce qui fera gagner quelques centimètres aux trottoirs (dis-

ponibles en cas d'incendie) : 0,60-0,65 cm de large au lieu de 0,45-0,50 cm actuellement. Les parements comme la chaussée seront de couleur claire afin d'améliorer la visibilité. Les tôles de voûte seront changées et de nouveaux ventilateurs, installés.

#### → 11 500 véhicules par jour

Le tunnel, en l'état actuel, est emprunté par 11 500 véhicules par jour en moyenne. Il est interdit aux transports de matières dangereuses - et il le restera - et aux poids lourds de plus de 7,5 t, 2,35 m de large et 3,50 de haut sauf pour sept entreprises locales. « À l'avenir, il restera interdit aux poids lourds de transit, conformément à la volonté des élus de réguler ce trafic, indique Jean-Paul Cart, responsable du service études et travaux du département. Il sera ouvert aux véhicules en desserte locale du canton du Bugey Savoyard pour des marchandises et des personnes (autocars). » ■

### PRÉFABRICATION DE POUTRES

Une partie de l'avenue de France à Paris 13<sup>e</sup> a été déconstruite afin de poursuivre la couverture des voies en sortie de la gare d'Austerlitz.

Cette rue avait été mise en service dans toute sa largeur - 40 m - en 2012, son premier tronçon ouvert une dizaine d'années plus tôt.

La couverture en cours de 10 voies afin de recevoir des immeubles, se concrétise par trois dalles en béton dont une préfabriquée constituée de 180 poutres de 55 m de long. Cette fabrication en usine, réalisée en six mois, a été présentée lors d'une matinale du Centre d'études et de recherches de l'industrie du béton fin 2015.

L'emploi d'éléments préfabriqués simplifie le chantier, les voies de chemin de fer restant dégagées la journée. Ces travaux ont commencé en mai 2014 et s'achèvent en août 2016. Ils ont été confiés à Eiffage Génie Civil.



© EIFFAGE GÉNIE CIVIL

Pose d'une des 180 poutres préfabriquées.



© CONSEIL DÉPARTEMENTAL DE SAVOIE

Tunnel du Chat, avant rénovation en 2017, côté Saint-Jean-de-Chevelu (Savoie).

### 40 MILLIONS D'EUROS

La mise aux normes du tunnel du Chat coûte 40 millions d'euros payés intégralement par le conseil départemental de Savoie, maître d'ouvrage.

**Assistance à maîtrise d'ouvrage :** Cetu, Cerema, SPS et BECS.

**Maîtrise d'œuvre :** groupe Systra (génie civil), HGM (équipements sauf ventilation) et HBI (ventilation).

**Travaux :** Eiffage génie civil (mandataire) avec Eiffage TP (chaussées), Clemessy (équipements sauf ventilation) et Cofely Axima (ventilation).

## ÉCRAN PARE-PIERRE

Ce filet de protection contre les chutes de rocher peut stopper un bloc de 10 tonnes tombant à plus de 115 km/h, soit une résistance de 5 000 kilojoules, sans dégradation excessive. Écran de la famille Élite, il atteint ainsi la catégorie A, la plus performante. GTS l'a testé en grandeur réelle à sa station de Montagnole (Savoie) sous le contrôle de l'Institut français des sciences et technologies des transports, de l'aménagement et des réseaux.



L'écran arrête un bloc de 10 tonnes à plus de 115 km/h.

## ÉVACUATION DE FUMÉE DE GRANDE TAILLE

Ce système d'évacuation naturelle de fumée et de chaleur convient aux toits plats. Il peut atteindre 9 m<sup>2</sup> par paliers de 5 cm dans ses dimensions. Ce dispositif est constitué de deux clapets en vitrage à double étanchéité périphérique. En position fermée, hors service, ils ne laissent passer ni l'air, ni l'eau, ni le bruit selon son fabricant, Lamilux.



L'ouverture peut atteindre 9 m<sup>2</sup>.

## VALORISER DES DÉCHETS DE MEMBRANES D'ÉTANCHÉITÉ



La transformation de déchets de membranes d'étanchéité donne des granulats, combustibles solides.

Les efforts de Nantet Serfim Recyclage pour valoriser les membranes d'étanchéité se concrétisent. Son projet de recherche et développement a abouti à la conception d'un prototype de broyeur fin 2015. En 2016-2017, la faisabilité de la filière sera validée sur un site proche de Lyon dans la perspective d'implanter un point de recyclage par région. Ce projet, baptisé Vamet, est porté par un comité qui associe l'entreprise, la Chambre syndicale française de l'étanchéité et l'Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie (Ademe). Le Syndicat des recycleurs du BTP y participe de façon informelle. L'Ademe suit et soutient cette recherche, une des deux à avoir remporté l'appel à projets Déchets BTP de 2013<sup>(1)</sup>. Dans ce cadre, les partenaires ont procédé par étapes. La première a consisté

à dresser l'état de l'art, regarder les différentes solutions et lever les verrous pour la suite. Les filières de valorisation possibles ont été identifiées, la proportion de membranes recyclables ou valorisables, établie, et un cahier des charges d'un pilote, défini.

« Les études réalisées nous ont orientés vers un procédé de broyage spécifique des membranes, précise Gilles Nantet, président de la société. Les granulés les plus fins seront récupérés pour la fabrication de sous-couches destinées à la fabrication des routes tandis que la partie calibrée de granulométrie supérieure sera travaillée pour former des combustibles solides de récupération utilisés notamment dans les cimenteries. »

Reste un écueil au développement de la filière énergie actuellement : le prix très bas du pétrole qui impacte la rentabilité de ce recyclage. ■

<sup>(1)</sup> Un second projet avait été retenu : Valo-CQFD. Cf. *Travaux*, octobre 2015, n°918, p. 11.



Broyage fin des membranes d'étanchéité à incorporer dans des sous-couches de routes.

## APPEL À PROJETS COMBUSTIBLES DE RÉCUPÉRATION

**Les candidats à l'appel à projets "Énergie CSR, produire de la chaleur à partir de combustibles solides de récupération (CSR) issus de déchets" ont jusqu'au 16 juin pour déposer leur dossier. L'appel du ministère de l'Environnement est géré par l'Ademe qui distribuera les aides à l'investissement. Il sera renouvelé sur plusieurs années.**

**L'État entend ainsi créer une filière de valorisation en chaleur des déchets refusés en centres de tri (après préparation), ce qui représente 2,5 millions de tonnes par an d'ici à 2025 et un potentiel 100 MW/an. Il faut concevoir ces installations. Le premier appel à projets en retiendra cinq.**

## ÉNERGIE COMMUNE À 3 IMMEUBLES



Les garde-corps des balcons sont constitués de deux verres abritant une couche de cellules photovoltaïques.

L'énergie et la chaleur sont mutualisées sur Hikari, opération immobilière livrée fin 2015 à Lyon (Rhône), dans le nouveau quartier de Confluence. Trois bâtiments - Higashi (bureaux), Minami (logements), Nishi (mixte) - fonctionnent ensemble<sup>(1)</sup>.

Les besoins en énergie ont été réduits grâce à une architecture bioclimatique (architecte : Kengo Kuma). L'énergie et la chaleur sont mises en commun à travers un réseau de communication. Les bureaux ou commerces en ont surtout besoin de jour tandis que les logements en tirent le matin, en fin de journée ou le week-end. L'énergie électrique provient de capteurs solaires intégrés dans les garde-corps des balcons et posés en toiture.

Un échangeur sur les eaux de la Saône voisine, assure la climatisation des locaux. Une machine à absorption produit de l'eau glacée. Un équipement de cogénération produit chaleur et électricité. L'excédent d'électricité est stocké sur batteries.

→ **Soutien d'une agence japonaise**  
D'après les prévisions, Hikari produira autant d'énergie qu'il en consomme. Les 60 millions d'euros qu'il coûte, pour 13 200 m<sup>2</sup>, ont été financés par Bouygues Immobilier et Nedo, agence japonaise pour la promotion des nouvelles énergies et des techniques industrielles et environnementales. ■

<sup>(1)</sup> Voir aussi projet Cooperate, *Travaux* novembre 2015, n°919, page 14.



## FONCTIONNEMENT HYDRO SÉDIMENTAIRE DU LITTORAL

Le cahier technique sur l'analyse du fonctionnement hydro sédimentaire du littoral aide à comprendre les évolutions physiques d'une côte, à plusieurs échelles de temps et sous l'effet de multiples facteurs. Cette étape de l'étude d'un aménagement côtier inter-

vient avant de caractériser les aléas et indépendamment d'eux. Elle permet de définir le périmètre d'étude et les phénomènes à l'origine des aléas. Il s'agit de procéder à une analyse géomorphologique du territoire, des conditions météorologiques et hydro dyna-

miques, et du fonctionnement hydro sédimentaire. Cette phase comprend également une recherche historique sur la configuration du littoral incluant son occupation humaine et les tempêtes mémorables.

[www.eau-mer-fleuves.cerema.fr](http://www.eau-mer-fleuves.cerema.fr) ■



## CONSTRUCTION MÉTALLIQUE ET ESPACES COMMERCIAUX

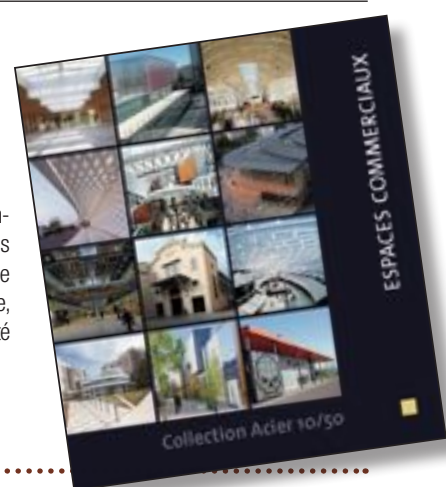
Le métal est souvent utilisé en rénovation d'espaces commerciaux, comme le montre l'ouvrage publié par Construiracier, organisme de promotion de l'acier.

Par exemple, le centre commercial Auchan à Nancy (Meurthe-et-Moselle)

est passé en 2015 d'une enveloppe style entrepôt à une succession de volumes à façades couvertes de bardages en acier de différentes teintes dont une finition aspect cuivre, de la tôle laquée, de l'inox recuit, etc., agrémentées de végétation en pied.

L'ouvrage, bien illustré, présente 12 chantiers utilisant le métal, en rénovation mais aussi en neuf. Il comprend un historique de l'emploi du métal en espaces de vente, rappelant sa faible emprise et sa capacité à porter des verrières.

[www.construiracier.fr](http://www.construiracier.fr) ■



# CESAR

Code aux Eléments Finis  
pour le Génie Civil

## Nouvelle version 6

pour toutes vos analyses 2D et 3D  
en calcul de structures: fondations,  
ouvrages d'art et linéaires ...



Téléchargez une version d'évaluation  
sur [www.cesar-lcpc.com](http://www.cesar-lcpc.com)



itech

Editeur de logiciels pour le Génie Civil

8 quai Bir-Hakeim 94410 Saint-Maurice  
Tél.: +33 | 49 76 12 59  
[www.itech-soft.com](http://www.itech-soft.com)    [contact@itech-soft.com](mailto:contact@itech-soft.com)

## AGENDA

### ÉVÉNEMENTS

#### • 31 MAI AU 2 JUIN

##### Salon des maires

Lieu : Paris (Porte de Versailles)  
www.salondesmaires.com

#### • 31 MAI

##### 3<sup>e</sup> assises nationales des énergies marines renouvelables

Lieu : Biarritz (Pyrénées-Atlantiques)  
www.assises-nationales-emr.fr

#### • 7 AU 9 JUIN

##### Preventica, sécurité-performance des chantiers

Lieu : Lille  
www.preventica.com

#### • 8 ET 9 JUIN

##### 3<sup>e</sup> rencontres nationales de l'urbanisme durable

Lieu : Paris  
www.ademe.fr

#### • 14 AU 16 JUIN

##### Interoute & Ville

Lieu : Paris (Porte de Versailles)  
www.comexposium.com

#### • 15 AU 17 JUIN

##### 13<sup>e</sup> conférence internationale structures métalliques

Lieu : Zielona Gora (Pologne)  
www.iabse.org

#### • 26 AU 30 JUIN

##### 8<sup>e</sup> conférence internationale maintenance, sécurité, gestion des ponts

Lieu : Foz Do Iguacu (Brésil)  
www.iabmas2016.org

#### • 27 AU 29 JUIN

##### 3<sup>e</sup> conférence internationale structures et architecture

Lieu : Guimaraes (Portugal)  
www.iabse.org

### FORMATIONS

#### • 28 AU 30 SEPTEMBRE

##### Techniques d'excavation et de soutènement en site urbain

Lieu : Paris  
http://formation-continue.enpc.fr

#### • 5 AU 7 OCTOBRE

##### Étude d'impact : caractérisation des impacts, cumuls, mesures compensatoires

Lieu : Paris  
http://formation-continue.enpc.fr

#### • 10 AU 12 OCTOBRE

##### Stabilité des pentes et des ouvrages sur pentes

Lieu : Paris  
http://formation-continue.enpc.fr

#### • 11 AU 13 OCTOBRE

##### Concevoir un programme de reconnaissances géotechniques des sols

Lieu : Paris  
http://formation-continue.enpc.fr

### NOMINATIONS

#### AÉROPORTS DE PARIS :

Jean Roche remplace Xavier Dubrac à la direction de la maîtrise d'œuvre et architecture d'ADP.

Xavier Dubrac a été nommé directeur faisabilité et programme.

#### BOUYGUES CONSTRUCTION :

À partir de cet été, Fabienne Viala sera directrice de l'ensemble des activités bâtiment au Royaume-Uni. Elle prend la suite de Madani Sow qui les dirigeait en partie.

#### MER :

Catherine Chabaud, navigatrice, a été nommée déléguée à la mer et au littoral (ministère de l'Environnement).

#### PRÉVENTION DES RISQUES :

Aurélien Gay prend la succession d'Aurélien Louis en tant que chef du bureau du sol et du sous-sol à la direction générale de la prévention des risques (ministère de l'Environnement, de l'Énergie et de la Mer). Aurélien Louis devient sous-directeur de l'industrie nucléaire à la direction générale de l'énergie et du climat.

#### SNBPE :

Pascal Barylo succède à Philippe Queneau à la présidence en Pays-de-la-Loire du collège béton prêt à l'emploi du syndicat national du même nom.

#### VINCI ÉNERGIES :

Olivier Genelot devient directeur de la marque Axians (technologies de l'information et de la communication).



Membre du Réseau Congés Intermédiaires BTP

## CAISSE NATIONALE DES ENTREPRENEURS DE TRAVAUX PUBLICS

Au service de la Profession des Travaux Publics

### Nos missions :

assurer le service des congés payés auprès des salariés des Travaux Publics

procéder au remboursement des indemnités de chômage-intempéries versées par les employeurs de la Profession.

La CNETP regroupe **7 400 entreprises** de Travaux Publics et assure le calcul et le versement de prestations dues à près de **270 000 salariés**.

### Nos coordonnées :

#### Par courrier :

31 rue le Peletier - 75453 PARIS CEDEX 09

Par Internet : [www.cnetp.fr](http://www.cnetp.fr)

Par mail : sur [www.cnetp.fr](http://www.cnetp.fr), lien [nous contacter](#)

#### Par téléphone :

pour les entreprises : 01.70.38.07.70

pour les salariés : 01.70.38.07.77

Serveur vocal (24h/24) : 01.70.38.09.00





# INTERROUTE & VILLE POUR LA PREMIÈRE FOIS À PARIS

LE RENDEZ-VOUS BIENNAL DE LA COMMUNAUTÉ ROUTIÈRE ET DE LA MOBILITÉ, SE TIENT DU 14 AU 16 JUIN À PARIS, CE QUI DEVRAIT LUI DONNER UNE DIMENSION PLUS INTERNATIONALE.

**ISABELLE ALFANO, DIRECTRICE DU SALON, NOUS FAIT PART DES CHANGEMENTS DANS SON ORGANISATION.** PROPOS RECUEILLIS PAR MONIQUE TRANCART

## Interoute, depuis sa création en 2004, s'est toujours tenu en province. Pourquoi le déplacer à Paris ?

Les deux dernières éditions du salon ont eu lieu à Lyon, en 2014 et 2012. En 2010, c'était Metz qui l'accueillait. Il se tenait jusqu'ici au mois d'octobre. Cette année, il s'installe à Paris et au mois de juin. Nous répondons ainsi mieux aux attentes des exposants et nous avons eu l'opportunité de l'organiser en même temps que le salon Transports Publics, dans le même hall du Parc des expositions, Porte de Versailles. Interoute & Ville accueille l'ensemble des acteurs de la communauté des infrastructures et Transports Publics, celle du transport urbain, interurbain et régional dont le rail. Les visiteurs pourront aisément passer de l'un à l'autre. Le salon a atteint sa taille de croisière. Le nombre d'exposants se situe entre 150 et 200 depuis 2010. En 2016, nous attendons 6 000 visiteurs, participation supérieure à celle de la dernière édition. Paris facilite la venue des étrangers. Nous avons investi davantage cette année dans la promotion du salon dans des pays européens. Nous espérons passer de 4-5% d'Européens à 10-12% et accueillir plus de visiteurs hors Europe. Précédemment, nous avons pu compter sur la présence de professionnels de Russie, Pologne, Maroc, Algérie, Cameroun, Sénégal, Togo, Gabon, États-Unis et Canada.

## Quelles modifications accompagnent l'édition parisienne ?

Nous faisons évoluer l'organisation de l'offre. Nous la recentrons sur ce qui préoccupe les visiteurs et



**Isabelle Alfano,**  
directrice  
d'Interoute & Ville

les exposants, autour du patrimoine routier - conception, construction, entretien. Nous séparons clairement les trois univers qui correspondent aux préoccupations du marché. Les exposants sont répartis en trois segments (secteurs dans le salon). Dans "concevoir et construire", seront présents les grandes entreprises routières, celles de matériel, les producteurs de matériaux et les équipements de voirie-réseaux divers (VRD) ; "préserver et exploiter" regroupe l'entretien des chaussées et des dépendances routières, la viabilité hivernale, les bureaux de contrôle, l'ingénierie, les instruments de mesure, les services ; dans le secteur "équiper", figurent la signalisation, les équipements de sécurité, les systèmes de transport intelligents (STI), les technologies connectées, etc.

## Qu'observez-vous sur ce que vont montrer les exposants ?

C'est vraiment un salon de spécialistes portant sur des sujets au cœur des enjeux de la communauté de la route et de la mobilité. Dans leur communication, les exposants mettent en avant les matériels performants et innovants (machines de production d'enrobés, d'application de revêtements, d'entretien, etc.). Les infrastructures intelligentes prennent de plus en plus d'importance avec la présentation de recherches ou de tests sur les échanges d'énergie, l'auto diagnostic, la gestion du trafic, les solutions de localisation, les STI, etc. Les matériaux à faible impact environnemental ressortent également, avec des qualités comme la facilité de recyclage, le moindre coût de production (baisse de la consommation d'énergie) ou la production locale.

## Les visiteurs pourront-ils aussi assister à des conférences ?

Oui, en particulier à celles du congrès de l'Institut des routes, des rues et infrastructures pour

la mobilité (Idrrim) qui se tient en même temps qu'Interoute & Ville, et avec qui nous avons un partenariat depuis 2012. Les 14 et 15 juin, 800 congressistes pourront assister à une quarantaine d'exposés autour du thème "Des infrastructures indispensables, innovantes et engagées dans la transition énergétique". Il sera question de l'entretien et de la gestion du patrimoine des infrastructures de transport, des méthodes d'auscultation non destructives et moins coûteuses, de recyclage, etc. Par ailleurs, le Syndicat des équipements de la route organise des ateliers sur son stand.

## Vous dirigez aussi Intermat ?

En tant que directrice du pôle construction au groupe Comexposium, je suis également responsable d'Intermat. Nous préparons la prochaine édition qui a lieu en 2018, du 23 au 28 avril, à Paris Nord-Villepinte accompagné, pour la deuxième fois, du forum World of Concrete Europe sur le béton.

## GUIDE DU SALON

**DATES :**  
Mardi 14 juin au jeudi 16

**LIEU :**  
Paris, Porte de Versailles, hall 1

**OUVERTURE :**  
9h - 18h30 tous les jours

**CONGRÈS DE L'IDRRIM :**  
14 et 15 juin, hall 1

[www.interoute-ville.com](http://www.interoute-ville.com)

# PONT YAVUZ SULTAN SELIM SUR LE BOSPHORE 9 SEMAINES POUR UN RECORD DU MONDE

L'ASIE MINEURE ET L'EUROPE N'EN FINISSENT PLUS DE SE RAPPROCHER. ALORS QUE, PENDANT DES MILLÉNAIRES, SEULS DES BATEAUX ONT PERMIS DE TRAVERSER LE BOSPHORE, L'ANCIENNE BYZANCE A JETÉ DEUX PONTS SUR LE DÉTROIT CES 40 DERNIÈRES ANNÉES ET EN CONSTRUIT ACTUELLEMENT UN TROISIÈME : LE PONT YAVUZ SULTAN SELIM, D'UNE LONGUEUR TOTALE DE 2 164 M, AVEC UNE PORTÉE CENTRALE DE 1 408 M. **ENTRETIEN AVEC MICHEL VIRLOGEUX (MICHEL VIRLOGEUX CONSULTANT) ET JEAN-FRANÇOIS KLEIN (T-INGÉNIERIE).** PROPOS RECUEILLIS PAR MARC MONTAGNON



© MARC MONTAGNON

À BIEN DES ÉGARDS, LE TROISIÈME PONT SUR LE BOSPHORE CONSTITUE UN OUVRAGE « D'EXCEPTIONS » QUE RECENSENT DANS LE DÉTAIL SES DEUX CONCEPTEURS : MICHEL VIRLOGEUX, DIRECTEUR DE MICHEL VIRLOGEUX CONSULTANT ET JEAN-FRANÇOIS KLEIN, DIRECTEUR ASSOCIÉ DE T-INGÉNIERIE.

## Comment avez-vous été amenés à participer à ce projet d'exceptions ?

Tout a commencé fin février 2012 lorsque Luigi Realini, un confrère de l'entreprise Astaldi, avec qui j'avais déjà travaillé sur d'autres projets, m'a contacté pour m'indiquer qu'Astaldi avait décidé de concourir en collaboration avec İçtas à la construction d'une autoroute de 150 km en Turquie incluant un pont sur le Bosphore et qu'il souhaitait faire appel à mes services ainsi qu'à ceux de Jean-François Klein et de T-ingénierie pour la conception de l'ouvrage. Le 25 février, pour être précis, il nous a indiqué qu'il fal-

lait donner une réponse pour le 6 avril suivant.

Nous avons réfléchi un petit moment. Et nous avons accepté, malgré les risques. Car tout devait se décider très rapidement, même si nous avons bénéficié d'un délai supplémentaire de 3 semaines. Nous ne disposions que de 9 semaines pour rendre notre copie. Nous avons réussi à présenter un projet qui, dans l'ensemble, est très peu différent de celui dont on vient de claver la travée centrale au dessus du Bosphore à la mi-mars 2016.

Ce qui fait qu'en l'espace d'à peine plus de quatre ans, nous sommes passés de la feuille blanche au cla-

vage du dernier voussoir du tablier, ce qui est tout à fait exceptionnel pour un projet de cette ampleur, sachant que les études proprement dites n'ont réellement commencé qu'en juillet 2012. Le chantier s'est ouvert en janvier 2013 avec une cérémonie de pose de la première pierre le 29 mai 2013. Le clavage de la travée centrale sera ainsi intervenu moins de trois ans après le lancement officiel du chantier.

C'est le concessionnaire ICA - Joint Venture composée de Astaldi et İçtas - qui a démarré les travaux par les terrassements et les fondations des pylônes tandis que la construction du pont principal était sous-traitée au

groupement coréen Hyundai/SK qui a pris possession des lieux en mars 2013.

## Quelles sont les grandes particularités de l'ouvrage ?

Ce pont supporte 2 x 4 voies autoroutières et deux voies ferrées capables de supporter des trains miniers, c'est-à-dire d'une charge de 8 t/m, multipliée allègrement dans les calculs par 1,33 afin de préserver l'avenir, à la demande de l'Union Internationale des Chemins de Fer<sup>(1)</sup>.

Les charges d'exploitation variables que supporte l'ouvrage sont supérieures de plus de 50% à celles de



© ICA

2



© THIERRY DELÉMONT - T-INGÉNIERIE

3



son poids propre, sur une portée de 1 408 m - soit presque 2 fois le pont de Normandie -, ce qui en fait le record mondial des ponts ferroviaires.

Le concours demandait un pont suspendu qui, en même temps, soit élégant sur le plan architectural et respecte le style architectural des deux ponts déjà existants dans le détroit. C'est ainsi qu'un unique niveau de circulation a été privilégié plutôt qu'un tablier en treillis à deux étages superposés. La conséquence est un tablier d'une largeur totale de 58,50 m : pour donner une comparaison imagée, l'avenue des Champs-Élysées a une largeur totale de 70 m dont 30 m pour les 8 voies routières.

Compte tenu des charges engendrées par le passage des trains, l'une des difficultés était de réaliser un pont suspendu en caisson, plat et profilé pour réduire l'impact du vent.

Nous avons repris à notre compte une idée du 19<sup>e</sup> siècle, que l'on peut qualifier d'hybride, en concevant un pont à la fois haubané à proximité des pylônes et suspendu dans la partie centrale avec une grande zone de transition. Ce schéma d'association suspension/haubanage a déjà été utilisé, par exemple, pour la réalisation du pont de Brooklyn à New York dans les années 1880, à la différence que l'ensemble de la portée du pont est supportée par les deux systèmes combinés. Ensuite la technique n'a plus jamais été utilisée peut-être parce que le besoin ne s'en est pas fait sentir.

Avec les charges induites par les voies ferrées, il fallait retrouver avec un tablier en caisson profilé la rigidité que nous aurait naturellement conférée un tablier en treillis à deux niveaux. Nous avons retrouvé, grâce au haubanage, la rigidité nécessaire de la structure et limité les déformations au passage des trains à des valeurs admissibles.

Avec un pont suspendu classique et un tablier identique, la flèche sous charge atteindrait entre 8 et 9 m alors qu'avec

## T-INGÉNIERIE EN BREF

**Fondée à Genève en 1920 par l'illustre ingénieur Robert Maillart, T-Ingénierie assure la continuité de plusieurs bureaux d'ingénieurs en nom propre qui ont successivement exercé leur activité à Genève et à l'étranger.**

**La société est spécialisée en études de structures complexes, et en particulier en ouvrages d'art, assurant les études de conception, de projet et d'exécution, ainsi que la direction et le contrôle de l'exécution des travaux. Bien que d'une taille modeste avec 60 collaborateurs, son rayon d'action est mondial.**

**La direction de la société est assurée par un conseil d'administration formé d'ingénieurs diplômés de hautes écoles (École Polytechnique Fédérale de Lausanne - EPFL) dont fait partie Jean-François Klein, Dr es sc. tech., ingénieur civil EPFL.**

**De nombreux ouvrages remarquables sont issus de leurs travaux. Plusieurs membres du conseil ont participé activement aux recherches et aux développements des ponts à haubans dans le cadre de l'EPFL et tout au long de leur activité.**

la technique que nous avons retenue elle est limitée à 3,65 m.

Le mouvement vertical est très faible en regard de la portée. La charge maximale - train plus voitures - que supporte le tablier est évaluée à 54 % des

charges permanentes, poids propre et superstructures, soit 25 t/m à comparer à 47 t/m.

Tout est différent de ce qui a été réalisé jusqu'à présent dans le dimensionnement, dans les matériaux mis en œuvre, dans les efforts et les déplacements.

En raison de l'importance des charges variables, nous avons choisi des haubans dont la résistance à la rupture est supérieure à celle requise habituellement : elle se situe à 1 960 MPa, contre 1 770 MPa, par exemple, pour le pont de Normandie et 1 860 MPa pour le viaduc de Millau.

Le tablier lui-même est en acier d'une résistance de 460 MPa, avec quelques pièces particulières dans un acier d'une résistance de 690 MPa.

Les 56 voussoirs courants et le voussoir central sont fabriqués dans une installation lourde au bord de la mer de Marmara, conçue pour produire ces pièces d'un poids unitaire de l'ordre de 950 t dont les dimensions sont impressionnantes : 58,50 m de largeur et 24 m de longueur.

## Comment avez-vous résolu le problème de la rapidité de construction ?

Un autre point du cahier des charges à respecter était évidemment la rapidité de construction : il était mentionné que l'ensemble de l'opération devait se dérouler en 36 mois.

Le fait de ne suspendre que la partie centrale de la grande travée à partir des câbles principaux de suspension nous permettait d'optimiser le délai de construction. La partie haubanée peut être réalisée pendant l'achèvement de la construction des pylônes et pendant le tissage des deux câbles principaux, de telle sorte qu'il ne reste plus, au final, qu'à lever et assembler la partie centrale.

Autre avantage : cela diminue la taille des câbles porteurs et donc le temps de leur réalisation. La partie centrale étant la seule à être suspendue, il n'est pas nécessaire que les câbles porteurs soient en place pour commencer le montage du tablier, d'où un gain de temps très important.

Le premier voussoir en encorbellement a été posé le 25 décembre 2014 et le premier voussoir suspendu à partir des câbles porteurs le 15 janvier 2015. Tout ce qui a été fait avant, c'est autant de temps gagné, sachant que le montage des voussoirs d'un pont suspendu est plus rapide que celui, en encorbellement et à l'avancement, d'un pont haubané.

Si le pont avait été purement suspendu, il aurait fallu attendre la fin de la construction des pylônes et de la fabrication des câbles porteurs pour commencer le montage du tablier.

Il est plus compliqué de réaliser un pont en encorbellement, car cela engendre des efforts de flexion importants lorsqu'un nouveau voussoir est levé depuis le fléau à l'aide d'un lourd derrick, avant que la charge puisse être reprise par une nouvelle paire de haubans ; il faut assurer la soudure complète du nouveau voussoir ▷

**1- De gauche à droite : Jean-François Klein et Michel Virlogeux.**

**2- L'ouvrage tel qu'il se présentait en février 2016.**

**3- En novembre 2014, achèvement de l'un des pylônes au niveau de la dalle de selle, c'est-à-dire à 304 m de hauteur.**

**4 et 5- Installation du catwalk en juillet 2015 et préparation de l'assemblage du câble principal.**

© THIERRY DELÉMONT - T-INGÉNIERIE



© THIERRY DELÉMONT - T-INGÉNIERIE



sur le précédent avant de passer à l'étape suivante, ce qui prend plus de temps qu'avec un pont suspendu où les connections sont réduites, ce qui permet de placer des équipes sur plusieurs voussoirs à la fois.

### Les pylônes, qui sont plus hauts que la tour Eiffel, présentent-ils des particularités ?

La portée de l'ouvrage requise par les conditions du concours positionnait un pylône dans le Bosphore. Nous avons réussi à convaincre le concessionnaire qu'il était préférable d'implanter les pylônes sur les rives pour sécuriser au maximum le planning, c'est-à-dire d'éviter les travaux off-shore, de façon à s'affranchir de l'ensemble des problèmes administratifs et réglementaires liés au trafic maritime.

Nous lui avons proposé de passer des 1 275 m de portée requis dans l'appel d'offre à 1 408 m, ce qui n'est pas un petit pas, pour sécuriser les fondations en posant les pylônes sur les rives. Il nous a heureusement suivi dans ce choix ce qui a permis de réaliser les fondations dans un délai record, d'autant que le sous-sol est de bonne qualité. Cela n'aurait sans doute pas été le cas si les pylônes avaient été construits dans le détroit : chaque jambe de pylône - il y en a deux par pylône - s'appuie sur un puits de fondation cylindrique de 20 m de diamètre et 20 m de hauteur.

Les pylônes eux-mêmes sont des ouvrages en béton d'une hauteur de 325 m, qui comportent en partie haute, à partir de 208 m et jusqu'à 304 m, les 88 pièces en acier (22 par jambe de pylône) qui assurent l'ancrage des haubans, un à l'avant et un à l'arrière. Entre 304 m et 325 m d'altitude sont installées les selles de déviation des câbles principaux.

Les travées de rive sont extrêmement courtes ce qui a entraîné des dispositions particulières au niveau des haubans : les cinq plus grands

## MICHEL VIRLOGEUX : L'HOMME DES 100 OUVRAGES D'ART

**Polytechnicien et ingénieur en chef des Ponts et Chaussées, Michel Virlogeux a contribué au développement de nombreuses techniques de construction modernes, notamment dans les domaines de la précontrainte extérieure au béton et des ponts à haubans.**

**Ingénieur conseil indépendant depuis 1995, après 20 ans passés au SETRA, dont 15 comme chef de la division des grands ouvrages en béton, puis en béton et en métal. Il compte à son actif plus de 100 ouvrages d'art dont plusieurs font référence dans le monde et ont d'ailleurs été primés. Parmi les plus récents : pont de Normandie, viaduc de Millau, pont Gustave Flaubert à Rouen, pont de Térénez en Bretagne, pont Jacques Chaban-Delmas à Bordeaux...**

haubans arrière sont ancrés, non dans le tablier, mais directement dans le sol. Il en résulte une situation particulière. L'effet horizontal de ces haubans ancrés dans le sol est compensé par une traction de 8 000 t dans la partie centrale de la grande travée.

### Et le système de suspension, en quelques mots ?

Le tablier de l'ouvrage est porté par un système de suspension hybride comprenant 176 haubans multi-torons, représentant 8 400 t d'acier et dont le plus long mesure 588 m, et deux câbles de suspension de 2 420 m de long auxquels sont suspendues 34 paires de suspentes verticales soutenant la partie centrale du pont. La portée de 1 408 m constitue un nouveau record dans la catégorie des ouvrages à haubans, qui est actuellement détenu par le pont de l'île Russky à Vladivostok, avec 1 104 m.

Les dimensions des câbles de haubanage sont à la mesure de l'ouvrage : les plus petits sont constitués de 91 torons, les plus gros de 155 torons. Par comparaison, les plus gros câbles du pont de Normandie comportent 55 torons, ceux du viaduc de Millau, 91 torons. Le câble principal, d'un diamètre de 790 mm, est constitué d'un

assemblage de fils de 5,40 mm de diamètre en acier 1860 MPa formant des torons hexagonaux de 127 fils assemblés en 122 paquets pour les travées de rive et 113 paquets pour la travée centrale. Les paquets sont comprimés pour former un ensemble circulaire autour duquel sont mises en place la protection contre la corrosion et l'étanchéité, ce qui aboutit au diamètre final.

### Le pont Yavuz Sultan Selim marque-t-il une étape dans la conception et la réalisation des futurs grands ouvrages ?

Il s'inscrit dans l'évolution actuelle des projets d'ouvrages d'art qui prennent des dimensions de plus en plus impressionnantes et, surtout, font partie intégrante de lots de travaux tout aussi démesurés.

Il y a actuellement en construction de nombreux projets de cette ampleur dans le monde aux États-Unis, au Canada, en Turquie. On constate une augmentation de la taille des projets qui est peut-être due au fait que les techniques actuelles permettent de réaliser des ouvrages qu'il n'aurait pas été possible de construire il y a 30 ans et que l'on peut entreprendre aujourd'hui pour plusieurs raisons.

Nous avons désormais une maîtrise plus grande qu'autrefois des forces physiques telles que celles engendrées par le vent et les séismes.

L'informatique a progressé également mais elle ne constitue toujours qu'un outil et seulement un outil facilitant le travail.

À cela s'ajoute une évolution au niveau du financement. Les projets de concession sont de plus en plus nombreux, avec des partenariats public/privé. D'une façon générale, les États sont exsangues. Pour réaliser des projets de grande envergure, ils font donc appel à des partenaires privés. C'est le cas du pont sur le Bosphore dont nous venons de parler. C'est le cas pour le viaduc de Millau, comme pour bien d'autres. On pourrait multiplier les exemples. À partir de là, il est nécessaire d'atteindre une taille critique pour assurer la rentabilité à terme d'un projet. Il faut que les revenus du péage soient suffisants pour financer un grand projet ou que soit mis en place un système de loyer versé au concessionnaire par l'État concerné, lorsque l'opération n'est pas finançable uniquement par le péage. Une autre raison est que l'on a vu se développer, au fil des dernières années, des entreprises de plus en plus puissantes dont la taille, et donc les moyens, sont de plus en plus importants.

En France, il y a une quarantaine d'années, dans les appels d'offre, quinze à vingt entreprises étaient capables de concourir pour construire de grands ouvrages. Aujourd'hui, le paysage s'est réduit à trois, voire quatre groupes, d'une taille suffisante tant financière qu'en hommes et en moyens techniques pour s'engager dans une concession.

Il en est de même au niveau mondial. Il s'est créé une catégorie d'entreprises internationales - Vinci et Bouygues, en France, Skanska, en Suède, Dragados, en Espagne, par exemple, sans parler des asiatiques, qu'elles soient





Chinoises, Coréennes ou encore Japonaises - une douzaine au total à l'échelle de ces très grands projets et qui, en général, lorsque le projet le justifie, se regroupent à plusieurs.

La préqualification pour concourir à de tels projets atteint également des sommets : actuellement, pour pouvoir participer à la préqualification pour la construction du quatrième pont sur le canal de Panama, il est demandé au leader du groupement candidat un chiffre d'affaires annuel de 6 milliards de dollars. De tels projets ne peuvent donc s'adresser qu'à des entreprises d'une taille énorme.

Cette évolution s'accompagne du fait, préoccupant pour des sociétés comme la nôtre, que l'on a tendance à voir apparaître des ingénieries de plus en plus grosses, constituées à la suite d'une succession de rachats de bureaux d'étude de toutes tailles, mais qui n'ont pas toujours la compétence technique que l'on peut trouver dans des bureaux d'études très spécialisés comme T-Ingénierie en Suisse ou Leonhardt en Allemagne.

Ces grandes ingénieries ont en portefeuille de nombreuses références parce qu'elles sont réparties dans le monde entier, ce qui leur permet de satisfaire un cahier de références en « piquant » des exemples de travaux auxquels elles auront participé de près ou de loin. Cette mondialisation présente un grand danger dans l'évolution du panel des bureaux d'études moyens ou petits.

### Sur un projet comme celui du pont sur le Bosphore, combien de personnes sont-elles intervenues au niveau des études ?

Dans le temps extrêmement court dont nous disposons, nous avons mobilisé une équipe d'une centaine de personnes pour la production, en un peu plus d'une année, de quelques 5 000 plans d'exécution et 400 notes de calcul.

C'est une force de frappe qu'il faut mobiliser du jour au lendemain. Nous avons préparé le concours de février à fin avril 2012.

Nous avons reçu le résultat fin mai 2012 et nous avons eu le feu vert fin juillet 2012.

### Des évolutions sont-elles prévisibles au niveau des matériaux ?

Ce n'est pas encore pour demain pour les très grands ouvrages, mais des matériaux commencent à être utilisés pour des réalisations de taille moyenne : des câbles en carbone, qui sont encore très coûteux, des fibres et du balsa pour avoir des structures extrêmement légères ainsi que des matériaux composites.

Jusqu'à présent, ils ont été mis en œuvre essentiellement pour des réalisations dans le nautisme ou sur des structures limitées dans leur utilisation. L'absence de normalisation et une problématique de contrôle de qualité freinent leur développement pour des ouvrages publics.

Ces matériaux sont désormais utilisés dans la construction aéronautique.

Un pas a donc été franchi dans l'industrie et il est vraisemblable que l'on va également le franchir dans les constructions.

6- Installation du câble principal de 790 mm de diamètre.

7- Compactage du câble principal pour lui donner une forme circulaire.

8- Montage des segments suspendus du tablier central.

9- Un collier de suspente des câbles du tablier central en place sur le câble principal.

### Et le BFUP ?

Il y a encore un grand pas à faire avant de remplacer le béton traditionnel par du BFUP et l'intérêt ne se situe pas à ce niveau, sauf pour de petits ouvrages tels que les passerelles qui ont une autre vocation.

Par contre, il y a des niches possibles pour utiliser le BFUP pour ses particularités et ses caractéristiques propres dans des applications bien spécifiques, par exemple, pour renforcer des dalles orthotropes en acier. Ce sont des applications qui ont déjà été réalisées aux Pays-Bas et qui sont envisagées aux Etats-Unis.

La difficulté réside dans la liaison entre la tôle et ce BFUP. Plusieurs viaducs ont déjà été renforcés en Suisse avec une réfection de la surface en BFUP, mise en œuvre avec une machine spéciale de pose identique à celle utilisée pour la pose d'enrobés.

Nous ne sommes pas encore convaincus pour les ouvrages eux-mêmes car il y a des effets d'échelle qui ne sont pas bien maîtrisés, notamment des phénomènes de retrait considérables pour les BFUP coulés en place.

En revanche, on pourrait très bien combiner l'étanchéité et le revêtement avec du BFUP en repensant les ouvrages différemment.

Il faut faire évoluer les structures pour utiliser les nouveaux matériaux à bon escient, en ne se contentant pas de les mettre en œuvre en simple remplacement des matériaux existants.

Ce sont des défis que l'on va avoir à relever dans les années à venir. □

1- L'U.I.C. est une organisation internationale qui compte notamment 81 membres actifs dont les Chemins de fer d'Europe, de Russie, du Proche-Orient, du Maghreb, de l'Afrique du Sud, de l'Inde, du Pakistan, de la Chine, du Japon, de la Corée, du Kazakhstan, et de compagnies à rayonnement mondial. Son rôle est de promouvoir le transport ferroviaire à l'échelle mondiale et relever les défis de la mobilité et du développement durable.

### QUELQUES CHIFFRES

**COÛT DU PROJET :**  
800 millions d'euros

**LONGUEUR TOTALE :**  
2164 m

**PORTÉE CENTRALE :**  
1408 m

**LARGEUR DU TABLIER :**  
58, 50 m

**HAUTEUR DES PYLÔNES :**  
321,90 m

### LES INTERVENANTS

**MAÎTRE D'OUVRAGE :** KGM (ministère des transports de Turquie)

**CONCESSIONNAIRE :** ICA - (Joint Venture italo-turque composée de Içtas Insaat et Astaldi S.P.a)

**CONCEPTION :** Jean-François Klein T-Ingénierie (Genève), Michel Virlogeux Consultant (Paris)

**CONSTRUCTION :** Hyundai Engineering & Construction / SK Engineering & Construction (Corée)

**ÉTUDES D'EXÉCUTION :** T-Ingénierie, Michel Virlogeux Consultant, Greisch (Belgique), Grid (Portugal), Lombardi (Italie)

**ESSAIS EN SOUFFLERIE ET ÉTUDES CLIMATIQUES :** Cstb - Nantes (France), Polytecnico di Milano (Italie)

**MISSION DE CONTRÔLE POUR LE CONCESSIONNAIRE :** Setec Tpi (France)

© ICA

8



© THIERRY DELÉMONT - T-INGÉNIERIE

9





© MARC MONTAGNON

# GROUPE GAGNERAUD QUAND INDÉPENDANCE ET RÉACTIVITÉ RIMENT AVEC PÉRENNITÉ

REPORTAGE DE MARC MONTAGNON

PLUS DE 130 ANS APRÈS SA CRÉATION EN 1880, L'ENTREPRISE GAGNERAUD CONSTITUE UN CAS UNIQUE DANS LE SECTEUR DE LA CONSTRUCTION : ELLE A VU SE SUCCÉDER À SA TÊTE CINQ GÉNÉRATIONS D'ENTREPRENEURS : JEAN, LE FONDATEUR, DEUX DE SES FILS, ANTONIN ET FERDINAND, PUIS MARCEL ET FRANCIS, RESPECTIVEMENT GRAND-PÈRE ET PÈRE DE L'ACTUEL PRÉSIDENT ROGER FRANÇOIS GAGNERAUD, TANDIS QUE SON FILS JEAN-FRANCIS SE PRÉPARE À PRENDRE LA RELÈVE. UNE SINGULARITÉ DE L'EXCEPTIONNELLE SAGA DE BÂTISSEURS QUI A PERMIS À CETTE ENTREPRISE EXCLUSIVEMENT FAMILIALE DE FAIRE FACE, ANNÉE APRÈS ANNÉE, AUX INCERTITUDES DU MARCHÉ ET À DES CONJONCTURES ÉCONOMIQUES SOUVENT DIFFICILES ET QUE NOUS RETRAÇONS AVEC LA COLLABORATION DE BENOÎT HEITZ, DIRECTEUR GÉNÉRAL DE GAGNERAUD CONSTRUCTION.



Le Groupe Gagneraud est constitué d'une part de Gagneraud Construction, son pôle BTP, qui réalise de l'ordre de 330 millions d'euros de chiffre d'affaires avec 1 500 collaborateurs dans quatre directions régionales - Nord, Normandie, Ile de France et Provence-Alpes-Côte d'Azur - et d'autre part la région Bretagne, la direction régionale dite « groupe Ouest », constituée essentiellement par l'entreprise bretonne Marc, reprise en 1972, qui emploie 1 200 collaborateurs et réalise un chiffre d'affaires de l'ordre de 160 millions d'euros.

Dans ces chiffres sont compris ceux de l'exploitation de plusieurs carrières, essentiellement en Bretagne, en PACA et dans le Nord de la France ainsi que de plusieurs centrales d'enrobage, la production de ces usines étant vendue très majoritairement à des tiers : le groupe n'est pas consommateur des matériaux qu'il produit.

« Si les entreprises familiales sont celles qui résistent le mieux aux crises, c'est également parce qu'elles résistent aux pressions extérieures, indique Benoît Heitz, qu'elles viennent des effets de mode de la communication ou des places financières. Tel est le cas du groupe Gagneraud, qui réalise aujourd'hui 500 millions d'euros de chiffre d'affaires et emploie 2 700 collaborateurs. Un éternel souci d'indépendance se transmet dans chacune des régions où le groupe est présent, chaque entité fonctionnant de manière autonome, dans la confiance et la délégation de pouvoir, à l'image même de l'esprit maison. »

De façon générale, depuis 1973, année du premier choc pétrolier, aux années 80, a disparu progressivement du paysage français un type de sociétés qui semblait avoir fait son temps : les entreprises de travaux publics à capital familial. Ont subsisté alors quelques "dinosaures" comme le groupe Gagneraud qui fait aujourd'hui figure d'exception dans la profession. « Il faut chercher les explications de cette réussite, précise Benoît Heitz, dans une stratégie de développement du groupe dans les années 50 à 70 qui a misé sur une capacité d'innover et évolué vers de nouvelles activités annexes ou connexes à la construction ».

« Aujourd'hui, cette résistance de Gagneraud aux crises successives résulte de trois raisons principales : des capitaux propres suffisants, des prises de risque mesurées qui privilégient les marges et la rentabilité au développe-

© MARC MONTAGNON



## UNE ÉPOPÉE FAMILIALE DEPUIS 135 ANS

**Originaires des plateaux de la Marche, dans le Limousin, les Gagneraud ont développé depuis cinq générations une société originale à la culture d'entreprise omniprésente et à l'identité forte.**

**Cette maison familiale a été créée en 1880 par un Creusois qui mène alors une double activité d'agriculteur et de maçon.**

**Agé de 56 ans, Jean Gagneraud (1824-1914) s'associe à ses trois fils, Sylvain dit « Antonin », Chéri et Ferdinand, pour fonder Gagneraud Père & Fils, une entreprise de travaux publics.**

**De 1880 à 1910, l'entreprise, constituée sous la forme d'une association de personnes physiques du nom de Gagneraud Père et Fils, fixe son siège à Dijon et se développe grâce à l'essor des chemins de fer.**

**Entre 1910 et 1922, la direction de la société est alors exercée par Antonin et Ferdinand Gagneraud qui transfèrent le siège à Orléans, élargissant leur activité à la production de matériaux de carrières et de ballastières.**

**En 1922, Marcel Gagneraud, petit-fils du fondateur, reprend le flambeau et établit rue Auguste Maquet, à Paris, le siège de la société, qui y est toujours. Durant cette période, le groupe se met solidement en place en acquérant une véritable expertise dans la construction de voies ferrées, dans l'exploitation de carrières et de ballastières, dans la réalisation de travaux de génie civil. Elle s'étend géographiquement en France ainsi qu'au Maroc et en Algérie.**

**Entre 1960 et 1983, le développement s'accélère et Francis Gagneraud, fils de Marcel, dirige les opérations. Il élargit les activités au bâtiment, aux ouvrages d'art en béton armé, à la construction industrielle ainsi qu'aux travaux maritimes. Il développe les services à l'industrie et à la sidérurgie et les transports de passagers. Le groupe traverse l'Atlantique en 1956 et exerce en Argentine et au Chili dans toutes ses activités européennes.**

**De 1983 à aujourd'hui, la société est présidée par Roger-François Gagneraud, cinquième du nom, dit « François », qui conforte les acquis du groupe et développe de nouvelles activités : construction métallique, travaux d'altitude, concessions d'ouvrages publics. La production de matériaux se diversifie aux produits spéciaux.**

**1- Gagneraud de père en fils depuis 135 ans. De gauche et à droite et de haut en bas : Jean, Antonin, Ferdinand, Marcel, Roger, Francis.**

**2- Benoît Heitz, directeur général de Gagneraud Construction.**

ment inconsideré du chiffre d'affaires, des "patrons" qui ont su transmettre à temps le témoin entrepreneurial à leurs fils : Marcel à Francis dans les années 50, Francis à François entre 1978 et 1983 ».

Gagneraud Construction exerce ses activités dans l'hexagone dans 6 secteurs du BTP : bâtiment, contractant général, génie civil, ouvrages d'art, travaux publics, production de matériaux, services.

## BÂTIMENT : RECHERCHE DE LA VALEUR AJOUTÉE

Dans le bâtiment, l'entreprise réalise depuis des décennies tous types de construction : équipements, bureaux, logements, hôtels, résidences spécialisées, bâtiments industriels.

Projets publics ou privés, neufs, de réhabilitation ou de restructuration, projets en entreprise générale, en clé en main ou en contrat de promotion immobilière, elle s'engage sur les opérations et son savoir faire constitue une réelle valeur ajoutée en intégrant les objectifs des maîtres d'ouvrages et des maîtres d'œuvre. Parmi les réalisations remarquables récentes, il faut citer le Conservatoire de Musique de Villemonble, en Seine-St-Denis, conçu par l'Atelier Brunel (architecte) et la rénovation du "Volcan" au Havre.

Le Volcan, cheminée de béton blanc de l'architecte brésilien Oscar Niemeyer, était endormi depuis près de cinq ans pour cause de rénovation lourde.

Le Volcan, dont les formes courbes dialoguent avec les formes rectilignes des immeubles de Perret, a été édifié entre 1978 et 1982. Très controversé au début, qualifié par ses détracteurs de "pot de yaourt" ou encore de "centrale nucléaire" - l'ensemble architectural composé d'un "grand volcan" (la grande salle) et d'un "petit volcan" (lieu de répétition) construit en contrebas du niveau de la ville est désormais devenu un symbole du Havre.

Sans que le monument ne soit en rien dénaturé, il est maintenant désenclavé par un grand escalier en pente douce menant à son entrée. La lumière y entre plus facilement par la suppression des portes hydrauliques du grand Volcan, remplacées par des portes en verre et par la pose d'une verrière sur le toit du petit Volcan. À l'intérieur du bâtiment principal, la jauge de la grande salle a été réduite de 1 100 à 800 places et, surtout, le bois a fait son entrée en force, apportant chaleur ainsi qu'une bien meilleure acoustique. L'espace Niemeyer a été réhabilité en totalité depuis que les travaux du petit volcan se sont achevés à l'automne 2015.

## CONTRACTANT GÉNÉRAL : « CLÉ EN MAIN »

En tant que contractant général, activité relativement récente puisqu'elle date de 2008, la filiale Cg2i s'est rapidement imposée pour la construction « clé en main » de bâtiments industriels, commerciaux et tertiaires, spécialement dans le Nord, dont elle constitue l'une des spécificités.



3



4

© GAGNERAUD

Cg2i, contractant général de Gagneraud Construction, réalise les bâtiments, en prenant un engagement contractuel sur les résultats en termes de qualité, de délais et de consommation énergétique. « Elle constitue l'interlocuteur unique pour la construction ou la réhabilitation des bâtiments, précise Benoît Heitz, depuis la conception du cahier des charges jusqu'à la livraison de celui-ci, en incluant la planification ainsi que l'assistance aux démarches réglementaires et administratives ».

L'une des réalisations importantes de la région est le nouveau site de production du groupe Atlantic à Douvrin, dans le Pas-de-Calais.

Ce projet d'Atlantic, fabricant de radiateurs, chaudières, pompes à chaleur, systèmes de climatisation, était connu depuis mai 2014.

La nouvelle usine réalisée par Gagneraud en 2015 s'étend sur 20 000 m<sup>2</sup> avec une extension prévue de 10 000 m<sup>2</sup>.

### GÉNIE CIVIL : L'INDUSTRIE POUR PRÉFÉRENCE

Dans le domaine du génie civil, de la conception à la réalisation, Gagneraud Construction réalise des opérations dans le secteur industriel comme la pétrochimie ou pour ERDF avec la construction de postes sources. Elle s'est également spécialisée dans les travaux de la filière eau avec la construction de station d'épuration des eaux usées ou de boues, de relevage, des usines d'eau potable, des réservoirs de toutes dimensions.

Dans les années 80, elle s'est lancée dans la construction de parkings dont elle assure, pour certains, l'exploitation : parkings Estienne d'Orves, Vallier, Breteuil à Marseille.

### OUVRAGES D'ART : LA RAISON EST DE MISE

Bien que la construction d'ouvrages d'art ne soit pas la plus importante des activités de Gagneraud, elle perpétue

**3- Après la guerre, Gagneraud fait face au défi des chantiers de la reconstruction : ici, le chantier de l'îlot V2 au Havre en avril 1951.**

**4- Reconstruction d'un îlot prioritaire dans le village martyr de Hatten, dans le Bas-Rhin en 1945 et 1946.**

**5- L'hôpital Saint Joseph à Marseille (maître d'œuvre : Archipel Architectes Associés).**

**6- Le poste ERDF de Cannes La Bocca (José Morales, architecte).**

ce métier depuis les années 1890 où, déjà, elle était présente lors de la construction des lignes de chemin de fer avec des ouvrages très techniques comme la construction du viaduc de Cognières en Haute Saône. Elle a axé son activité dans ce métier sur des ouvrages de dimension moyenne : pont autoroutier, pont sur rivière, encorbellements, pont route...

« Parmi les réalisations récentes, indique Benoît Heitz, le pont sur l'Argens à Fréjus, dans le Var, constitue une référence intéressante. Il s'agit d'un pont routier sur rivière, de type bow-string, de 62 m de portée et de 13,80 m de large, fondé sur pieux forés tubés en Ø 1 200, de 25 m de profondeur. La construction inclut des dalots contre les inondations à l'arrière des culées sur 15 m. Le sol a été conforté par des colonnes ballastées de 33 m de profondeur. L'ouvrage a nécessité un tracé routier neuf de 600 m avec écrans anti-bruit sur 265 m de longueur ».



5



6

© GAGNERAUD





7



8



9



10



11

## TRAVAUX PUBLICS : VRD ET URBANISME

Au sein de son activité travaux publics, l'entreprise, forte de son expérience dans le domaine de l'exploitation des matériaux, a développé la fabrication et la mise en place d'enrobés ou de liants hydrauliques tout particulièrement en Normandie et en PACA, par le biais de sa marque Arobia.

La branche TP de Gagneraud intervient également dans tous les travaux de VRD tels que la pose de réseaux d'assainissement, l'adduction d'eau et tous types d'opérations sur réseaux de réseaux.

Elle est aussi très active dans l'aménagement urbain : pavage, dallage, revêtement de sol, travaux routiers, chaussées.

Dans le secteur des infrastructures de transport, ses références sont nombreuses : première ligne de tramway du Havre, amélioration du littoral à La Ciotat (13), extension de la ligne de tramway T3 à Paris, modernisation et prolongement de la ligne 68 du tramway de Marseille sur une longueur de 4 km...

**7- Le réservoir d'eau de 15 000 m<sup>3</sup> du quartier de Bellevue à Fréjus (maître d'œuvre : Safège).**

**8- Le réservoir semi-enterré de 3 500 m<sup>3</sup> de Saint Aygulf dans le Var (maître d'œuvre : Ingerop).**

**9- Le pont sur l'Argens à Fréjus, de type bow-string, de 62 m de portée (maître d'œuvre : Conseil Général du Var)**

**10- Le pont sur l'Argens fondé sur des pieux de 25 m de profondeur.**

**11- Le réaménagement des accès au pont de Tancarville, et notamment le déplacement de la gare de péage en rive Sud, fait l'objet de très importants travaux.**

Le chantier de l'aménagement des accès au pont de Tancarville est le chantier en cours le plus important de la direction régionale Normandie de l'entreprise.

Dans celui des aménagements urbains, les réalisations sont en adéquation avec l'environnement architectural ou urbain : parvis de la cathédrale d'Évreux (27), parvis de l'église de Fontaine-Mallet (76), rénovation de la côte d'Orcher à Gonfreville l'Orcher (76)...

## PRODUCTION DE MATÉRIAUX : UNE ANTÉRIORITÉ CENTENAIRE

« Le premier développement dans les carrières de Gagneraud se situe en 1906, poursuit Benoît Heitz, lors de la mise en exploitation d'une ballastière de graviers siliceux dans le Pas-de-Calais. Depuis, l'entreprise a ancré ce métier dans ses activités par le biais de ses filiales ».

Elle exploite dans le Nord, en PACA et en Île-de-France des carrières de ▷





12



13



14



15

matériaux qui approvisionnent tant les chantiers de bâtiment ou de TP que les centrales d'enrobés et les centrales à béton. Elle s'est adjointe, sur le site de certaines de ses carrières, des centrales de grave traitée et, en Normandie, en participation, des centrales d'enrobage et la fabrication d'émulsions destinées aux enduits superficiels ou aux couches d'accrochage.

La Carrière de la Brosse à Bannost Villegagnon (77), ouverte en 1987, exploite le calcaire dit "de Champigny" avec des ventes qui se répartissent à 50% sur les marchés de BPE et pré-fabrication et 50% sur les marchés routiers et d'assainissement.

Les Carrières de Bellignies (59) appartiennent au groupe Gagneraud depuis 1969. D'une superficie de 65 ha dont 31 ha d'exploitation sur une profondeur de 120 m, elles assurent la production de calcaire du Givétien, à hauteur de 800 000 t/an à 1 200 000 t/an. Le site comporte également une centrale de graves traitées aux liants hydrauliques.

Les Carrières de la Ménudelle, à Saint-Martin-de-Crau (13) ont été mises en exploitation en 2007 sur une surface de 3 ha/an pour une surface totale de 83 ha. La production annuelle autorisée

de 200 000 t est une roche silico calcaire provenant de matériaux alluvionnaires de la plaine du Crau.

Le Havre Enrobés (76), une centrale d'enrobage située sur la zone industrialo-portuaire du Havre, est une unité de production d'une capacité d'environ 200 000 t/an permettant d'élaborer les différents types d'enrobés (chauds ou tièdes) selon les normes en vigueur. La Société des Liants de l'Estuaire à

Saint-Romain-de-Colbosc (76) est une usine de fabrication d'émulsions SLE, située sur cette même zone havraise. Elle permet, quant à elle, de fabriquer différents types d'émulsions destinées tant aux enduits superficiels qu'aux couches d'accrochage pour différents enrobés ou au façonnage de liants pour des techniques froides. Cette usine a une capacité de production pouvant aller jusqu'à 15 000 t par an.



16

**12- La première ligne du tramway du Havre (maître d'œuvre : Systra/Ingerop/Attica/Osty/Ateliers Lion).**

**13- Le bel aménagement du parvis de la cathédrale d'Évreux, dans l'Eure (maître d'œuvre : Michel Desvignes Paysagiste).**

**14- Le parvis de l'église Saint Valéry de Fontaine-la-Mallet, en Seine Maritime (maître d'œuvre : Arc en Terre).**

**15- Le chantier d'assainissement de Port 2000 au Havre.**

**16- Les chantiers d'Alteam nécessitent l'intervention d'équipes rompues à des exercices souvent périlleux.**





© PATRICK BOULEN/CCI SEINE ESTUAIRE

17

## SERVICES : DEUX SPÉCIALITÉS BIEN DIFFÉRENTES

L'entreprise a ouvert, depuis quelques années, une branche d'activité spécialisée dans le travail en hauteur sous le nom de Alteam.

« Cette activité, développée au sein de la Région Provence Alpes Côte d'Azur, précise Benoît Heitz, excelle dans les travaux d'accès difficiles, sur ouvrages d'art, dans les interventions en hauteur en milieu industriel, dans le confortement de parois rocheuses et de murs de soutènement, la stabilité de talus. Les membres de l'équipe Alteam sont tous titulaires du Certificat d'Aptitude aux Travaux sur Cordes. La Région Provence Alpes Côte d'Azur s'est également spécialisée dans la reprise en sous œuvre avec sa filiale ETS ».

Dans un tout autre domaine, par le biais de sa filiale Massilia Park, basée à Marseille, Gagneraud est non seulement "bâtisseur" de parkings mais

**17- Chantier du nouveau giratoire Nord d'accès direct au pont de Tancarville.**

**18- La carrière de Bellignies de la SECAB, dans le Nord, appartient au groupe Gagneraud depuis 1969.**

**19- La carrière de la Méné-delle, à Saint Martin-de-Crau (13) produit des matériaux silico-calcaires.**

également gestionnaire. Elle exploite plus de 1 600 places de parking en DSP (délégation de service public), en concession ou en propre : parking Estienne d'Orves (650 places), parking Vallier (460 places) tous deux en concession avec la CUMPM, parking Puget (265 places) concession immobilière, parking Breteuil (262 places) en propre, et deux parkings en affermage avec la CUMPM : parking Espezieux (550 places) et parking Arvieux (300 places) en collaboration avec la société Q.Park.

Les réalisations d'Alteam sont toujours spectaculaires et nécessitent l'intervention d'équipes rompues à ces exercices souvent périlleux : haubanage de pylône à Marignane, tirage de câbles sur une cheminée de 300 m à Gardanne (13), travaux par hélicoptère pour EDF dans la vallée de la Roya (06), confortement de falaise à Marseille, à Toulon, à Vitrolles.

## UNE PERTINENCE ÉCONOMIQUE INCONTESTABLE

« Nous croyons en notre métier et nous sommes persuadés que nous avons une pertinence économique, conclut Benoît Heitz. L'entreprise a une longue antériorité, une clientèle fidèle, un fonds de commerce solide, ce qui nous permet de nous maintenir dans un marché qui reste très difficile ».

« Constance dans la durée, avec des hommes et des femmes expérimentés, peu de changements dans l'organisation, une diversification des compétences, sont autant de critères qui inspirent confiance aux clients qui rencontrent toujours des interlocuteurs cohérents ».

Le choix de chantiers raisonnables, nombreux et adaptés à des structures flexibles, permet à l'entreprise de poursuivre sa route. D'autant que chaque direction régionale est très autonome et forme une entité à elle seule, bien au fait des besoins locaux et ressentie comme telle par les clients : une entreprise régionale ancrée dans sa région.

La recherche de niches, des investissements réguliers en matériel, la formation d'apprentis, le développement d'opérations "clé en main" contribuent à asseoir l'image et les performances d'une entreprise qui mise sur la valeur ajoutée qu'elle offre à ses clients pour constituer une alternative crédible face aux majors.

Aujourd'hui, au cœur d'une crise de civilisation d'ampleur mondiale où l'économique et le social s'interrogent sur le modèle de développement à adopter, les entreprises familiales de taille importante - près de 3 000 collaborateurs - telles que le groupe Gagneraud, ne sont pas les plus mal préparées pour aborder les routes incertaines de l'avenir. □



© GAGNERAUD

18



19





1  
© BOUYGUES TP RF

# LE VIADUC LEZ-LIRONDE - DU DÉPLACEMENT DE L'AUTOROUTE A9 À MONTPELLIER

AUTEUR : ÉMILIE BRULIN, RESPONSABLE TRAVAUX, BOUYGUES TRAVAUX PUBLICS RÉGIONS FRANCE

L'AUTOROUTE A9 À MONTPELLIER EST EN PLEINE MUTATION. LE FORT TRAFIC URBAIN DÉPLACÉ AVEC LES ANNÉES SUR L'AUTOROUTE A CONVAINCU ASF D'ENTREPRENDRE UNE COMPLÈTE RESTRUCTURATION DE L'A9 AUX ABORDS DE MONTPELLIER, PASSANT PAR LA CRÉATION DE 25 KM D'UNE NOUVELLE AUTOROUTE ET LA REQUALIFICATION FUTURE DE L'EXISTANTE EN CONTOURNEMENT EST DE MONTPELLIER. LES TRAVAUX, SÉPARÉS GÉOGRAPHIQUEMENT EN 2 TRONÇONS EST ET OUEST DE 15 ET 10 KM, SE REJOIGNENT AU NIVEAU DU FUTUR VIADUC LEZ-LIRONDE, OUVRAGE NON COURANT MAJEUR DU TRACÉ.

## LE DÉPLACEMENT DE L'AUTOROUTE A9 À MONTPELLIER

L'autoroute A9 passe historiquement au sud-est du cœur de la ville de Montpellier. Avec les années et la très forte croissance de ce qui est aujourd'hui une métropole nationale

majeure, Montpellier s'est largement urbanisée et a fini par s'étendre aux abords et au-delà de l'autoroute, entraînant l'usage de l'A9 par les Montpelliérains comme ils le feraient d'un contournement.

Le fort trafic local est par ailleurs décuplé quand viennent les vacances d'été,

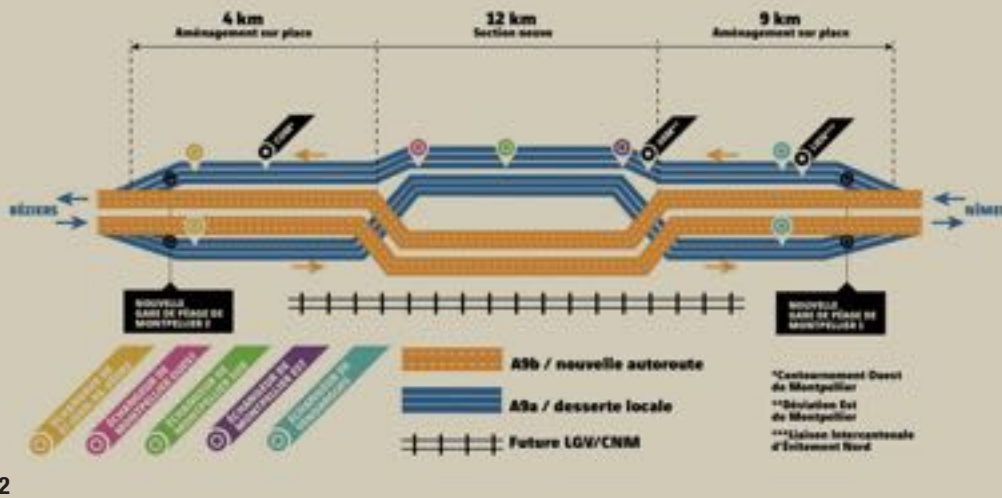
### 1- Tronçon d'ouvrage sur le Lez.

### 1- Section of the bridge over the Lez.

conduisant à des ralentissements, voire des bouchons de plusieurs kilomètres, notamment aux abords des gares de péage de Gallargues au nord et de Saint-Jean-de-Védas au sud, ainsi qu'à de longues files au niveau des sorties en direction des centres ville, parfois en partie déplacées sur les BAU.



## SCHÉMA DE PRINCIPE DES FLUX A9A ET A9B



2

Pour fluidifier le réseau autoroutier local, la création d'une nouvelle autoroute est devenue nécessaire, avec certains aménagements :

- La nouvelle autoroute ne dessert pas les sorties aux abords de Montpellier, elle est donc complètement dissociée du trafic local ;
- L'ancienne autoroute est conservée et sera progressivement déclassée en boulevard urbain (son futur statut routier n'est pas finalisé à ce stade) ;
- La nouvelle autoroute n'est pas soumise au passage par les futures gares de péage de Montpellier 1 (celle de Gallargues sera démantelée et une nouvelle gare de péage sera située à Baillargues) et de Montpellier 2 (ancienne gare de péage de Saint-Jean-de-Védas en cours de restructuration) ;

### 2- Schéma de principe des flux A9a et A9b.

### 3- Obstacles franchis par le viaduc LL A9.

### 2- Schematic diagram of A9a and A9b flows.

### 3- Obstacles crossed by the LL A9 viaduct.

- Seuls les véhicules souhaitant accéder aux niveaux des 5 échangeurs situés entre Vendargues et Saint-Jean-de-Védas emprunteront ces gares de péage rattachées au tracé de l'ancienne autoroute.

Concrètement, sur les 25 km concernés, une partie centrale de 12 km est constituée d'une nouvelle portion de 2x3 voies totalement dissociée de l'autoroute actuelle, mais à proximité immédiate du tracé de CNM (Contournement Nîmes-Montpellier - travaux ferroviaires en cours de réalisation par Oc'Via) afin de réduire les nuisances exportées par ces 2 grands projets de travaux dans l'Hérault et de mutualiser par ailleurs certains équipements nécessaires aux deux réseaux (bassins de rétention par exemple).

De part et d'autre, sur 9 km à l'est et 4 km à l'ouest, l'ancienne autoroute est élargie de 2x3 voies à 4x3 voies. Sur cette portion, les 6 voies centrales seront affectées au trafic de transit et les 6 voies latérales au trafic local (figure 2).



3

## LE VIADUC LEZ-LIRONDE

Sur les 12 km de voies neuves situées au sud de la zone de l'autoroute actuelle entre les échangeurs de Montpellier Est et Montpellier Sud, on trouve, sur une distance longue d'environ 500 m, plusieurs obstacles à franchir (figure 3) :

- Le Lez, dont les crues sont localement réputées ;
- La RD58 qui permet le transit journalier entre les communes de Lattes et de Montpellier ;
- L'avenue Georges Frêche, ancienne route de Carnon, liaison directe des Montpellierains aux plages les plus proches ;
- La ligne 3 du tramway située au centre de l'avenue Georges Frêche ;
- L'avenue des Platanes (RD) à l'arrière de l'avenue Georges Frêche ;
- La Lironde, chenal de débordement du Lez ;
- Des pistes cyclables le long du Lez (rives gauche et droite) et de l'Avenue Georges Frêche (dans les 2 sens de circulation).

La réalisation d'un seul ouvrage de franchissement d'une longueur totale de 550 m a ainsi été décidée entre les 2 tronçons linéaires (nommés TOARCH Est et Ouest)

L'ouvrage a été doublé transversalement, on trouve donc un tablier par sens de circulation.

## DESIGN DE L'OUVRAGE

Le viaduc Lez-Lironde est un ouvrage constitué de 2 tabliers de 555 m au nord et 565 m au sud.

Chaque tablier est mixte à poutres métalliques à inertie variable (1,90 m à mi-travée et jusqu'à 3,50 m sur piles) et comporte 8 travées entre les culées C0 et C8, reposant sur 7 piles intermédiaires.

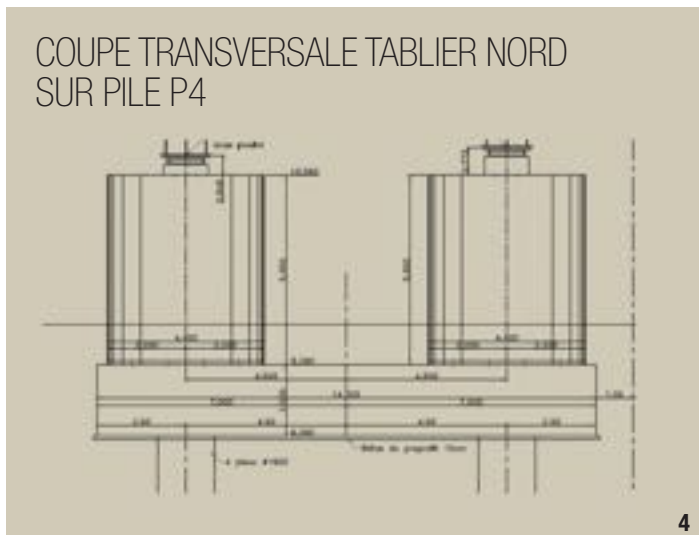
L'inertie variable des poutres est issue d'une demande de l'agglomération montpellieraine, dont la volonté est d'alléger l'impact de l'ouvrage dans le paysage.

Cette variabilité confère à l'ouvrage une finesse des lignes notamment au niveau des axes qu'il enjambe (figure 1).

## LES APPUIS INTERMÉDIAIRES: LES PILES

Chaque pile de chaque tablier repose sur 2 fûts en béton armé ovoïdes posés sur une semelle en béton armé elle-même fondée sur 4 à 5 pieux en béton armé de diamètre 1 600 mm. (figures 4 et 5). En 6 mois ont ainsi été réalisés 1 650 m de pieux.

## COUPE TRANSVERSALE TABLIER NORD SUR PILE P4



4

© COGECI



5

© BOUYGUES TP RF

Les semelles de piles, de dimensions 2 m (H) x 7 m (l) x 14 m (L) sont constituées de 210 m<sup>3</sup> de béton C35/45 et de 23,5 t d'armatures. Les 14 semelles ont été réalisées en 6 mois à l'aide de banches de coffrage.

Les fûts de pile, de hauteur variable entre 4 m à 6,5 m ont une section ovoïde de grand rayon 2,2 m et de petit rayon 1,1 m. Ils sont constitués de 35 à 55 m<sup>3</sup> de béton C35/45 et de 2 à 2,5 t d'armatures.

28 fûts ont été réalisés en 5 mois avec un unique coffrage comportant une peau métallique, fabriqué spécifiquement pour l'ouvrage et sans tiges traversantes.

Les longueurs de travée des tabliers et les orientations en plan des fûts de piles sont différentes afin de s'organiser autour des 3 franchissements majeurs de l'ouvrage (figure 6) :

- Le Lez,
- L'avenue George Frêche,
- La Lironde.

### LES CULÉES

Les culées C0 et C8 sont de type perchées, sur des remblais réalisés dans le cadre de travaux préparatoires.

Des contraintes de tassement minimum ont nécessité un pré-chargement de ces remblais de plusieurs mois avant de pouvoir démarrer les travaux des culées.

Chaque culée comporte de manière classique :

- Un chevêtre,
- Des murs retours,
- Un mur garde-grève,
- Une dalle de transition.

Les chevêtres sont fondés sur pieux en béton armé traversant les remblais de pré-chargement, de diamètre 1200 mm, forés à la boue.

Les pieux sont au nombre de 4 par culée et par tablier soit 16 pieux pour l'ensemble de l'ouvrage, représentant 420 m de pieux réalisés en 2 mois. Les perrés en pied de culée sont réalisés en enrochements, encadrés d'une longrine en béton armé.

Le chantier a par ailleurs fait le choix de préfabriquer à pied d'œuvre les murs retours et de les poser à la grue afin de limiter les travaux en bord de talus (figure 7 et 8).

### LE TABLIER

#### LA CHARPENTE MÉTALLIQUE

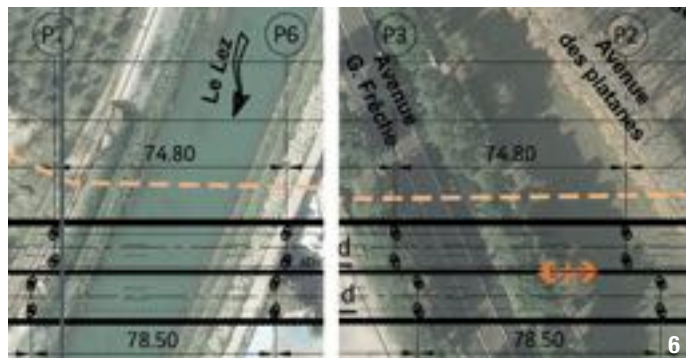
Le tablier est à ossature mixte composée de poutres à inertie variable. Longitudinalement, le tablier Nord est décomposé en 22 tronçons et le tablier Sud en 23.

Transversalement, chaque tablier se compose de 2 PRS identiques, reliées entre elles par des pièces de pont. De part et d'autre, des consoles sont mises en œuvre sur chaque rive de tablier.

Les éléments transversaux sont distribués le long des PRS avec un pas régulier d'environ 4 m (figure 9).

Chaque PRS de tronçon est réalisée d'un seul tenant et livrée depuis l'usine de fabrication située à Aigle, en Suisse, par convoi exceptionnel.

45 convois (de 2 transports jumelés) sont nécessaires pour l'ensemble de la charpente. Leur transit depuis la Suisse est un sujet complexe à traiter. Il faut, en effet, composer avec les travaux des



6

© DR VINCI AUTOROUTES



7

© DUVAL



8

© BOUYGUES TP RF

4- Coupe transversale tablier Nord sur pile P4.  
5- Piles P5 des tabliers Nord et Sud.

6- Schéma orientation fûts de piles.

7- Culée et perré C8 - Vue architecturale.

8- Culée et perré C8 - Travaux en janvier 2016.

4- Cross section of North deck on pier P4.

5- Piers P5 of the North and South decks.

6- Pier shaft positioning diagram.

7- Abutment and breast wall C8 - Architect's view.

8- Abutment and breast wall C8 - Works in January 2016.





9

© BOUYGUES TP RF

communes et des axes autoroutiers, les flux saisonniers, les festivités à l'origine de fermetures de voies, les ouvrages existants à franchir, etc.

La bonne volonté des intervenants concernés par ces trajets, notamment Asf et les collectivités, a permis de figer les itinéraires et ainsi la réalisation de cet ouvrage inscrit dans le cadre d'un projet d'utilité publique.

Un *run test* a notamment été réalisé dans la commune de Lunel (34). L'objectif est de faire circuler un convoi

**9- PRS, pièces de pont et consoles.**

**10- Lançage tablier Nord - juin 2015.**

**9- Built-up girders, cross ties and cantilever girders.**

**10- Launching the North deck - June 2015.**

au gabarit le plus contraignant dans des conditions mises au point avec la commune et les autorités et notamment de nuit pour ne pas perturber les circulations, et de valider ainsi l'itinéraire en repérant les éventuels obstacles.

Les consoles et entretoises sont également fabriquées en Suisse et livrées sur site.

Les éléments livrés sont déjà partiellement traités anticorrosion. Les compléments des zones d'assemblage sont pour leur part réalisés sur site.

#### MODE OPÉRATOIRE

Sur site, les tronçons, plus courts que les travées définitives entre les appuis, sont posés sur des étalements provisoires entre deux piles appelés palées. Ces palées métalliques sont solidement fixées sur des semelles en béton préalablement réalisées dans le sol, puis contreventées entre elles. Une fois les tronçons reliés entre eux par soudage, les palées sont retirées.

Les pièces de pont sont soudées aux poutres principales et forment alors le squelette métallique de l'ouvrage. Après soudage, les zones sont sablées puis les couches de peintures sont finalisées sur site.

#### PARTICULARITÉS CONSTRUCTIVES

##### Le lançage au-dessus du Lez

La configuration du site permet en grande partie de mettre en place chaque élément de charpente à la grue à sa position définitive. Quelques coupures de voies sont nécessaires pour permettre de réaliser certaines mises en place en sécurité.

Une zone de tablier néanmoins se trouve piégée entre le Lez, juste en dessous, et une ligne électrique haute tension en service, juste au-dessus. Ces éléments compliquent toute mise en œuvre à la grue car elle nécessiterait un moyen de levage conséquent du fait de l'éloignement du point d'appui et devrait pouvoir gérer les zones interdites sous ligne RTE, imposant une grande minutie dans l'exécution de tels travaux.



© BOUYGUES TP RF

10



Pour éviter tout risque lié à cette pose délicate, le choix a été fait de :

→ Réaliser un assemblage du tronçon de tablier problématique sur une zone facile d'accès ;

→ Riper ce tronçon par tirage de câbles jusqu'à sa position définitive.

Les emprises propres au viaduc étant restreintes à l'arrière des culées, le ripage ne s'est pas fait classiquement depuis l'arrière des culées vers l'ouvrage, mais au contraire depuis l'ouvrage vers la culée C8 (montage du tronçon sur zones P3/P6, ripage vers C8).

Pour anticiper la pose des prédalles situées sur ce même tronçon, celles-ci sont mises en place sur la charpente avant ripage.

Lors des lançages, 1 500 t de charpente et prédalles sont ripées de 150 m en 3 jours, avec une vitesse de croisière de 15 m/h.

Une fois ce tronçon correctement positionné, le reste de la charpente y est liaisonné par soudages successifs des éléments adjacents (figure 10).

#### La pose sur l'avenue Georges Frêche

Sur cette avenue où circule la voie de tramway, il a été nécessaire de modifier le phasage des travaux.

En effet, les travaux au-dessus du tramway nécessitant des coupures de la ligne, il a été nécessaire d'en limiter le nombre et ainsi d'assembler la charpente au préalable de sa pose, réalisée alors avec un important moyen de levage dépêché spécifiquement (grue mobile 700 t) (figure 11).

Les assemblages des 5 600 t de charpente métallique des tabliers Nord et Sud se sont achevés en janvier 2016 permettant la suite des travaux du tablier et notamment la pose de l'ensemble des prédalles.

En parallèle des 13 mois de fabrication en usine, 11 mois d'assemblage sur site ont été nécessaires et ont notamment mobilisé 10 monteurs, 10 soudeurs, 2 contrôleurs de soudures et 4 peintres. L'assemblage a nécessité la présence permanente d'une grue 300 t, d'une grue 110 t et de huit nacelles de flèche 16 m.

#### GÉNIE CIVIL DU TABLIER

Le hourdis du tablier est réalisé en béton armé d'une épaisseur totale de 26 cm, dont une première partie de 13 cm qui est constituée par les prédalles collaborantes posées en bord des éléments de charpente.

Le site le permettant, les prédalles sont réalisées directement sur le chantier.



11

© GEORGES BARTOLI

De ce fait, on a retenu des dimensions permettant un levage sur site sous une grue à tour Potain MD345 avec une flèche de 40 m (figure 12). Cette grue lève une charge de 8 t en bout de flèche.

La largeur des prédalles est fixée par la distance entre éléments transversaux, soit un pas d'environ 4 m.

La longueur des prédalles de rive est de 3 m environ, celle des prédalles centrales de presque 8 m. Ces dernières peuvent être réalisées en un seul élément du fait du choix de la préfabrication foraine.

Les 810 prédalles (dont 270 centrales et 540 de rive), constituées de

11- Grutage tablier Sud sur G.F. - novembre 2015.

12- Aire préfabrication - prédalles réalisées et stockées sous la grue à tour.

11- Crane handling of South deck on Georges Frêche avenue - November 2015.

12- Prefabrication area - formwork slabs completed and stored under the tower crane.

2 000 m<sup>3</sup> de béton C35/45 et 698 t d'armatures, ont été réalisées en 9 mois.

Le stockage sous la grue à tour est optimal pour 120 prédalles centrales et 272 prédalles de rive.

Pour répondre à un planning contraint et à une surface de stockage réduite au pied de la grue à tour, la pose des prédalles se fait à l'avancement des tâches de charpente, dès la finition de la couche de peinture.

Cette pose se fait également selon les contraintes transmises par les différents bureaux d'études, les prédalles ne pouvant être posées avant finalisation de la charpente sur le tronçon n que si la charpente est assemblée jusqu'au tronçon n+2.

Après la pose des prédalles, le hourdis est ferrailé en place.

Les bétonnages suivent un pianotage précis élaboré pour minimiser les contraintes successivement transmises dans les plots déjà bétonnés.

Le phasage est également contraint par un délai de prise du béton avant le bétonnage suivant.

Les plots en travée sont bétonnés en premier, puis le clavage sur chaque appui est réalisé (figure 13).

De ce phasage résulte un planning de bétonnage qui a démarré le 24 novembre 2015 pour s'achever au début du mois de mars 2016.

Sur cette période seront ainsi réalisés 15 plots de 70 m<sup>3</sup> (plots sur pile) à 150 m<sup>3</sup> (plots en travée). Ces plots représentent 733 t d'armatures et



12

© BOUYGUES TP RF





13  
© BOUYGUES TP RF

3 170 m<sup>3</sup> de béton C35/45 coulé en place.

Par la suite les longrines de rive des tabliers (contre B.A.U. et T.P.C.) représentent 230 m<sup>3</sup> de béton supplémentaire réalisés également en place.

### LE PLANNING ET LES TRAVAUX POUR 2016

La période préparatoire de 3 mois s'est étalée d'avril à juin 2014 pour laisser place au démarrage des travaux à compter de juillet 2014 pour une durée de 24 mois.

L'année 2016 est celle de la fin de la charpente et du bétonnage des tabliers et des longrines de rive, puis

**13- Bétonnage du 2<sup>e</sup> plot de tablier - décembre 2015.**

**14- Planning simplifié des travaux du viaduc LL A9.**

**13- Concreting the second deck section - December 2015.**

**14- Simplified planning chart for the LL A9 viaduct works.**

des différents équipements (figure 14). Du printemps à l'été, on pourra ainsi observer la mise en œuvre de la protection par étanchéité des tabliers, des enrobés, des corniches-caniveaux métalliques surplombées d'écrans acoustiques en panneaux de PPMA et tôles, des dispositifs de retenue en rive des ouvrages de type H4W4b et la mise en place des appareils d'appui sphériques entre la charpente et chaque appui permis par un vérinage du tablier.

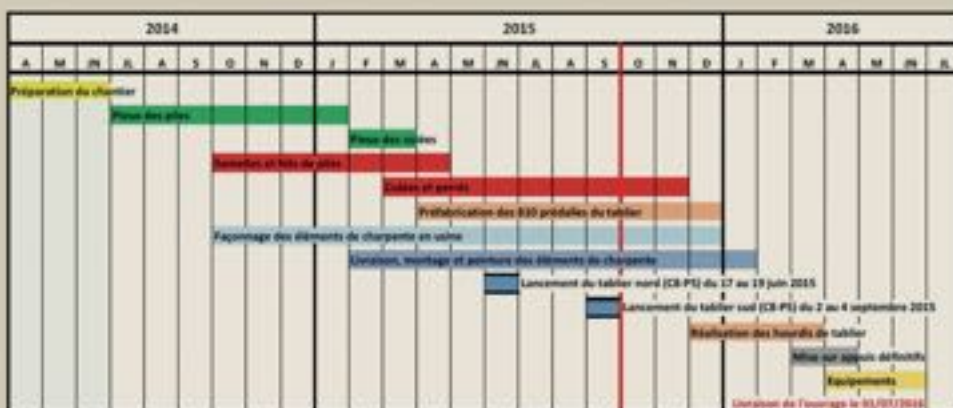
Il faudra attendre 2017 et la fin des travaux de raccordement au viaduc par les TOARCH pour circuler sur l'ouvrage (figure 15).

### MÂTRISE D'OUVRAGE VINCI AUTOROUTE : DES EXIGENCES FORTES ET UNE VOLONTÉ DE S'INSCRIRE DANS LE TISSU LOCAL

Une des particularités de ce chantier réside dans la volonté forte de maintien des conditions de circulation des riverains et des saisonniers par le maître d'ouvrage. Le chantier a dû se concerter tout au long des travaux avec son voisin du CNM pour faire concorder les coupures et déviations diverses nécessitées par les travaux, afin d'en limiter les impacts sur les flux de véhicules et sur les pistes situées le long des berges du Lez ou de l'avenue Georges Frêche. Cette préoccupation forte du maître d'ouvrage a été complètement intégrée aux réflexions des équipes travaux et l'implication importante de celui-ci a permis le déroulement des travaux dans les meilleures conditions.

L'inscription du chantier dans le tissu local passe aussi par l'emploi de personnel local en insertion sociale, ce qui est, là encore, une volonté affichée dès les appels d'offres par le maître d'ouvrage. 7 000 heures étaient ainsi prévues sur le chantier du viaduc Lez-Lironde à de l'emploi en insertion, et 10 000 h environ seront finalement réalisées. L'humain restant la préoccupation majeure d'Asf, une politique performante visant au respect de l'intégrité des travailleurs a été mise en place par le maître d'ouvrage. Cette politique appelée MOZA (Maître d'Ouvrage Zéro Accident) a été déployée au

### PLANNING SIMPLIFIÉ DES TRAVAUX DU VIADUC LL A9



© BOUYGUES TP RF

14





15

© GEORGES BARTOLI

démarrage de l'opération et suivie de manière très régulière.

Les grands axes de la politique MOZA se retrouvant par ailleurs dans ceux de la politique Santé Sécurité de Bouygues Travaux Publics Régions France, une vigilance commune et permanente des équipes et des donneurs d'ordre permet aujourd'hui de ne déplorer aucun accident sur le chantier du viaduc Lez-Lironde de l'autoroute A9. □

**15- Vue du ciel en janvier 2016 avec viaducs LL de l'autoroute A9 et du CNM.**

**15- Aerial view in January 2016 with LL viaducts of the A9 motorway and the Nîmes Montpellier bypass (CNM).**

## PRINCIPALES QUANTITÉS

**BÉTON DES SUPERSTRUCTURES : 10 000 m<sup>3</sup> de type C35/45**

**ARMATURES DE BÉTON ARMÉ HA : 2 000 t**

**PIEUX BÉTON ARMÉ DE FONDATION : 2 000 m / 80 unités**

**ACIERS DE CHARPENTE : 5 600 t**

**TABLIER : 2 unités de 560 m environ - 8 travées de 75 m en moyenne - 18 000 m<sup>2</sup> de surface totale**

**DURÉE DES TRAVAUX : 24 mois**

**MONTANT DES TRAVAUX : 28 358 000 € H.T.**

**EFFECTIFS : 25 personnes en moyenne - 50 personnes en pointe**

**HEURES D'INSERTION PRÉVUES EN FIN DE CHANTIER : 10 000 h**

## INTERVENANTS

**MAÎTRE D'OUVRAGE :** Vinci Autoroute

**MAÎTRE D'ŒUVRE :** Agence Traverses - Duval - Ingerop

**CSPS :** Europacte

**GROUPEMENT TITULAIRE DU MARCHÉ DU VIADUC LEZ-LIRONDE :** Bouygues Travaux Publics Régions France (mandataire - génie civil / fondations / terrassement) et Zwahlen & Mayr (charpente métallique)

**PRINCIPAUX SOUS-TRAITANTS / FOURNISSEURS / PRESTATAIRES :**

- Bureaux d'études : Cogeci (génie civil) - Briva (charpente en phase constructive) - Arcadis (contrôle externe des études de génie civil) - Artélia (études hydrauliques) - Fondasol (études géotechniques)
- Fondations profondes : Profond
- Palplanches : Dfc Battage
- Armatures : Sendin
- Béton : Unibéton & Cemex
- Principaux terrassements : Valérian
- Pose de la charpente : Simi
- Peinture charpente : Exopeint
- Écrans acoustiques sur corniches caniveaux : Pont Équipement
- Barrières de retenue H4W4 : Distiroute & Comely
- Travaux de chaussée : Colas MM / Aximum

## ABSTRACT

### THE LEZ-LIRONDE VIADUCT FOR SHIFTING OF THE A9 MOTORWAY AT MONTPELLIER

ÉMILIE BRULIN, BOUYGUES

**The new A9 motorway at Montpellier**, an ambitious project for separation of local and transit traffics, promoted by Vinci Autoroutes, is at present becoming part of the Languedoc landscape, with commissioning scheduled for 2017. On the 25 km of the new motorway section separated into a West section of 15 km and an East section of 10 km, a major civil engineering structure, the Lez-Lironde viaduct, is taking form on the edge of the cities of Lattes and Montpellier. The structure, 560 metres long, is a double composite deck with a variable-inertia frame. It is being constructed by a consortium consisting of Bouygues Travaux Publics Régions France and Zwahlen & Mayr, and requires 24 months of works. The construction makes allowance for the local populations and is performed with their backing. □

### EL VIADUCTO LEZ-LIRONDE PARA EL DESPLAZAMIENTO DE LA AUTOPISTA A9 A MONTPELLIER

ÉMILIE BRULIN, BOUYGUES

**La nueva autopista A9 a Montpellier**, ambicioso proyecto de separación de los tráficos locales y de tránsito implementado por Vinci Autoroutes, ya se perfila en el paisaje del Languedoc. Su entrada en servicio está prevista para 2017. A lo largo de los 25 km de tramo de autopista nueva, divididos en un tramo Oeste de 15 km y un tramo Este de 10 km, se dibuja una importante obra a las afueras de las ciudades de Lattes y Montpellier: el viaducto Lez-Lironde. Con un doble tablero mixto con armazón de inercia variable y una longitud 560 m, las obras de este proyecto, realizadas por el consorcio de empresas formado por Bouygues Travaux Publics Régions France y Zwahlen & Mayr, tendrán una duración de 24 meses. La ejecución se llevará a cabo teniendo en cuenta a las poblaciones locales y con su participación. □





Concevoir, maîtriser les grands projets du monde de demain

**setec accompagne la réalisation des grands ouvrages d'art**

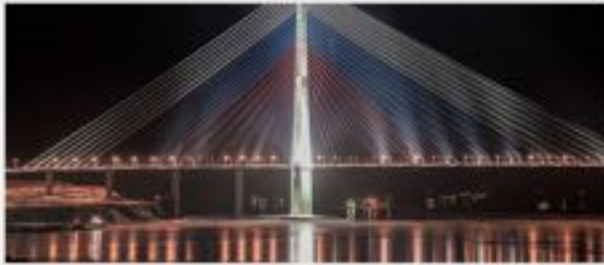
setec tpi est le spécialiste français des ouvrages de grande portée. Nous assurons des missions de conception, de maîtrise d'oeuvre, de contrôle et d'ingénierie de la construction partout dans le monde.



Port sur le Bourguib - Maroc  
Conception et assistance à la maîtrise d'oeuvre



Troisième pont sur le Bessifons - Togo  
Ingénierie-Contrôle



Port de Ruzhsky - Russie  
Expertise pour la Fédération de Russie



Route de la Corniche (Brazzaville) - Congo  
Maîtrise d'oeuvre en groupement avec SOF

Crédit-Photo: DR



**TRAVAUX**  
REVUE TECHNIQUE DES ENTREPRISES DE TRAVAUX PUBLICS

**Prochains numéros :**

- TRAVAUX n° 924 « Sols et fondations »
- TRAVAUX n° 925 « Spécial Hong Kong »
- TRAVAUX n° 926 « Énergie »

**Retrouvez l'actualité de la profession, les chantiers en images, les interviews des grands décideurs, le point de vue des ingénieurs. Pour réserver votre emplacement publicitaire dans Travaux, contactez :**

**Bertrand COSSON**

Tél. 01 42 21 89 04

[b.cosson@rive-media.fr](mailto:b.cosson@rive-media.fr)



**Carine REININGER**

Tél. 01 42 21 89 05

[c.reininger@rive-media.fr](mailto:c.reininger@rive-media.fr)



© SYSTRA

# INCENDIE SOUS UN PONT FRANCHISSANT LES VOIES FERRÉES À TOURS

AUTEURS : AZOUZ BENNOUI, DIRECTEUR DE PROJET, SYSTRA - PHILIPPE VION, EXPERT TECHNIQUE, SYSTRA - GAËL CHIPEAUX, DIRECTEUR GÉNÉRAL, PCB - JEAN-JACQUES ANDRE, DIRECTEUR DÉPARTEMENT GÉNIE CIVIL, BAUDIN CHATEAUNEUF

TOUR(S)PLUS ET SON EXPLOITANT KEOLIS SONT EN CHARGE DE LA PREMIÈRE LIGNE DE TRAMWAY DE L'AGGLOMÉRATION DE TOURS, MISE EN SERVICE EN AOÛT 2013. TROIS ANS APRÈS LE RENFORCEMENT PAR PRÉCONTRAINTE ADDITIONNELLE DU PONT GRAMMONT POUR LE PASSAGE DE CETTE PREMIÈRE LIGNE, CE PONT A SUBI, DANS LA NUIT DU 10 AU 11 JUILLET 2015, UN VIOLENT INCENDIE. LA RÉPARATION DU DEMI-OUVRAGE OUEST, FORTEMENT DÉGRADÉ, A CONSISTÉ À REMPLACER LA PRÉCONTRAINTE ADDITIONNELLE ENDOMMAGÉE ET À RESTAURER LE BÉTON DÉGRADÉ.

## PRÉSENTATION DE L'OUVRAGE ET DE SON RENFORCEMENT

Le pont franchissant les voies de chemin de fer au niveau de l'avenue Grammont dans Tours est un portique double en béton armé à deux travées de 17 et 18,5 m, construit en 1922. Il est composé de 2 ouvrages parallèles, pour une largeur totale de 24 m.

Chaque ouvrage est constitué de 5 poutres en béton armé reliées par des entretoises et une dalle supérieure de 16 cm d'épaisseur. La limitation à 15 t par essieu sur le pont a été décrétée en 1959.

Le profil en travers fonctionnel du nouvel aménagement de la première ligne de tramway comprend une plateforme

**1- Travaux nocturnes dans l'emprise de voies SNCF.**

**1- Night work in the area occupied by railway tracks.**

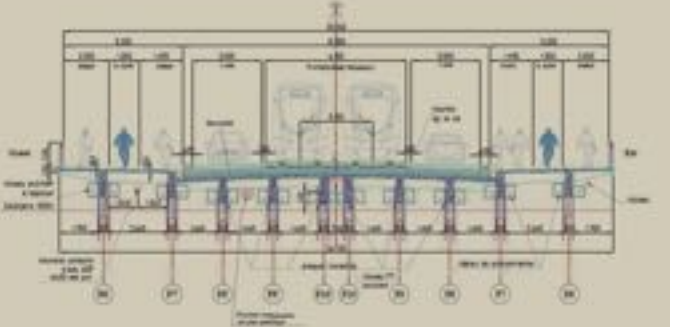
tramway à 2 voies, 2 voies routières séparées et 2 trottoirs. Les études de cet ouvrage ont mobilisé à l'époque l'équipe d'ingénierie Ouvrage d'Art de Systra. Depuis le diagnostic jusqu'à la réception finale par le maître d'ouvrage en décembre 2012, ce projet a requis un travail de conception et un suivi des travaux très spécifiques.





© SYSTRA

## SECTION TRANSVERSALE DU PONT APRES RENFORCEMENT



2



3a



3b

© LA NOUVELLE RÉPUBLIQUE

### INCENDIE DE 2015 ET DÉSORDRES

Un feu s'est déclaré sous le pont, au nord des voies de chemin de fer, dans la nuit du 10 au 11 juillet 2015 (figure 3).

Le foyer, situé sous les quatre premières poutres de l'ouvrage Ouest, a détruit les câbles de précontrainte additionnelle du pont Ouest qui avaient

été récemment ajoutés pour la nouvelle ligne de tramway.

Le feu a aussi détruit les caténaires, la multitubulaire située entre les poutres centrales et la conduite d'eau placée le long de la poutre de rive.

Suite à l'incendie, le trafic ferroviaire a été interrompu pendant 5 jours, le trafic routier et le trafic tramway ont été arrêtés pendant 2 semaines.

Le pré-diagnostic fait apparaître des désordres sur les ouvrages en fonction de leur position.

**Intrados de l'ouvrage Est :** dégradation possible des câbles longitudinaux de précontrainte additionnelle et des barres transversales de précontrainte des blocs d'ancrage ; épaufure et fissures du béton des poutres, des entretoises et de la dalle (figure 4) ;

endommagement de la caténaire et de ses supports.

**Intrados de l'ouvrage Ouest :** endommagement des câbles longitudinaux de précontrainte additionnelle et des barres transversales de précontrainte des blocs d'ancrage ; épaufure et fissures du béton des poutres, des entretoises et de la dalle ; dégradation des blocs d'ancrages et des poutres de renfort ▷

2- Section transversale du pont après renforcement.

3a & 3b- Incendie sous le pont.

4a & 4b- Écaillage et épaufure du béton de la dalle et des blocs d'ancrage.

2- Cross section of the bridge after strengthening.

3a & 3b- Fire under the bridge.

4a & 4b- Scaling and spalling of the concrete in the slab and anchoring blocks.



© SYSTRA

4a



4b



avec aciers apparents ; dégradation de la multitubulaire, de la conduite d'eau et des fibres optiques ; endommagement de la caténaire et de ses supports. Les câbles de précontrainte additionnelle intacts ont été détendus sur la poutre centrale pour éviter les efforts structuraux dissymétriques.

**Extrados du tablier :** noir de fumée sur le garde-corps ; endommagement de l'étanchéité des trottoirs de l'ouvrage Ouest.

### DIAGNOSTIC

Des investigations complémentaires ont été réalisées pour affiner le diagnostic. Les mesures réalisées consistent à peser les câbles de précontrainte longitudinale du tablier Est et les barres de précontrainte transversale de clouage des blocs d'ancrage des tabliers Ouest et Est, ainsi qu'à évaluer la température maximale atteinte par le béton pendant l'incendie. Les pesées de la précontrainte ont été réalisées par Pcb douze jours après l'incendie. L'évaluation de la température a été réalisée à partir d'un échantillon prélevé sur site.

**Pesée des câbles longitudinaux du tablier Est :** le pesage de 10 torons a donné des résultats satisfaisants avec des tensions résiduelles moyennes dans les torons de 194 kN pour une valeur attendue de 197 kN (incluant les pertes par relaxation et fluage).

**Pesée des barres transversales du tablier Est :** le pesage de 3 barres a donné des résultats satisfaisants avec des tensions résiduelles moyennes dans les barres de 909 kN pour une valeur attendue de 953 kN (incluant les pertes par relaxation et retrait), soit une perte inférieure à 5%.

**Pesée des barres transversales du tablier Ouest au Nord de l'ouvrage :** le pesage de 9 barres a donné des résultats inférieurs à la valeur attendue de 953 kN avec des tensions résiduelles dans les barres comprises entre 747 et 848 kN (incluant les pertes par relaxation et retrait), soit une perte comprise entre 10 et 20%.

Les pesées sur les câbles de précontrainte longitudinale et les barres transversales du tablier Est ont donné des tensions correctes et les câbles et les barres sont préservés en l'état. Les barres de précontrainte transversale du tablier Ouest ont présenté des pertes de tensions comprises entre 15 et 20%. En conséquence, les barres situées au nord du tablier Ouest sont remplacées.

**Évaluation de la température maximale atteinte par le béton :** la température atteinte par le béton pendant



5 © BAUDIN-CHATEAUNEUF

l'incendie a été évaluée sur la base d'essais réalisés par Magéo sur une éprouvette de béton récupérée sur le site après l'incendie. Les tests de laboratoire et les articles disponibles sur le sujet dans la littérature ont montré que la température du béton, jusqu'à une profondeur de 4 à 5 cm, n'a pas dépassé 400 °C pendant l'incendie. Cette valeur de température peut avoir entraîné des pertes de contraintes dans les armatures passives ou de précontraintes comprises entre 15 et 30%. En conclusion, la température du béton pendant l'incendie n'a pas excédé 400 °C, et par voie de conséquence les aciers passifs du béton ont perdu de l'ordre de 15 à 30% de leur contrainte admissible. En conséquence, la justification du béton armé a été réalisée avec une résistance des aciers diminuée de 30%.

### ORGANISATION DES ÉTUDES ET DÉFINITION DES INTERVENTIONS NÉCESSAIRES POUR RÉTABLIR LE TRAFIC SUR L'OUVRAGE

Les objectifs de Tour(s)plus et de l'exploitant Keolis étaient de rétablir la circulation sur l'ouvrage en mode dégradé le plus rapidement possible et de permettre la reprise du trafic normal du tramway dans un délai de 3 mois. Les équipes de Tour(s)plus, Keolis et du groupement de maîtrise d'œuvre Systra-Safege ont été mobilisées, jour et nuit, en semaine et le week-end, afin de permettre la remise en service du tramway en mode dégradé, le plus rapidement possible. À la suite du diagnostic, des investigations complémentaires et des calculs justificatifs, les actions réalisées sont les suivantes :

**5- Zone de travaux culée Nord.**

**6- Travaux de jour au droit de la culée Nord.**

**5- North abutment work area.**

**6- Day work at the level of the North abutment.**

→ Les câbles de précontrainte encore en place sur les poutres centrales du tablier Ouest ont été détendus (pour des raisons de sécurité) par Pcb en urgence le dimanche 12 juillet 2015 au lendemain de l'incendie ;

→ Il a été procédé à un hydro-découpage général des zones les plus touchées afin de sécuriser le trafic ferroviaire et le déplacement du



6 © BAUDIN-CHATEAUNEUF





**7a- Massif d'ancrage et poutres côté culée Nord - vue avant travaux.**  
**7b- Massif d'ancrage et poutres côté culée Nord - vue après travaux.**  
**8- Massif d'ancrage de la poutre 64 Nord après travaux.**

**7a- Anchoring foundation block and beams on the North abutment side - view before works.**

**7b- Anchoring foundation block and beams on the North abutment side - view after works.**

**8- Anchoring foundation block for North beam 64 after works.**



personnel de chantier et de permettre de réaliser les investigations nécessaires au diagnostic précis des parties d'ouvrage en béton du tablier Ouest ;

→ Le rétablissement de la circulation provisoire des VL et bus sur l'ouvrage dès la première semaine après l'incendie (sans renforcement). Par la suite le passage du tramway à vide sur l'ouvrage a été autorisé, ce qui a permis d'améliorer l'exploitation du tramway avant la rentrée scolaire.

Les entreprises ont pu commencer à travailler dès le 10 août 2015. Pendant cette phase d'études, les équipes de Systra ont également

apporté leur appui à Tour(s)plus dans l'établissement et la validation des dossiers de sécurité afin d'avoir les autorisations d'exploitation dans les délais.

#### **LES CONTRAINTES DE TRAVAUX ET PRÉPARATION DE CHANTIER**

Le chantier de renforcement s'est déroulé sous l'ouvrage à l'intérieur des emprises ferroviaires.

La contrainte associée a été le respect de l'environnement ferroviaire à proximité des équipes travaux : voies, supports caténaires, équipements ferroviaires, chemins de câbles.

Les contraintes du chantier ont été dictées par un planning comprenant une vingtaine de nuits de coupure

de circulation des voies ferroviaires. Deux catégories de nuits ont été accordées par la SNCF : les nuits de semaine limitées à 4,5 heures et les nuits de weekend (samedi à lundi) de 6 à 8 heures.

La programmation des travaux pour respecter ce planning a nécessité une organisation rigoureuse du chantier par le groupement Pcb/Baudin Chateaneuf, titulaire du marché de renforcement.

La présence de réseaux sous l'ouvrage et les interventions des équipes de la SNCF ont également dû être intégrées dans l'organisation des travaux de renforcement afin d'éviter les conflits :

→ Le remplacement par la Ville de Tours de la conduite d'eau potable endommagée par l'incendie ;

→ Les travaux de remise en place des caténaires et la reprise des voies réalisées par les équipes de la SNCF.

En plus des travaux de réparation du génie civil de l'ouvrage, des travaux de mise en conformité du système de fonctionnement de tramway et des travaux sur la plateforme (coupure et soudure des rails) ont été exécutés.

L'implication de l'ensemble des intervenants a permis de restituer la ligne de tramway 3 jours avant la date fixée et annoncée à l'utilisateur par Tour(s)plus. ▷

La réussite du chantier et du défi planning lancé aux équipes travaux a été possible grâce au travail permanent d'anticipation et l'expérience des intervenants en place sur ce type de sujet.

### RÉPARATION DU BÉTON DÉGRADÉ (POUTRES, DALLES, POTEAUX)

Compte tenu du maintien en circulation des voies ferrées en journée, le chantier de réparation s'est déroulé en 2 phases principales :

→ Réparation diurne des massifs d'ancrage de la précontrainte additionnelle, de l'extrémité Nord des poutres et de l'intrados du tablier à l'abri d'une clôture lourde isolant les ateliers du trafic ferroviaire (figure 5) ;

→ Réparation nocturne des poutres et de l'intrados des travées Nord et Sud de l'ouvrage à partir de la plateforme ferroviaire (figure 1).

Les travaux de jour (figure 6) ont été exclusivement exécutés à partir de plateformes élévatrices à ciseaux pour éviter d'engager le gabarit ferroviaire ; quant aux travaux de nuit, ils ont été exécutés à partir de plateformes élévatrices et de nacelles à bras orientable.

Afin d'éviter toute projection de matériaux à l'intérieur du gabarit ferroviaire de jour et la pollution du ballast (bien que protégé par un géotextile retiré en fin de créneau dédié) et des équipements lors des travaux de nuit, la mise en œuvre manuelle des produits de réparation a été privilégiée.

Dans un premier temps, les bétons ont été sonnés afin de parachever leur purge et les aciers apparents ont été passivés par application d'une barbotine chargée en agent adhérent.

Par la suite, tous les parements dégradés ont été reconstitués par application en passes successives de mortier de réparation à retrait compensé fibré.

Toutes les arêtes ont été redressées par coffrage et certaines zones dégradées des talons des poutres principales où les aciers passifs existants présentaient un défaut d'enrobage manifeste à la construction, ont fait l'objet d'une restructuration en surépaisseur (figure 7).

Les poteaux en béton armé de la culée Nord, eux aussi endommagés par l'incendie, ont été traités de manière identique.

Côté Nord de l'ouvrage, les barres d'ancrages précontraintes des deux massifs les plus touchés, ainsi que leurs composants périphériques (plaques, écrous,



9  
© PCB

jointes et capots), ont été démontés pour être remplacés par des composants neufs (figure 8).

En ce qui concerne les produits de réparation utilisés, ils ont été choisis en fonction de leur domaine d'utilisation :

→ Pour le ragréage superficiel et finition ;

→ Pour la restructuration profonde et le ragréage de forte épaisseur ;

→ Pour la passivation des aciers, et pour la barbotine.

Après la fin des travaux de réparation des parties d'ouvrage béton, qui se sont déroulés de fin août à mi-octobre 2015,

**9- Détension des câbles de précontrainte depuis un fourgon nacelle.**

**10- Cônes de déviation dégradés par l'incendie.**

**9- Detensioning of tendons from an aerial work platform.**

**10- Diversion cones damaged by the fire.**

les équipes de Baudin Chateauneuf ont eu à reconstituer une multitubulaire en intrados du tablier de l'ouvrage, dont les fourreaux PVC, dégagés des réseaux au préalable par les différents concessionnaires, avaient, en plus de leur enveloppe, fortement souffert de l'incendie.

### RESTAURATION DE LA PRÉCONTRAÎTE DU TABLIER OUEST

Pour des raisons de sécurité et d'asymétrie des efforts de précontrainte, les câbles de précontrainte encore en place sur le tablier Ouest ont été totalement détendus par Pcb, en urgence, le dimanche 12 juillet 2015 au lendemain de l'incendie (figure 9).

Cette opération délicate a été réalisée, par un technicien expérimenté, par fusion des clavettes de précontrainte au moyen d'un chalumeau oxyacétylénique. Les torons ainsi détendus et les conduits associés ont été déposés dans la foulée afin de libérer au plus vite l'emprise ferroviaire.

Les câbles de précontrainte ont été remplacés à l'identique, sous consignation totale des voies programmée en créneaux nocturnes les week-ends de mi-septembre à mi-octobre 2015. Les tromplaques en bon état du système d'origine ont été conservées.

Les conduits d'origine en PEHD noyés dans les massifs ont été laissés en place quand ils étaient encore en état avec une amorce d'une vingtaine de centimètres pour les raccorder grâce



10  
© PCB





© BAUDIN-CHATEAUNEUF 11

à des manchons électro-soudables. Dans le cas inverse, les conduits dégradés, ovalisés ou déformés à l'intérieur et en sortie de massif (figure 10) ont été extraits, puis des pièces métalliques constituées d'un tube et d'une colle-rette ont été chevillées à la sortie du massif pour assurer le raccordement et la continuité de la gaine. L'ajout d'une manchette thermo-rétractable au droit de ce raccordement a permis de garantir l'étanchéité.

Les plaques d'ancrages et clavettes du système d'origine ont été renouvelés. Après régénération du clouage des massifs et après désolidarisation des rails de tramway en extrados, la mise en tension des câbles a été effectuée au vérin monotoron, notamment en raison des faibles encombrements

**11- Précontrainte additionnelle régénérée - tablier Ouest.**

**11- Regenerated additional prestressing - West deck.**

disponibles à l'arrière des massifs (figure 11).

Une cire pétrolière Cirinject-Cp a été injectée en guise de protection définitive des câbles, y compris dans les capots d'extrémité accueillant les ancrages et sur-longueurs de torons coté ancrage actif pour une possible détension ultérieure.

#### CONCLUSION

La réalisation des réparations du pont Grammont et le rétablissement de la circulation normale du tramway sur l'ouvrage dans un délai assez court, est un défi, pour les équipes techniques et les entreprises, qui a été relevé grâce à l'implication et l'expérience des intervenants et également à l'engagement et au professionnalisme de tous les acteurs du projet, mais aussi à l'implication des équipes de Tour(s)plus.

Une réflexion semble nécessaire sur l'intégration du risque d'incendie pour les ouvrages d'art, soit dans le cadre des dispositifs à mettre en place dans le suivi de l'ouvrage, soit dans l'intégration de l'action incendie pour la justification de l'ouvrage. □

#### PRINCIPAUX INTERVENANTS

**MAÎTRISE D'OUVRAGE :** Tour(s)plus  
**EXPLOITANT :** Keolis  
**MAÎTRISE D'ŒUVRE :** Systra / Safège  
**TRAVAUX DE RÉPARATION DE L'OUVRAGE :** Groupement Baudin Chateaneuf / Pcb

#### ABSTRACT

### FIRE UNDER A BRIDGE CROSSING THE RAILWAY LINES IN TOURS

AZOUZ BENNOUI, SYSTRA - PHILIPPE VION, SYSTRA - GAËL CHIPEAUX, PCB - JEAN-JACQUES ANDRE, BAUDIN CHATEAUNEUF

**Tour(s)plus and its operator Keolis are in charge of the first tramway line for the Tours urban area, commissioned in August 2013. Three years after strengthening by additional prestressing the bridge over the railway lines known as "Pont Grammont" for crossing by this first line, in the night of 10 to 11 July 2015 the bridge sustained a dramatic fire. This fire caused substantial damage to the West half-structure, making it necessary to limit traffic. The repairs involved replacing the damaged additional prestressing and restoring the damaged concrete.** □

### INCENDIO DEBAJO DE UN PUENTE QUE CRUZA LAS VÍAS FÉRREAS EN TOURS

AZOUZ BENNOUI, SYSTRA - PHILIPPE VION, SYSTRA - GAËL CHIPEAUX, PCB - JEAN-JACQUES ANDRE, BAUDIN CHATEAUNEUF

**Tour(s)plus y su empresa operadora Keolis son los responsables de la primera línea de tranvía de la aglomeración de Tours, puesta en servicio en agosto de 2013. Tres años después del refuerzo por pretensado adicional de la construcción que franquea las vías férreas, llamada "pont Grammont", para el paso de esta primera línea, el puente sufrió un violento incendio la noche del 10 al 11 de julio de 2015. Este incendio provocó importantes deterioros en el tramo Oeste que obligaron a cortar la circulación. La reparación ha consistido en sustituir el pretensado adicional dañado y restaurar el hormigón deteriorado.** □



1  
© EGIS

# LE PONT CITADELLE À STRASBOURG : UN EXERCICE D'ÉQUILIBRE

AUTEURS : NABIL YAZBECK, CHEF DE PROJET, EGIS JMI - ALEXANDROS GIANNOPOULOS, INGÉNIEUR CONFIRMÉ, EGIS JMI - THOMAS KLUMB, INGÉNIEUR D'AFFAIRE, EIFFAGE MÉTAL - FLORENT DELHOMME, CONDUCTEUR DE TRAVAUX, GTM-HALLÉ - FRÉDÉRIC KISSLING, DIRECTEUR DE L'ANTENNE EST DE SOLETANCHE BACHY FRANCE

À STRASBOURG, UN OUVRAGE D'ART ÉLÉGANT ET ATYPIQUE EST EN COURS DE CONSTRUCTION DANS LE CADRE DE L'EXTENSION VERS L'ALLEMAGNE DU RÉSEAU TRAMWAY. FRANCHISSANT D'UN TRAIT LE BASSIN VAUBAN ET S'INSCRIVANT DANS UNE COURBE EN PLAN PRONONCÉE, LE PONT CITADELLE EST CONSTITUÉ D'UN GRAND ARC MÉTALLIQUE QUI ENJAMBE ET SUPPORTE UN TABLIER EN CAISSON ORTHOTROPE TRÈS ÉLANCÉ. SA GÉOMÉTRIE EST LE RÉSULTAT D'UNE RECHERCHE DES FORMES OPTIMALES ET DÉCOULE DE L'ANALYSE DE L'ÉQUILIBRE DES EFFORTS. SA CONSTRUCTION A ÉTÉ L'OCCASION D'UNE DÉMONSTRATION D'INGÉNIOSITÉ DANS LA MISE EN ŒUVRE ET DE SAVOIR-FAIRE DANS L'EXÉCUTION.

## LE CONTEXTE ET LES ÉLÉMENTS GÉNÉRAUX DE CONCEPTION

La Compagnie des Transports Strasbourgeois a décidé, suite à la concertation menée en octobre 2010, de prolonger la ligne D du tramway de l'agglomération strasbourgeoise vers la ville allemande frontalière de Kehl, en privilégiant un tracé sinueux au nord de la route du Rhin (ancienne RN4), qui permettra de desservir et d'irriguer d'anciens terrains du Port Autonome

de Strasbourg qui seront reconvertis en nouvelles zones urbanisées, et également d'améliorer la desserte de la zone portuaire.

Ce projet d'extension est un symbole fort du développement des relations entre Strasbourg et Kehl.

La mise en œuvre de ce tracé sinueux (figure 2) nécessite la construction de quatre ouvrages d'art : une trémie routière rue du Péage, un passage sous les voies ferrées, et deux ouvrages non courants, le pont sur le Rhin et

**1- Maquette architecturale du pont Citadelle dans le projet de la ZAC des Deux Rives.**

**1- Architectural model of the Citadelle Bridge in the "ZAC des Deux Rives" development project.**

le pont Citadelle ou pont sur le bassin Vauban (figure 3). Ce dernier permettra aux deux voies de tramway et aux modes doux de circulation (piétons et cycles) de franchir un des bassins du Port Autonome de Strasbourg (PAS) et ses voies de halage, ainsi que la voie ferrée qui longe le bassin en rive Est. Il se situe au cœur des parcelles de terrains urbanisables dénommés "Môle Citadelle" et "Starlette", pour lesquels un programme d'aménagement, la ZAC Deux-Rives, est actuellement à l'étude.





© CUS



© JM BANNWARTH

### LES LIGNES DIRECTRICES DU PROCESSUS DE CONCEPTION

La démarche de réflexion globale, menée dès l'avant-projet, a associé les contraintes techniques (recherche de la géométrie et des formes optimales du point de vue du fonctionnement statique, des contraintes et impératifs fonctionnels et des méthodes de construction) et la vision esthétique (recherche d'une structure fine aux lignes simples et épurées, élégante, dont la lisibilité des formes est en accord avec le fonctionnement mécanique et exprime le cheminement des efforts).

La conception de l'ouvrage a été réalisée en trois dimensions dès le démarrage des études, à l'aide du logiciel Inventor® (édité par Autodesk).

Les plans ont été établis à partir de ce modèle tridimensionnel (figures 6a, 6b et 7).

Le traitement architectural de l'ouvrage a été réalisé en collaboration étroite avec Jean-Bernard Nappi, architecte interne à Egis.

La maquette architecturale (figure 1) illustre l'intention de sobriété et la recherche d'élégance de l'ouvrage, en harmonie avec le projet d'urbanisation future de la ZAC.

### LES CARACTÉRISTIQUES PRINCIPALES DE L'OUVRAGE

L'ouvrage est un pont métallique à arc supérieur supportant un tablier suspendu courbe, d'une portée de 163 m entre axes des culées.

L'arc, qui se développe suivant une ligne d'épure située dans un plan vertical, présente un biais par rapport au tablier qu'il enjambe.

Le tablier est suspendu à l'arc par l'intermédiaire de suspentes, simples aux extrémités ou appariées en zone centrale.

Il est prolongé côté Ouest par une rampe d'accès de 180 m environ, à

l'extrémité de laquelle est implantée la future station "Citadelle".

Le tablier est conçu pour supporter une plateforme TCSP rail à deux voies et deux bandes latérales piétons/cycles. Sa largeur utile, mesurée entre nus intérieurs des garde-corps, s'établit à 14,30 m.

Le profil en long sur ouvrage permet de dégager les différents gabarits nécessaires sur les voies franchies, et notamment le gabarit fluvial de 9 m sur le bassin. Il est constitué d'un rayon de 700 m en partie centrale, encadré par des pentes à 4%. Le dévers des voies est nul.

2- Tracé et ouvrages d'art de l'extension Est de la ligne D.

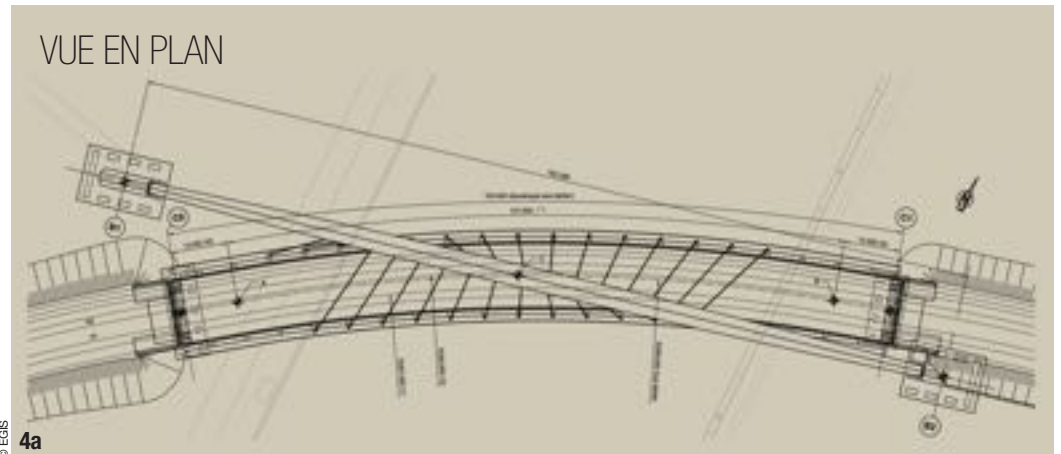
3- Le chantier du pont Citadelle - Fin des opérations de hissage de l'arc (février 2016).

4a & 4b- Vue en plan et élévation longitudinale amont (suivant la corde du tablier).

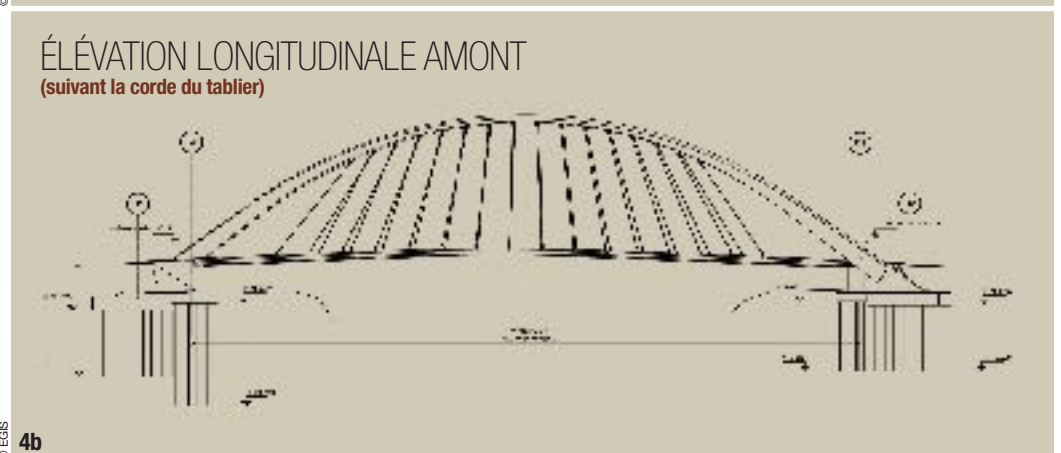
2- Route and engineering structures for the eastern extension of Line D.

3- The Citadelle Bridge project - End of arch hoisting operations (February 2016).

4a & 4b- Plan view and longitudinal elevation view upstream (following the chord of the deck).

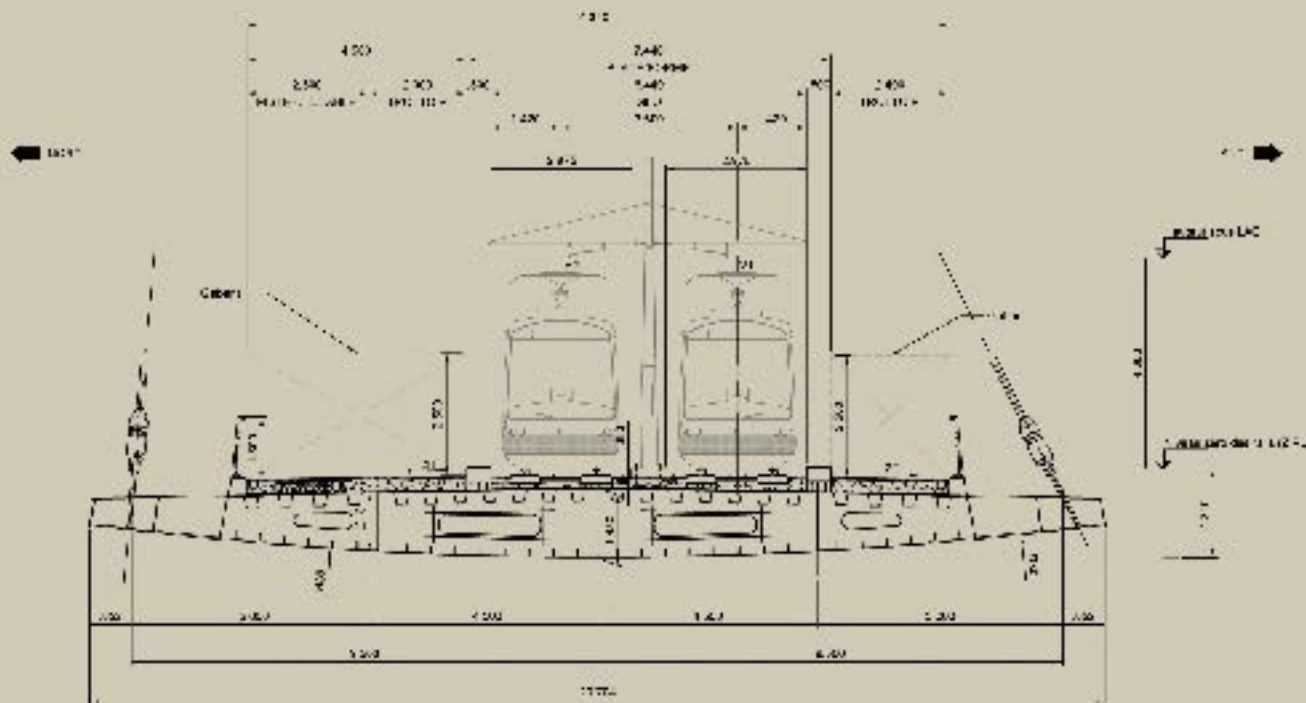


© EGIS



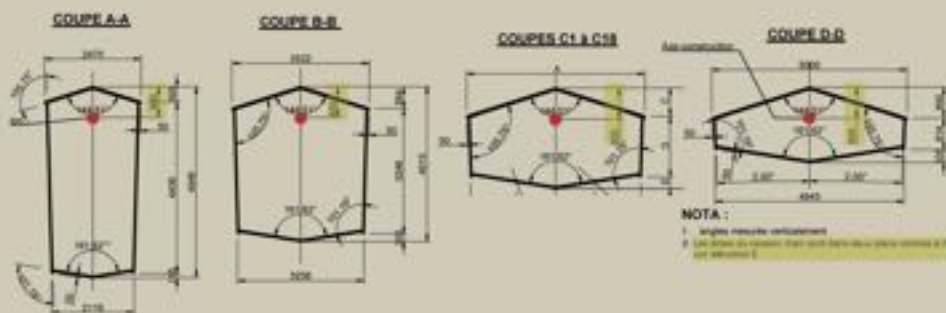
© EGIS

## COUPE TRANSVERSALE DU TABLIER



5a

## COUPES TRANSVERSALES DE L'ARC



5b

5a & 5b- Coupes transversales - Tablier et arc.

5a & 5b- Cross sections - Deck and arch.

Le tracé en plan du tablier est composé d'un rayon de 390 m environ en partie centrale, prolongé par deux alignements droits aux extrémités de l'ouvrage, pour permettre la pose et le bon fonctionnement des appareils de dilatation des voies du tramway (figures 4a & 4b). Le profil en travers fonctionnel sur l'ouvrage est composé, du nord vers le sud, d'une piste de 2,50 m réservée aux cycles et d'un trottoir de 2,00 m réservé aux piétons (séparés par un marquage au sol), d'une plateforme tramway de 6,44 m réservée aux deux voies du TCSF, et d'un espace piétons de 2,40 m de largeur. Des bordures de 50 cm matérialisent la séparation entre les circulations douces et celles du tramway.

Le système de pose de voie proposé sur l'ouvrage est identique à celui prévu en section courante, à savoir une pose classique sur traverses bloquées dans un béton de calage. Le béton de calage est coulé sur l'étanchéité qui recouvre le platelage métallique, entre les deux longrines qui encadrent la plateforme tramway.

### LES PRINCIPES DE CONSTRUCTION GÉOMÉTRIQUE DE L'ARC ET DE LA SUSPENSION

L'arc présente une ouverture en pied de 181,50 m, pour une flèche à la clé de 40,80 m. À son point haut, il se situe à environ 30 m au-dessus de la chaussée. En vue en plan, l'axe de symétrie vertical de l'arc se trouve quasiment à

l'aplomb du centre du tablier. Ainsi, le système de suspension est antisymétrique, ce qui permet de solliciter les deux demi-arcs de manière identique (position optimale vis-à-vis des flexions hors plan de l'arc), comme l'illustre la vue en plan donnée en figure 4a. À la différence d'un pont bow-string qui se caractérise par un auto-ancrage de l'arc sur le tablier, l'arc reprend les charges suivant un schéma de suspension classique, sans autre connexion avec le tablier que les suspentes.

L'arc est un caisson métallique dont la section transversale, proche d'une forme en losange, varie aussi bien en hauteur qu'en largeur le long du parcours de sa ligne d'épure entre le pied et la clé (figure 5b). À partir de la

section en pied, plus haute que large (5 m x 2,50 m), l'épure évolue pour aboutir, à la clé, à une section plus large que haute (2 m x 5 m).

Si l'épure adoptée pour l'arc affirme une volonté architecturale forte, ses formes constituent également une réponse technique à l'analyse des efforts auxquels il est soumis. L'évolution de sa ligne d'épure (un rayon central prolongé par des naissances d'arc droites) et de sa section transversale ont été définies en accord avec l'évolution générale des efforts, afin d'optimiser la matière. Le schéma de suspension radial a également été retenu pour cette raison : il permet de limiter les flexions de l'arc hors de son plan et ainsi d'assurer sa stabilité.



La définition de la géométrie de la suspension est également guidée par le respect des gabarits de circulation sur la plateforme tramway et les trottoirs :  
 → L'arc doit présenter une flèche suffisamment importante pour permettre aux câbles d'échapper au gabarit de 2,50 m défini au niveau des trottoirs pour la circulation des cycles (figure 5a) ;

**6a & 6b- Détails d'attache des suspentes sur l'arc et sur le tablier (oreilles et raidisseurs).**

**6a & 6b- Details of attachment of suspenders to the arch and the deck (lugs and stiffeners).**

- Les ancrages bas sont déportés transversalement sur un caisson latéral, rattaché au caisson principal du tablier au niveau de chaque diaphragme ;
- Les 14 files centrales se composent de deux suspentes se raccordant aux rives du tablier. Les files d'extrémité sont composées d'une seule suspente, se raccordant au tablier du côté où sa rive est la plus proche de l'arc.

latéral filant, qui permet de rigidifier les rives du tablier et dans lequel viennent s'ancrer les suspentes. Les oreilles d'ancrage hautes et basses sont des tôles épaisses usinées; elles se prolongent à l'intérieur du caisson d'arc et des caissons secondaires latéraux du tablier, sans cassure angulaire (figures 6a & 6b).

**LE SCHEMA STATIQUE, LES APPUIS ET LES FONDATIONS**

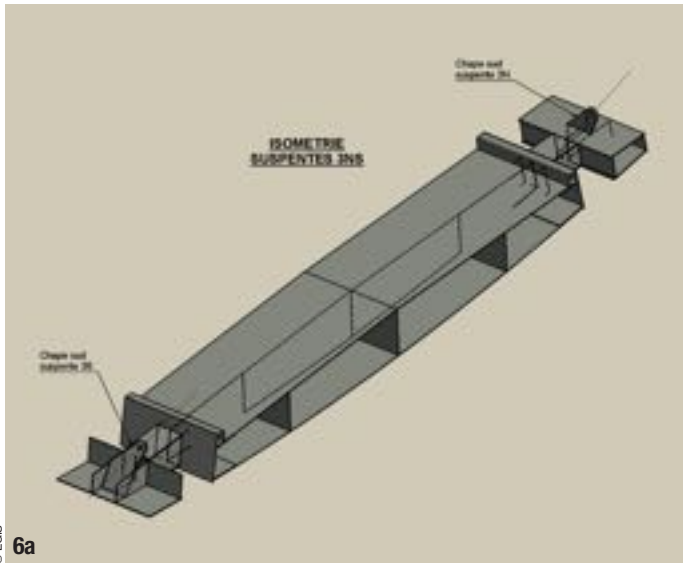
Le tablier repose sur ces culées au moyen d'appareils d'appui à pot spécifiques capables de reprendre des efforts horizontaux relativement importants associés à des efforts verticaux limités, puisque l'arc supporte une grande partie des charges du tablier. En service, le tablier est bloqué longitudinalement sur la culée Ouest (CO) et transversalement sur les deux culées, par l'appareil d'appui Sud.

L'ancrage supérieur sur l'arc est un ancrage passif, les réglages des tensions initiale et finale se faisant au niveau de l'ancrage inférieur sur le tablier (ancrage actif). Les suspentes sont des câbles clos de diamètres variant entre 50 et 75 mm ; leurs ancrages sur le tablier et l'arc se font à l'extérieur des caissons métalliques, par l'intermédiaire de chapes articulées sur les oreilles de fixation. Dans le caisson du tablier, un diaphragme sur deux (tous les 8 mètres) est placé au droit d'un ancrage de suspente, et se prolonge par une pièce de pont extérieure au caisson. Ces pièces de pont sont reliées par un caisson secondaire

La butée sismique longitudinale prévue sur la culée CO au stade du projet a été remplacée au stade de l'exécution par un ressort amortisseur précontraint (RAP), ce qui a permis de réduire de manière significative les efforts transmis à celles-ci. Les efforts sismiques transversaux sont repris par les appareils d'appui.

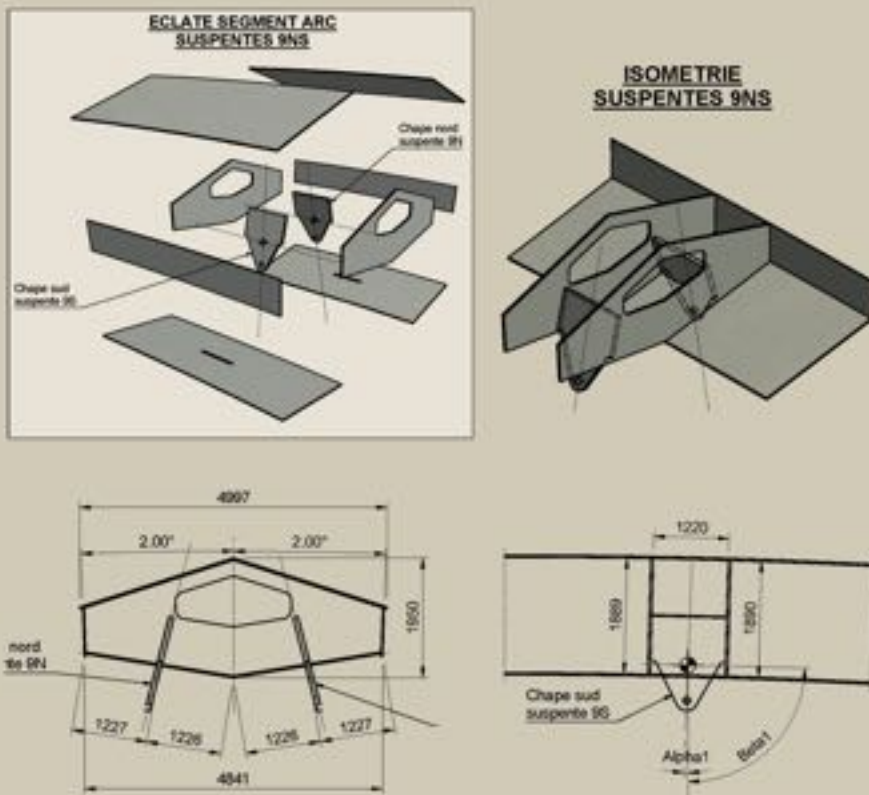
Les pieds d'arc sont encastrés sur des massifs d'appui en béton, composés d'une semelle de répartition épaisse et d'un sabot de liaison assurant la diffusion des charges. La partie hors sol du sabot présente une hauteur de 4 m environ. Les charges transmises par l'arc présentent la particularité d'être inclinées de 40° environ sur l'horizontale. La nature des alluvions sablo-graveleuses rhénanes impose, pour concevoir un système de fondation suffisamment rigide vis-à-vis des efforts horizontaux, de recourir à des fondations profondes. Le système retenu au niveau du projet était une fondation comportant deux files de barrettes de dimensions 1,20 x 2,60 m orientées dans la direction longitudinale de l'arc, et d'une grande barrette transversale arrière de rigidité et de butée (figure 7). Ces barrettes sont ancrées dans les graves compactes.

Au stade de l'exécution, l'entreprise a proposé une optimisation des dimensions de ces barrettes de fondation. Elle a également suggéré de remplacer les pieux de fondation de diamètre 1500 mm prévus sous les culées par un système de fondation allégé à base de barrettes, solution rendue possible par la réduction des efforts sismiques apportée par le RAP.



6a

**DÉTAILS D'ATTACHE DES SUSPENTES SUR L'ARC ET SUR LE TABLIER (oreilles et raidisseurs)**



6b

## LES TRAVAUX LES FONDATIONS

L'installation du chantier (figure 8) a débuté le 9 février 2015 sur la rive Ouest.

Sur chaque rive il a été réalisé 3 barrettes de 3,6 m de largeur, de 0,8 m d'épaisseur et de 15 m de profondeur sous la culée, et 3 panneaux de 6 m de largeur, 1,2 m d'épaisseur et de 22 m de profondeur sous les arcs.

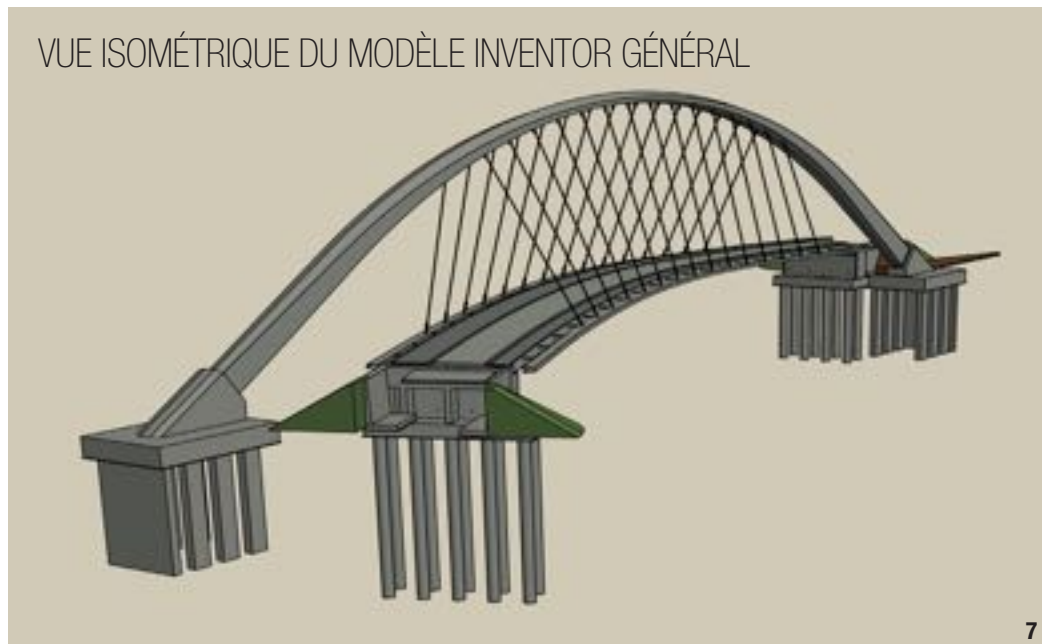
Le chantier se déroule en 3 phases :

- Réalisation des fondations en rive Ouest ;
- Transfert de l'ensemble du matériel d'une rive à l'autre ;
- Réalisation des fondations en rive Est.

Le terrain est typique de la plaine du Rhin : un mélange de galets, de graviers et de sables sur toute la hauteur d'excavation. Le forage est mené à l'aide d'une benne hydraulique de type KS (figure 9).

Cependant, lors de l'ouverture du premier panneau, le terrain s'est avéré beaucoup plus ouvert et cru qu'attendu. Afin de garantir la sécurité des hommes et des machines, les méthodes d'excavation ont dû être adaptées suite à des pertes totales du fluide d'excavation (bentonite), entraînant des effondrements.

La technique mise en œuvre pour s'affranchir de cette difficulté est une pré-imprégnation au coulis. Une première excavation est réalisée au coulis puis remblayée. Le coulis se diffuse alors dans le terrain très ouvert. Cela permet à ce dernier d'avoir une tenue suffisante lors de la re-perforation et de limiter ainsi les pertes de boue bentonitique.



7

© EGIS

## LES TRAVAUX NAUTIQUES

Deux palées provisoires sont nécessaires dans le bassin pour les phases de lancement du tablier et de hissage de la portion centrale de l'arc. Elles sont constituées de tubes de diamètre 1 200 mm battus sur une dizaine de mètres. Afin de protéger ces appuis des chocs de bateau, quatre ducs d'albe (caissons en palplanches assemblées) sont mis en place par vibrofonçage. Ces travaux ont été réalisés à l'aide d'une grue stationnée sur un ponton (figure 10).

## LA RÉALISATION DES CULÉES ET DES PIEDS D'ARC

Pour la construction des appuis en béton, une grue à tour de type GTMR

7- Vue isométrique du modèle Inventor général.

8- Vue d'ensemble du chantier des barrettes.

7- Isometric view of the general Inventor model.

8- General view of the deep foundation works.

a été mise en place côté ouest, puis transférée à l'est. Les appuis ont été réalisés simultanément de chaque côté du bassin.

Les culées sont composées d'un chevêtre qui repose sur 3 contreforts, fondés directement sur les barrettes. À l'avant de ces contreforts repose une longrine permettant d'appuyer le mur de front de la culée, habillé par des gabions en granite des Vosges, les murs en retour étant fondés sur une semelle superficielle. En rive est, vu la qualité moyenne des sols de surface, le sol a été renforcé par des colonnes à module contrôlé sous ces semelles. Les outils coffrants étaient constitués de panneaux métalliques revêtus d'une peau en bois.



8

© CEDRIC HELSLEY POUR SOLETANCHE BACHY





Pour les pieds d'arc, la connexion entre le sabot et la platine en pied d'arc est assurée par 48 barres de précontrainte de diamètres 58 et 66 mm.

Ces barres sont pré-positionnées à l'aide d'un châssis métallique posé sur le béton de propreté et noyé dans le sabot et sa semelle, avant mise en place du ferrailage, particulièrement dense (figure 11).

La totalité du coffrage du sabot est mise en place "à blanc". Les panneaux coffrants des deux faces inclinées sont retirés avant bétonnage, puis remis en place au fur et à mesure de celui-ci. Des goulottes sont prévues pour libérer le passage du tube plongeur approvisionnant le béton et des vibreurs (figure 12).

**9- Benne hydraulique KS.**

**10- Vue d'ensemble - Travaux nautiques au premier plan (mai 2015).**

**9- KS hydraulic bucket.**

**10- General view - Nautical works in the foreground (May 2015).**



## LES TERRASSEMENTS

La rampe Ouest a été réalisée en deux phases.

La première phase consistait en une plateforme provisoire pour l'assemblage de la charpente métallique, avant lancement. Elle a été conçue plus large que la rampe définitive afin de permettre la circulation autour du tablier. Afin d'optimiser les mouvements de matériaux de cette rampe, la deuxième phase consistait à retailler les talus pour obtenir le profil en travers final, les matériaux récupérés servant à monter la rampe à son niveau définitif.

## LA CHARPENTE MÉTALLIQUE

Le démarrage des études d'exécution nécessitait une définition préalable précise de la cinématique de construction de l'ouvrage, pour la détermination de la contreflèche de la structure. De ce fait, certaines options proposées lors de l'étude d'avant-projet ont dû être rapidement confirmées ou modifiées. L'accès au bassin Vauban depuis le Rhin nécessite le passage d'une écluse dont les dimensions ne permettaient pas le transport du tablier ou de l'arc en un seul élément. De plus, l'acheminement de tronçons par voie fluviale aurait nécessité des moyens de manutention relativement lourds pour le déchargement et la pose. Il aurait entravé la navigation sur le bassin, qui devait pouvoir être maintenue. Les constructeurs ont donc retenu le transport par convois routiers exceptionnels depuis l'usine. Ainsi, le tablier a été découpé en 7 tronçons longitudinaux et 4 transversaux, soit 28 éléments. L'arc a été fractionné en 15 éléments.

Ces tronçons ont été fabriqués à l'usine d'Eiffage Métal de Lauterbourg, de mars à novembre 2015. Après un passage en peinture, les 43 colis, dont les dimensions atteignaient pour le tablier 26 m en longueur et 6,20 m en largeur, et pour l'arc 15 m de long, 4 m de large, 4 m de haut et jusqu'à 100 t, ont été chargés sur des ensembles routiers. Le trajet, d'une soixantaine de kilomètres, nécessitait une journée complète.

Le tablier a été assemblé sur la plateforme en deux phases. La première a permis de reconstituer 100 m du tablier en assemblant 4 tronçons longitudinaux, soit 16 éléments. Un premier lancement a amené la charpente au-dessus du premier appui provisoire situé dans le bassin, libérant l'arrière de la plateforme. L'assemblage des 12 éléments restants terminait la reconstitution complète du tablier.



© EIFFAGE MÉTAL



© GTM HALLE

En parallèle, le montage des premiers tronçons d'arc s'est déroulé selon le phasage suivant et de part et d'autre du bassin :

- Pose des deux premiers tronçons sur les massifs des pieds d'arc et sur des palées provisoires, puis soudage ;
- Remplissage de l'espace entre le sabot et la platine d'about de l'arc au mortier bi-composant sans retrait ;
- Pré-assemblage au sol des tronçons 3 et 4 ;
- Mise en tension des barres de clouage liaisonnant les amorces d'arc aux massifs ;
- Pose des ensembles pré-assemblés au sol sur des palées et sur les amorces déjà constituées, puis soudage.

La portion centrale de l'arc, constituée de 5 tronçons, a été assemblée sur le tablier, avant le second lançage, à l'aplomb de sa position définitive (figure 13). À l'issue du second lançage, des palées ont été installées en partie sur le tablier et en partie sur des appuis réalisés dans le bassin. À leur sommet, à 40 m au-dessus du tablier, des vérins avaleurs de câbles de 200 t de capacité chacun ont hissé, en quelques heures, le colis central de 400 t et de 80 m de long à son niveau quasi-définitif. Durant la même semaine se sont succédé les opérations suivantes :

- Hissage de l'arc (figure 14) ;
- Pose de la clé d'arc ouest et bridage provisoire ;
- Réglage de l'arc ;
- Pose de la clé d'arc est et bridage provisoire.

**11- Chassis métallique de maintien des barres de clouage.**

**12- Pied d'arc avant bétonnage.**

**13- Le tablier et la portion centrale de l'arc, avant démarrage du lancement n°2.**

**11- Steel frame holding the stitching bars.**

**12- Arch base before concreting.**

**13- The deck and the central portion of the arch, before starting the second launch.**

Après soudage des deux clés, les deux structures - arc et tablier -, isolées l'une de l'autre, pouvaient être reliées par les suspentes. Les niveaux de lançage étant différents des niveaux définitifs, un réglage du tablier lui a donné sa géométrie et son profil en long quasi-définitifs.

Les travaux de pose des équipements pourront démarrer après décintrement des appuis provisoires. Dans l'ordre, on trouve la réalisation la protection anticorrosion, de l'étanchéité, la pose des différents fourreaux et caniveaux, la pose des bordures séparant la zone de circulation du tramway des zones piétonnes, le bétonnage des trottoirs, la pose des enrobés et enfin l'installation des garde-corps. L'ouvrage sera ensuite livré à l'entreprise en charge de la voie des voies.



© EIFFAGE MÉTAL





© EIFFAGE MÉTAL

14

## CONCLUSION

Le pont Citadelle a été conçu pour répondre à l'ambition de la Compagnie des Transports Strasbourgeois, qui était de réaliser un pont emblématique, capable de servir d'ancrage à la revalorisation et à l'urbanisation d'une partie de la zone portuaire.

Ouvrage à la fois très technique et très élégant, il aura bénéficié d'une conception particulièrement soignée, d'une réalisation très rigoureuse et d'une mise en place astucieuse, et aura permis des échanges fructueux entre maître d'œuvre et entreprises. Arc pur, il constituera un écho inté-

ressant à son voisin le pont sur le Rhin, qui est un arc auto-ancré, comme deux cas d'école dans le domaine des grands ouvrages d'art métalliques. □

**14- Hissage de la portion centrale de l'arc.**

**14- Hoisting the central portion of the arch.**

## PRINCIPALES QUANTITÉS

### ACIER DE CHARPENTE MÉTALLIQUE :

- Tablier (S355/S460) : 1 350 t
- Arc (S460) : 1 000 t

### APPUIS ET FONDATIONS - BÉTON : 3 200 m<sup>3</sup>

### ACIERS BÉTON ARMÉ : 480 t

### SUSPENTES : 920 m

## INTERVENANTS

**MAÎTRE D'OUVRAGE :** Compagnie des Transports Strasbourgeois

**MAÎTRE D'ŒUVRE DE L'EXTENSION DE LA LIGNE D :**

- Groupement Getas Egis Rail - Serue
- Atelier Alfred Peter (paysagiste/urbaniste)

**MAÎTRE D'ŒUVRE PARTICULIER DET :** Serue

**MAÎTRE D'ŒUVRE PARTICULIER DU PONT CITADELLE :** Egis Jmi

**ARCHITECTE :** Jean-Bernard Nappi, Egis

**CONTRÔLE EXTÉRIEUR :** Cerema

**CONTRÔLE TECHNIQUE :** Veritas

**GROUPEMENT ATTRIBUTAIRE DU MARCHÉ DE TRAVAUX :** Eiffage Construction Métallique - Gtm-Hallé

**BET ÉTUDES CHARPENTE :** Cticm

**BET ÉTUDES GÉNIE CIVIL :** Ingerop

**SOUS-TRAITANT FONDATIONS :** Soletanche Bachy France

**SOUS-TRAITANT FONDATIONS FLUVIALES :** Durmeyer

**SOUS-TRAITANT TERRASSEMENT :** Colas Est

**SOUS-TRAITANT ARMATURES POUR BÉTON ARMÉ :** Groupement Straub - Gala

**SOUS-TRAITANT BARRES DE PRÉCONTRAINTE ET APPUIS :** Freyssinet

**SOUS-TRAITANT AMORTISSEUR :** Etic - Douce Hydro

**SOUS-TRAITANT SUSPENTES :** Pfeifer

## ABSTRACT

### THE CITADELLE BRIDGE IN STRASBOURG: A BALANCING EXERCISE

N. YAZBECK, EGIS JMI - A. GIANNOPOULOS, EGIS JMI - T. KLUMB, EIFFAGE - F. DELHOMME, GTM-HALLÉ - F. KISSLING, SOLETANCHE BACHY

The Citadelle Bridge undergoing construction in Strasbourg will enable the urban tramway to pass over one of the Port Autonome basins for an extension into Germany. Located in a large curve on the route, it is formed of a steel arch of 180-metre span, which straddles and supports a very slender steel deck by means of closed cable suspenders. The structure's geometry was precisely calibrated in 3D to comply with all the required structure gauges and the equilibrium of forces transmitted by the deck to the arch. The bridge is supported on deep foundations (barrettes) and provided with a preloaded spring shock absorber for seismic resistance. Meticulous design and construction work was required for anchoring of the arch in its concrete shoe. The frame was moved into position by an astute method, with the deck already loaded with part of the arch being launched on temporary bents. □

### EL PUENTE CITADELLE DE ESTRASBURGO: UN EJERCICIO DE EQUILIBRIO

N. YAZBECK, EGIS JMI - A. GIANNOPOULOS, EGIS JMI - T. KLUMB, EIFFAGE - F. DELHOMME, GTM-HALLÉ - F. KISSLING, SOLETANCHE BACHY

El puente Citadelle que se está construyendo en Estrasburgo permitirá al tranvía de la aglomeración cruzar una de las cuencas del Puerto Autónomo y llegar hasta Alemania. Situado en una fuerte curva del trazado, está formado por un arco metálico de 180 m de ojo que sobrevuela y soporta un tablero metálico muy fino mediante suspentajes de cables cerrados. La geometría de la construcción ha sido definida con precisión en 3D para respetar el conjunto de los gálibos impuestos y el equilibrio de los esfuerzos transmitidos del tablero al arco. La construcción se sustenta sobre pilotes flotantes y dispone de un muelle amortiguador pretensado que protege en caso de sismo. El anclaje del arco a su base de hormigón se ha diseñado y realizado meticulosamente. La armadura se ha instalado utilizando un método ingenioso que consiste en un lanzamiento del tablero ya cargado con una parte del arco sobre pilares provisionales. □



# PASSERELLE DU GRAND LARGE : LE CHANTIER

AUTEURS : JULIE GAUBERT, INGÉNIEUR RESPONSABLE DE PROJET, SETEC TPI - DAPHNE DECKERS, CHEF DE PROJET,  
VICTOR BUYCK STEEL CONSTRUCTION - THOMAS PETIT, RESPONSABLE TRAVAUX, BOUYGUES TRAVAUX PUBLICS RÉGIONS FRANCE -  
JEAN-BERNARD DATRY, SETEC TPI

**LA PASSERELLE DU GRAND LARGE, SITUÉE DANS LE QUARTIER DU MÊME NOM À DUNKERQUE, PERMET DE RELIER CETTE ANCIENNE FRICHE INDUSTRIELLE EN PLEINE RÉHABILITATION À MALO-LES-BAINS, CENTRE TOURISTIQUE ET BALNÉAIRE DE LA VILLE. SA CONSTRUCTION S'EST ACHEVÉE EN AVRIL 2015, PERMETTANT AUX DUNKERQUOIS DE REJOINDRE À PIED OU À VÉLO CES DEUX QUARTIERS AUTREFOIS SÉPARÉS PAR LE CANAL EXUTOIRE.**

## L'OUVRAGE

D'une longueur totale de 180 m, le tracé de la passerelle débute au niveau de la digue des Alliés, enjambe de biais le canal exutoire par une travée de 112 m de long et se termine sur une butte, sur laquelle ont été aménagés des chemins piétonniers permettant de redescendre au niveau de la rue.

Cette butte est reliée au premier étage du nouveau Fond Régional des Arts Contemporains par une deuxième passerelle de 103 m de long qui survole le parvis récemment réalisé.

Le canal régule le niveau d'eau des *wateringues* - réseau de canaux de l'arrière-pays dunkerquois et calaisien.

Les appuis principaux de la passerelle consistent en deux paires de pylônes métalliques d'une hauteur totale de 28 m. Ils sont situés de part et d'autre du canal et sont inclinés transversalement. En P9, P10 et C19, le tablier repose sur trois paires de bielles bi-articulées, permettant la dilatation de l'ouvrage et l'ancrage des haubans de retenue (figure 2). En C19, la tension du hauban de retenue est contrebalancée par une culée poids.

Les appuis et les mâts présentent un biais de 43 degrés par rapport à l'axe longitudinal du tablier.

Le système structurel est celui d'une poutre Fink inversée, l'ensemble mâts secondaires, haubans croisés et tablier

se comportant comme une poutre treillis dont on aurait supprimé la membrure supérieure.

Les mâts principaux et secondaires sont des tubes métalliques de diamètre variant de 510 mm pour les mâts centraux à 1016 mm pour les pylônes. Les mâts secondaires sont espacés de 16 m, et leur hauteur varie de 10,8 à 16,7 m, suivant un tracé funiculaire à la courbe des moments.

Le système de haubanage est constitué de barres pleines de diamètre 72 mm et de nuance S540, dont le nombre varie en fonction de la position sur la travée : quatre barres sont nécessaires pour les haubans de retenue, une ou deux barres pour les haubans centraux.

Les barres sont bi-articulées et ancrées en tête et pied de mât. Des manchons de réglage permettent l'ajustement des longueurs.

Le tablier est composé de deux caissons métalliques de 80 cm de hauteur, reliés entre eux par des entretoises biaisées espacées de 4 m environ, supportant les solives destinées à porter le platelage en bois. Le contreventement est assuré par des tubes disposés en K. Pour une description plus détaillée de la passerelle, de son fonctionnement et de sa conception, le lecteur est invité à consulter l'article intitulé « la passerelle du Grand Large à Dunkerque » publié dans la revue *Travaux* n°896 avril/mai 2013.





1

© ANNE-CLAUDE BARBIER POUR SETEC TPI

## LES TRAVAUX DE GÉNIE CIVIL

### LES ÉTUDES D'EXÉCUTION

Les études d'exécutions ont été menées par quatre bureaux d'études d'exécution sous le contrôle de la maîtrise d'œuvre, Setec Tpi :

- Charpente métallique et méthodes de montage de la passerelle de franchissement : bureau d'études de Victor Buyck Steel Construction ;
- Charpente métallique et méthodes de montage de la passerelle d'accès: bureau d'étude de Ducrocq Ingénierie Process ;
- Génie civil et fondations des deux passerelles : Maîtrise Ingénierie Management (M.I.M.) ;

- 1- Vue de la passerelle.
- 2- Schéma statique.

- 1- View of the foot bridge.
- 2- Static diagram.

- Méthodes génie civil/fondations: Bureau d'étude interne de Bouygues Travaux Publics Régions France.

La prise en compte du séisme a nécessité une étroite coordination

entre les intervenants pour la prise en compte de la raideur des appuis, entre autres, assurée par le coordinateur étude-travaux.

### LES ACCÈS : LA DIGUE PROVISOIRE

Le génie civil et le montage de la passerelle ont été réalisés à partir d'une digue composée de grave non traitée et d'enrochements (figure 3).

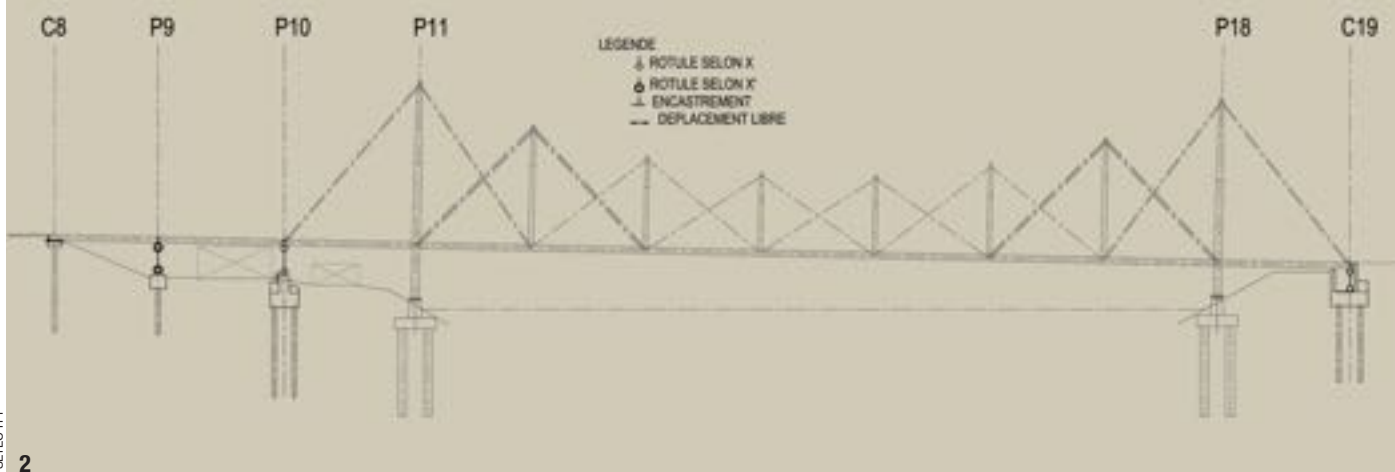
Une étude hydraulique a été réalisée pour modéliser l'incidence de la digue sur l'écoulement des eaux du canal et par conséquent sur l'évacuation de l'eau de l'arrière-pays dunkerquois (localement appelé les *waterings*). Le flux d'écoulement a été centré au

milieu du canal entre les palées de la charpente métallique afin de respecter le fonctionnement initial du canal (figure 4).

Une estacade provisoire a été construite entre les deux côtés de la digue dans le but d'accéder aux appuis côté Malo sans créer un second accès, difficile à réaliser. Les capacités de la digue ont été définies conjointement entre les membres du groupement en fonction du matériel nécessaire à chaque entreprise.

Pendant les travaux, les vitesses d'écoulement ont été mesurées au niveau de l'ouverture. Des levés bathymétriques ont été réalisés régulièrement en amont et en aval de la digue. ▷

## SCHÉMA STATIQUE



© SETEC TPI

2

En complément, des échelles de crue ont permis de surveiller le niveau du canal et de détecter une éventuelle différence de niveau entre l'amont et l'aval de la digue provisoire.

En cas de contexte hydraulique défavorable (faible coefficient de marée additionné à une forte pluviométrie), les intervenants du chantier ont mis en place une procédure d'urgence en lien avec la préfecture, afin de définir la marche à tenir si le niveau dans le canal venait à dépasser certains seuils d'alerte prédéfinis. Si le seuil maximum était atteint, il était prévu de démolir la digue pour créer un second passage pour l'évacuation de l'eau, et éviter ainsi la remontée du plan d'eau amont. Durant le chantier, la procédure a été enclenchée à plusieurs reprises mais les niveaux sont restés sous le seuil d'alerte maximum.

### LES APPUIS

La passerelle, au départ de la digue de Malo-les-Bains et à destination du FRAC, débute par l'appui C19, qui est une culée creuse de 6 m de profondeur (dont un radier béton de 2 m d'épaisseur). Elle reçoit deux bielles, une butée transversale et un accès pour l'entretien.

Le béton a été réalisé à l'intérieur d'un batardeau en palplanches permettant ainsi de limiter l'impact des travaux sur la digue des Alliés (figure 5).

Les palplanches ont été mises en œuvre depuis la digue des Alliés par vibrofonçage. Il a par ailleurs été nécessaire de les surbattre avec un marteau hydraulique pour atteindre la cote calculée. Les palplanches ne sont pas récupérées après réalisation de la culée car le béton des voiles s'appuie directement contre celles-ci.

Les pieux à la tarière creuse, d'une longueur de 12 m, ont été réalisés depuis le terrain naturel et ont été recépés après réalisation des palplanches.

La passerelle prend ensuite ses deux appuis principaux de chaque côté du canal : les piles P11 et P18 reçoivent les 4 mâts principaux. Ces appuis ont également été réalisés à l'intérieur de batardeaux en palplanches afin de s'affranchir des venues d'eau liées au canal exutoire.

Les palplanches ont été réalisées depuis la digue provisoire et sont également laissées en place après recépage selon la forme du perré.

Sur P11 et P18, les palplanches ont servi de support pour les palées utilisées lors du montage de la charpente. Lors de l'étude des piles P11 et P18,

il a été décidé de réaliser les fondations avec 3 barrettes de dimensions 2,80 m x 0,60 m x 9,00 m au lieu des 6 pieux de diamètre 1 m initialement prévus. Cette solution a permis de réduire la largeur de la semelle de l'appui et de réaliser ainsi des économies sur les

quantités de béton, d'aciers, de palplanches et de déblais.

Les mâts sont rendus solidaires des piles grâce à des ancrages de 3 t positionnés dans le ferrailage avec des tolérances d'exécution très fines (figure 6).

**3- Digue provisoire : coupe.**

**4- Digue provisoire : vue en plan.**

**5- Batardeau de la culée C19.**

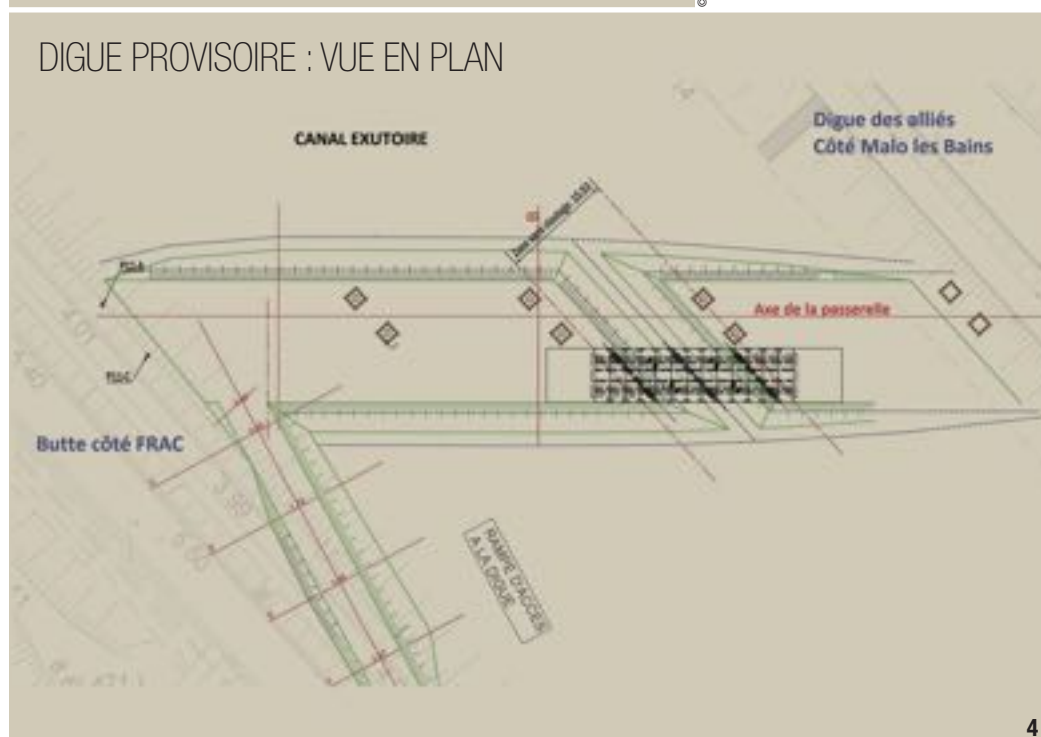
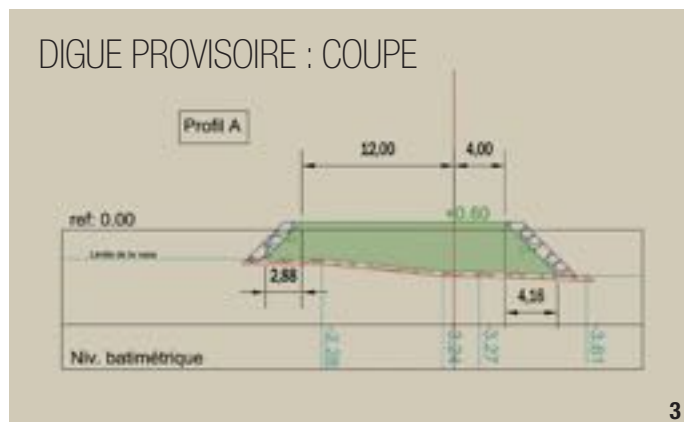
**6- Ancrage des pylônes.**

**3- Temporary breakwater: cross section.**

**4- Temporary breakwater: plan view.**

**5- Cofferdam of abutment C19.**

**6- Pylon anchoring.**



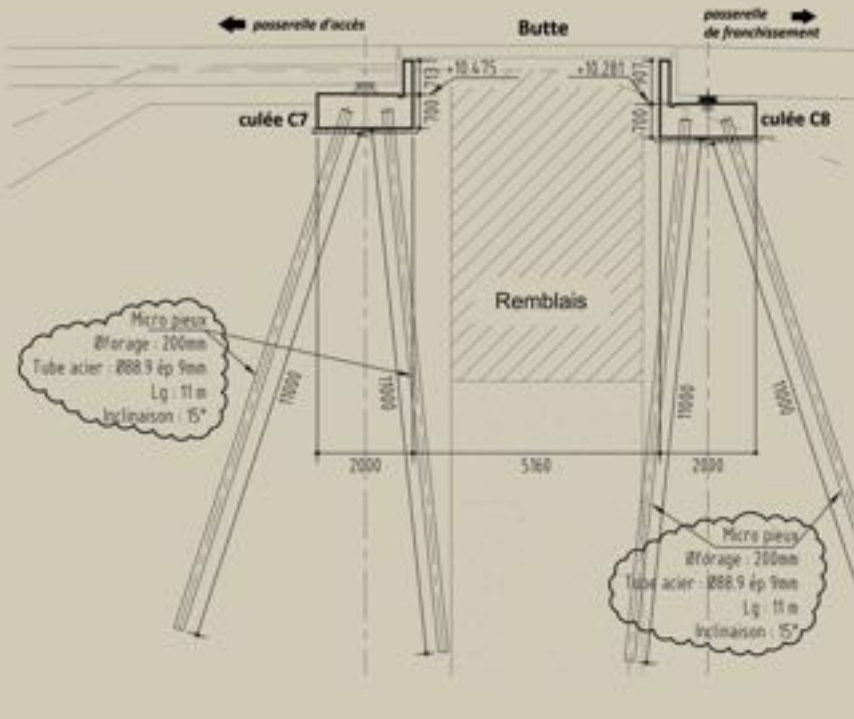




© BOUYGUES TP RÉGIONS FRANCE

7

## CULÉES C7-C8



© BOUYGUES TP RÉGIONS FRANCE

8

La mise en œuvre des ancrages a été réalisée avec un gabarit métallique. Avant bétonnage, les entreprises procèdent à une vérification de leur position.

L'appui P10 se trouve entre le canal exutoire et la butte paysagère sur laquelle viennent s'appuyer les deux abouts de passerelles.

**7- Réalisation des palplanches de l'appui P10.**  
**8- Culées C7-C8.**

**7- Execution of sheet piling for support P10.**  
**8- Abutments C7-C8.**

Dans le but de limiter la démolition de la route adjacente et ainsi minimiser les contraintes pour les Dunkerquois durant les phases de chantier, l'entreprise a opté pour la réalisation d'un quatrième batardeau en palplanches (figure 7). Cet appui est fondé sur des pieux en béton et il est lesté au moyen de gros béton pour reprendre les efforts de

traction qui peuvent apparaître dans certains cas de charges.

Afin d'éviter les interférences entre les aciers et les ancrages des platines, les inserts métalliques ont été définis très tôt et ont ainsi pu être intégrés dans les plans de ferrailage dès le premier indice.

Pour les fondations des culées C8 et C7 sur lesquelles s'appuient simplement les tabliers des passerelles de franchissement et d'accès, il avait été prévu, en phase de conception, qu'elles soient constituées chacune de deux pieux de diamètre 600 mm et de longueur 10 m. Il a finalement été choisi de réaliser des micro-pieux de type II et de diamètre 90 mm (figure 8). Ceci a permis de s'affranchir des ouvrages provisoires qui auraient été nécessaires pour hisser une machine de pieux en tête de la butte sans détériorer les talus et les rampes béton nouvellement réalisés dans le cadre du marché de réaménagement du parvis.

## LA CHARPENTE MÉTALLIQUE

### LA FABRICATION DE LA CHARPENTE MÉTALLIQUE EN ATELIER

La passerelle a été entièrement fabriquée dans les ateliers de Victor Buyck Steel Construction (Vbsc), à Eeklo en Belgique, soit à 100 km du site.

Le canal n'étant pas navigable, le transport des éléments de charpente ne pouvait s'effectuer que par la route. L'étude du découpage de la passerelle en tronçons a été réalisée avec soin afin limiter le nombre d'éléments transporter et les opérations d'assemblage et de soudage sur site. Le nombre d'opérations d'assemblage et de peinture en dehors des ateliers s'en trouve diminué, garantissant une plus grande qualité et une pollution moindre.

Les nuisances aux riverains sont également amoindries.

La programmation de la découpe est entièrement automatisée et la découpe des tôles est étudiée pour optimiser le taux de chute. Les tôles sont achetées sur mesure en incluant une marge pour les préparations au soudage et les contre-flèches.

Les poutres principales sont assemblées, réglées et pointées suivant un ordre déterminé afin de réaliser le plus grand nombre possible d'opération à plat (les pièces sont parfois retournées). Deux membrures sont montées en premier, suivies des raidisseurs, les deux dernières tôles venant fermer le caisson (figure 9).



9- Montage des caissons à plat.

10- Soudage des connexions des haubans au tablier.

11- Pied de mât avant assemblage.

12- Assemblage du nœud pylône/tablier.

13- Pièce de renfort avant usinage.

14- Pièce de renfort avant et après usinage.

9- Caisson assembly on flat ground.

10- Welding of stay-cable connections to the deck.

11- Mast base before assembly.

12- Assembling the pylon/deck joint.

13- Reinforcing part before machining.

14- Reinforcing part before and after machining.

FIGURES 9, 10, 12, 13 & 14 © SETEC TPI - FIGURE 11 © Vbsc

Pour réaliser les soudures des connexions des haubans, qui requièrent un grand nombre de passes, des contre-poids ont été employés pour maîtriser les déformations de l'acier pendant le soudage (figure 10).

Les nœuds de connexion avec les mâts secondaires sont intégrés aux poutres-caissons.

Les mâts principaux sont fabriqués en trois parties qui sont assemblées avant le transport sur site : le nœud de connexion entre les mâts principaux et les caissons, la partie supérieure à laquelle sont connectés les haubans, le pied de mât (figure 11).

Le nœud est une pièce complexe, assemblée en amont (figure 12), avant d'être connectée à la partie inférieure et supérieure du mât. Le modèle 3D établi par Vbsc facilite l'anticipation de l'ordre d'assemblage des tôles et éléments constituant le nœud.

Les mâts secondaires et les connexions hautes des haubans sont assemblés entièrement en atelier avant le transport sur site.

Pour réaliser les renforts au niveau de l'accroche des haubans, on procède de la manière suivante : Les fourrures de renforcement sont découpées, le diamètre du trou étant plus petit que le trou final.

Elles sont soudées de part et d'autre de la chape à renforcer, et le renfort est ensuite usiné pour obtenir une surface lisse et un trou alésé au diamètre final (figures 13 et 14).

Les bielles sont constituées de tubes, dans lesquelles ont été réalisées des engravures. Les chapes, en tôles épaisses y seront ensuite enfourchées et soudées.

La peinture de protection est mise en œuvre au sein des ateliers de Vbsc. Les opérateurs qualifiés ACQPA appli-

quent le système de protection dans un environnement confiné dont l'hygrométrie et la température sont contrôlées. Les systèmes de protection mis en œuvre sont les suivants :

- Tablier, bielles, mâts : C5MaANV 965 ;
- Haubans (sur acier galvanisé) : C4ANV859.

Les seules opérations de peinture à réaliser sur chantier sont la reconstitution du complexe au droit des joints de chantier et l'application d'une couche de finition.

#### LE MONTAGE SUR SITE

L'accès s'effectuait au moyen de la digue provisoire, permettant l'utilisation de grues sur toute la longueur de l'ouvrage. Le montage a donc été réalisé sur palées provisoires.

La durée des travaux de montage de charpente métallique a été de six mois.

Le phasage de montage a été le suivant (figures 15a à 15g) :

- Mise en place des palées provisoires ;
- Montage des poutres principales des travées de rive ;
- Montage des mâts principaux ;
- Montage des poutres principales ;
- Connexion des éléments de tablier et des mâts principaux ;
- Mise en place des bielles ;
- Montage des entretoises, des longerons et des contreventements (éléments boulonnés) ;
- Montage et soudages des mâts secondaires ;
- Scellement des mâts principaux sur les fondations ;
- Mise en place du platelage ;
- Mise en place et réglage des haubans ;
- Scellement des bielles ;
- Démontage des palées provisoires ;



### 15a à 15g- Montage de la charpente.

### 15a à 15g- Assembling the frame.

- Essais statiques et dynamiques ;
- Montage des amortisseurs ;
- Essai dynamique final.

Le réglage des barres par manchons filetés repose entièrement sur la géométrie de construction :

- La combinaison de réglage donne la tension et l'allongement de chaque barre. On en déduit la longueur neutre, non tendue, du hauban par retrait de l'allongement.
- Les barres sont coupées de telle façon que leur longueur soit égale à la longueur non tendue, corrigée après relevé sur site des imperfections dues au montage.
- Le tablier est vériné à chaque étape sur les appuis provisoires, afin que la distance entre les points d'accroche en tête et en pied de mât corresponde exactement à la longueur neutre des haubans.
- Les haubans sont montés simultanément de chaque côté d'un mât à l'aide d'un palonnier (figure 16). Ce palonnier permet de neutraliser la déformée sous poids propre de la barre, déformée qui raccourcirait la longueur projetée du hauban et empêcherait son montage.

La tension de réglage est choisie afin qu'aucun hauban ne soit détendu à l'État Limite de Service. En revanche, on autorise une détente dans les haubans centraux, à l'État Limite Ultime. La passerelle fonctionne alors comme deux consoles en vis-à-vis.

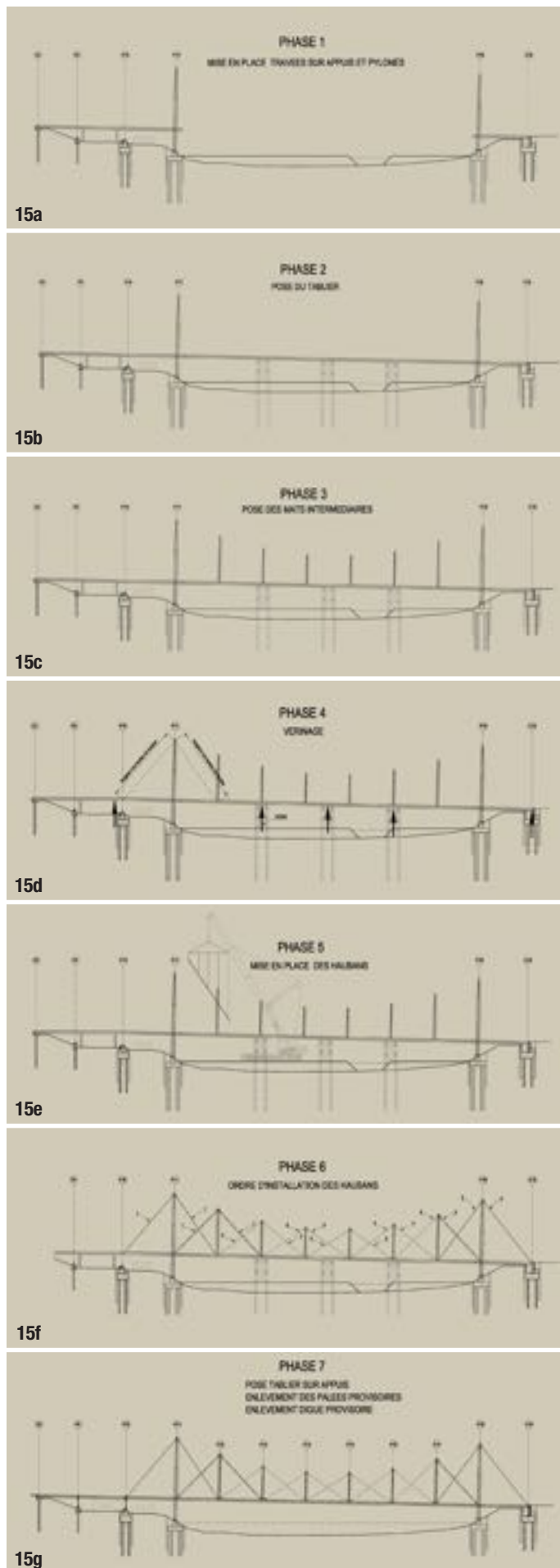
### LA LIAISON AVEC LA PASSERELLE D'ACCÈS

Les deux passerelles ont été réalisées par deux entreprises différentes de manière indépendante.

La jonction entre les deux structures se fait au niveau de la butte par une travée métallique isostatique biaisée d'une longueur de 5 m.

Elle supporte le même platelage que le reste de la passerelle, et repose sur les culées C7 et C8.

La mise en fabrication de cette travée a été lancée après le coulage des culées et la pose des charpentes : Les dimensions exactes de la travée intermédiaire ont ainsi pu être relevées sur site.



© SETEC TPI

### LES ÉQUIPEMENTS

La passerelle est équipée de garde-corps en inox avec un éclairage intégré dans les mains courantes.

Sous la main courante, les gardes corps sont équipés de filets de maille inox entre les montants et certaines zones permettent aux usagers de s'asseoir sur des bancs en caillebotis.

Des essais ont été réalisés afin de vérifier que les critères d'un éclairage public confortable étaient bien atteints (figure 17).

Les deux passerelles sont revêtues d'un platelage en maçaranduba (classe biologique 4) équipé d'un coridon antidérapant en résine sur chaque planche du platelage.

Le calepinage du platelage est identique sur les deux passerelles.

Les planches du platelage ont été fixées sur des lambourdes du même bois, elles-mêmes fixées sur les solives métalliques de la passerelle.

À l'origine, le platelage devait être fixé directement sur les solives, mais afin de limiter les percements dans la charpente et permettre un montage et réglage plus aisé, il a été décidé d'utiliser des lambourdes du même bois que le platelage.

La taille de ces lambourdes a été réduite au minimum pour limiter l'impact visuel sous la charpente.

### LES ESSAIS DYNAMIQUES

Les calculs effectués en phase étude ont montré la nécessité de l'installation d'amortisseurs dynamiques accordés. En effet, le calcul effectué selon les modalités du guide méthodologique du Setra « passerelles piétonnes - Évaluation du comportement vibration sous l'action des piétons » donne les résultats suivants :

- Une accélération verticale maximale de  $2,08 \text{ m/s}^2$ , supérieure à la limite de  $1 \text{ m/s}^2$ , recommandée par le guide du Setra. L'installation d'amortisseurs verticaux se révèle indispensable.

- Une accélération horizontale maximale de  $0,106 \text{ m/s}^2$ , supérieure de 6% à la limite de  $0,1 \text{ m/s}^2$ . L'accélération est proche de la limite, mais par sécurité, des amortisseurs seront installés.

Deux séries d'essais dynamiques ont été effectuées, la première avant l'installation des amortisseurs dynamiques, la deuxième permettant de vérifier leur efficacité.

Les premiers essais dynamiques ont permis de mesurer :



16- Mise en place des haubans à l'aide d'un palan.

17- Essai d'éclairage de la passerelle.

18- Amortisseur horizontal avant son installation.

19- Amortisseurs sous le tablier.

20- Brides anti-vibrations.

16- Placing stay cables in position using a hoist.

17- Foot bridge lighting trial.

18- Horizontal shock absorber before its installation.

19- Shock absorbers under the deck.

20- Anti-vibration clamps.

→ Les propriétés dynamiques, qui permettent d'estimer la probabilité de mise en vibration de la passerelle du fait du trafic piéton et de dimensionner les éventuels amortisseurs (fréquence propre, amortissement).

→ Les accélérations de la passerelle sous divers chargements piétons, chargements aléatoires ou destinés à exciter l'un des modes propres de la passerelle.

Les mesures sont faites au moyen d'accéléromètres reliés à une centrale d'acquisition. Ces capteurs sont placés de chaque côté du tablier (afin de rendre compte des déformées de torsion), au milieu et au quart de la travée, c'est-à-dire aux ventres des déformées des modes propres principaux. Ils mesurent les accélérations verticales et horizontales du tablier.

Une première mesure, sous excitation du vent seul, permet de mesurer les fréquences propres.

Les fréquences obtenues à l'issue de ces essais sont proches des fréquences calculées durant les phases d'études :

→ **1<sup>er</sup> mode** : horizontal, de fréquence 0,71 Hz (0,69 Hz calculé). C'est le mode horizontal principal.

→ **2<sup>e</sup> mode** : horizontal et torsion, de fréquence 1,22 Hz (1,17 Hz calculé).

→ **3<sup>e</sup> mode** : horizontal, de fréquence 1,48 Hz (1,42 Hz calculé).

→ **4<sup>e</sup> mode** : vertical, de fréquence 1,70 Hz (1,71 Hz calculé). C'est le mode vertical principal.

Après dépouillement des résultats de la mesure à vide, on effectue une série d'essais sous chargement dynamique :

→ Deux essais sans fréquence déterminée : une dizaine de personnes courent puis marchent le long de la passerelle.

→ Deux essais par mode propre :

- Un groupe de 5 personnes marche au rythme de la fréquence testée, en accentuant la direction verticale ou horizontale en fonction du mode propre.

- Un groupe de 5 personnes plie les genoux au rythme de la fréquence testée. Il s'agit du test de vandalisme.

Le décrétement des accélérations mesurées après chaque essai permet de déterminer l'amortissement réel de la structure.

Cet amortissement varie de 0,2% pour le mode vertical à 0,4% pour le mode horizontal. Ces valeurs sont à comparer

à la valeur de 0,4% recommandée par le guide du Setra pour les ouvrages en acier.

Les amortisseurs dynamiques accordés, constitués d'un système masse-ressort amorti, sont réglés en fréquence et amortissement selon les paramètres mesurés durant les essais. Ils sont installés sous le tablier, au milieu de la travée principale (figures 18 et 19). Prévus dès la phase de conception, ils ne sont pas visibles depuis les berges. Il s'agit de :

→ 2 amortisseurs horizontaux de 3 t chacun, installés au milieu de la section ;

→ 4 amortisseurs verticaux de 1,5 t chacun, installés près des caissons latéraux afin de reprendre la torsion. Le mouvement relatif de ces amortisseurs par rapport à la structure dissipe

FIGURES 16, 18 & 19 © SETEC TPI - FIGURE 17 © BOUYGUES TP RÉGIONS FRANCE - FIGURE 20 © ANNE-CLAUDE BARBIER POUR SETEC TPI



de l'énergie et permet d'augmenter l'amortissement total de la structure. Il vaut 1% pour les modes verticaux, soit 5 fois plus que la structure sans amortisseurs.

La deuxième série d'essais reproduit les essais par mode propre effectués précédemment. Les accélérations avec et sans amortisseurs sont ensuite comparées. En ce qui concerne les modes horizontaux, les accélérations sont divisées par 2 ou 4 selon les fréquences testées.

Pour le mode vertical, l'accélération est divisée par 6.

Étant donnés les résultats théoriques, les amortisseurs sont suffisants pour ramener les accélérations à des niveaux acceptables pour le confort des piétons.

## LA VIBRATION DES HAUBANS

Durant la construction, un phénomène de vibration est apparu sur les haubans de retenue, constitués chacun de quatre barres disposées en carré. Une des quatre barres vibrait selon une trajectoire elliptique, pour un vent de plus de 50 km/h perpendiculaire à l'ouvrage.

Après analyse, il a été conclu qu'il s'agissait d'un phénomène de galop d'interférence, qui apparaît lorsque plusieurs cylindres sont proches sans être reliés. Le déplacement relatif des cylindres entre eux conduit à une modification du vent apparent et, dans certains cas, à une instabilité. Les calculs menés selon le paragraphe de

l'annexe E.3 de l'Eurocode 1 partie 1-4 donnent une vitesse de déclenchement de 17 km/h, bien inférieure à la vitesse observée. Cela peut s'expliquer en partie par la présence de ridoirs qui provoque des perturbations du flux de vent sur la longueur du hauban et augmente son amortissement intrinsèque (frottement des axes). Les autres haubans, pourtant de caractéristiques identiques et, pour certains, placés dans les mêmes dispositions (groupement de quatre barres disposées en carré), ne sont pas sujets aux vibrations : le croisement des haubans à l'endroit où l'amplitude du mouvement est la plus grande empêche visiblement le déclenchement du phénomène en perturbant le flux de vent. Des facteurs favorables,

comme l'amortissement dû au frottement des axes d'extrémités, jouent également pour les haubans les plus courts.

Pour empêcher le phénomène de se déclencher, les mouvements relatifs entre haubans ont été empêchés en les reliant par des brides horizontales, placées au quart de la hauteur des haubans (figure 20).

Après pose de ces éléments, aucune nouvelle vibration des haubans n'a été observée.

La construction de la passerelle s'est achevée fin avril 2015, et a été ouverte au public dès le 1<sup>er</sup> mai de la même année. Elle est depuis très empruntée par les cyclistes, joggeurs et promeneurs. □

## PRINCIPALES QUANTITÉS

### OUVRAGE D'ACCÈS

#### FONDACTIONS :

- Pieux : 12 u - Ø 0,6 m - 6,50 m de profondeur
- Micro pieux : 4 u - Ø 88,9 mm - longueur 11 m

#### GÉNIE CIVIL :

- Béton des appuis : 58 m<sup>3</sup>
- Armature des appuis : 7 170 kg

#### CHARPENTE MÉTALLIQUE :

- Piles : 24 t
- Tablier : 83 t

### OUVRAGE DE FRANCHISSEMENT

#### FONDACTIONS :

- Pieux : 10 u - Ø 0,6 m - 11 m de profondeur moyenne
- Barrettes : 6 u - 0,62 x 2,8 m - longueur 9 m
- Micro pieux : 4 u - Ø 90 mm - longueur 11 m

#### GÉNIE CIVIL :

- Béton des appuis : 510 m<sup>3</sup>
- Armature des appuis : 58 200 kg

#### CHARPENTE MÉTALLIQUE :

- Mâts et béquilles : 150 t
- Tablier : 265 t
- Haubans : 69 t

## PRINCIPAUX INTERVENANTS

**MAÎTRE D'OUVRAGE DÉLÉGUÉ :** S3D pour le compte de la Communauté Urbaine de Dunkerque

**MAÎTRE D'OUVRAGE :** Communauté Urbaine de Dunkerque

**MAÎTRE D'ŒUVRE MANDATAIRE :** Setec Tpi

**ARCHITECTE :** Espace Sarl - Brigit de Kosmi

**PAYSAGISTE :** Agence Philippe Thomas

**CONCEPTEUR LUMIÈRE :** Patrick Rimoux

### GROUPEMENT D'ENTREPRISES

**MANDATAIRE - BÉTON :** Bouygues Travaux Public Régions France

**CO-TRAITANT MÉTAL - PASSERELLE DE FRANCHISSEMENT :** Victor Buyck Steel Construction

**CO-TRAITANT MÉTAL - PASSERELLE D'ACCÈS :** Ducrocq Ingénierie Process

### SOUS-TRAITANTS

**ÉTUDES D'EXÉCUTION BÉTON :** Mim

**FONDACTIONS :** Botte Fondations

**TERRASSEMENTS :** Janssen

**ARMATURES :** Dubaere - Bdr armature

**ÉCLAIRAGE :** Bouygues Énergies & Services

**GARDE-CORPS :** D.R. Équipement

**FOURNISSEUR PLATELAGE BOIS :** Fribois

## ABSTRACT

### GRAND LARGE FOOT BRIDGE: THE PROJECT

JULIE GAUBERT, SETEC TPI - DAPHNE DECKERS, VICTOR BUYCK STEEL CONSTRUCTION - THOMAS PETIT, BOUYGUES - JEAN-BERNARD DATRY, SETEC TPI

The "Grand Large" (High Seas) foot bridge links Malo-les-Bains beach to the Grand Large district of Dunkirk. Its structure is that of an inverted Fink beam. It evokes a cable-stayed bridge but its structural behaviour is more like that of a lattice girder from which the upper member has been removed. This solution makes it possible to obtain a 0.80-metre deck, very thin relative to the large 112-metre span. Since solid bars were used as stay cables to cope with the problem of crossovers, the methods for installation and adjustment of these bars had to be carefully designed and executed. □

### LA PASARELA DEL GRAND LARGE: LA OBRA

JULIE GAUBERT, SETEC TPI - DAPHNE DECKERS, VICTOR BUYCK STEEL CONSTRUCTION - THOMAS PETIT, BOUYGUES - JEAN-BERNARD DATRY, SETEC TPI

La pasarela del Grand Large une la playa de Malo-les-Bains y el barrio del Grand Large de Dunkerque. Tiene la estructura de una viga Fink invertida. Recuerda a un puente atirantado pero su comportamiento estructural se asemeja más a una viga de celosía sin el larguero superior. Esta solución permite obtener un tablero de 0,80 m, muy fino respecto a la importante luz de 112 m. Debido al uso de barras macizas como tirantes para responder al problema de los cruzamientos, los métodos de instalación y ajuste de estas barras han exigido un estudio y una ejecución minuciosos. □



CONSTRUIRE ET PRÉSERVER LES INFRASTRUCTURES ROUTIÈRES

# INTERROUTE & VILLE 2016

LE RENDEZ-VOUS  
EUROPÉEN DE  
LA COMMUNAUTÉ  
ROUTIÈRE

14-16 JUIN

PARIS · PORTE DE VERSAILLES · HALL 1  
[WWW.INTERROUTE-VILLE.COM](http://WWW.INTERROUTE-VILLE.COM)

DEMANDEZ VOTRE BADGE VISITEUR SUR  
[WWW.INTERROUTE-VILLE.COM](http://WWW.INTERROUTE-VILLE.COM) AVEC LE CODE : INTERROUTE16





## 3 PÔLES POUR RÉVÉLER LES MEILLEURES SOLUTIONS DÉDIÉES AUX INFRASTRUCTURES ROUTIÈRES

200  
EXPOSANTS



### CONCEVOIR ET CONSTRUIRE LES INFRASTRUCTURES ROUTIÈRES

- Bureaux d'études, d'ingénierie,
- Institutionnels et Collectivités territoriales
- Entreprises de construction
- Production de matériaux
- Matériels pour les infrastructures
- Équipements Voirie et Réseaux Divers (VRD)



### ÉQUIPER

- Signalisation
- Sécurité, balisage, dispositifs de retenue
- Systèmes de transports intelligents
- Technologies connectées, systèmes communicants, software



### PRÉSERVER ET EXPLOITER

- Entretien de chaussées et dépendances routières et urbaines
- Viabilité hivernale
- Ingénierie des infrastructures
- Instruments de mesure des conditions de circulation, d'exploitation
- Bureaux de contrôle
- Services pour l'exploitation et la maintenance

## DES ÉVÉNEMENTS AU CŒUR DES NOUVEAUX ENJEUX DES INFRASTRUCTURES POUR LA MOBILITÉ

LE CONGRÈS DE L'IDRRIM : LES 14 ET 15 JUIN 2016



Dans le cadre de son 3<sup>ème</sup> Congrès, qui se déroulera les 14 et 15 Juin 2016 conjointement au salon INTERROUTE & VILLE, les membres de l'IDRRIM ont souhaité orienter la prochaine édition sur le thème :

« DES INFRASTRUCTURES INDISPENSABLES, INNOVANTES ET ENGAGÉES POUR LA TRANSITION ÉNERGÉTIQUE. »

- Plus de 1 000 participants sont attendus pour cette nouvelle édition.
- Des intervenants issus de la communauté des infrastructures, représentant la compétence et l'expertise dans ses différents métiers.
- 2 jours pour partager et échanger sur les enjeux de la mobilité de demain.

PROGRAMME DÉTAILLÉ ET INSCRIPTION SUR [WWW.INTERROUTE-VILLE.COM](http://WWW.INTERROUTE-VILLE.COM), RUBRIQUE « CONGRÈS DE L'IDRRIM ».

NOUVEAU EN 2016 : DES PARCOURS EXPERTS POUR VOUS GUIDER



A travers des parcours thématiques, découvrez pendant les trois jours de salon les solutions innovantes et applications dynamiques dédiées aux infrastructures intelligentes et à la mobilité durable : signalisation dynamique, outils numériques, capteurs intelligents, recueil de données trafic, météorologie, ingénierie...





1  
© ISC

# LES APPUIS EN RIVIÈRE DU DEUXIÈME PONT SUR LE WOURI

AUTEURS : PAUL ONFROY, CHEF DE PROJETS, ISC (VINCI CONSTRUCTION FRANCE) - CHARLES SPAULDING, DIRECTEUR DE PROJET ADJOINT, SOLETANCHE BACHY INTERNATIONAL (VINCI CONSTRUCTION) - JEAN MOUFO, DÉLÉGUÉ RÉGIONAL, LABOGÉNIE - NICOLAS METGE, DIRECTEUR ADJOINT, ISC (VINCI CONSTRUCTION FRANCE)

À L'HEURE OÙ LES IMPRESSIONNANTS FLÉAUX DE CE DOUBLE PONT COMMENCENT À S'ÉLANCER AU-DESSUS DE L'ESTUAIRE DU WOURI À DOUALA, CAPITALE ÉCONOMIQUE DU CAMEROUN, RETOUR SUR LA CONCEPTION ET LA RÉALISATION DES APPUIS EN RIVIÈRE DE CES OUVRAGES HORS NORMES.

## CONTEXTE DU PROJET

Le projet du deuxième pont sur le Wouri comprend 2 ouvrages exceptionnels jumelés, courbes, avec un tablier routier de 25,55 m de large et un tablier ferroviaire de 10,10 m.

Ces deux ouvrages structurellement indépendants sont simplement reliés entre eux par un caniveau central.

Les 750 m de brèche sont franchis à l'aide de 6 travées en béton précontraint de portées variant de 91 à 133 m. La portée maximale de l'ouvrage ferroviaire atteint 130 m, ce qui est relativement rare pour un ouvrage ferroviaire à 2 sens de circulation. Les 5 appuis en rivière sont de type

« pile-chevêtre » reposant sur des groupes de 4 à 6 pieux de 2,50 m de diamètre ancrés à 45 m de profondeur. La réalisation de ces ouvrages a été confiée à un groupement composé de filiales du groupe Vinci Construction à l'issue d'un concours de type conception-réalisation lancé par le Ministère des TP camerounais. Le mandataire Sogea Satom a fait appel pendant la phase d'appel d'offre à Ingénierie des Structures et des Chantiers (ISC), filiale de Vinci Construction France et à l'architecte Thomas Lavigne pour la conception des deux ponts (figure 2). Situés sur la Nationale n°3 dans sa traversée de la ville de Douala, ces

**1- Vue générale du chantier depuis la rive gauche.**

**1- General view of the project from the left bank.**

ouvrages sont destinés à augmenter la capacité d'échange face à l'accroissement du trafic en doublant un pont routier-ferroviaire datant de 1954 aujourd'hui saturé.

Ils permettent de raccorder le centre du pays à la région Ouest, grenier du Cameroun et porte d'entrée vers le Nigeria.

Cette grande réalisation du Cameroun de l'émergence, voulue par le Président Paul Biya, est complétée par deux projets de pénétrantes autoroutières qui se raccordent aux extrémités Est et Ouest du tracé.

Les retombées économiques sur le pays sont nombreuses. À titre d'exemple, le ciment, les aciers passifs et les ouvrages provisoires métalliques (équipages mobiles, estacade, charpente de dévérinage) sont produits ou réalisés localement.





© AGENCE LAVIGNE/CHÉRON

2

## CONCEPTION ARCHITECTURALE ET TECHNIQUE

Le règlement du concours exigeait que les appuis des nouveaux ouvrages soient alignés avec ceux du pont existant, situé 8 m en amont de l'ouvrage routier. Le pont existant ayant des travées de 45 m, les concepteurs avaient donc le choix entre réaliser des tabliers mixtes de 90 m de portée, ou des tabliers en béton précontraint de 135 m de portée. Le choix économique s'est porté sur la deuxième solution (réduction du nombre d'appuis en rivière) ce qui a aussi eu pour effet de favoriser l'économie locale (la fabrication et la

**2- Photo-montage des ouvrages (pont ferroviaire au 1<sup>er</sup> plan).**

**3- Profil en long de l'ouvrage ferroviaire.**

**2- Photo-montage of the structures (railway bridge in the foreground).**

**3- Longitudinal profile of the railway bridge.**

mise en œuvre du béton nécessitant davantage de main d'œuvre que l'assemblage d'une charpente métallique préfabriquée).

Les tabliers sont constitués de voussoirs en béton de type B50 coulés en place par encorbellements successifs (16 à 17 paires de voussoirs de 3,30 à 3,54 m de long par fléau). Une estacade traversante de 8 m de large et de 15 m de portée permet d'acheminer hommes, matériels et matériaux en pied de chaque fléau. L'appui central P4 joue le rôle de point fixe pour les 2 ouvrages. Sur l'ouvrage ferroviaire, le voussoir sur pile du point fixe est directement encastré sur la pile-che-

vêtre elle-même appuyée sur 2 files de 3 pieux Ø 2 500, dans le but d'encasser les efforts de freinage des trains. L'élançement des tabliers associé au profil en long parabolique des ouvrages permet de libérer 4 passes navigables de 40 m par 5,50 m de haut au droit des travées principales (figure 3).

Des déviateurs primaires complètent les déviateurs secondaires afin d'adapter le tracé en plan des câbles de précontrainte de continuité au tracé en plan des tabliers. Ornés de motifs inspirés de la culture Sawa, les tabliers viennent rebondir sur les pile-chevêtres qui émergent à peine de l'eau tels des galets faisant des ricochets. ▷

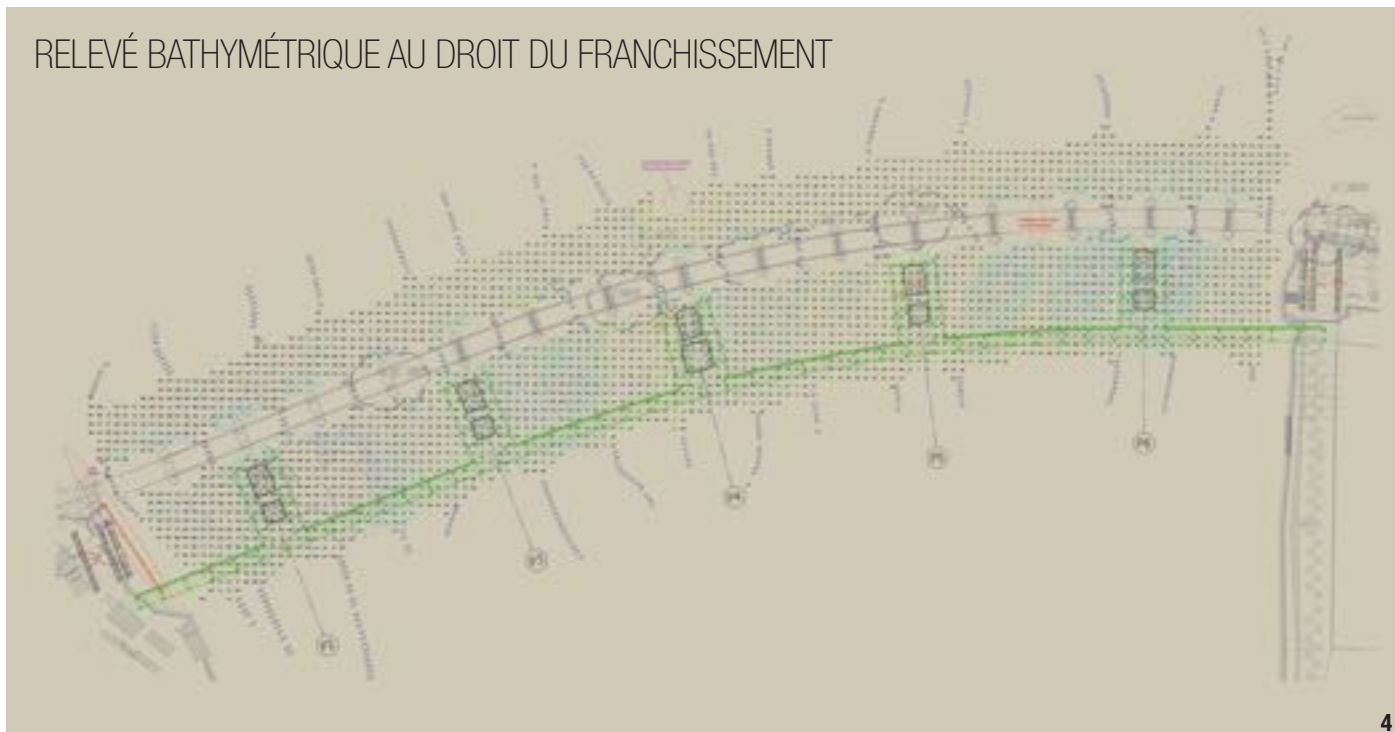
## PROFIL EN LONG DE L'OUVRAGE FERROVIAIRE



3

© ISC

## RELEVÉ BATHYMÉTRIQUE AU DROIT DU FRANCHISSEMENT



4

© SOGEA-SATIM POUR LE GPT LE WOURI

### CARACTÉRISTIQUES DU SITE CARACTÉRISTIQUES HYDRO- LOGIQUES ET GÉOTECHNIQUES

Le fleuve Wouri constitue un large bassin de plusieurs centaines de kilomètres carrés au niveau de la ville côtière de Douala.

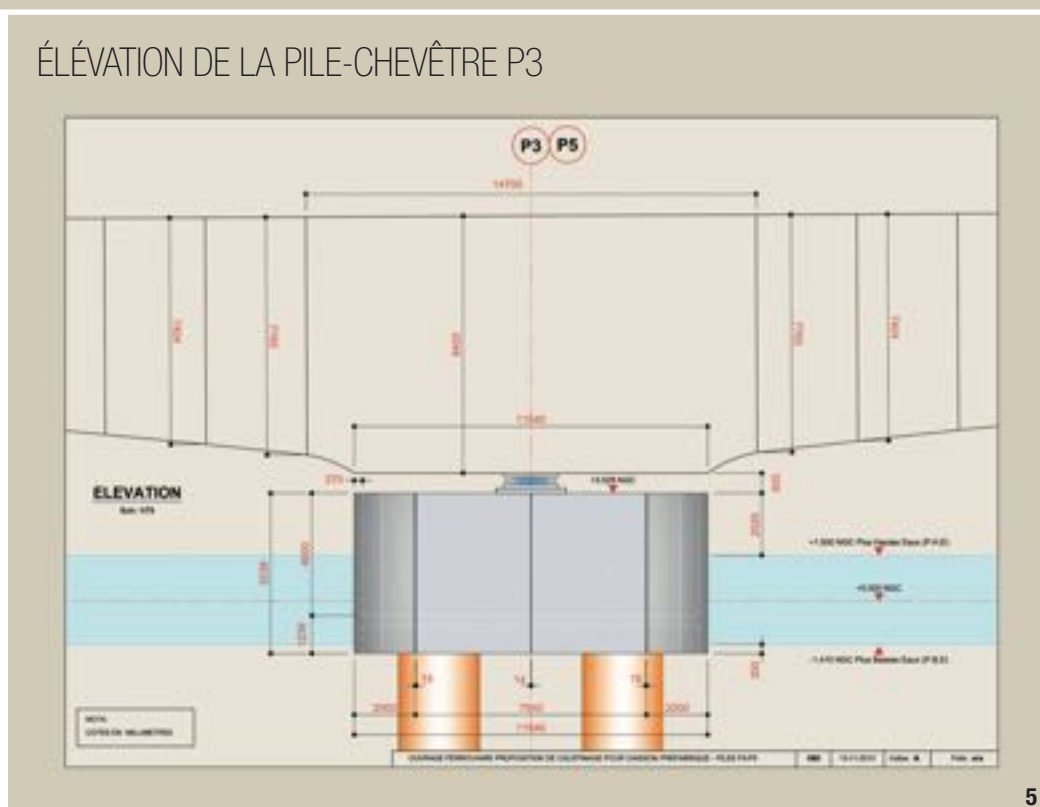
Les précipitations annuelles qui règnent dans cette zone tropicale sont de 3,80 m, 80% ayant lieu pendant la saison des pluies de juillet à octobre. La profondeur du fleuve au niveau du franchissement varie de 18 m (dans l'alignement du chenal de navigation) à 3 m (au milieu du fleuve).

Le courant s'inverse au gré des marées, avec un marnage moyen de 2,20 m et une vitesse à l'étiage de l'ordre de 1 m/s.

Le Mio-Pliocène (MP), situé à environ 40 m de profondeur, est l'horizon servant d'ancrage aux fondations des ouvrages. Cet horizon est constitué de dépôts alluvionnaires très compacts de granulométrie allant des limons aux sables fins. Sa résistance à la compression simple est de l'ordre de 1 MPa, donc à la limite entre un sol et une roche. Ce matériau érodable se délite dans l'eau. Au-dessus et jusqu'au toit du fond marin, le lit du fleuve est constitué de dépôts alluvionnaires lâches, le plus souvent des sables silteux intercalés de poches d'argile organique.

La berge côté rive droite est caractérisée par une butte constituée de sols silto-argileux. En rive gauche, l'ouvrage

## ÉLÉVATION DE LA PILE-CHEVÊTRE P3



5

© BSC

atterrit sur un remblai hydraulique réalisé lors du boom pétrolier pour étendre le port de Douala et qui surmonte des dépôts sableux lâches à moyennement denses datant du quaternaire.

### AFFOUILLEMENTS

Des affouillements très importants des piles 12 à 15 du pont existant (situées en rive gauche) ont mis en évidence 2 phénomènes :

**4- Relevé bathymétrique au droit du franchissement.**  
**5- Élévation de la pile-chevêtre P3.**

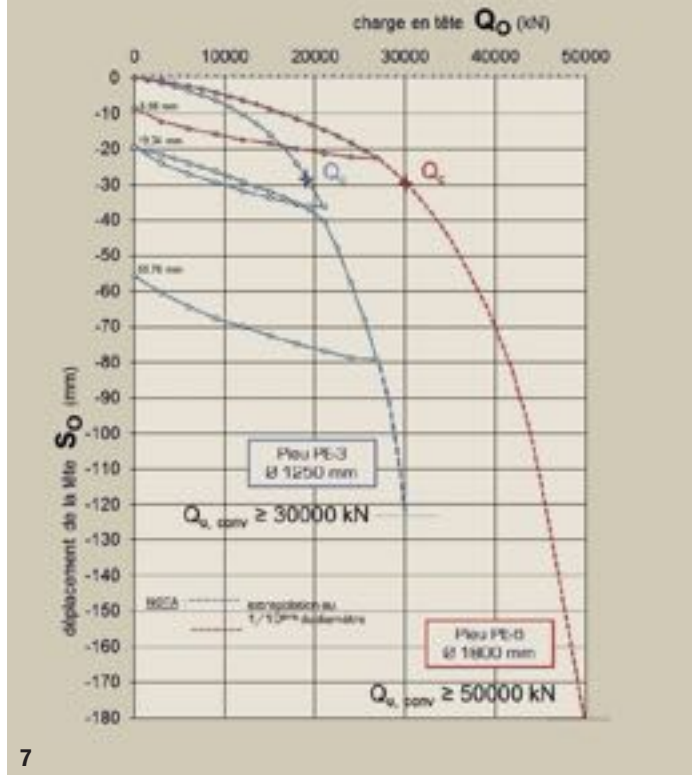
**4- Bathymetric survey at the crossing point.**  
**5- Elevation view of pier and pier cap P3.**

→ Un effet de seuil caractérisé par de fortes érosions en aval dues à l'obstacle que représente la ligne de piles du pont existant ;  
→ La création d'effets tourbillonnaires au droit des piles existantes (figure 4) dus au désaxement de 45° entre les piles existantes et la ligne d'écoulement des eaux (causé par le remblai hydraulique mis en place dans les années 70).





© SOGEA-SATOM POUR LE GPT LE WOURI



© MICHEL BUSTAMANTE CONSEIL

Pour faire face à ces 2 phénomènes, les ingénieurs ont conjugué deux idées fortes pour la conception des appuis en rivière : des pieux de grand diamètre peu sensibles à des érosions ultérieures, encastrés sur des chevêtres descendant à peine plus bas que la cote des plus basses eaux pour réduire au minimum la section hydraulique du fleuve et éviter la création de tourbillons supplémentaires (figure 5) préjudiciables à la structure existante.

**LES FONDATIONS RECONNAISSANCES**

La caractérisation des conditions géotechniques s'est faite au moyen d'essais pressiométriques haute pression (poussés au plus à 10 MPa) et de sondages carottés (SPT puis carot-

tage avec tube Mazier dans le MP). Les valeurs trouvées de pression limite de 7,5 MPa en moyenne, contrastant avec les 2,5 MPa de la campagne du dossier d'appel d'offre, ont permis de justifier le raccourcissement des pieux.

**PIEUX D'ESSAI**

Les pieux d'essai ont été particulièrement utiles pour valider l'optimisation de la longueur des pieux, passant de 65 m à 45 m dont 5 m ancrés dans l'horizon porteur du Mio-Pliocène. La méthode d'exécution des essais proprement dits a dû être adaptée, les essais de type Osterberg prévus initialement par le groupement constructeur n'étant plus adaptés dès lors que l'effort mobilisable en pointe devient prépondérant comparé au frottement

mobilisable le long du fût des pieux. Le choix s'est donc porté sur l'utilisation de 6 pieux de réaction pour mobiliser les 2 800 t nécessaires pour solliciter tour à tour 2 pieux d'essai (de 1,25 et 1,8 m de diamètre correspondant règlementairement à au moins la moitié du diamètre des pieux d'exécution) au-delà de leur charge de service et au plus proche possible de la rupture du sol (figure 6). Le protocole des essais, leur suivi et leur interprétation se sont faits avec le concours de l'équipe de M. Bustamante et L. Gianeselli, et l'entreprise Sol Data. Les pieux d'essai avaient été calculés selon le fascicule 62 titre V avec les résultats des essais au pressiomètre Ménard, qui une fois encore et en présence de sols encaissants somme

toute non répertoriés, se sont avérés extrêmement fiables (figure 7).

**LA RÉALISATION DES PIEUX Ø 2500**

Les pieux en rivière ont été forés depuis une estacade provisoire complétée par des antennes transversales de 7 m de large de part et d'autre de chaque ligne d'appui. Sur la hauteur libre, des viroles en acier scellées de 6 m environ dans les terrains de surface ont été mises en place jusqu'à la cote de la plateforme soit 2 m au-dessus des plus hautes eaux. La raideur importante des terrains encaissants a déterminé le choix d'une foreuse puissante Soilmec SC120 avec table de forage déportée SA40 délivrant 45 t.m de couple aux 2 kellys utilisés pour le forage.

- 6- Charpente de réactions des essais à 2 800 t.
- 7- Résultats des pieux d'essai.
- 8- Mise en place d'une virole métallique Ø 2 600.
- 9- Forage d'un pieu Ø 2 500 au bucket sous bentonite.

- 6- Reaction frame for 2800-tonne tests.
- 7- Test pile results.
- 8- Positioning a steel collar of dia. 2600 mm.
- 9- Bentonite bucket drilling of a pile of dia. 2500 mm.



© SOGEA-SATOM POUR LE GPT LE WOURI





10  
© ISC

Le phasage de réalisation des pieux se déroulait comme suit : mise en place des viroles (figure 8), forage au bucket (figure 9), dessablage avec une unité Sotres, mise en place des cages d'armatures à la grue Sumitomo SCX130 et enfin le bétonnage au tube plongeur, soit un cycle total de 2 jours par pieu en double poste.

Une série d'aléas géotechniques explique le rallongement de la durée d'exécution des 82 pieux des ouvrages (y compris 30 pieux diamètre 1800 mm en rives), soit 16 mois au lieu des

10 mois prévus, de juillet 2014 à octobre 2015.

#### LES PRINCIPAUX ALÉAS GÉOTECHNIQUES

→ Affaissement du trou de forage de 4 pieux sur 10 de la première pile en rivière dû à la présence de terrains bouillants s'expliquant par une circulation d'eau imprévisible dans l'horizon des sables et graviers roulés (situés immédiatement au-dessus du substratum). Ces affaissements localisés

pouvant représenter plusieurs dizaines de mètres cubes ont eu pour effet de déstabiliser les terrains et rendu la reprise du forage très difficile. La solution trouvée a été de rallonger la longueur dans le substratum. L'atelier de vibro-fonçage du chantier étant inadapté pour vibro-foncer des pièces de cette dimension (tubes de 45 t, 2,70 m de diamètre et 45 m de long), il a donc fallu procéder par tronçons de tubes

enturés *in-situ* et préforés de l'intérieur à l'avancement.

- Présence d'enrochements (blocométrie 100 kg et plus) et d'obstacles divers dans les vases de surface sur certains pieux situés près des piles du pont existant, pouvant gêner le fonçage des tubes, les déformer ou considérablement gêner la progression du forage. Il a fallu broyer et enlever ces blocs à la tarière.
- Présence de couches d'induration au sein du mio-pliocène sur des épais-



11

© SOCEA-SANTOM POUR LE GPT LE WOURI

**10- Les caissons ferroviaires (à gauche, déjà déveriné) et routier (à droite, en cours d'assemblage) des pilechevêtres P2.**

**11- Ferrailage d'une prédalle sur l'aire de préfabrication.**

**10- The railway caissons (left-hand, already jacked down) and road caissons (right-hand, being assembled) of pier and pier cap P2.**

**11- Reinforcing bars for a formwork slab on the prefabrication area.**





© SOGEA-SATCOM POUR LE GPT LE WOUFRI

12

seurs inférieures à un mètre mais avec des résistances à la compression mesurées atteignant 100 MPa. Après une série de tentatives qui ont fini par aboutir pour les traverser sur les premiers pieux, dans des conditions particulièrement éprouvantes pour le matériel de forage, les couches indurées ont finalement été prises en compte dans la justification de la pointe des pieux, réduisant leur longueur à 40 m.

### UNE MÉTHODE INNOVANTE POUR LA RÉALISATION DES APPUIS EN RIVIÈRE

Afin de s'affranchir de batardeaux conséquents (jusqu'à 18 m de tirant d'eau au niveau de la pile P2) et de limiter la réduction de la section hydraulique du fleuve en phase de chantier, une méthode innovante (sélection du prix régional de l'innovation Vinci) a été mise au point par l'équipe d'Isc, et mise en œuvre sur le terrain par l'équipe travaux.

### DES CAISSONS ÉTANCHES PRÉFABRIQUÉS

Les chevêtres des piles en rivière ont été réalisés à l'aide de caissons étanches en béton armé jouant à la fois le rôle de parement architectural, de coffrage perdu et de batardeau. Ces caissons préfabriqués ont été assemblés hors d'eau à l'aplomb de leur position définitive et dévêrinés à l'aide d'une charpente métallique, de vérins creux, et de barres Dywidag (figure 10).

### LA CHARPENTE DE DÉVÉRINAGE

La charpente de dévêrinage, constituée de poutres primaires, de poutres secondaires et d'un réseau de passerelles et d'escaliers, s'appuie sur les chemises des pieux définitifs à l'aide de tabourets métalliques afin de répartir la pression sur la périphérie des chemises. Les trous oblongs situés sur les différents organes de la charpente permettent d'adapter cette dernière à la géométrie exacte du caisson et à l'implantation des pieux (tolérance en plan de  $\pm 50$  mm). Les caissons sont constitués de 14 à 17 éléments préfabriqués pesant entre 4 t et 18 t, préfabriqués sur installation foraine (figure 11) et posés depuis les antennes de l'estacade avec la grue Sumitomo SCX 130 (figure 12). Une fois le hourdis du fond de caisson bétonné, l'ensemble est dévêriné jusqu'au-dessus du niveau des plus hautes eaux par passes de 25 cm à l'aide de vérins creux simple effet de 100 t de capacité et d'un système de chaises et de double écrou.

### LA POSE DES COQUES PRÉFABRIQUÉES

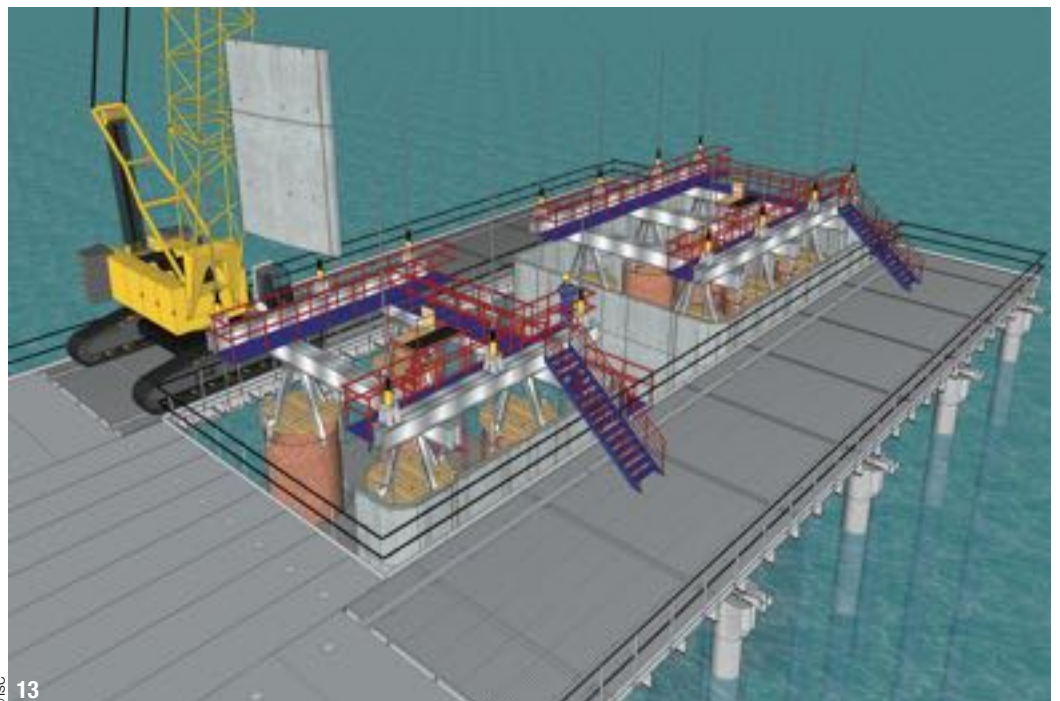
Cette position permet d'assembler les coques périphériques en sécurité, le grutier ayant le champ de vision libre de tout obstacle. Les coques périphériques sont ensuite posées, stabilisées et clavées au rythme de 4 éléments par jour (figure 13). Les éléments préfabriqués sont pré-équipés avec des équerres en pieds et des étais tirant-poussant en tête pour faciliter leur pose et leur réglage. ▷

12- Mise en place des pré-dalles constituant le fond des caissons.

13- Mise en place des coques périphériques.

12- Positioning the formwork slabs constituting the bottom of the caissons.

13- Positioning the peripheral shells.



© ISC 13



14

© ISC



15

© GROUPEMENT LE WOURI

14- À l'intérieur d'un caisson de l'ouvrage routier avant son immersion.  
15- Collettes d'étanchéité en béton armé.  
16- Immersion du caisson.

14- Inside of a caisson for the road bridge before its submersion.  
15- Reinforced-concrete sealing collars.  
16- Submersion of the caisson.

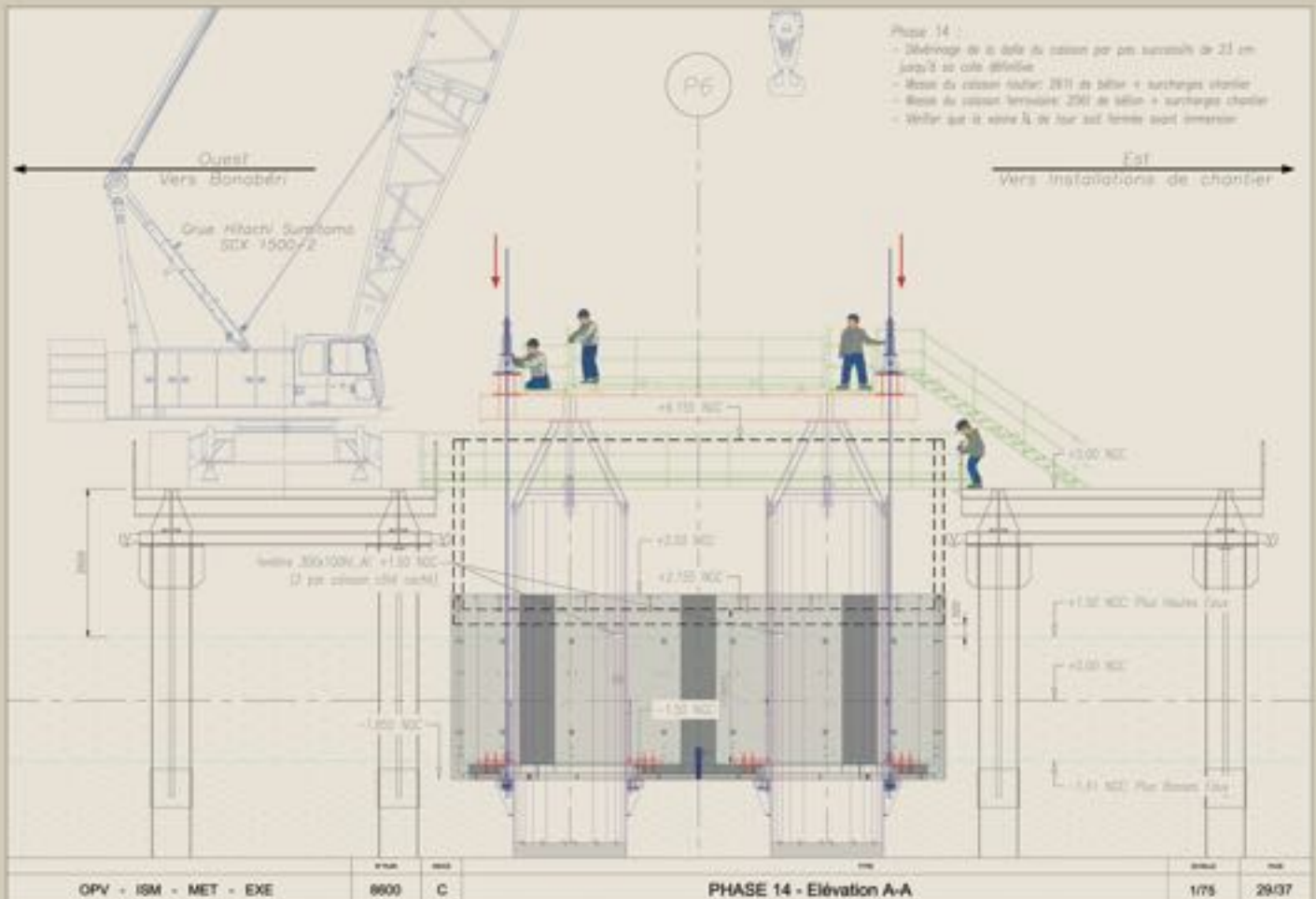
Les caissons de 300 t ainsi reconstitués (figure 14) sont déverinés sur 3,50 m jusqu'à leur cote définitive (figure 16). Ils reposent sur des corbeaux métalliques soudés sur les chemises des pieux via une collerette en béton armé jouant à la fois le rôle de réglage et d'étanchéité (figure 15).

### ÉTANCHÉITÉ ET POUSSÉE D'ARCHIMÈDE

Ces collerettes sont munies d'un joint intérieur à lèvres en nitrile pour rendre le vide annulaire étanche au mortier prise mer et de 2 joints supérieurs en polymère pour assurer un contact parfait avec la sous-face du caisson.

La poussée d'Archimède est reprise grâce à des contre-équerres reliées aux précédents corbeaux par des tiges Artéon Ø 30 qui maintiennent plaqué le fond du caisson à marée haute. Le vide annulaire laissé entre les chemises métalliques et le caisson est comblé à marée basse à l'aide d'un

## IMMERSION DU CAISSON







© SOGEA-SATOM POUR LE GFT LE WOURI  
17

micro-béton à liant colloïdal. Les éléments préfabriqués (surtout les coques verticales), ont été dimensionnés pour faire face aux nombreuses phases provisoires de l'opération (décoffrage, retournement, poussée d'eau en fibre extérieure, poussée du béton en fibre intérieure, etc.). Des palonniers à poulies ont été conçus pour manipuler ces pièces fragiles (épaisseur de 13 cm pour les prédalles) en toute sécurité.

**17- Ferrailage de la phase 1 du caisson de l'ouvrage routier.**

**18- Caisson de l'ouvrage ferroviaire vidangé.**

**17- Reinforcing bars for phase 1 of the road-bridge caisson.**

**18- Emptied caisson of the railway bridge.**

### LE FERRAILAGE DU CHEVÊTRE

Le caisson est ensuite vidé, la charpente de dévérinage démontée et les chemises métalliques recepées (figure 18).

Les 4 m du chevêtre peuvent alors être ferrailés et bétonnés (en 3 phases, voir figure 17) pour un délai total de 8 semaines par paire de chevêtres de ces 2 ouvrages. Les chevêtres sont alors libérés pour monter les grues à tour et les plateformes de VSP. □

### PRINCIPALES QUANTITÉS DES OUVRAGES

**35 000 m<sup>3</sup> de béton**

**3 550 t d'armatures passives**

**1 600 t de précontraintes**



© ISC  
18

### PRINCIPAUX INTERVENANTS

**FINANCEMENT :** AFD / C2D / BIP

**MAÎTRE D'OUVRAGE :** MINTP

**GROUPEMENT CONCEPTEUR / CONSTRUCTEUR :** Sogea Satom / Soletanche Bachy

**ASSISTANT À LA MAÎTRISE D'OUVRAGE :** Groupement Louis Berger / Scet Cameroun / Ingecam

**ASSISTANT GÉOTECHNIQUE À LA MAÎTRISE D'OUVRAGE :** Labogénie  
**CONCEPTION ET MÉTHODES :** Ingénierie des Structures et des Chantiers (ISC)

**ÉTUDES D'EXÉCUTION :** Isc / Cbdj

**CONTRÔLE EXTÉRIEUR :** Secoa / Stefanini (O.P.)

### ABSTRACT

#### RIVER SUPPORTS FOR THE SECOND BRIDGE OVER THE WOURI

PAUL ONFROY, ISC (VINCI) - CHARLES SPAULDING, SOLETANCHE BACHY INTERNATIONAL (VINCI) - JEAN MOUFO, LABOGÉNIE - NICOLAS METGE, ISC (VINCI)

The river piers for the second bridge over the Wouri (Douala, Cameroon) were designed to resist scouring and limit the impact on the river's hydraulic cross section. These piers and pier caps, supported on pile foundations 2500 mm in diameter and 45 m long, were prefabricated above the water and jacked down to their final level using hollow jacks. This construction technique, developed and executed by the companies of Vinci Group, makes it possible to build piers in a river in record time by doing without a cofferdam. □

#### LOS APOYOS SOBRE EL RÍO DEL SEGUNDO PUENTE SOBRE EL WOURI

PAUL ONFROY, ISC (VINCI) - CHARLES SPAULDING, SOLETANCHE BACHY INTERNATIONAL (VINCI) - JEAN MOUFO, LABOGÉNIE - NICOLAS METGE, ISC (VINCI)

Los pilares sobre el río del segundo puente sobre el Wouri (Douala, Camerún) han sido diseñados para resistir las socavaciones y limitar el impacto sobre la sección hidráulica del río. Estos pilares capiteles, sustentados sobre pilotes de 2.500 mm de diámetro y 45 m de longitud, se han prefabricado por encima del nivel de agua y se han hecho descender hasta su cota definitiva mediante cilindros huecos. Esta técnica de realización, ideada y ejecutada por empresas del grupo Vinci, permite construir pilares sobre el río en un tiempo récord sin necesidad de ataguías. □



1

© ARCADIS

# LIGNE D DU TRAMWAY DE STRASBOURG- CONSTRUCTION DU PONT SUR LE RHIN

AUTEURS : DITER BRAET, RESPONSABLE DU BUREAU D'ÉTUDES DE PARIS, VBSC - PATRICK VAN SEVEREN, PROJECT MANAGER, VBSC - CHRISTIAN CREMONA, DIRECTEUR R&D MATÉRIAUX ET STRUCTURES, BOUYGUES TP - DIDIER GUTH, DIRECTEUR MÉTIER, ARCADIS

**LE NOUVEAU PONT SUR LE RHIN, OUVRAGE TRANSFRONTALIER PLACÉ SOUS MAÎTRISE D'OUVRAGE DE LA COMPAGNIE DES TRANSPORTS STRASBOURGEOIS (CTS), FAIT PARTIE DES TRAVAUX D'EXTENSION EST DE LA LIGNE D DU TRAMWAY DE STRASBOURG VERS KEHL, EN ALLEMAGNE. L'OUVRAGE RETENU, DANS LE CADRE D'UN MARCHÉ DE CONCEPTION-RÉALISATION, EST UN OUVRAGE DE TYPE BOW-STRING. SA CONCEPTION ET SA RÉALISATION ONT ÉTÉ ATTRIBUÉES AU GROUPEMENT BOUYGUES TPRF / VICTOR BUYCK / LINGENHELD / FRÜH IB (\*) / ARCADIS ET MARC BARANI ARCHITECTES.**

## CONTEXTE GÉNÉRAL DE L'OPÉRATION

Confiés à la Compagnie des Transports Strasbourgeois (CTS) par l'Eurométropole de Strasbourg (EMS), les travaux d'extension de la ligne D du tram vers Kehl ont démarré en 2014. Dans leur première phase, ils constituent un prolongement du réseau strasbourgeois vers l'Allemagne, d'une longueur de 2,7 km, dont la mise en service commerciale est prévue au printemps 2017. Ce prolongement vers l'Allemagne, moteur dans le développement des liaisons transfrontalières, est appelé à devenir le vecteur d'urbanisation du secteur des Deux Rives et permettra de recentrer l'agglomération sur le Rhin. La réalisation de cette extension néces-

site la construction d'infrastructures remarquables, dont le pont sur le Rhin. Retenu par l'EMS et la Ville de Kehl sur proposition de la CTS, maître d'ouvrage du projet, la conception-réalisation de cet ouvrage a été attribuée au groupement d'entreprises composé de Bouygues TPRF, Victor Buyck SC, Lingenheld TP, Früh Ingenieurbau<sup>®</sup>, Arcadis et Marc Barani Architectes, à l'issue d'une consultation qui s'est déroulée d'août à décembre 2012.

Le montant global de l'ouvrage, financé à parts égales par l'EMS et la Ville de Kehl, s'élève à 24,9 M€. À la date de parution de l'article, les travaux toujours en cours sont la pose de la voie ferrée sur l'ouvrage et les finitions. L'inauguration est prévue au printemps 2017.

**1- Vue d'ensemble du pont depuis la berge allemande.**

**1- General view of the bridge from the German bank.**

## CONCEPTION DE L'OUVRAGE

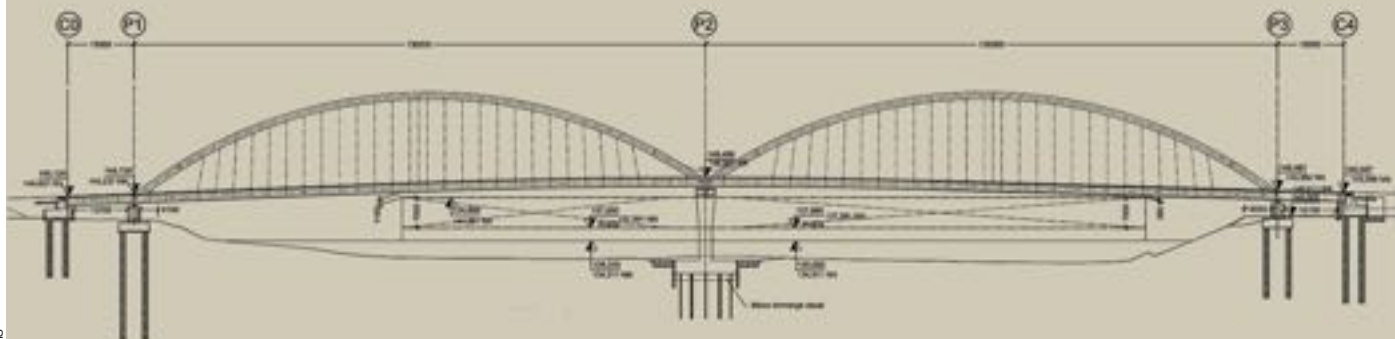
Le pont est un ouvrage d'art de type bow-string métallique, quasi symétrique, comportant deux tabliers distincts, à 4 travées de 15-130 et 130-15 m (figure 2). L'ouvrage, calculé aux Eurocodes français, a été dimensionné

pour supporter les trams-trains qui l'emprunteront dans le futur.

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

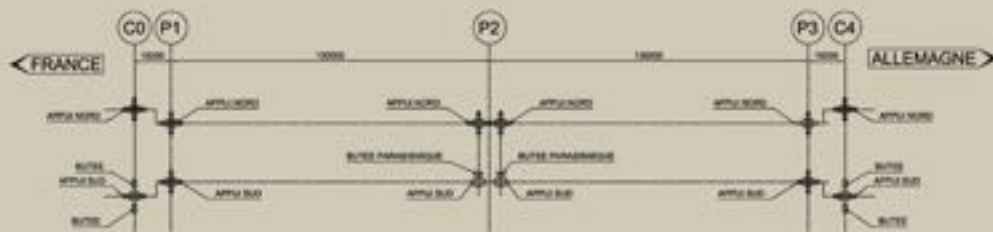


## ÉLÉVATION LONGITUDINALE



2

## SCHÉMA STATIQUE



3

donc les pilettes (P1 et P3) qui supportent des appuis glissants dans les deux directions. Longitudinalement, l'ouvrage comporte un seul point fixe par demi-tablier, au droit de P2.

### LES APPUIS

L'ouvrage comporte 4 travées qui reposent sur 5 appuis (figure 2) :

- La culée C0 et la pile P1 sur la rive française ;
- La pile P2 dans le Rhin ;
- La Pile P3 et la culée C4 sur la rive allemande.

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

### APPUIS ET CULÉES SUR BERGES

L'article de la revue Travaux<sup>[1]</sup> a largement décrit les modes de construction des fondations retenus vis-à-vis des caractéristiques géotechniques existant au droit des appuis. Le recours à des fondations profondes a été retenu en raison de la présence de remblais et d'une couche alluvionnaire de qualité médiocre en tête d'alluvions anciennes. Des pieux forés-tubés de 1200 mm de diamètre ont donc été mis en

### 2- Élévation longitudinale.

### 3- Schéma statique.

### 4- Semelle, pile et coffrage.

### 2- Longitudinal elevation view.

### 3- Static diagram.

### 4- Foundation slab, pier and formwork.

place pour les culées C0/C4 et les piles P1/P3. Réalisés à l'aide d'une tarière, 10 pieux ont été forés sous les culées et 6 pieux sous les piles.

Des radiers en béton armé respectifs de 150 m<sup>3</sup> sur les piles P1 et P3 et de 250 m<sup>3</sup> sur C0 et C4 (80 kg/m<sup>3</sup> d'acier) ont été coulés, une fois le recépage effectué. Le garde-grève a été coulé en deux parties, la première avant pose de la charpente et la deuxième après la pose pour régler au mieux les espacements des joints de dilatation. Les deux

fûts de pile ont été coulés séparément avec un coffrage en bois sur mesure (figure 4).

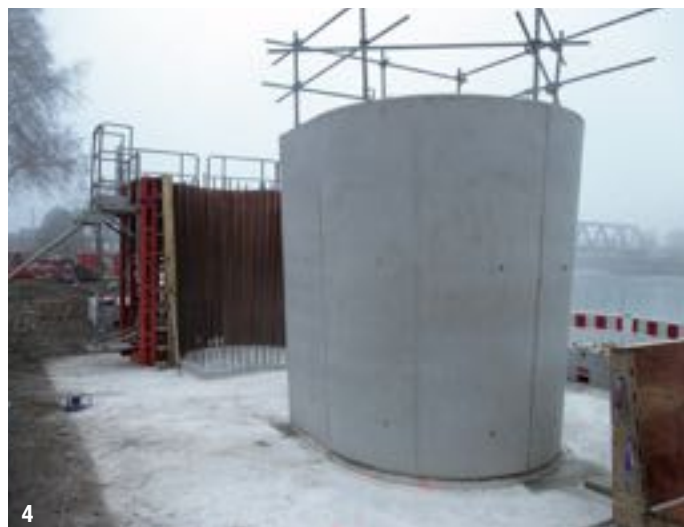
Les bétons des murs, appuis et culées sont des bétons prêts à l'emploi C30/37 formulés en classe d'exposition XF1 à base de CEM III/A dosé à 350 kg/m<sup>3</sup>.

### PILE P2 DANS LE RHIN

Dans le Rhin, les alluvions anciennes régulièrement compactes ont conduit à s'orienter vers une solution avec semelle superficielle sollicitant directement les sols de bonne compacité. Les dimensions de semelle sont de 18x14,5 m<sup>2</sup> pour 3 m d'épaisseur. La solution retenue pour le bouchon est un béton non armé de faible épaisseur (1,5 m) avec clouage passif constitué de HEA 200 de 14 m de longueur dans le fond du Rhin (figure 5).

Le batardeau, hydrauliquement profilé, est constitué de palplanches de longueur 18,50 m, fichés de 11,50 m dans le fond du Rhin. Sa stabilité a nécessité un lit de butons et liernes disposé à 10,50 m du fond de fouille. La forme du butonnage a été conçue de manière à ne pas interférer avec le coffrage de la pile P2. Les palplanches ont été étanchées à l'aide d'un joint bitumineux. Une connexion par aciers passifs avec la semelle a été prévue de manière à ce que le batardeau puisse remplir son rôle de parafouille. Le fut de pile a été bétonné en deux levées de 7 m et 8,50 m. Les parties arrondies ont été coffrées à l'aide de négatifs bois fabriqués en atelier.

L'ensemble des travaux effectués pour la réalisation de la pile P2 a été facilité par la neutralisation de la passe navigable, côté France, en œuvre depuis les travaux du pont ferroviaire situé en aval de l'ouvrage (2008-2010).



4

© BOUYGUES



FIGURE 5 © ARCADIS - FIGURE 6 © BOUYGUES



© BOUYGUES

**5- Vue du batardeau et vibrofonçage des clous.**

**6- Estacade provisoire, mât de bétonnage et barge.**

**7- Coulage du béton de propreté.**

**5- View of the cofferdam and vibropiling of nails.**

**6- Temporary jetty, concreting mast and barge.**

**7- Pouring blinding concrete.**

Un atelier flottant, composé d'un ponton flottant, d'une grue treillis et d'un bateau pousseur a été utilisé pour l'ensemble des travaux. La mise en fiche et le battage des palplanches ont été effectués par vibrofonçage.

Le tapis d'enrochement préconisé sur le pourtour du batardeau (5,00 m de largeur pour 1,00 m de profondeur) afin d'éviter les affouillements et une déstabilisation du batardeau a fait l'objet d'un rechargement en raison d'un creusement de 4 m à l'avant de ce dernier; d'importantes crues, exceptionnelles pour la saison, ont en effet interrompu à plusieurs reprises les travaux, le débit du Rhin passant de 1200 m<sup>3</sup>/s à 3 400 m<sup>3</sup>/s. Le relevé hebdomadaire du niveau du fond n'a pas montré, par la suite, de reprise du phénomène. L'intérieur du batardeau a été terrassé

pour réaliser le bouchon et la semelle. Il a été notamment décidé de sur-creuser le fond de fouille de 20 cm minimum, de manière à obtenir l'épaisseur minimale sur toute la surface. Le bouchon cloué d'un mètre cinquante d'épaisseur est constitué d'un béton C25/30 (CEM III/A dosé à 330 kg/m<sup>3</sup>) de classe d'exposition XC2, non armé et de 26 clous passif en profilés HEA 200 d'une longueur de 14,00 m, munis d'une platine en tête. Le béton a été formulé en classe XC2. Les clous reprennent ainsi les sous-pressions et sont équipés de manchettes d'injections de diamètre 32 mm. Un coulis de ciment a été injecté à partir d'une centrale au fur et à mesure du vibrofonçage. À la fin de cette opération, un nettoyage des creux de palplanches a été effectué par plongeurs. Une estacade provisoire reliant le

pont de l'Europe existant au batardeau a permis d'assurer les bétonnages, un mât de bétonnage ayant été installé à l'extrémité de l'estacade (figure 6). Seize heures ont été nécessaires pour le bétonnage du bouchon qui s'est déroulé sous l'eau, assisté par plongeurs pour guider la chaussette de bétonnage. La vidange a été effectuée au bout de 7 jours, visant à assurer une résistance minimale de 20 MPa. Une couche de propreté de 10 cm a été mise en place avant le ferrailage de la semelle (figure 7). Pour éviter des problèmes importants d'organisation liés à un bétonnage continu de 20 h, à une cadence de 35 m<sup>3</sup>/h, la semelle de béton C25/30 a été bétonnée en deux fois (2x350 m<sup>3</sup>), répartissant le bétonnage sur deux jours, mais nécessitant de rajouter

8 t d'aciers verticaux pour reprendre les efforts horizontaux au niveau de la reprise de bétonnage. La semelle a nécessité l'assemblage de 100 t d'aciers (figure 8).

La formule du béton a été adaptée pour augmenter la rhéologie à 4 h par l'ajout d'un retardateur de prise. La présence de nombreuses pièces massives a nécessité de vérifier que les bétons n'étaient pas sensibles à des réactions sulfatiques internes (RSI). Celle-ci est une pathologie endogène qui peut toucher les matériaux cimentaires ayant été exposés à des températures supérieures à environ 65°C. Elle est causée par une formation tardive de l'ettringite dans le matériau durci, induisant le développement de pressions de cristallisation et de gonflements importants, et donc une coloration du parement,





8- Ferrailage de la semelle de la pile P2.

9- Ferrailage du fût et première levée de la pile P2.

10- Ferrailage et coffrage du fût de la pile P2 - seconde levée.

8- Reinforcement for the foundation slab of pier P2.

9- Reinforcement for the shaft and first concrete lift for pier P2.

10- Reinforcement and formwork for the shaft of pier P2 - second concrete lift.

un faiçençage et une fissuration pouvant accélérer l'apparition d'autres pathologies ou une résistance au gel amoindrie. L'évolution de la température d'hydratation a donc été mesurée par thermocouples pour vérifier que celle-ci ne dépasse pas 75°C. La température maximale relevée a été limitée à 45°C. Des aciers HA 40 de 12 m ont été placés en attente pour la première levée du fût, puis, une fois la semelle bétonnée, le ferrailage et le coffrage de la première élévation du fût de la pile P2 ont été réalisés (figure 9). Le béton est de formulation analogue au béton des piles P1 et P3, soit un C30/37 (classe d'exposition XF1).

La seconde levée s'est successivement effectuée par la pose du coffrage, de la peau périphérique et des épingles, de bas en haut (figure 10).

Une fois la pile P2 totalement bétonnée, le recépage des palplanches a été effectué par plongeurs (figure 11). Les travaux sur la pile P2 ont duré près de 10 mois et ont mobilisé 1 490 m<sup>3</sup> de béton pour 200 t d'acier assemblé (170 kg/m<sup>3</sup>).

### LES TABLIERS COUPE FONCTIONNELLE

Le tablier a une largeur hors tout de 16 800 mm. Il est équipé de garde-corps avec éclairage par LED et de corniches-caniveaux recouvertes d'un caillebotis, sur chaque rive, d'une voie dédiée aux piétons de 2,00 m et d'une piste cyclable de 2,50 m de large, d'un garde-corps séparateur implanté le long de la piste cyclable, de caissons d'éclairage de l'arc, d'une plateforme tram en béton de 8,10 m. L'extrados du

tablier présente une pente à 2%, côté modes doux et à 1% côté tram, vers les caniveaux, nord et sud, respectivement (figure 12).

### STRUCTURE DU TABLIER

Le tablier est un caisson métallique orthotrope dont le platelage supérieur est raidi par des augets d'épaisseur 6 mm côté piétons/cycles et d'épaisseur 8 mm côté tram. Dans la zone centrale de 2 400 mm entre les deux zones circulées, les raidisseurs sont des plats de 200x14. De même, les faces latérales et le platelage inférieurs sont raidis par des plats de mêmes dimensions. Tous les raidisseurs sont soudés sur les diaphragmes espacés de 4,0 m environ. La partie supérieure des âmes inclinées est raidie par des raidisseurs transversaux.

Les diaphragmes, d'épaisseur 30 mm dans la partie centrale et 16 mm dans les zones latérales, permettent, d'une part, de rigidifier le caisson pour éviter sa distorsion sous l'effet des efforts transversaux (tranchant et torsion) et, d'autre part, de transférer ces mêmes charges vers les suspentes et donc les arcs, en jouant le rôle de poutre d'appui des augets longitudinaux (figure 13). Une des particularités de l'ouvrage est que le caisson formant le tablier de l'ouvrage est suspendu à un arc unique. Les arcs ont une flèche de 20,00/130,00, soit 1/6,5. Ils se dédoublent à partir d'une cote d'environ 5 400 mm au-dessus du tablier. On passe ainsi d'un arc commun de dimension 2 400 x 1 500 ht à deux arcs inclinés de dimension 1 200 x 1 500 ht chacun.

Avant de se séparer, les arcs dédoublés restent néanmoins liaisonnés entre eux, sur 11,00 m environ, via des tôles en prolongement de leurs semelles supérieures et inférieures et des voiles orthogonales. Ceci a été imposé pour obtenir une réduction de la longueur de flambement des arcs. L'espacement libre maximal au sommet des arcs vaut environ 5 400 mm, de caisson à caisson. Les suspentes sont des barres Ø80 mm en acier S460. Elles sont fixées via un système d'axe et de chapes faisant office d'articulation sur les voiles d'accrochage. Le tablier est circulaire et visitable sur toute sa longueur grâce à un trou d'homme aménagé au droit de chaque diaphragme. L'accès à l'intérieur du tablier se fait par les culées. Une protection anticorrosion de l'intérieur est assurée par déshumidificateurs.

#### LA FABRICATION, LE TRANSPORT ET LE MONTAGE

Le pont est composé de 2 tabliers en acier pesant 3 000 t au total, dont 1 000 t pour les arcs. Mises à part les naissances d'arc en acier S460, le tablier a été fabriqué en acier S355. La fabrication et le montage ont été conditionnés par les possibilités de transport. En effet, les accès directs aux voies navigables depuis l'atelier d'assemblage de Victor Buyck Steel Construction ont permis d'acheminer le tablier sur site par barges. Chaque tablier a donc pu être fabriqué et assemblé dans sa longueur totale de 145 m en Belgique. Les arcs, quant à eux, ont été transportés en 10 tronçons (longueur maximale 23,10 m).

#### FABRICATION DU TABLIER

Les pièces métalliques (hors suspentes) ont été fabriquées dans les usines de Victor Buyck Steel Construction. Certaines parties de tablier ont été fabriquées à Eeklo, mais les deux tabliers ont été assemblés dans le nouveau hall d'assemblage à Wondelgem, situé le long du canal de Gand. Pour permettre un assemblage dans deux usines, chaque tablier a été fabriqué en 6 tronçons d'une longueur maximale de 28,50 m. Chaque tronçon était composé lui-même d'un caisson central de 5,56 m et de 2 caissons de rives de 4,47 m et 4,97 m de largeur. Une fois acheminés à Wondelgem, les tronçons ont été soudés dans un hall fermé. Les tronçons d'arc, quant à eux, ont fait l'objet d'un montage à blanc, les uns aux autres, en usine, afin d'assurer un montage parfait sur site (figures 15 et 16).



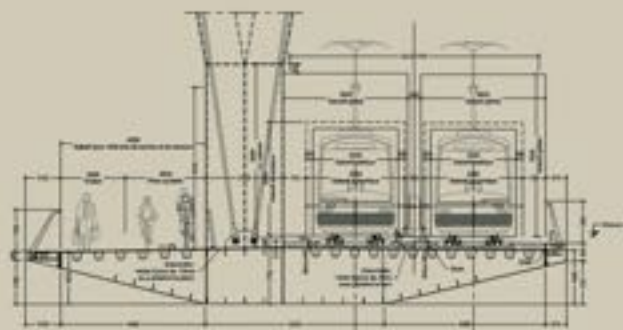
11

© BOUYGLIES

- 11- Pile P2 : enlèvement des palplanches.
- 12- Coupe fonctionnelle.
- 13- Coupe transversale.

- 11- Pier P2: removal of sheet piling.
- 12- Functional cross section.
- 13- Cross section.

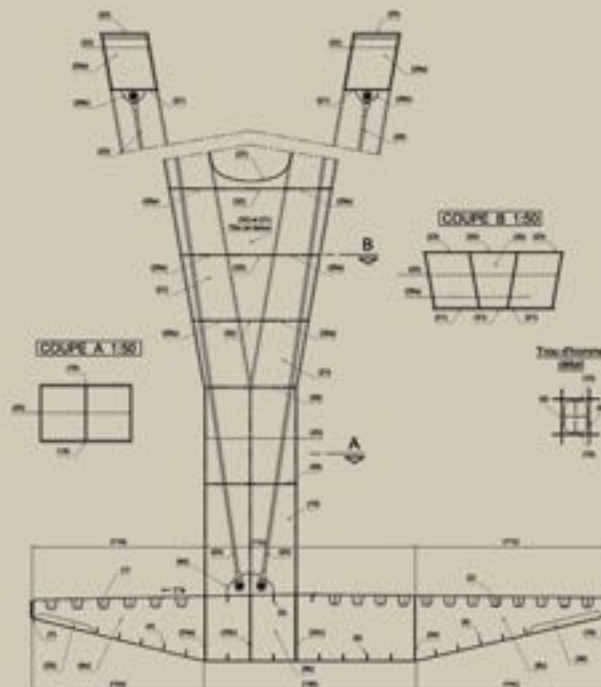
#### COUPE FONCTIONNELLE



12

© AFRCADIS

#### COUPE TRANSVERSALE



13

© AFRCADIS

La fabrication a incorporé une contre-fleche verticale ainsi qu'une contre-fleche transversale, du fait de la suspension centrale et de la différence notable de poids liée à la présence d'une voie béton du côté tram uniquement. Une contre-fleche complémentaire de 125 mm, vers le bas, a été imposée sur chacune des culées pour charger les appuis qui auraient eu tendance à se soulever lors du chargement de la travée centrale (figure 14).

#### UN TRAJET FLUVIAL

Chaque tablier a été chargé, depuis l'atelier, sur une barge à l'aide de transporteurs S.P.M.T (Self Propelled Modular Transporter), connus aussi sous le nom commercial de Kamag. À titre d'anecdote, on peut mentionner qu'il a été nécessaire d'arroser un des tabliers pendant la manutention, pour le refroidir : le soleil printanier belge ayant, en effet, chauffé l'extrados et provoqué une cambrure générale du tablier,





14

© ARCADIS

incompatible avec la faible distance sol-about de tablier (figure 17).

Les arcs ont été chargés à l'aide de grues mobiles sur une seconde barge. Les deux barges accolées l'une derrière l'autre ont ainsi été remorquées et guidées par un remorqueur et un pousseur. Toutes les pièces ont emprunté un trajet fluvial, depuis les ateliers de Victor Buyck Steel Construction (Gand), par le canal Gent-Terneuzen, puis Rotterdam pour remonter le Rhin jusqu'à la ville de Strasbourg (figures 18 et 19).

L'exiguïté de l'aire d'assemblage à Strasbourg a conduit à acheminer le tablier coté Allemagne en premier alors qu'il a été mis en place en dernier.

**14- Vue de l'ouvrage : profil en long et contre-flèche.**

**15- Soudage en atelier.**

**16- Présentation des arcs en atelier.**

**14- View of the structure: longitudinal profile and camber.**

**15- Welding in workshop.**

**16- Presentation of the arches in workshop.**

**DÉCHARGEMENT, ASSEMBLAGE DES ARCS ET MISE EN PLACE DES SUSPENTES**

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

crage ancrés sur les rives (figure 20). L'assemblage des arcs a nécessité plus de 300 t de matériel de montage (figure 21). La pose des tronçons d'arc sur les palées de montage a été réalisée à l'aide de 2 grues mobiles. L'accès en tête des palées pour le réglage et le soudage des arcs se faisait à l'aide d'échafaudages permettant au personnel de Vbsc de circuler et travailler en toute sécurité. Les suspentes ont été montées en une seule longueur pour éviter l'usage de ridoirs jugés inesthétiques par Marc Barani. Leur installation a été réalisée une fois les arcs soudés. Ce n'est qu'après l'installation des suspentes que les palées ont été démontées. ▷



© VBS

15



16





17



18



19

**17- Chargement des tabliers à Gand.**

**18- S.P.M.T et future rampe de déchargement en place depuis Gand.**

**19- Le convoi fluvial.**

**20- Opération de déchargement des tabliers à l'aide d'une rampe sur la barge.**

**17- Loading the decks in Ghent.**

**18- SPMT and future unloading ramp in place from Ghent.**

**19- The river convoy.**

**20- Deck unloading operation using a ramp on the barge.**

Il est à noter qu'il s'est avéré nécessaire d'étudier plus de 15 phases de vérinage/déverinage sur appuis, du fait de la longueur et de la souplesse du tablier privé de ses arcs et suspentes. Les palées utilisées pour l'assemblage du premier tablier ont été réutilisées pour le second.

#### OPÉRATIONS DE MISE EN PLACE DES TABLIERS

Les opérations de mise en place se sont déroulées les 7 et 18 décembre 2015, respectivement pour le tablier français et pour le tablier allemand. Avant la mise en place des tabliers à leur emplacement définitif, 4 butons

verticaux ont été montés approximativement au quart de la portée centrale. Ces butons étaient indispensables pendant les phases de mise en place ; sans eux, les conditions de résistance et de stabilité du tablier et des suspentes n'auraient pas été vérifiées (les butons sont visibles sur la figure 24).

© ARCADIS

20







21



22

**21- Palées d'appui et de montage des arcs.**  
**22- Pieux en bois au fond du Rhin.**  
**23- Vue aérienne de la mise en place des tabliers.**

**21- Arch support and assembly bents.**  
**22- Wooden piles at the bottom of the Rhine.**  
**23- Aerial view of positioning of the decks.**



23

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

→ La mise à niveau du tablier sur la berge, c'est-à-dire des opérations de décalage altimétrique des appuis parallèlement à la géométrie définitive ;

→ Le chargement par lancement, depuis les berges sur les barges, au moyen des S.P.M.T ;

→ La mise en place sur les piles et culées par déplacement des barges (figure 23) ;

→ Le réglage final en position définitive (figure 24).

Le tablier a tout d'abord été mis à niveau avec des tours à vérins sur l'aire d'assemblage, afin de limiter les manœuvres de vérinage une fois celui-ci sur les barges.

Le lancement permettant de mettre le tablier en porte-à-faux au-dessus du Rhin, puis de le mettre en charge sur

des twin-barges (2 barges couplées côte-à-côte) a été effectué avec des S.P.M.T, des barges, des tours à vérins et un pousseur.

Après fermeture des passes navigables par les services de VNF et WSA, après accord de la CCNR, chaque tablier a été mis en place à l'aide des twin-barges, ▷







24  
© VBSC

dirigées par des câbles ancrés sur les rives et un pousseur, afin de positionner le tablier dans son axe définitif.

La mauvaise surprise est venue de la présence de pieux en bois verticaux au fond du Rhin : les câbles de traction (figure 22) sont en effet venus s'y bloquer, nécessitant l'envoi de plongeurs. Enfin, pour terminer les opérations de manutention, le tablier a été déveriné à l'aide des tours à vérins pour le mettre à son niveau définitif.

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

**Lien vers la vidéo de la CTS concernant la mise en place des tabliers :**

<https://www.youtube.com/watch?v=iejZqIBkGoY>

**Références :**

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

(\*) devenu Schleith GmbH Baugesellschaft depuis.

**24- Positionnement final du second tablier.**

**24- Final positioning of the second deck.**

**PRINCIPALES QUANTITÉS**

- PRÉCHARGEMENT : 36 000 m<sup>3</sup>**
- PIEUX : 576 m**
- BÉTON : 4 300 m<sup>3</sup>**
- CHARPENTE MÉTALLIQUE : 3 000 t**
- VOIE FERRÉE : 620 m**
- GARDE-CORPS : 1 000 m**
- ÉTANCHÉITÉ : 4 200 m<sup>2</sup>**

**PRINCIPAUX INTERVENANTS**

**MAÎTRE D'OUVRAGE :** Compagnie des Transports Strasbourgeois

**ASSISTANCE À MAÎTRISE D'OUVRAGE :** Egis Jmi

**MAÎTRISE D'ŒUVRE GÉNÉRALE DES EXTENSIONS :** Getas

**GROUPEMENT DE CONCEPTION-RÉALISATION :**

**MANDATAIRE, EN CHARGE DES TRAVAUX DE GÉNIE CIVIL :**

**Bouygues Travaux Publics Régions France**

**CO-TRAITANT, EN CHARGE DES TRAVAUX DE CHARPENTE**

**MÉTALLIQUE :** Victor Buyck Steel Construction

**CO-TRAITANT, EN CHARGE DES TRAVAUX DE TERRASSEMENT**

**ET D'ASSAINISSEMENT :** Lingenheld

**CO-TRAITANT, EN CHARGE DES FONDATIONS SPÉCIALES**

**ET DES TRAVAUX FLUVIAUX :** Früh Ingenieurbau (\*)

**CO-TRAITANT, MAÎTRE D'ŒUVRE INTÉGRÉ, EN CHARGE**

**DE LA CONCEPTION, DU VISA ET DU SUIVI DES TRAVAUX :** Arcadis

**CO-TRAITANT, MAÎTRE D'ŒUVRE, EN CHARGE DE LA CONCEPTION**

**ET DU VISA ARCHITECTURAL ET DU SUIVI DES TRAVAUX :**

**Marc Barani Architectes**

**ABSTRACT**

**LINE D OF THE STRASBOURG TRAMWAY - CONSTRUCTION OF THE BRIDGE OVER THE RHINE**

DITER BRAET, VBSC - PATRICK VAN SEVEREN, VBSC - CHRISTIAN CREMONA, BOUYGUES TP - DIDIER GUTH, ARCADIS

The extension works on tramway Line D, awarded to Compagnie des Transports Strasbourgeois (CTS) by Eurometropolis of Strasbourg (EMS), got under way in 2014. They represent an extension of the Strasbourg network into Germany and will be drivers for the development of cross-border links. Project execution requires the construction of remarkable infrastructure, including the bridge over the Rhine. The design and construction of this structure was awarded to the consortium formed by Bouygues TPRF, Victor Buyck SC, Lingenheld TP, Früh Ingenieurbau (\*), Arcadis and Marc Barani Architectes, selected by the EMS and the City of Kehl upon the proposal of the CTS, contracting authority for the project. □

(\*) since become Schleith GmbH Baugesellschaft.

**LÍNEA D DEL TRANVÍA DE ESTRASBURGO: CONSTRUCCIÓN DEL PUENTE SOBRE EL RIN**

DITER BRAET, VBSC - PATRICK VAN SEVEREN, VBSC - CHRISTIAN CREMONA, BOUYGUES TP - DIDIER GUTH, ARCADIS

Las obras de extensión de la línea D del tranvía, encargadas a la empresa Compagnie des Transports Strasbourgeois (CTS) por Eurometropole de Strasbourg (EMS), comenzaron en 2014. Constituyen una prolongación de la red de Estrasburgo hacia Alemania y serán un vector de desarrollo de los enlaces transfronterizos. Su realización requiere la construcción de importantes infraestructuras, como el puente sobre el Rin. Seleccionado por EMS y la ciudad de Kehl a propuesta de CTS, promotor del proyecto, el consorcio de empresas formado por Bouygues TPRF, Victor Buyck SC, Lingenheld TP, Früh Ingenieurbau (\*), Arcadis y Marc Barani Architectes será el responsable del diseño y la realización de esta obra. □

(\*) devenu Schleith GmbH Baugesellschaft depuis.



PAR NUMÉRO : 15€ AU LIEU DE 25€



907



908



909



910



911



912



913



914



915



916



917



918



919



920



921



### BON DE COMMANDE ■ REVUE TECHNIQUE DES ENTREPRISES DE TRAVAUX PUBLICS

À renvoyer à : Com et Com - Service Abonnements TRAVAUX - Bât. Copernic - 20 av. Édouard Herriot - 92350 Le Plessis-Robinson  
Tél. : +33 (0)1 40 94 22 22 - Fax : +33 (0)1 40 94 22 32 - Email : revue-travaux@cometcom.fr

**JE COMMANDE LES NUMÉROS SUIVANTS** (cochez les cases de votre choix en indiquant le nombre d'exemplaires) :

- |                                |                                |                                |
|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| <input type="checkbox"/> 907 x | <input type="checkbox"/> 912 x | <input type="checkbox"/> 917 x |
| <input type="checkbox"/> 908 x | <input type="checkbox"/> 913 x | <input type="checkbox"/> 918 x |
| <input type="checkbox"/> 909 x | <input type="checkbox"/> 914 x | <input type="checkbox"/> 919 x |
| <input type="checkbox"/> 910 x | <input type="checkbox"/> 915 x | <input type="checkbox"/> 920 x |
| <input type="checkbox"/> 911 x | <input type="checkbox"/> 916 x | <input type="checkbox"/> 921 x |

Soit un montant total de :

\_\_\_\_\_ numéros x 15 € = \_\_\_\_\_ €

(Pour une commande de plus de 20 numéros le prix passe de 15 € à 13 € l'unité)

\*Offre valable jusqu'au 31/12/17 et hors frais postaux : 4,80€ d'envoi France, 9,00€ d'envoi Europe et 11,00€ d'envoi étranger hors Europe. Conformément à la Loi informatique et des libertés du 06/01/78, le droit d'accès et de rectification des données concernant les abonnés peut s'exercer auprès du service abonnements. Ces données peuvent être communiquées à des organismes extérieurs. Si vous ne le souhaitez pas, veuillez cocher cette case

**JE VOUS INDIQUE MES COORDONNÉES :**

Nom \_\_\_\_\_ Prénom \_\_\_\_\_

Entreprise \_\_\_\_\_ Fonction \_\_\_\_\_

Adresse \_\_\_\_\_

Code postal [ ] [ ] [ ] [ ] [ ] Ville \_\_\_\_\_

Tél. : \_\_\_\_\_ Fax : \_\_\_\_\_

Email : \_\_\_\_\_  Merci de ne pas communiquer mon adresse mail

Je joins mon règlement d'un montant de \_\_\_\_\_ € TTC par Chèque à l'ordre de **COM'1 ÉVIDENCE**

**ATTENTION : tous les règlements doivent être libellés exclusivement à l'ordre de COM'1 ÉVIDENCE**

Je réglerai à réception de la facture

Je souhaite recevoir une facture acquittée

Date, signature et cachet de l'entreprise obligatoire





1  
© ARCADIS

# RENFORCEMENT DU VIADUC DE CHASSE-SUR-RHÔNE SUR L'AUTOROUTE A7N

AUTEURS : JEAN-MICHEL ODIN, RESPONSABLE POLE GCOA, ARCADIS - STÉPHANE LAURAND, INGÉNIEUR CHARGÉ D'AFFAIRE, ARCADIS - PASCAL FERRATON, CHEF D'AGENCE TP REGION RHÔNE ALPES AUVERGNE, FREYSSINET

CE CHANTIER DE RENFORCEMENT D'UN TABLIER DE PONT SITUÉ AU SUD DE LYON COMPREND LA MISE EN ŒUVRE D'UN PROCÉDÉ DE TRAITEMENT DES CÂBLES DE PRECONTRAINTE CORRODÉS PAR IMPRÉGNATION ULTRASONORE D'INHIBITEUR DE CORROSION, SUIVI D'UNE RÉINJECTION PAR COULIS DE MICRO-CIMENT. CE PROCÉDÉ EST APPLIQUÉ POUR LA PREMIÈRE FOIS EN FRANCE. L'ENSEMBLE DES TRAVAUX EST RÉALISÉ SOUS EXPLOITATION.

## PRÉSENTATION DE L'OUVRAGE

Le viaduc de Chasse-sur-Rhône (désigné VIPP 211) est situé sur l'autoroute A7N dans l'Isère (38), à une vingtaine de kilomètres au sud de Lyon.

Cet ouvrage permet le franchissement d'une zone résidentielle de la commune de Chasse-sur-Rhône.

Construit en 1963, il s'agit d'un viaduc à poutres préfabriquées précontraintes de type VIPP comportant 9 travées indépendantes d'une longueur totale d'environ 300 m (figure 2).

Chaque travée est composée de 8 poutres d'une portée d'environ 32 m, précontraintes par des câbles de type 12Ø8. Chaque poutre courante comporte 10 câbles de précontrainte dont 4 sont relevés et ancrés sous la chaussée (figure 3).

Le hourdis est de type intermédiaire, coulé en place entre les poutres principales. La solidarisation du hourdis est faite uniquement par la mise en place d'une précontrainte transversale.

Les poutres sont liaisonnées transversalement par des entretoises.

Les entretoises ont été coulées en 2<sup>e</sup> phase et la solidarisation transversale est assurée uniquement par l'intermédiaire de câbles transversaux du type 12Ø8.

Le tablier, d'une largeur de 27,80 m, porte 2x3 voies de circulation (figure 4).

À l'origine, le VIPP 211 était constitué de deux tabliers indépendants.

En 2005, des travaux ont permis l'élargissement de la largeur roulable en rendant continu transversalement le hourdis et les entretoises.

## 1- Vue générale du chantier.

## 1- General view of the site.

## CONTEXTE DE L'OPÉRATION

Le VIPP 211 est entretenu par le concessionnaire autoroutier ASF (Vinci Autoroutes) depuis de nombreuses années. La DOIE et la Direction Technique ASF ont lancé en 2009 une importante campagne d'investigations sur cet ouvrage.

Cette campagne, réalisée par le Lerm, a intégré des relevés et mesures *in-situ* ainsi que des mesures en laboratoire. Les caractéristiques des matériaux et

des superstructures ont ainsi pu être évaluées.

Il ressort de cette campagne les principaux éléments suivants :

- Une carbonatation du béton ayant atteint le premier lit des armatures passives ;
- La présence d'ions chlorure, notamment dans les gaines de précontrainte ;
- Aucun fil de précontrainte rompu parmi ceux investigués ;
- Une tension résiduelle de la précontrainte des poutres de 813 MPa (tension faible mais classique pour des câbles de ce type et de cette époque) ;
- Des défauts d'injection aux extrémités de gaine ;
- Une corrosion des ancrages et fils aux extrémités de gaines.



Une mission maîtrise d'œuvre études a ensuite été confiée à Egis Jmi pilotée par ASF DOIE et son AMO, Arcadis. Cette mission a conduit à établir un projet complet de renforcement du tablier du viaduc de Chasse-sur-Rhône. Au final, les travaux de renforcement, sous maîtrise d'œuvre Arcadis, ont été confiés au groupement Freyssinet - Campenon Bernard Régions et comprennent :

- La mise en œuvre de composites en fibres de carbone et précontrainte additionnelle ;
- L'imprégnation d'une partie des gaines de précontrainte par un inhibiteur de corrosion ;
- La réinjection d'une partie des gaines de précontrainte au coulis de ciment ;
- Le remplacement des appareils d'appui néoprène et la réfection des bossages ;
- Le remplacement des joints de chaussée.

**2- Coupe longitudinale de l'ouvrage.**

**3- Élévation d'une poutre courante - tracé des câbles de précontrainte existants.**

**4- Coupe transversale de l'ouvrage - les poutres 4 et 5 comportent un câble relevé supplémentaire.**

**2- Longitudinal section of the structure.**

**3- Elevation view of a standard girder - layout of existing tendons.**

**4- Cross section of the structure - girders 4 and 5 include an additional deflected tendon.**

**PHILOSOPHIE DU RENFORCEMENT DU TABLIER**

Le VIPP 211, construit au début des années 60 fait partie de la génération des ouvrages de type VIPP construits avant la parution de l'IP1 et du dossier type du Setra VIPP67. Les calculs effectués à l'époque étaient basés sur la circulaire de 1953 pour le béton précontraint et le comportement du matériau béton précontraint n'était alors pas encore bien connu. À cette époque, les densités de ferrailage passif mis en œuvre dans les tabliers dont tous les éléments étaient précontraints (poutres, entretoises et hourdis) étaient très faibles. Certaines sections de liaison entre une partie préfabriquée et une partie coulée en place voient même une absence totale d'armatures passives. En présence de tels ouvrages, il est clair qu'en cas de rupture de fils de précontrainte par corrosion une rupture

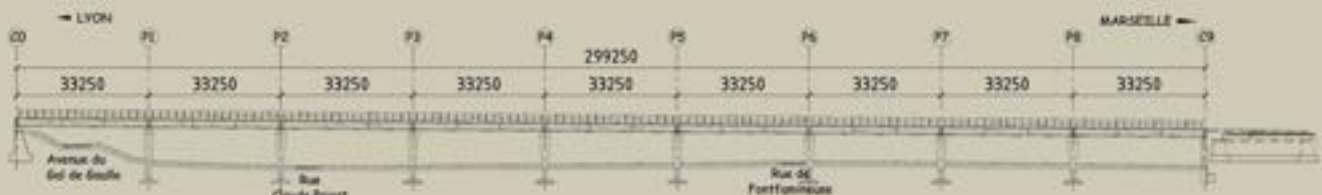
fragile des poutres peut se produire. Ce risque est identifié comme relativement élevé sur cet ouvrage dont les gaines sont particulièrement mal injectées aux extrémités.

Le renforcement du tablier a donc été guidé par les résultats des investigations et par la gestion du risque de rupture de fils de précontrainte.

Le recalcul de l'ouvrage a été effectué selon plusieurs configurations et hypothèses permettant d'appréhender la ductilité du comportement du tablier. Il a mis en évidence des dépassements des critères réglementaires du BPEL (tous les calculs ont été réalisés selon les règlements français).

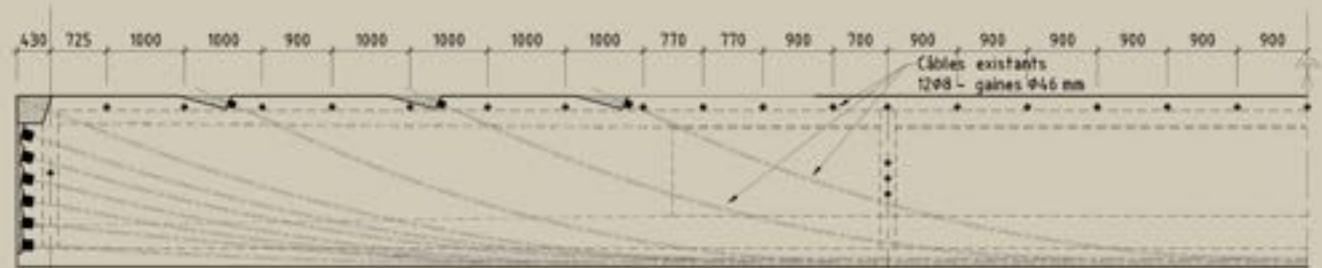
Des scénarii pessimistes de rupture de fils de précontrainte ont été établis en se basant sur les résultats des investigations (défauts d'injection et état dégradé aux extrémités de câbles) et pour tenir compte de dégradations futures éventuelles.

COUPE LONGITUDINALE DE L'OUVRAGE



2

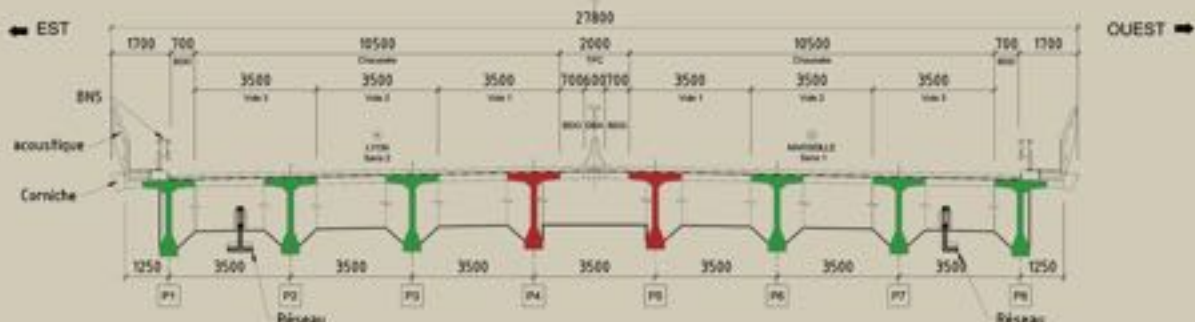
ÉLÉVATION D'UNE POUTRE COURANTE - TRACÉ DES CÂBLES DE PRÉCONTRAINTE EXISTANTS



3

COUPE TRANSVERSALE DE L'OUVRAGE

Les poutres 4 et 5 comportent un câble relevé supplémentaire



4

Différents scénarii de rupture de fils ont ainsi été envisagés pour la détermination des renforts de flexion, d'effort tranchant, d'équilibre du coin et de bielle d'about des poutres principales et entretoises. Il n'a pas été considéré un scénario de rupture de précontrainte au niveau du hourdis étant donné que ce dernier présente une réserve de ductilité suffisante, y compris en cas de rupture partielle de précontrainte. Le hourdis n'a donc pas fait l'objet de renforcement.

Les risques de rupture de fils sont considérés plus élevés aux extrémités des câbles du fait d'un manque de coulis d'injection près des ancrages (impossibilité de ré-ancrage dans ce cas) et de la facilité d'entrée des polluants par les ancrages de câble.

L'ouvrage comportant un total de 72 poutres, on a recherché une solution de renforcement des poutres assurant la pérennité de l'ouvrage tout en limitant le coût des travaux.

Ainsi, il a été fait le choix d'associer un renforcement léger à la flexion (par composite carbone) à un traitement par imprégnation d'inhibiteur de corrosion des gaines de précontrainte des câbles relevés (câbles les plus soumis aux polluants). L'imprégnation d'inhibiteur de corrosion est suivie d'une réinjection au coulis de ciment micro fin des gaines de précontrainte à leurs extrémités ce qui permet un ré-ancrage des fils même en cas de rupture. Ce choix de renforcement, en limitant les risques de rupture et en augmentant les possibilités de ré-ancrage, permet de s'affranchir de précontrainte additionnelle longitudinale puisqu'il prolonge la durée de vie de la précontrainte existante de manière significative.

Le renforcement des abouts de poutre pouvant être réalisé par ajout de composite carbone, les câbles ancrés aux abouts de poutre ne sont pas traités par inhibiteur de corrosion.

### RENFORCEMENT DES POUTRES PRINCIPALES

Les poutres principales sont renforcées à la flexion par collage en fibre inférieure de 3 couches de tissu fibre de carbone (procédé Foreva® TFC de Freyssinet).

Il en est de même pour les renforcements à l'effort tranchant. Les renforts sont constitués d'une seule couche de tissu mise en œuvre par bandes de 0,15 m de largeur en faisant le tour de chaque retombée de poutre avec, si nécessaire, un ancrage par mèches dans le hourdis. Un dispositif anti-pous-



5



6



7

sée au vide par mèche d'ancrage est mis en œuvre à la jonction âme/gousset inférieur de la poutre (figure 5). La majorité de l'espace sous le tablier est circulaire, les travaux de renforcement en travée sont donc réalisés depuis des nacelles ciseau (figure 6). Au niveau des abouts de poutres, les scénarii de ruptures de fils de précontrainte ont conduit à des manques de section relativement importants. Les renforts d'équilibre du coin comportent 3 couches de TFC ancré au moyen de plaques inox. Le système d'ancrage par mèche ou par plaque inox permet d'augmenter significativement le taux de travail du TFC de 417 MPa à 789 MPa à l'ELU (figure 7). Tous les travaux de renforcement des poutres principales sont réalisés sous circulation, sans gêne à l'exploitation autoroutière.

### RENFORCEMENT DES ENTRETOISES

Seules les entretoises d'about sont renforcées. Ce renforcement est dimensionné par le vérinage du tablier. Cet ouvrage n'a pas été conçu pour permettre le remplacement de ses

5- Mise en œuvre d'une mèche d'ancrage anti-poussée au vide sur une bande de TFC de renfort à l'effort tranchant.

6- Travaux sur nacelles de mise en œuvre des bandes de TFC de renfort à l'effort tranchant.

7- Abouts de poutres : ancrage du TFC par plaque inox.

5- Placing a strand for anchoring against outward pressure on a carbon fibre fabric strip providing reinforcement against shear force.

6- Work on aerial baskets for placing carbon fibre fabric strips providing reinforcement against shear force.

7- Girder end pieces: carbon fibre fabric anchoring by stainless steel plate.



8- About de poutre de rive : massif béton d'ancrage des monotorons et barres de précontrainte de serrage pour reprise des efforts de vérinage.

9- Principe général de fonctionnement de la pompe à ultrasons.

8- Edge-beam end piece: concrete foundation block for anchoring of single-strand cables and clamping prestressing bars to absorb jacking forces.

9- General operating principle of the ultrasonic pump.



© ARCADIS 8

appareils d'appui en néoprène et aucun emplacement de vérinage n'est prévu. Le vérinage de l'ouvrage est effectué avec le système LAO® de Freyssinet. La centrale hydraulique centralise le pilotage de l'ensemble des vérins en assurant le déplacement de l'ouvrage dans un plan fixe. Une dénivellation maximale de 0,3 mm entre 2 vérins est prise en compte dans les calculs, valeur légèrement supérieure à la précision de mesure du système.

La prise en compte de cette dénivellation a conduit à renforcer les entretoises d'about de chaque travée à l'aide de 3 monotorons gainés graissés du type T15S. L'effet de cette précontrainte additionnelle sur les entretoises et le taux de re-compression ont été étudiés à l'aide d'un modèle 3D aux éléments finis d'une travée complète. Les mesures effectuées sur place ont montré que la souplesse réelle de l'ouvrage était plus importante que celle

issue du modèle 3D, ce qui va dans le sens de la sécurité.

Les monotorons sont ancrés sur des massifs additionnels coulés en place dans la hauteur de l'âme à l'about des poutres de rive. Ces massifs servent également au vérinage du tablier (figure 8). Ils sont liaisonnés aux poutres de rive par l'intermédiaire d'une précontrainte de clouage constituée de 4 barres de précontrainte du type Freyssibar Ø 36 mm.

## IMPRÉGNATION D'INHIBITEUR DE CORROSION ET RÉINJECTION AU COULIS DE CIMENT MICRO FIN DANS LES GAINES DE PRÉCONTRAÎNTE (PROCÉDÉ FOREVA® ULTRASONS)

### DESCRIPTION DU PROCÉDÉ

Ce procédé a été mis au point dans les années 90 par la société Pmd Ateav Systems. Il s'agit désormais du procédé Foreva® Ultrasons de Freyssinet.

Il consiste à faire pénétrer à l'intérieur de gaines de précontrainte injectées au coulis de ciment un inhibiteur de corrosion dans l'objectif de stopper la progression du phénomène de corrosion des câbles de précontrainte. Les gaines sont ensuite réinjectées par un coulis de ciment micro fin adapté à cette application.

L'imprégnation du coulis existant par l'inhibiteur de corrosion est réalisée par l'utilisation d'une pompe alternative à ultrasons de puissance qui aboutit à saturer en inhibiteur le milieu qui entoure les câbles de précontrainte.

L'utilisation d'une pompe alternative à ultrasons de puissance permet de créer des surpressions et des dépressions alternatives à la fréquence ultrasonore. L'action des ultrasons induit un état de cavitation en phase vapeur du liquide inhibiteur. L'énergie ainsi libérée permet de dégager les macros pores du coulis en contact avec les aciers de précontrainte, favorisant la pénétration de l'inhibiteur (figure 9).

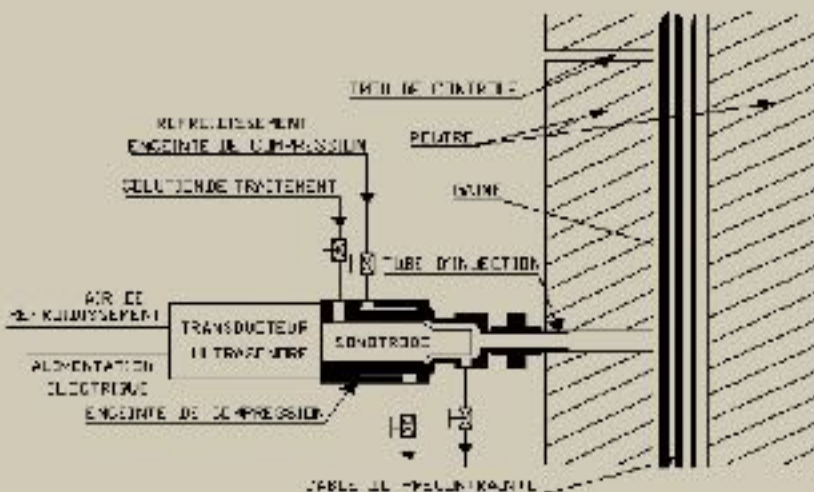
Injecté à saturation, l'inhibiteur agit au niveau de la couche extérieure de l'acier des câbles de précontrainte de manière à mettre un point d'arrêt au processus de corrosion.

Les mesures du temps nécessaire pour saturer les câbles de proche en proche permettent de dresser une cartographie précise des vides de coulis de ciment. La réinjection ciblée des vides avec un micro-ciment, au départ des mêmes injecteurs, devient dès lors une opération aisée et fiable.

### APPLICATION DU PROCÉDÉ

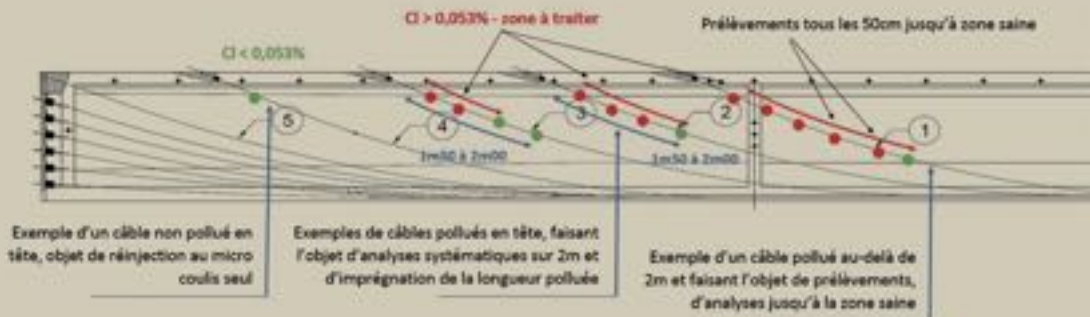
Les risques les plus importants de corrosion des câbles existants sont ceux par piqûre induite par les chlorures. L'inhibiteur de corrosion mis en œuvre est actif même en cas de présence de taux de chlorure élevé. Dans le cas du VIPP 211, il a été fait le choix de traiter systématiquement à partir de tous les points de mesure dont le taux de chlorure totaux est supérieur à 0,1 % de la masse de ciment soit 0,053 % de la masse totale du coulis prélevé. ▷

## PRINCIPE GÉNÉRAL DE FONCTIONNEMENT DE LA POMPE À ULTRASONS



© P.M.D. ATEAV SYSTEMS 9

## EXEMPLE DE CARTOGRAPHIE DES RÉSULTATS DES MESURES DE TENEUR EN CHLORURE DU COULIS DE GAINE



10

© ARCADIS

Les opérations nécessaires à l'aboutissement complet des opérations d'inhibition de la corrosion des câbles de précontrainte, de la détermination de la cartographie des vides jusqu'à la réinjection des vides, peuvent se décrire comme suit :

- 1- Repérage des câbles de précontrainte ;
- 2- Prélèvement du coulis ;
- 3- Mesure des chlorures dans le coulis prélevé ;
- 4- Percage des trous d'injection et de contrôle ;
- 5- Injection/imprégnation de l'inhibiteur de corrosion par pompe alternative à ultrasons en contrôlant le pH de la solution inhibitrice ;
- 6- Réinjection de coulis de micro-ciment suivant cartographie inhibiteur.

### MISE EN ŒUVRE DU PROCÉDÉ

La mise en œuvre du procédé est réalisée en deux phases distinctes. Elle nécessite, dans un premier temps, des travaux préalables afin de définir les zones contaminées et de connaître le degré d'injection (présence de

### 10- Exemple de cartographie des résultats des mesures de teneur en chlorure du coulis de gaine.

11- Injecteurs en place le long du tracé des câbles relevés.

12- Transducteur ultrasonore d'injection d'inhibiteur de corrosion dans les gaines de précontrainte.

### 10- Example of mapping of the results of duct grout chloride content measurements.

11- Injectors in place along the route of the deflected tendons.

12- Ultrasonic transducer for injection of corrosion inhibitor in the prestressing ducts.

vide) des gaines de précontrainte existantes.

Les travaux préparatoires consistent à réaliser des prélèvements du coulis existant, sans endommager les câbles de précontrainte (opérations 1 à 3). Pour la réalisation de cette opération, il est nécessaire de réaliser les tâches élémentaires suivantes :

- Le repérage des câbles existants par auscultation radar ;
- Le forage du béton jusqu'à la gaine de précontrainte ;
- Le percement de la gaine et le prélèvement du coulis en débutant au plus près de la tête d'ancrage des câbles ;
- L'analyse du coulis de ciment (taux de chlorures) ;
- La réalisation de nouveaux forages sur tous les câbles où la tête d'ancrage présentait une pollution aux chlorures (un forage est réalisé tous les 0,50 m environ le long du câble sur une distance égale à 2 m, puis prolongé si nécessaire) et de nouvelles analyses jusqu'à obtenir le long de chaque câble au moins une mesure de taux de chlorure

en-dessous du seuil de traitement ;  
→ La réalisation d'une cartographie des chlorures (figure 10) ;  
→ La qualification visuelle du degré de corrosion des fils et de l'état de remplissage de la gaine.

Dans un deuxième temps, lorsque la cartographie complète du câble est réalisée, les travaux d'imprégnation de l'inhibiteur de corrosion, puis d'injection complémentaire au coulis de micro-ciment peuvent débuter (opérations 4 à 6).

Le traitement est réalisé en suivant les étapes :

- Scellement des injecteurs dans les forages distants d'environ 0,50 m (figure 11) ;
- Test d'étanchéité en insufflant de l'air comprimé depuis chaque injecteur, un à un ;
- Test au passage d'air d'un injecteur à l'autre afin de caractériser l'état de remplissage des gaines ;
- Mise en place du transducteur (figure 12) ;
- Injection de l'inhibiteur de corrosion à une pression de 4 bars environ sur les zones polluées (figure 13) ;



11



12

© ARCADIS



- Suivi de l'imprégnation de l'inhibiteur (progression, durée et volume) ;
- Réinjection au coulis de ciment micro fin par les mêmes injecteurs ;
- Arrachage des injecteurs et colmatage des perçages.

L'imprégnation est considérée suffisante lorsque la solution inhibitrice percole au niveau du ou des injecteurs situés de part et d'autre qui ont alors un rôle d'évent.

Les durées d'imprégnation sont variables (de 30 mn à 2 h) selon les points en fonction du remplissage de la gaine par le coulis de ciment existant.

Les têtes d'ancrage des câbles de précontrainte polluées sont systématiquement imprégnées sur une durée de 2 heures. Un contrôle de l'imprégnation est réalisé a posteriori par échantillonnage. L'inhibiteur de corrosion étant à base de nitrite, un contrôle de présence de nitrite sur des échantillons de coulis prélevés est réalisé.



13  
© ARCADIS

**13- Poste de travail sur nacelle de l'atelier d'imprégnation d'inhibiteur de corrosion dans les gaines de précontrainte.**

**13- Work station on aerial basket for impregnation of corrosion inhibitor in the prestressing ducts.**

### AUTRES TRAVAUX RÉALISÉS DANS L'OPÉRATION

Le tablier est vériné sur chaque file d'appui pour permettre le remplacement de tous les appareils d'appuis néoprène.

Le tablier est, au cours de cette opération de vérinage, définitivement remonté de 6 cm afin de mettre hors

d'eau les appuis en néoprène situés sous les poutres de rive qui ne comportaient pas de bossage.

Ces travaux exécutés de nuit sont réalisés sur 3 week-ends (nuit du samedi au dimanche) sous coupure totale de la circulation autoroutière.

Le remplacement de 270 m de joints de chaussée en bitume élastomère (procédé Viajoint) est également réalisé de nuit (dépose et repose).

Enfin, les travaux comprennent la réparation des épaufrures et des aciers apparents (ragréage, injection de fissures et passivation des aciers) ainsi que l'application d'un produit bouche-pore (de type LHM) sur les rives du tablier directement soumises aux intempéries. □

## PRINCIPALES QUANTITÉS

**RENFORTS TFC : 5 500 m<sup>2</sup>**

**PRÉCONTRAINTE ADDITIONNELLE : 3 100 kg**

**REMPACEMENT D'APPUIS NÉOPRÈNE : 144 u**

**REMPACEMENT DE JOINTS DE CHAUSSÉE : 270 m**

**IMPRÉGNATION ULTRASONORE D'INHIBITEUR ET RÉINJECTION AU COULIS DE CIMENT MICRO FIN : 450 câbles**

**MESURES DE TENEUR EN CHLORURE DU COULIS DE GAINES : plus de 1 500 u**

## PRINCIPAUX INTERVENANTS

**MAÎTRE D'OUVRAGE : ASF DOIE**

**ASSISTANT MAÎTRISE D'OUVRAGE ÉTUDES : Arcadis**

**MAÎTRE D'ŒUVRE ÉTUDES : Egis Jmi**

**MAÎTRE D'ŒUVRE TRAVAUX : Arcadis**

**CONTRÔLE EXTÉRIEUR CHANTIER : Concrete**

**COORDONNATEUR SPS : Bureau Veritas**

**GROUPEMENT D'ENTREPRISES : Freyssinet - Campenon Bernard Régions**

**PRINCIPAUX SOUS-TRAITANTS :**

- Études d'exécution et méthodes : Freyssinet - BE Arlaud
- Assistance à l'imprégnation ultrasonore par inhibiteur des gaines de précontrainte : Pmd Ateav Systems
- Mesures de teneurs en chlorure du coulis : In situ
- Hydrodécapage : THP
- Échafaudages : Arnholdt

## ABSTRACT

### REINFORCEMENT OF THE CHASSE-SUR-RHÔNE VIADUCT OVER THE A7N MOTORWAY

JEAN-MICHEL ODIN, ARCADIS - STÉPHANE LAURAND, ARCADIS - PASCAL FERRATON, FREYSSINET

**This viaduct is located on the ASF (Vinci Autoroute) network south of Lyon.** Built in 1963, it is a viaduct with nine prefabricated independent prestressed girder spans. Like the great majority of structures of this type built in the 1960s, it runs significant risks of brittle failure in the event of partial failure of the prestressing. Studies and then strengthening work were accordingly undertaken by ASF in order to ensure a sufficient level of service for this structure for another fifty years or so. A new process was employed for the first time in France in order to extend the lifetime of the tendons. This process involves injecting a corrosion inhibitor inside the prestressing ducts previously identified as representing corrosion risks due to the presence of chlorides. Injection of the corrosion inhibitor is performed by means of a special technique using a high-power ultrasonic pump which allows complete impregnation of the cement grout. □

### REFUERZO DEL VIADUCTO DE CHASSE-SUR-RHÔNE SOBRE LA AUTOPISTA A7N

JEAN-MICHEL ODIN, ARCADIS - STÉPHANE LAURAND, ARCADIS - PASCAL FERRATON, FREYSSINET

**Este viaducto discurre sobre la red de ASF (Vinci Autoroutes), al sur de Lyon.** Construido en 1963, se trata de un viaducto con vigas prefabricadas pretensadas de tipo VIP que forman 9 tramos. Como la gran mayoría de construcciones de este tipo realizadas en los años 60, presenta riesgos nada despreciables de ruptura frágil en caso de ruptura parcial del pretensado. Así, ASF ha llevado a cabo estudios y obras de refuerzo con el objetivo de garantizar un nivel de servicio suficiente de esta construcción durante otros cincuenta años. Se ha aplicado un nuevo procedimiento inédito en Francia para prolongar la vida útil de los cables de pretensado. Este procedimiento consiste en inyectar un inhibidor de corrosión dentro de las vainas de pretensado que presentan riesgos de corrosión debido a la presencia de cloruros. La inyección del inhibidor de corrosión se realiza mediante una técnica especial que utiliza una bomba de ultrasonidos de potencia que permite impregnar la totalidad de la lechada de cemento. □

# CONSTRUCTION DU VIADUC DE LA GRANDE CHALOUPE - NOUVELLE ROUTE DU LITTORAL

AUTEURS : DIDIER KOENIG, DIRECTEUR DE DÉPARTEMENT OUVRAGE D'ART, EIFFAGE GÉNIE CIVIL - CHRISTOPHE OUTTERYCK, DIRECTEUR DE PROJET ADJOINT, EGIS JMI - PHILIPPE LECOQ, DIRECTEUR DE CHANTIER VGC, EIFFAGE GÉNIE CIVIL - PHILIPPE ROUSSOT, CHEF DE PROJET VGC, EGIS - SIMON BONTHONNEAU, INGÉNIEUR MÉTHODES, EIFFAGE GÉNIE CIVIL - THIBAUT CESTERO, RESPONSABLE PRODUCTION, RAZEL

LE VIADUC DE LA GRANDE CHALOUPE EST L'OUVRAGE DU LOT MT4 DU PROJET DE LA NOUVELLE ROUTE DU LITTORAL (NRL) SUR L'ÎLE DE LA RÉUNION. LA RÉGION RÉUNION, MAÎTRE D'OUVRAGE, EN A CONFIE LA MAÎTRISE D'ŒUVRE À EGIS. EIFFAGE GÉNIE CIVIL EST MANDATAIRE DU GROUPEMENT COMPOSÉ DE RAZEL BEC, SAIPEM ET NGE CONTRACTING EN CHARGE DE SA RÉALISATION. LES APPUIS SONT RÉALISÉS EN MER, AU DROIT DE LA RAVINE DONT L'OUVRAGE TIENT SON NOM. LE TABLIER, D'UNE LONGUEUR TOTALE DE 242 M, EST UNE STRUCTURE MONO-CAISSON À 4 ÂMES EN BÉTON PRÉCONTRAIT, CONSTRUITE À L'ÉQUIPAGE MOBILE PAR ENCORBELLEMENTS SUCCESSIFS DE VOUSOIRS.

© RÉGION RÉUNION/JÉRÔME BALLEYDIER/LAURENT DE GEBHARDT

1





1- Vue d'ensemble du chantier.  
2- Vue d'ensemble en cours de réalisation du fléau de la pile P2.

1- General view of the project.  
2- General view during execution of the cantilever section of pier P2.



© RÉGION RÉUNION/JÉRÔME BALLEYDIER/LAURENT DE GEBHARDT

## OBJET DU VIADUC

L'ouvrage ouvre la continuité des ravines Grande Chaloupe et Tamarins et une perspective visuelle vers l'Océan. Il constitue l'ouvrage principal de la desserte du site dont les bretelles d'accès seront réalisées dans un second temps (figures 1 et 2).

Intégré au projet de la NRL dont il est la charnière géographique, l'ouvrage est d'une largeur hors tout de 29 m. Il a été conçu pour deux modes de circulation :  
→ Configuration à la mise en service : le tablier supporte 2x3 voies de circulation séparées par un terre-plein central (TPC) et encadrées par deux

bandes d'arrêt d'urgences (BAU) ;  
→ Configuration future : comportant 2x2 voies de circulation séparées par un TPC et encadrées par deux bandes dérasées droites (BDD) et bordées par deux voies de transport collectif en site propre (TCSP) de type tramway.

## PRINCIPES STRUCTURELS ET ARCHITECTURAUX

### SCHÉMA STRUCTUREL

Le viaduc de la Grande Chaloupe est un ouvrage de 239 m de longueur entre axes des appuis sur culées. Il comporte quatre travées dont les portées mesurent successivement : 50,5 m, 69,0 m, 69,0 m et 50,5 m (figure 3).

Le tracé en plan de la NRL est, au droit du viaduc, en courbe de rayon 860 m. Son profil en long est en pente constante de 0,5% suivant la direction Saint Denis - La Possession.

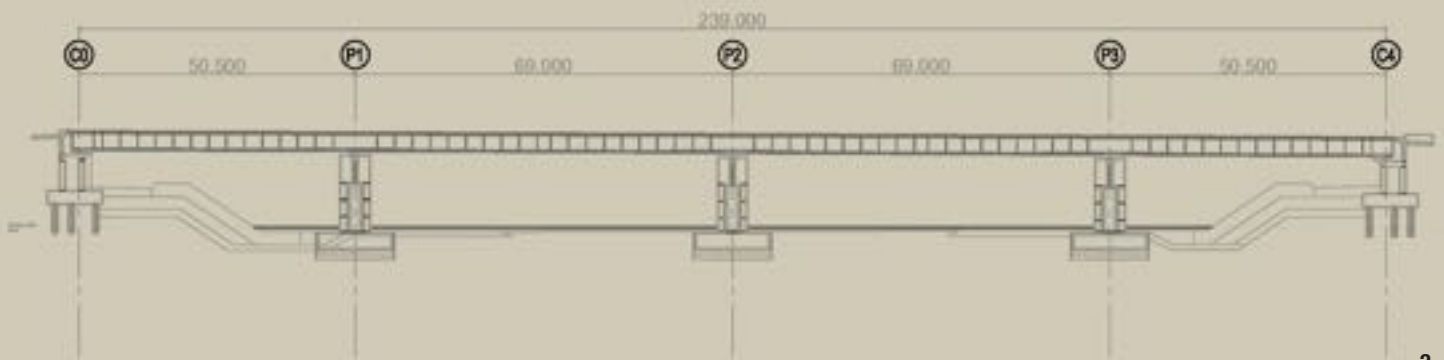
Le profil en travers est en toit, légèrement décalé par rapport à l'axe de l'ouvrage, et présentant une pente de 2,5%.

### GÉOLOGIE

La géologie du site est composée de blocs basaltiques de grandes dimensions et de galets dans une matrice sablo-graveleuse, altérée ou indurée. ▷



## COUPE LONGITUDINALE DE L'OUVRAGE



3

### APPUIS

Les hauteurs des piles varient de 16,20 à 17,08 m.

Elles sont fondées superficiellement sur un béton de blocage ancré dans le substratum.

Leurs fûts sont de section elliptique et creuse. Le point fixe de l'ouvrage est localisé sur la pile P3.

Les culées sont fondées sur des pieux réalisés sur les digues construites dans le cadre d'un autre marché du projet de la NRL (figure 4).

### TABLIER

Le tablier est, à l'image des viaducs d'accès au pont de Normandie ou du viaduc de Saint-Cloud, composé d'un caisson en béton précontraint à 4 âmes. La précontrainte est double : longitudinale et transversale.

Ce type de section permet de combiner la raideur nécessaire à une finesse rappelant celle d'une aile d'avion.

Malgré sa grande largeur, le tablier offre l'avantage d'une hauteur constante de 3,45 m permettant l'insertion

**3- Coupe longitudinale de l'ouvrage.**

**4- Coupe transversale sur pile.**

**5- Mise en place d'une hauteur de virole de la pile P2.**

**6- Ferrailage de la semelle de la pile P2 au sein d'une virole.**

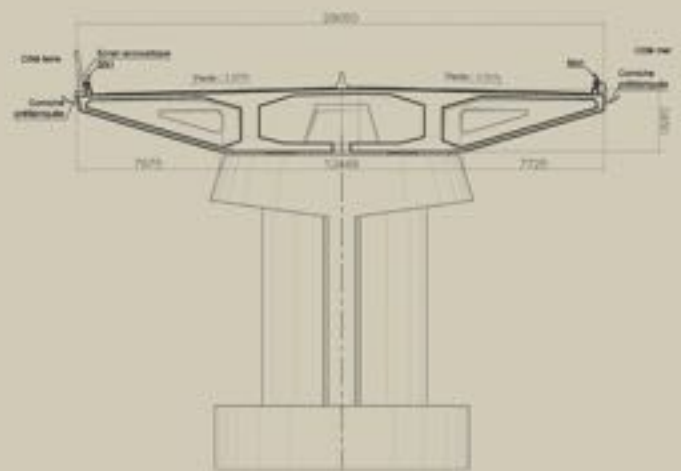
**3- Longitudinal section of the structure.**

**4- Cross section on pier.**

**5- Positioning a collar height for pier P2.**

**6- Reinforcement for the foundation slab of pier P2 in a collar.**

## COUPE TRANSVERSALE SUR PILE



4

© BIEP

tion paysagère discrète souhaité par le cabinet d'architectes Lavigne et Chéron.

C'est le premier ouvrage du genre à être calculé suivant les règles de calcul des Eurocodes, les précédents ayant été réalisés selon le BAEL. Compte

tenue de la complexité de la structure liée à la forme du caisson et à la courbure en plan de l'ouvrage, les calculs du tablier ont été menés à partir d'un modèle tridimensionnel aux éléments finis. Cela a permis de mieux appréhender le comportement du tablier.



5



6

© EIFFAGE GÉNIE CIVIL





© NICOLAS VERCELLINO / PHOTOTHÈQUE RAZEL-BEC

7

## PRÉPARATION DE CHANTIER

La période de préparation de chantier a démarré au 20 janvier 2014. Les travaux préparatoires revêtent pour tout projet une grande importance. Cela est d'autant plus vrai pour ce viaduc situé au droit d'une ravine, dans des

contextes géologique et écologique sensibles, et dont les appuis sont situés à une vingtaine de mètres du rivage. Les reconnaissances complémentaires, impératives dans le cadre de la mission géotechnique de niveau G3 associée aux études d'exécution, n'ont

pu démarrer qu'après l'obtention des diverses autorisations émanant des services de l'État en charge du domaine maritime. Ces derniers ont par ailleurs mis en place une série d'arrêtés préfectoraux maritimes spécifiques pour l'ensemble des travaux de la NRL.

7- Réalisation des pieux des culées selon la méthode du marteau fond-de-trou.

8- Pile P1 terminée.

7- Execution of abutment piles by the down-the-hole drill method.

8- Pier P1 completed.



© RÉGION RÉUNION/JÉRÔME BALLE YDIER/LAURENT DE GEBHARDT

8

Afin de réaliser des sondages pertinents, des exondements en enrochements, prémices aux plateformes de travaux, ont permis un accès à l'aplomb des futurs appuis. Réalisées à l'abri d'un rideau anti-MES (matières en suspension) destiné à confiner les éventuels matériaux fins mis en suspension, ces avancées en mer devaient tenir compte de l'aléa des fortes houles qui peuvent sévir dans cette zone de l'océan Indien.

Dans un contexte environnemental marin agressif, le respect des critères de performance des bétons (durabilité sur une période de plus de 100 ans) a mobilisé plusieurs experts dans la mise au point de formules spécifiques des bétons.

Les valeurs limites de porosité accessible à l'eau, de perméabilité au gaz, la pénétrabilité et la capacité à bloquer la diffusion des ions chlorure ont été étudiées et appliquées dans le processus de formulation puis de fabrication des bétons.

## LES TRAVAUX SEMELLES EN MER

Les semelles des piles en mer ont été réalisées à l'abri de viroles métalliques superposées et mécaniquement assemblées sur site. Leur mise en place a nécessité des terrassements dont l'emprise impactait fortement les zones de travail en raison des faibles pentes de talus constatées : de 3/2 à 4/1 selon l'exposition à la houle.

Par rapport à des batardeaux en palplanches mises en œuvre par battage, la mise en place des viroles engendre peu de nuisances sonores sous-marines. Cette approche nécessite en contrepartie des terrassements plus importants (figure 5).

Afin d'assurer la stabilité de ces batardeaux, un bouchon en béton de 1,90 m d'épaisseur a été ancré dans le substratum par une vingtaine de micropieux de 10 à 20 m de longueur. Ce dispositif, répété pour chaque pile, a permis de s'affranchir des problématiques de sous-pressions induites par la houle (figure 6).

Dans le cas de la pile P2, une anomalie géotechnique a été détectée sous la semelle. Cette lentille limono-sableuse, sans impact sur les tassements attendus de l'ouvrage, a nécessité le prolongement de certains micropieux.

## FONDACTIONS PROFONDES

Contrairement aux piles, les culées C0 et C4 sont respectivement fondées sur 33 et 27 pieux de diamètre Ø 1000. ▷





Les fondations profondes ont été réalisées par la méthode du marteau fond-de-trou tubé à l'avancement, directement sur les remblais des digues.

Le choix de cette méthode s'est imposé pour permettre de traverser les blocs constitutifs des musoirs de digue ainsi que les sols identifiés dans les reconnaissances géotechniques, tout en limitant les risques d'éboulement grâce au chemisage.

La technique retenue consiste à réaliser en continu des percussions et des rotations de la tête de forage afin de briser puis de creuser les blocs et la roche. La présence d'ailettes rétractables sur le taillant a notamment permis (figure 7) :

→ Dans un premier temps de forer un diamètre légèrement supérieur à celui du diamètre extérieur du tube pour faciliter son enfilage ;

→ Puis de remonter l'ensemble de l'outil de forage sans être gêné par le tubage laissé en place jusqu'à la fin du bétonnage.

#### ÉLÉVATIONS DES APPUIS

Chaque fût de pile a été réalisé en une fausse levée de hauteur variable suivie de deux levées successives de 3,10 m.

Un outil unique a servi aux 9 levées de bétonnage de l'ensemble des piles. Il se compose :

→ D'un coffrage en deux parties : une intérieure pour coffrer la partie creuse interne, l'autre pour les parties vues ;

→ De plateformes de travail prenant appuis sur la levée précédente et permettant la pose et le réglage des parties coffrantes.

**9- Alignement des appuis depuis le musoir de la culée C0.**

**10- Stockage des âmes préfabriquées avant montage.**

**9- Alignment of supports from the pier head of abutment C0.**

**10- Storage of prefabricated girders before assembly.**

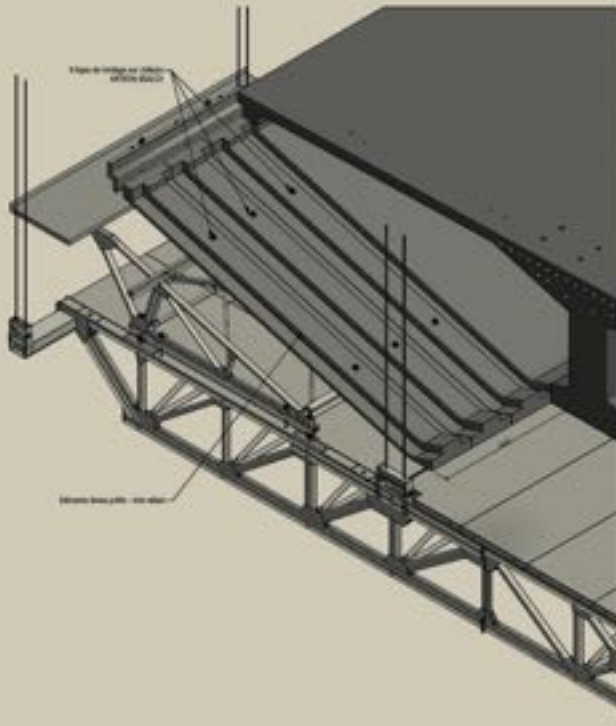
Toutes ces opérations (coffrage, mise en place du ferrailage, décoffrage, et hissage des plateformes de travail) sont réalisées à l'aide des grues à tour ou, ponctuellement, d'une grue mobile de 80 t pour P1 (figure 8).

Les chevêtres, d'une hauteur de 5,0 m, ont été réalisés à l'aide d'un coffrage métallique spécifique. Leur volume de 275 m<sup>3</sup>, combiné à des températures extérieures élevées en journée, ont nécessité de répondre aux contraintes liées à la réaction sulfatique interne (RSI) du béton. La température du béton ne devant pas dépasser 75°C tout au long de la prise, les chevêtres, comme les semelles auparavant, ont été bétonnés de nuit après un malaxage avec des granulats brumisés ou réfrigérés à l'eau glacée. Afin de permettre une vibration efficace en partie inférieure,





## MODÉLISATION DES ÂMES PRÉFABRIQUÉES POSITIONNÉES SUR LE FOND DE MOULE DE L'ÉQUIPAGE MOBILE



**11- Modélisation des âmes préfabriquées positionnées sur le fond de moule de l'équipage mobile.**

**12- Fléau de la pile P2 en cours de réalisation à l'équipage mobile.**

**11- Modelling of prefabricated girders positioned on the back of the mould of the mobile rig.**  
**12- Cantilever section of pier P2 being executed by mobile rig.**

Le phasage de l'ouvrage et les dimensions impliquent une réalisation des murs garde-grève après la mise en tension de la précontrainte extérieure, soit juste avant la phase de pose des équipements et superstructures.

Les culées disposent d'une particularité liée au risque de houle inhérent à la zone : la présence de déflecteurs destinés à réduire les projections d'eau sous l'impact des vagues grâce à leur forme arrondie (figure 9).

Pour diminuer le risque de corrosion des armatures, et en complément des indicateurs pris en compte dans la formulation des bétons, l'ouvrage est doté d'un dispositif de protection cathodique :

- Par anode sacrificielle pour les semelles ;
- Actif par courant imposé pour les élévations de l'ouvrage.

### TABLIER

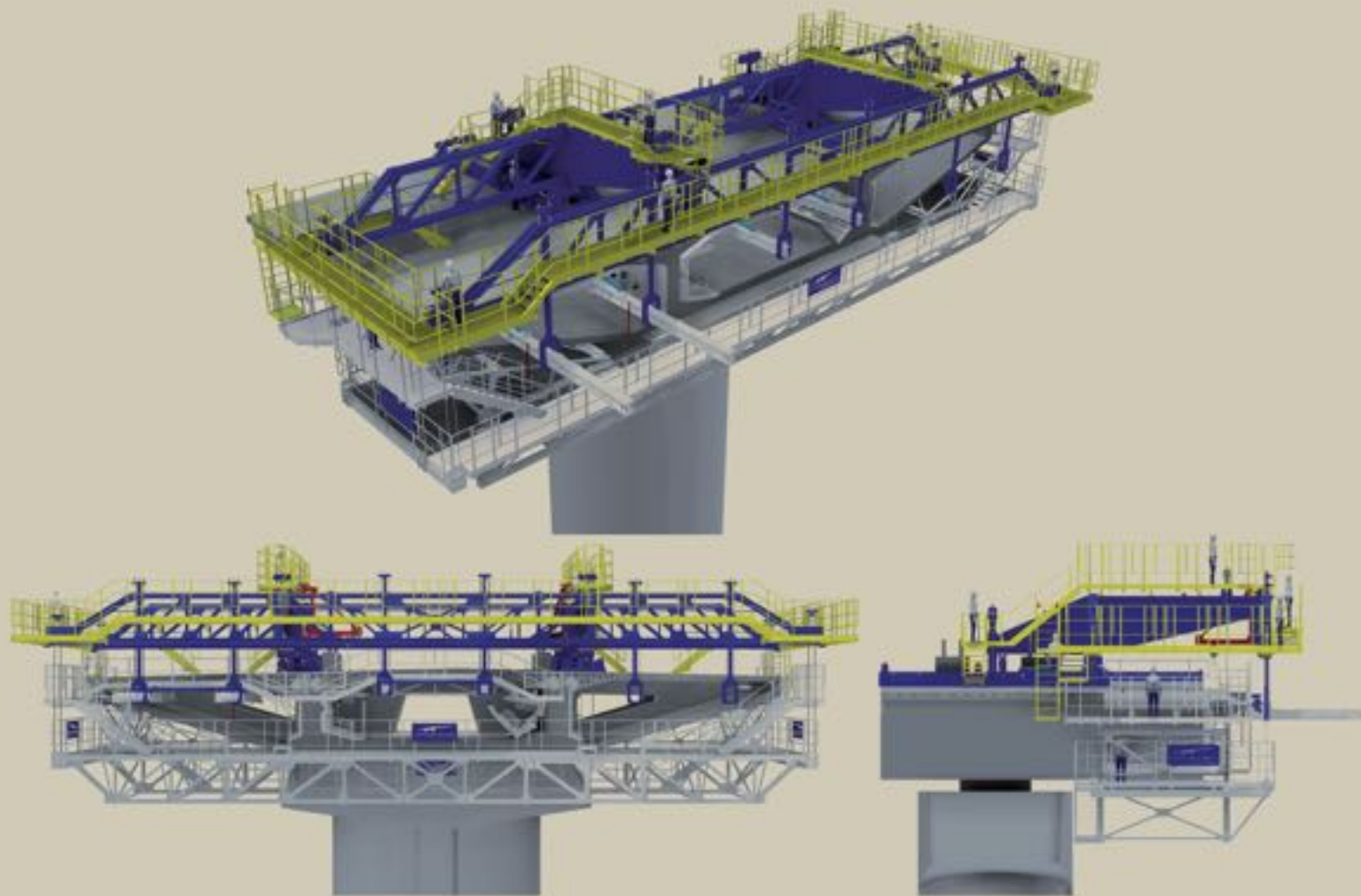
Le tablier est construit par encorbellements successifs de voussoirs coulés en place à l'aide d'équipages mobiles, à partir des piles. Les voussoirs sur piles sont réalisés préalablement à l'aide d'un coffrage spécifique. ▷

des cheminées ont été aménagées dans les armatures.

Chaque culée est constituée d'une semelle, de murs poteaux, puis d'un chevêtre et d'un garde-grève.



## MODÉLISATION 3D D'UN ÉQUIPAGE MOBILE



13

© COFFRAGE EQUIPAGE

Pour les travées de rive, les voussoirs sont construits sur cintre.

Afin de faciliter le bétonnage et d'alléger le ferrailage des nœuds de liaison, le choix des équipes de travaux s'est porté sur la préfabrication des âmes inclinées du caisson du tablier. Du fait de la courbure en plan, les âmes préfabriquées sont plus larges côté terre que côté mer (figures 10 et 11).

Les voussoirs sur piles sont bétonnés en 3 phases. Ils sont renforcés par des entretoises en béton armé et provisoirement clouées dans les chevêtres des piles. Leur longueur, supérieure à celle des voussoirs courants, permet la pose d'une paire d'équipages mobiles. Ces derniers sont ensuite utilisés pour la réalisation par encorbellement des voussoirs de 3,25 m de long et de 56 à 70 m<sup>3</sup> de béton, soit entre 140 et 175 t. Les voussoirs sont bétonnés successivement, puis précontraints

par mise en tension des câbles de fléau jusqu'à la réalisation complète d'un fléau. Un cycle de réalisation d'une paire de voussoirs s'étend sur une semaine (cf. encadré explicatif) (figure 12).

Les extrémités du tablier sont, quant à elles, réalisées sur des étalements lourds (ou cintres) prenant appui sur les plateformes à l'avant des culées (figure 14).

Les différentes parties sont ensuite clavées et solidarisées entre elles

### 13- Modélisation 3D d'un équipage mobile.

#### 13- 3D modelling of a mobile rig.

## CYCLE D'UNE PAIRE DE VOUSSOIRS À L'ÉQUIPAGE MOBILE

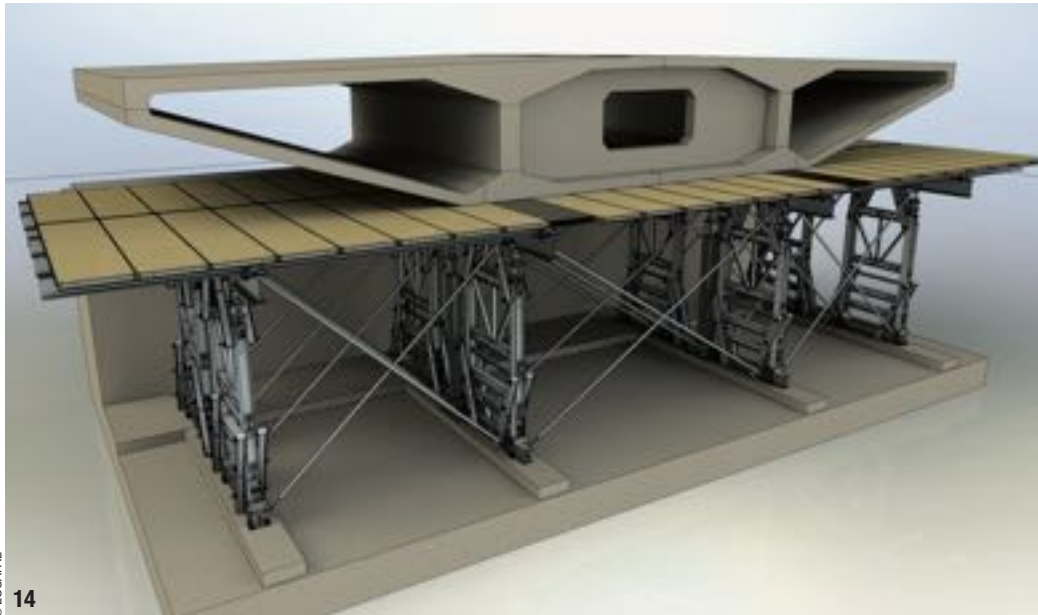
Chaque équipage mobile est composé (figure 13) :

- D'une paire de poutres principales pleines ancrées au voussoir précédent et maintenant l'ensemble de l'outil coffrant lors du bétonnage ;
- De rails permettant leur ripage ;
- De deux poutres transversales en treillis ;
- D'un fond de moule suspendu à l'aide de tiges Macalloy ou Artéon permettant la pose des armatures et des âmes préfabriquées sur des chariots ;
- D'une série de coffrages intérieurs portant sur des poutres tiroirs ;
- D'un ensemble de passerelles permettant une circulation en toute sécurité.

Ils fonctionnent en parallèle, chacun à l'aide d'un système hydraulique dédié. Les réglages de l'équipage avant bétonnage constituent une étape cruciale pour cette méthodologie. Les études d'exécution ont, dans ce cadre, déterminé les flèches à chaque étape de contrôle en tenant compte :

- De l'avancement du chantier et notamment des bétonnages ;
- De l'âge du béton et de sa rhéologie ;
- Des déformations induites par les câbles de précontrainte.





© LOCAPAL  
14

par la mise en tension des câbles de continuité intérieurs au béton (câbles éclisses) et des câbles extérieurs au béton filants sur toute la longueur du tablier.

La précontrainte longitudinale représente un total de 296 câbles 27T15s (fléau, éclisses et extérieurs) et une longueur totale de 8450 m.

Le hourdis supérieur est également précontraint transversalement à l'aide de câbles 5T15s espacés d'environ 45 cm, soit un total de 523 câbles d'une longueur de 29 m.

Les corniches de l'ouvrage, conçues géométriquement comme un caniveau, assurent l'assainissement longitudinal de la chaussée.

Elles sont préfabriquées sur site et clavées dans les encorbellements de l'ouvrage.

**14- Modélisation des cintres.**

**14- Centre modelling.**

## PRINCIPALES QUANTITÉS

**MONTANT DU MARCHÉ :**  
34,6 M€ HT

**PIEUX Ø 1000 :** 1 020 m

**BÉTON :** 13 000 m<sup>3</sup>  
(y compris béton immergé)

**ACIERS HA :** 2 530 t

**ACIERS HR :** 350 t

**ÉTANCHÉITÉ :** 7 100 m<sup>2</sup>

## ENVIRONNEMENT

Le contexte cyclonique de l'île s'est fait sentir dès le week-end du 10 au 12 janvier 2015 au passage du cyclone Bansi, puis de nouveau lors de la tempête Haliba du 10 mars suivant, engendrant des dégradations sur les plateformes et la reprise des travaux de souille.

Située dans un environnement marin sensible, la zone de l'ouvrage a fait l'objet, en temps réel, d'un suivi acoustique en mer ainsi que de mesures de la turbidité.

La présence de Pétrels de Barau, une espèce d'oiseaux marins endémique de l'île, très sensible à la pollution lumineuse, a impliqué des périodes d'interdiction d'éclairage et nécessité l'utilisation de moyens d'éclairage particuliers. □

## PRINCIPAUX INTERVENANTS

**MAÎTRISE D'OUVRAGE :** Région Réunion

**MAÎTRISE D'ŒUVRE :** Egis

**ARCHITECTE :** Cabinet Lavigne et Chéron

**GROUPEMENT :** Eiffage Génie Civil, Razel-Bec, Saipem et Nge Contracting

**PRINCIPAUX SOUS-TRAITANTS :**

- **Fondation profondes :** Spie Fondations
- **Béton :** Terralta
- **Aciers HA :** Welbond
- **Précontrainte :** Eiffage Génie Civil - Via Pontis
- **Appareils d'appuis :** Etic
- **Protection cathodique :** Freyssinet
- **Ancrages :** Rocs
- **Cintres :** Locapal
- **Équipages mobiles :** Coffrage Équipage
- **Coffrages :** Clrm, Cmf et Ersem
- **Études de génie civil et béton armé :** Eiffage Infrastructures - Biep / Razel-Bec - Dtm

## ABSTRACT

### CONSTRUCTION OF THE GRANDE CHALOUPÉ VIADUCT - NEW COASTAL ROAD

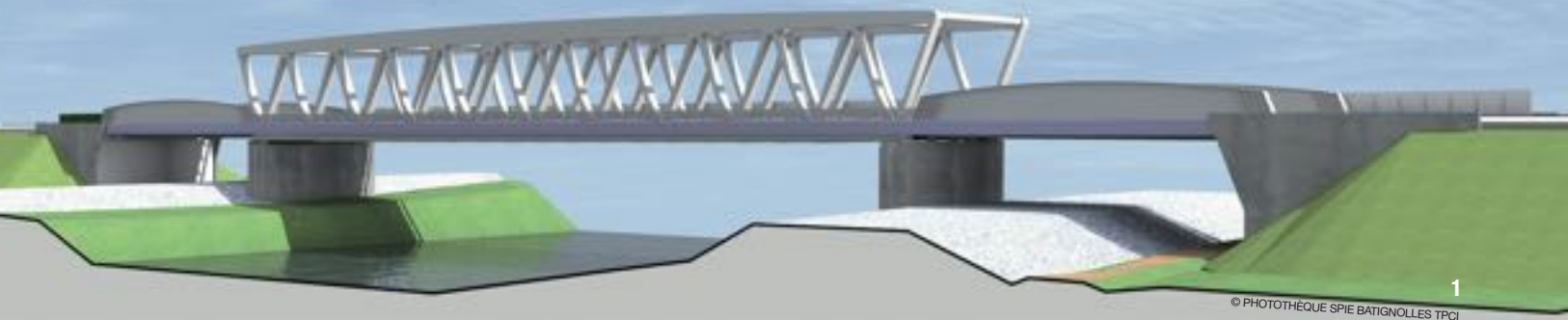
DIDIER KOENIG, EIFFAGE - CHRISTOPHE OUTTERYCK, EGIS JMI - PHILIPPE LECOQ, EIFFAGE - PHILIPPE ROUSSOT, EGIS - SIMON BONTHONNEAU, EIFFAGE.

**The Grande Chaloupe viaduct is a structure 239 metres long, with four spans.** The deck, 29.05 m wide, is formed of a single caisson with four girders bearing on three piers executed at sea in cofferdams, and two abutments supported on pile foundations. Designed to provide access to the gully after which it is named, this is the key structure of the New Coastal Road (NRL - RN1) which will eventually link Saint Denis and La Possession on Reunion Island. Executed by a consortium led by Eiffage Génie Civil, the prestressed concrete deck is built by balanced cantilever method. It combines prefabrication and concrete cast in situ by a mobile rig. A perfect match was found between the design, the work methods and the requirements of the project manager, with regard to sustainability, safety and environmental protection. □

### CONSTRUCCIÓN DEL VIADUCTO DE LA GRANDE CHALOUPÉ: NUEVA CARRETERA DEL LITORAL

DIDIER KOENIG, EIFFAGE - CHRISTOPHE OUTTERYCK, EGIS JMI - PHILIPPE LECOQ, EIFFAGE - PHILIPPE ROUSSOT, EGIS - SIMON BONTHONNEAU, EIFFAGE.

**El viaducto de la Grande Chaloupe es una obra en cuatro tramos de 239 m de longitud.** El tablero, de 29,05 m de ancho, está formado por un mono-artesón con 4 almas portantes sobre 3 pilares realizados en el mar en el interior de ataguías y dos estribos sustentados sobre pilotes. Diseñado para comunicar el barranco que le da nombre, es la obra central de la nueva carretera del litoral (NRL - RN1), que una vez inaugurada unirá Saint Denis y La Possession, en la isla de la Reunión. Realizado por un consorcio de empresas liderado por Eiffage Génie Civil, el tablero de hormigón pretensado se está construyendo por ménsulas sucesivas. Combina prefabricación y hormigón en obra con un encofrado móvil. Se ha logrado una perfecta adecuación entre el proyecto, los métodos de ejecución y las exigencias del contratista en términos de durabilidad, seguridad y protección del medio ambiente. □



1  
© PHOTOTHÈQUE SPIE BATIGNOLLES TPCI

# LGV CNM VIADUC DU VIDOURLE

AUTEURS : YI ZHANG, INGÉNIEUR D'ÉTUDES, SPIE BATIGNOLLES TPCI - SYLVAIN BOIREAU, INGÉNIEUR D'ÉTUDES, SECOA - DOMINIQUE REGALLET, DIRECTEUR TECHNIQUE, OC'VIA CONSTRUCTION - BRUNO FOURNIER, RESPONSABLE SERVICE MÉTHODES, SPIE BATIGNOLLES TPCI - VINCENT BEAUDOU, RESPONSABLE TRAVAUX, OC'VIA CONSTRUCTION

D'UNE LONGUEUR DE 80 KM, LA NOUVELLE LIGNE À GRANDE VITESSE (LGV) DU CONTOURNEMENT DE NÎMES ET MONTPELLIER (CNM) EST LA PREMIÈRE LIGNE MIXTE LGV EN FRANCE QUI PERMET D'ACCUEILLIR AUSSI BIEN DES TRAINS DE VOYAGEURS QUE DU TRAFIC FRET. CETTE LIGNE FRANCHIT LE FLEUVE CÔTIER LE VIDOURLE SUR LE VIADUC DU VIDOURLE, UN OUVRAGE EMBLÉMATIQUE DE 159 M DE LONG COMPOSÉ D'UN PONT DE TYPE WARREN (OUVRAGE MIXTE ACIER/BÉTON CONSTITUÉ D'UNE STRUCTURE MÉTALLIQUE FERMÉE DE TYPE TREILLIS) ET DE DEUX PONTS D'ACCÈS DE TYPE RAPL (PONT RAIL À POUTRES LATÉRALES).

## CONTEXTE SITUATION

Le viaduc du Vidourle permet à la LGV CNM de franchir le Vidourle, un fleuve côtier des Cévennes, traversant les communes de Lunel et Aimargues, à cheval sur les départements du Gard et de l'Hérault.

## GÉOLOGIE

Dans la zone du viaduc, des formations géologiques ont été identifiées telles que du limon, de l'argile et des calcaires marneux.

## SISMICITÉ

Le viaduc est situé en zone de sismicité faible. Les ouvrages de la ligne LGV sont en catégorie d'importance III. La classe du sol est E (les alluvions récentes avec l'ordre de 10 m d'épaisseur sur les calcaires marneux).

## HYDROLOGIE

Dans la zone du viaduc, le lit mineur est d'environ 50 m de large pour une profondeur moyenne de 10 m. Le débit du Vidourle retenu pour le projet CNM est de 2 400 m<sup>3</sup>/s, il correspond à la grande crue de l'année 2002.

## PRÉSENTATION DE L'OUVRAGE

La LGV CNM est la première ligne à grande vitesse mixte en France.

La vitesse de conception est de 350 km/h pour les trains de voyageurs et de 120 km/h pour les trains de marchandises.

Le viaduc du Vidourle doit supporter deux voies de la LGV.

De plus, des contraintes existent pour assurer la transparence hydraulique de l'ouvrage.

Elles exigent de ne pas créer d'obstacles à l'écoulement des eaux en cas de crue du Vidourle, connu pour ses « vidourlades », qui sont des crues violentes et spectaculaires.

Au final, le projet d'un pont principal Warren avec deux ponts d'accès RaPL a été retenu, portant également une solution architecturalement élégante (figure 1).

Le pont Warren a une portée de 90 m et une hauteur maximale de 12,5 m (élançement 1/7).

Les deux ponts RaPL ont chacun une portée de 31,5 m et une hauteur maximale de 5,5 m (élançement 1/6).

1- Vue perspective architecturale.

1- Architect's perspective view.

## TRACÉ EN PLAN ET PROFIL EN LONG

Le tracé de la LGV dans la zone du viaduc s'inscrit dans un rayon de 10 000 m (figure 2).

Le profil en long suit une pente ascendante à 0,8% de Nîmes vers Montpellier (figure 3).

Les axes du viaduc sont conçus en alignement droit, moyennant une légère surlargeur et un raccord biais entre les axes des ponts RaPL et l'axe du pont Warren.

## LARGEUR UTILE ET PROFIL EN TRAVERS

La largeur totale du tablier est de 14,1 m (figure 4), elle permet l'intégration du tracé en plan de la LGV. L'entraxe des voies est de 4,8 m.

Le dévers du tablier est défini par un profil en toit de 2,5%.

## MATÉRIAUX

Les aciers de l'ossature métallique sont de nuance S355 K2+N, N ou NL suivant l'épaisseur.

La charpente est protégée par un système anticorrosion ACQPA C4ANV pour les parties inférieures des poutres et entretoises qui ont reçu une couche de métallisation.

Les goujons de nuance S235 J2G3 + C450 assurent la liaison entre l'ossature métallique et le béton.

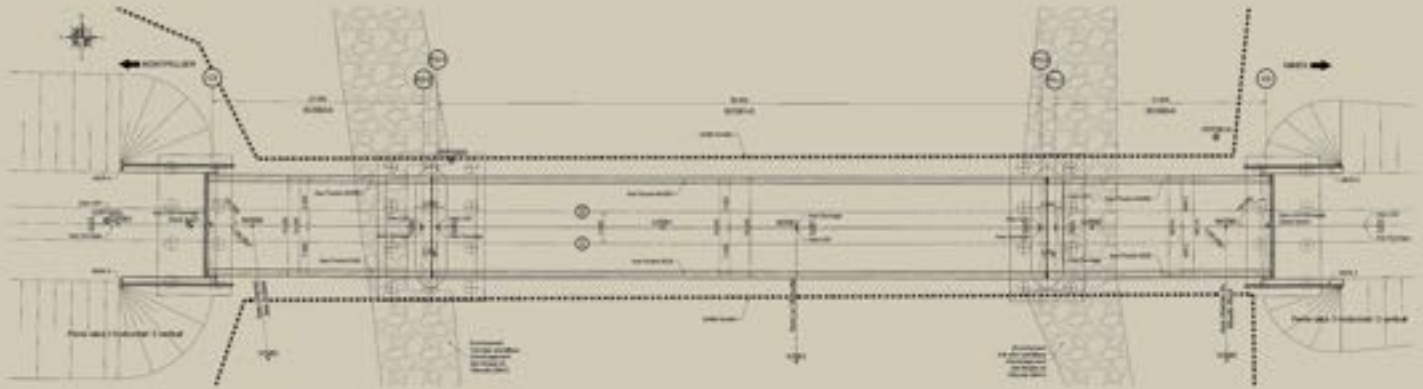
Le béton du hourdis est de type C35/45 avec les classes d'exposition XC4/XF1, celui des élévations des piles est C30/37 XC4/XF1. Le béton des semelles, des culées et des fondations profondes est de C30/37 XC4/XA1.

## CONCEPTION DE L'OUVRAGE CHOIX DES POINTS FIXES

La solution avec les points fixes sur les piles P2 et P1 a été retenue (figure 5). Pour le pont Warren, le point fixe est sur la pile P2 (côté Montpellier). Cette pile s'appuie sur une semelle de 3,5 m d'épaisseur avec 12 pieux de diamètre

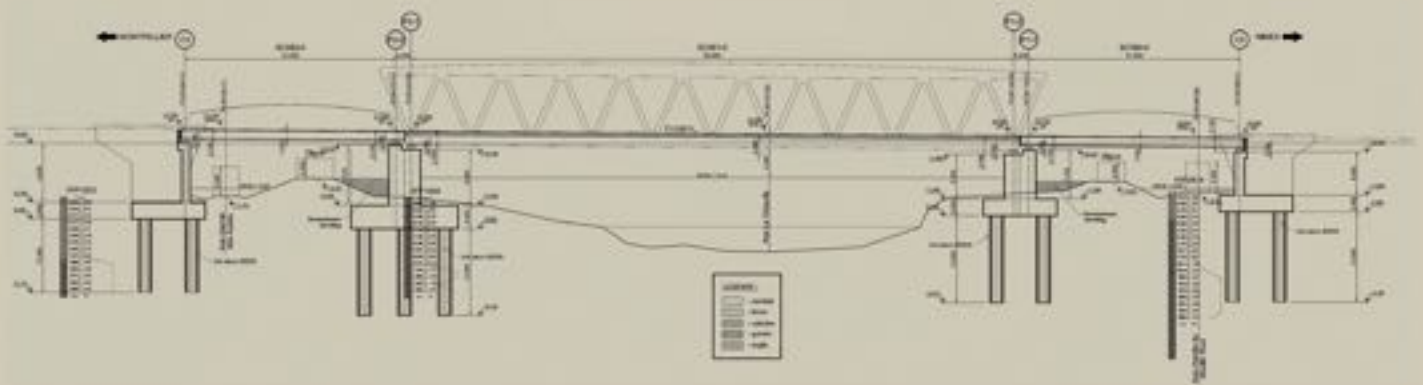


## VUE EN PLAN



2

## COUPE LONGITUDINALE DANS L'AXE DE L'OUVRAGE

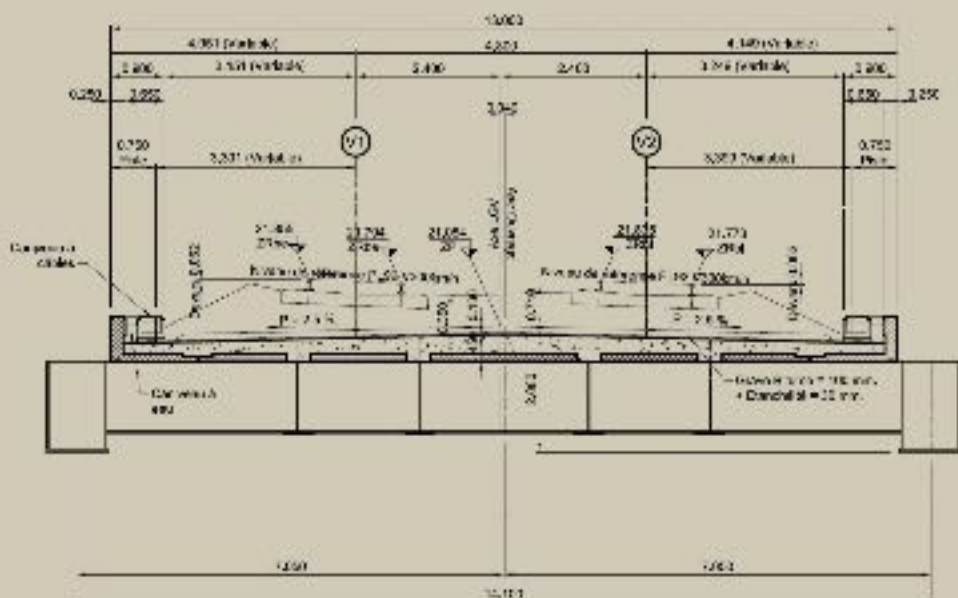


3

© PHOTOTHÈQUE SPIE BATIGNOLLES TPCI

## COUPES TRANSVERSALES (zones Warren et RaPL)

(zones Warren et RaPL)



4

© PHOTOTHÈQUE SPIE BATIGNOLLES TPCI

2- Vue en plan.  
3- Coupe longitudinale dans l'axe de l'ouvrage.  
4- Coupes transversales (zones Warren et RaPL).

2- Plan view.  
3- Longitudinal section in the centreline of the structure.  
4- Cross sections (Warren and side girder rail bridge zones).

2,0 m. Les pieux ont une longueur de 13 m, ancrés dans la couche portante constituée des calcaires marneux. Cette dimension importante de la pile P2 permet d'assurer, d'une part, le respect du critère de déplacement horizontal du tablier sous freinage-démarrage du train (5 mm maximum sous un effort de 6000 kN) et, d'autre part, la reprise des efforts sismiques (21 500 kN dans la direction longitudinale).

Compte tenu de sa longueur dilatable de 90 m, un joint point mobile (joint couteau) est disposé sur la pile P1, permettant la libre dilatation du tablier. Pour le pont RaPL côté Montpellier, le point fixe se trouve sur la pile P2, un joint couteau est mis en place sur la culée C3. Un joint point fixe est mis en place sur la pile P2.

Pour le pont RaPL côté Nîmes, le point fixe est sur la pile P1 avec un joint couteau sur la culée C0. La pile P1 s'appuie sur une semelle de 2,5 m d'épaisseur avec 8 pieux de diamètre 2,0 m. Les pieux ont également une longueur de 13 m, ancrés dans la couche portante des calcaires marneux.

### DISPOSITIF PARASISMIQUE

Pour le pont Warren, la conception parasismique consiste à reprendre les efforts sismiques à l'aide des appareils d'appui à pot et des butées anti-sismiques sur les piles P1 et P2 (figure 6). Les appareils d'appuis fixes reprennent les efforts horizontaux en service y compris les efforts sismiques à l'ELS, les butées anti-sismiques ne reprennent que les efforts horizontaux à l'ELU sismique (trop importants pour être repris par les appareils d'appui à pot). Pour les ponts RaPL, les efforts sismiques sont repris uniquement par les appareils d'appui sur les piles et culées, à l'ELS et à l'ELU.

### PILES ET CULÉES

L'ensemble des appuis est réalisé en béton armé.

La tête des piles P1 et P2 possède deux arases supérieures qui accueillent deux tabliers différents.

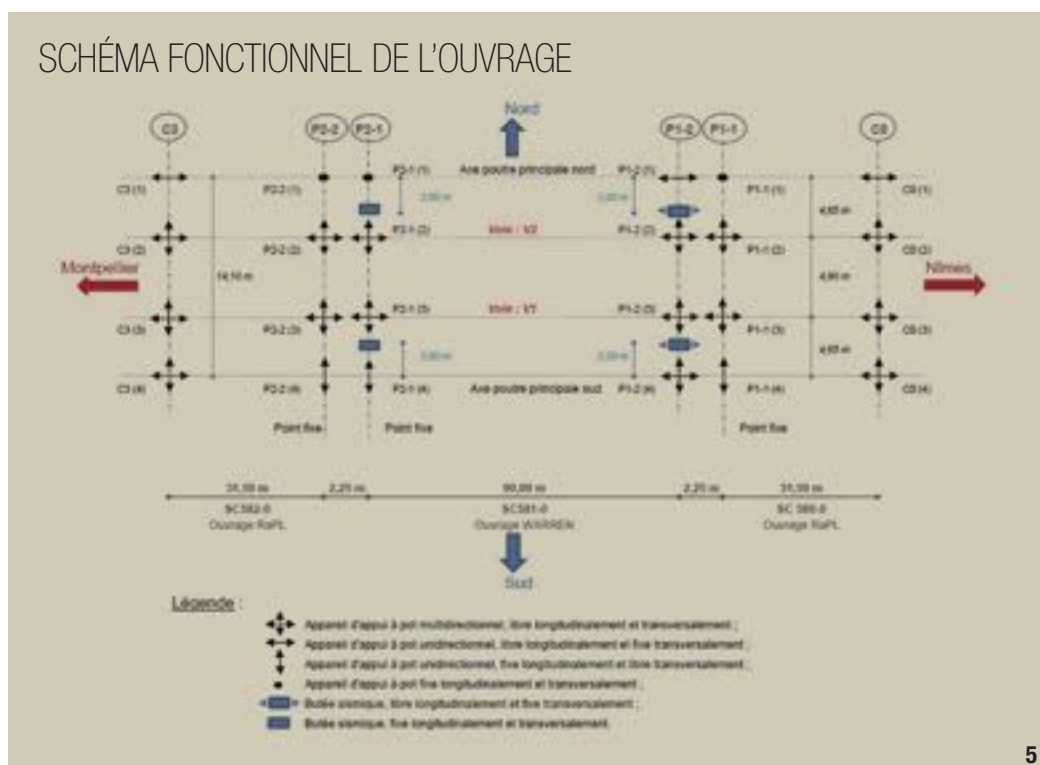
Sa surface permet de loger 8 appareils d'appui, 2 butées anti-sismiques et 6 zones de vérinage (figure 7).

De plus, la pile P2 a été dimensionnée pour porter une béquille métallique en phase travaux, qui sert à l'appui provisoire du pont Warren lors de lancement de la charpente. Deux vérins de lancement sont installés sur la pile P1 qui a été dimensionnée pour reprendre les efforts de lancement.

Les culées C0 et C3 sont fondées sur 8 pieux de diamètre 2,0 m qui ont respectivement une longueur de 13,5 m et 11 m, fichés dans les calcaires marneux. Le mur de front (y.c. le mur garde grève) a une hauteur de 10,8 m pour la culée C3 (figure 8).

### TABLIER MÉTALLIQUE ET HOURDIS

Pour le pont Warren, le tablier métallique comprend (figure 9) :



→ Deux poutres principales métalliques PRS de type Warren avec une hauteur variable de 11,5 m à 12,5 m.

→ Des entretoises transversales PRS au niveau des membrures inférieures des poutres principales avec :

- Un espacement de 4,5 m ;
- Une hauteur de 1,2 m pour pièces de pont courantes et de 1,5 m pour pièces de pont sur piles correspondant à la hauteur des membrures inférieures des poutres latérales treillis.

### 5- Schéma fonctionnel de l'ouvrage.

### 6- Bossages et butées anti-sismiques sur la pile P2.

### 5- Block diagram of the structure.

### 6- Anchor blocks and earthquake-resistant thrust stops on pier P2.

→ Quatre longerons longitudinaux PRS solidarissant les entretoises entre elles au niveau des voies avec une hauteur de 1,2 m.

→ Des butons transversaux en tube au niveau des membrures supérieures des poutres principales avec :

- Un espacement de 9 m ;
- Un diamètre extérieur Ø 711 mm et une épaisseur de 16 mm.

Le hourdis du pont Warren est une dalle en béton armé posée sur les entretoises et les longerons métalliques inférieurs. Cette dalle est constituée de 140 prédalles collaborantes clavées sur les entretoises, avec des attentes en boucle assurant le recouvrement des armatures. Le hourdis présente un dévers en toit constant à 2,5%. L'épaisseur du hourdis à l'axe de l'ouvrage est de 0,45 m. La corniche-caniveau se trouve à l'extérieur de la charpente métallique afin d'optimiser la largeur du hourdis.

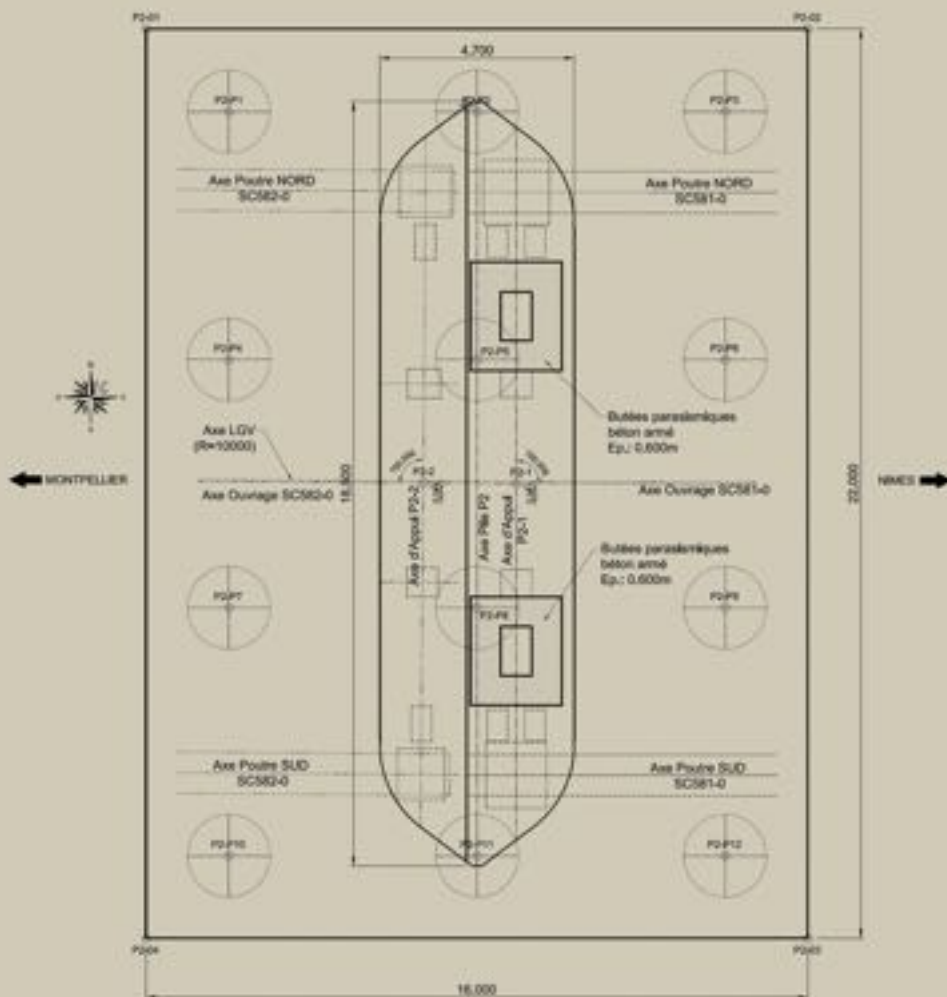
Pour les ponts RaPL, la hauteur des poutres métalliques latérales varie de 3,5 m à 5,5 m. Les poutres latérales sont raidies verticalement tous les 2,1 m sur la face intérieure. Le faible élanement des poutres (1/6) est le résultat des études dynamiques (voir chapitre vérifications de l'ouvrage).

Le hourdis des ponts RaPL est constitué de poutrelles enrobées dans le béton, qui portent transversalement de poutre latérale à poutre latérale (figure 10). On distingue :





## VUE EN PLAN DE LA PILE P2



7- Vue en plan de la pile P2.

8- Culée C3 lors de bétonnage du mur frontal.

7- Plan view of pier P2.

8- Abutment C3 during concreting of the front wall.

- Les entretoises principales, constituées de HEA 900 espacés de 2,1 m, assemblées sur les raidisseurs verticaux et sur la semelle inférieure des poutres latérales ;
- Les entretoises secondaires, constituées de HEA 900 espacés de 0,7 m, assemblées sur l'âme des poutres latérales ainsi que sur le dessus de leurs semelles ;
- Les pièces de pont sur piles et culées, constituées de PRS renforcés pour permettre le vérinage des ouvrages à proximité des poutres latérales.

Les âmes des entretoises HEA 900 sont prévues avec des trous de diamètre 100 mm espacés tous les 20 cm et alignées sur deux lits : un lit en partie supérieure et un lit en partie inférieure. Ces trous sont nécessaires pour le passage et le recouvrement du ferrailage passif du tablier et notamment pour transmettre les efforts de séisme. Les âmes des entretoises sur culée sont prévues avec des trous de diamètre 50 mm espacés tous les 20 cm. Le hourdis des ponts RaPL présente un dévers en toit constant à 2,5%. L'épaisseur du hourdis à l'axe de l'ouvrage est de 1,18 m.

### VÉRIFICATIONS DE L'OUVRAGE

Pour les études génie civil de lignes mixtes, les applications des Eurocodes font l'objet des spécifications suivantes :

- Le coefficient  $\alpha = 1,33$  est appliqué aux modèles de charge LM71 et SW/O ;
- Le coefficient  $f = 1$  est appliqué aux trains de fret circulant à la vitesse de 140 km/h.

Le dimensionnement et la stabilité du viaduc du Vidourle sont vérifiés par les calculs statiques, effectués à l'aide du logiciel ST1 développé par le Cerema. Deux modèles ST1 distincts ont été réalisés respectivement pour le pont Warren et le pont RaPL.





9



10

9- Tablier métallique du pont Warren.

10- Hourdis du pont RaPL en bétonnage.

11- Vitesses retenues pour les calculs dynamiques avec masses en fourchette basse du pont RaPL.

12- Modèle ST1 des calculs sismiques.

9- Steel deck of the Warren bridge.

10- Top slab of the side girder rail bridge during concreting.

11- Speeds adopted for dynamic calculations with bottom-of-range masses for the side girder rail bridge.

12- ST1 model of seismic calculations.

Les contreflèches des poutres sont calculées sous charges permanentes nominales à long terme.

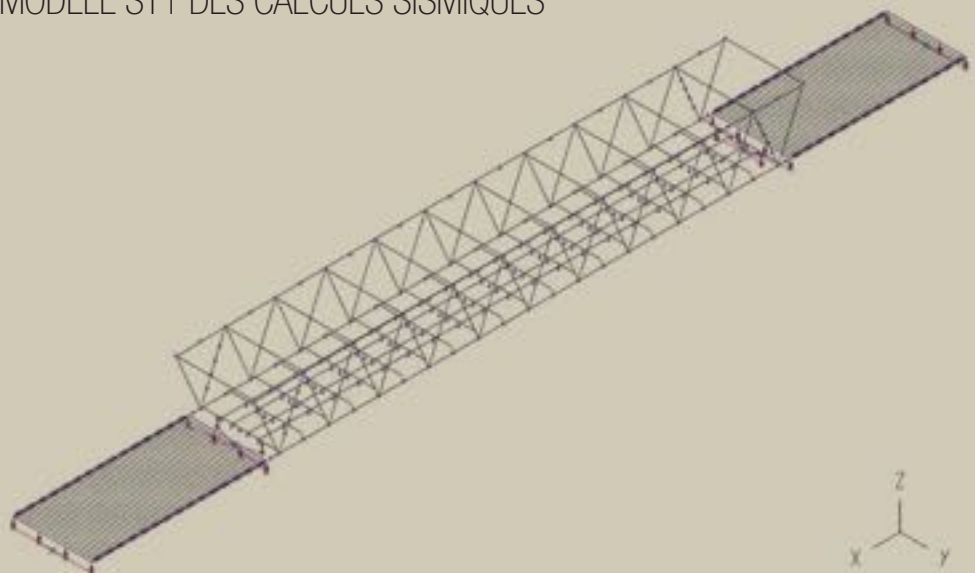
De plus, aucun appareil de dilatation de voie n'est utilisé aux extrémités des tabliers pour les longs rails soudés, du fait que la longueur dilatable de chaque ouvrage est inférieure à 90 m (longueur dilatable admissible sans appareil de dilatation pour un tablier mixte selon Eurocode1-2). Une étude complète d'interaction rails-structure est donc

## VITESSES RETENUES POUR LES CALCULS DYNAMIQUES avec masses en fourchette basse du pont RaPL

VITESSES RETENUES POUR LE CALCUL AU PASSAGE DES TRAINS (km/h)											
N° de vitesse	TGV FATIGUE	HSLM-A1	HSLM-A2	HSLM-A3	HSLM-A4	HSLM-A5	HSLM-A6	HSLM-A7	HSLM-A8	HSLM-A9	HSLM-A10
vitesses de base	360	360	350	360	360	360	360	360	360	360	360
	-	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400
	-	420	420	420	420	420	420	420	420	420	420
vitesses critiques	300	288	304	320	336	352	368	384	400	416	432
	-	144	152	160	168	176	184	192	200	208	216
	-	244	257	271	285	298	312	325	339	352	366
	-	270	285	300	315	330	345	360	375	390	-
	-	338	356	375	394	413	-	-	-	-	-
	-	393	415	-	-	-	-	-	-	-	-
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

11

## MODÈLE ST1 DES CALCULS SISMICIQUES



12



**13- Culé C0 avec plateforme de montage.**

**14a- Assemblage charpente métallique Warren.**

**14b- Assemblage charpente RaPL côté Nîmes plus vérins de retenue.**



© PHOTOTHÈQUE CCVIA  
13

**13- Abutment C0 with assembly platform.**

**14a- Assembly of Warren steel frame.**

**14b- Assembly of side girder rail bridge frame at Nîmes end plus restraining jacks.**

menée pour les justifications du tablier, des appuis et des rails à l'aide du logiciel Robot de l'Autodesk. Enfin, l'ouvrage est vérifié vis-à-vis du passage des trains et de différents séismes.

#### CALCULS DYNAMIQUES

Les calculs dynamiques sont réalisés en prenant compte d'une fourchette des masses. Le modèle HSLM-A est

retenu pour le modèle des trains dynamiques. Il est conduit pour une vitesse nominale de 350 km/h et une vitesse maximale potentielle de 420 km/h mais également pour une série de vitesses critiques (figure 11). Au total, dix trains types avec les vitesses appropriées sont considérés.

Les calculs dynamiques sont effectués à l'aide du logiciel PCP développé par le Cerema. Deux modèles PCP distincts

ont été réalisés respectivement pour le pont Warren et le pont RaPL.

Les calculs dynamiques sont conduits au moyen d'une analyse temporelle. Ils permettent de vérifier l'accélération et les déformations des voies, ainsi que la fatigue sous le passage des trains. Pour le pont Warren, l'accélération verticale maximale des voies de  $3,2 \text{ m/s}^2$  est obtenue sous le convoi HSLM-A5 à vitesse critique de 420 km/h en fourchette basse des masses.

Pour le pont RaPL, l'accélération verticale maximale des voies de  $3,5 \text{ m/s}^2$  est obtenue sous le convoi HSLM-A10 à vitesse critique de 407 km/h en fourchette haute des masses. Les études dynamiques mettent en évidence que la portée isostatique de 31,5 m pour un RaPL est assez défavorable. En effet nous avons été amenés à augmenter la hauteur des poutres pour respecter le critère d'accélération maximale sous chargements dynamiques.

#### CALCULS SISMISTIQUES

Le viaduc est situé en zone de sismicité faible ( $a_{gr} = 0,7 \text{ m/s}^2$ ). Sous les actions sismiques de calcul, le comportement du viaduc doit être élastique. Le coefficient de comportement est pris égal à 1. Deux séismes sont pris en compte :

- Action sismique à l'état limite ultime (coefficient d'importance  $\gamma_1 = 1,2$ ) ;
- Action sismique à l'état limite de service (coefficient d'importance  $\gamma_1 = 0,585$ ).

Les points fixes de chacun des viaducs sont positionnés sur les piles communes P1 et P2. L'ensemble des 3 viaducs est modélisé avec le logiciel ST1 du Cerema (figure 12). Les analyses sismiques sont effectuées avec une fourchette des raideurs sismiques des appuis. ▽



© PHOTOTHÈQUE SPIE BATIGNOLLES TPCI  
14a



© PHOTOTHÈQUE SPIE BATIGNOLLES TPCI  
14b

Les calculs sismiques sont conduits au moyen d'une analyse spectrale multimodale, les réponses modales sont combinées par combinaisons quadratiques complètes. Le nombre de mode obtenu pour l'analyse sismique couvre au moins 90% des masses dans chacune des directions étudiées.

À l'ELU sismique, la valeur maximale de l'effort sismique longitudinal (direction X) calculée est de 13000 kN pour le pont Warren, et de 9500 kN pour le pont RaPL. La valeur maximale de l'effort sismique transversal (direction Y) calculée est de 6000 kN pour le pont Warren, et de 6500 kN pour le pont RaPL.

De plus, ces calculs sismiques permettent de vérifier l'accélération et les déformations du tablier à l'ELS sismique.

### RÉALISATION DE L'OUVRAGE

La durée totale des travaux est de 24 mois. Débutés en janvier 2014, les travaux du génie civil s'achèvent en janvier 2016.

### EXÉCUTION DES APPUIS

Les pieux ont été réalisés en foré tubé. Les fouilles des appuis (piles et culées) ont été épuisées par la mise



14c

© PHOTO THÉQUE SPIE BANGNOLLES TFCI

**14c- Vérins de traction sur la pile P1.**

**14d- Au cours de lançage.**

**14e- Pose charpente RaPL côté Montpellier par grue.**

**14f- Appareils d'appui définitifs à grain sphérique.**

**14g- Charpente métallique mise en place.**

**14c- Tensioning jacks on pier P1.**

**14d- During launching.**

**14e- Placing side girder rail bridge frame at Montpellier end by crane.**

**14f- Spherical-grain final support devices.**

**14g- Steel frame placed in position.**

en place d'un drainage périphérique et de pompes.

Les fûts des piles ont été coulés à l'aide d'un coffrage outil spécifique en bois associé à un train de banches de coffrage métalliques. Les élévations des culées ont été réalisées classiquement à l'aide de banches de coffrage métalliques transportables par colis.

Après achèvement du mur de front des culées et des murs en retour associés,

les blocs techniques ainsi que les remblais contigus ont été réalisés jusqu'au niveau du sommet des culées. Pour la culée C0, ce niveau correspond au niveau de la plate-forme de montage (figure 13).

### LANÇAGE DE LA CHARPENTE MÉTALLIQUE

La plate-forme de montage, d'une largeur de 22 m et d'une longueur



14d



14e

© PHOTO THÉQUE OC'VA



14f



14g

© PHOTO THÉQUE OC'VA



de 166 m, a été placée derrière la culée C0. Elle suit la pente ascendante à 0,8% de Nîmes vers Montpellier. Le franchissement du cours d'eau a nécessité l'utilisation d'un avant-bec de 40 m de long et de 15,1 m de large.

Les pièces de la charpente métallique ont été fabriquées dans l'atelier suisse de Zwahlen & Mayr, et transportées sur place en convois routiers. La charpente métallique a été assemblée sur la plate-forme de montage et mise en place suivant les principales phases suivantes :

- Les tronçons de la charpente du pont Warren sont assemblés, soudés et mis en peinture sur les appuis de lancement installés sur la plate-forme ;
- Les tronçons de la charpente du pont RaPL côté Nîmes sont assemblés, soudés, mis en peinture sur les appuis de lancement et liés aux poutres Warren par articulation ;
- La béquille provisoire est installée sur la pile P2, les deux vérins de traction sont mis en place sur la pile P1, et les deux vérins de retenue sont installés sur la plate-forme derrière le pont RaPL ;
- La charpente métallique est lancée avec une cinématique de plusieurs phases (les 9 phases d'avancement sont intercalées avec des phases de vérinage permettant de modifier les conditions d'appui au fur et à mesure de lancement) ;
- La charpente du pont RaPL côté Montpellier est posée par une grue mobile ;
- Les appareils d'appui définitifs de type à grain sphérique sont mis en place ;
- La charpente est descendue sur les appareils d'appui par vérinage.



15  
© PHOTOTHÈQUE OC'VIA

En juin 2015, la charpente métallique du pont Warren et du pont RaPL côté Nîmes (y.c. le coffrage Viroc et une partie de ferrailage du hourdis) a été lancée ensemble de C0 vers C3 pour franchir Le Vidourle (figures 14a à 14g). Les deux ouvrages sont liés par des articulations d'axe transversal. Le poids de la charpente lancée est de 1 600 t avec une longueur de 120 m (soit environ 13 t/m).

#### EXÉCUTION DU HOURDIS

Pour le pont Warren, les prédalles sont mises en place à la grue entre butons transversaux, le bétonnage du hourdis du pont Warren est effectué en une seule phase. Pour les ponts RaPL, le bétonnage du hourdis s'est fait classiquement en deux phases pour ne pas solliciter excessivement la charpente métallique. La première phase a consisté à bétonner les premiers 25 cm. Le reste du tablier a été bétonné par la suite. En août 2015, les équipes des travaux ont bétonné les 91,6 m de longueur du tablier du pont Warren, ainsi que les 33,5 m de longueur du tablier des ponts RaPL aux extrémités. 1 320 m<sup>3</sup> de béton ont été nécessaires pour couvrir la totalité du tablier.

#### MISE EN ŒUVRE DE L'ÉTANCHÉITÉ ET DES SUPERSTRUCTURES

L'étanchéité du tablier est obtenue par la mise en œuvre d'une chape préfabriquée adhérente protégée par une couche de bitume de 2,5 cm. Les superstructures ferroviaires (couche de grave bitume de 10 cm, ballast et voie) sont disposées directement sur le tablier permettant d'obtenir le niveau de rail. □

15- Viaduc du Vidourle.

15- Vidourle viaduct.

### PRINCIPALES QUANTITÉS

**LONGUEUR : 159 m**

**TERRASSEMENTS :**

- Blocs techniques : 7 700 m<sup>3</sup>

**PIEUX :**

- Forage : 456 m de Ø 2,0 m

- Béton : 1 433 m<sup>3</sup>

- Aciers passifs : 275 t (192 kg/m<sup>3</sup>)

**APPUIS (PILES ET CULÉES) :**

- Béton : 5 100 m<sup>3</sup>

- Aciers : 880 t (173 kg/m<sup>3</sup>)

**TABLIER (HOURDIS) :**

- Béton : 1 530 m<sup>3</sup>

- Aciers : 260 t (170 kg/m<sup>3</sup>)

**CHARPENTE MÉTALLIQUE :**

- Aciers : 1 975 t

### PRINCIPAUX INTERVENANTS

**MAÎTRE D'OUVRAGE :** Oc'Via et Réseau Ferré de France (Partenariat Public Privé)

**MAÎTRE D'ŒUVRE INTÉGRÉ :** Systra

**ARCHITECTE :** Alain Spielmann

**GROUPEMENT CONSTRUCTEUR**

**TERRASSEMENT ET GÉNIE CIVIL :** Oc'Via Construction

**CHARPENTE MÉTALLIQUE :** Zwahlen & Mayr

**APPAREILS D'APPUI :** Mageba

**ÉTUDES D'EXÉCUTION**

**BUREAU D'ÉTUDES GÉNIE CIVIL :** Spie Batignolles Tpci

**BUREAU D'ÉTUDES CHARPENTE MÉTALLIQUE :** Secoa

### ABSTRACT

#### CNM HSL - VIDOURLE VIADUCT

Y. ZHANG, SPIE BATIGNOLLES TPCI - S. BOIREAU, SECOA - D. REGALLET, OC'VIA CONSTRUCTION - B. FOURNIER, SPIE BATIGNOLLES TPCI - V. BEAUDOU, OC'VIA CONSTRUCTION

**The Vidourle viaduct (CNM HSL)** is a non-standard structure 159 metres long and 14.1 metres wide. It consists of a Warren bridge of 90-metres span and two bridges of the railway bridge type with side girders of 31.5-metre span. The structure is designed to resist passenger and freight train traffic: a braking-starting force of 6,000 kN on the fixed point of pier P2, a maximum potential traffic speed of 420 km/h, and an earthquake of 0.7 m/s<sup>2</sup> generating a maximum longitudinal seismic force of 21,500 kN on pier P2. The steel frame was manufactured in workshop and assembled on-site. It was placed in position by means of launching by jack and placing by crane. □

#### LGV CNM: VIADUCTO DE VIDOURLE

Y. ZHANG, SPIE BATIGNOLLES TPCI - S. BOIREAU, SECOA - D. REGALLET, OC'VIA CONSTRUCTION - B. FOURNIER, SPIE BATIGNOLLES TPCI - V. BEAUDOU, OC'VIA CONSTRUCTION

**El viaducto de Vidourle (LGV CNM)** es una construcción nada habitual de 159 m de longitud y 14,1 m de ancho. Está formado por un puente Warren de 90 m de luz y dos puentes de tipo ferroviario con vigas laterales de 31,5 m de luz. La obra ha sido diseñada para resistir la circulación de trenes de viajeros y mercancías: esfuerzo de frenado-arranque de 6.000 kN sobre el punto fijo del pilar P2, velocidad de circulación máxima potencial de 420 km/h y seísmos de 0,7 m/s<sup>2</sup> que generen un esfuerzo sísmico longitudinal máximo de 21.500 kN sobre el pilar P2. La armadura metálica es de fábrica y se ha ensamblado in-situ. Se ha instalado mediante un lanzamiento por cilindro y una colocación por grúa. □

# COUVRIR LES GRANDES INFRASTRUCTURES DE TRANSPORT EN MILIEU URBAIN. ÉTAT DE L'ART ET PROPOSITIONS ISSUES DU PROJET DE RECHERCHE ANR « CANOPÉE »

AUTEUR : MICHEL MOUSSARD, EXPERT GÉNIE CIVIL ET OUVRAGES D'ART, ARCADIS

POUR PERMETTRE UNE COHABITATION HARMONIEUSE ENTRE LES GRANDES INFRASTRUCTURES DE TRANSPORT, FERROVIAIRES ET ROUTIÈRES, ET LA VILLE, LA COUVERTURE DES VOIES EST UNE DES SOLUTIONS DONT DISPOSENT LES AMÉNAGEURS, SOLUTION EFFICACE MAIS AUSSI COMPLEXE ET ONÉREUSE. PARTANT DU CONSTAT QUE CE TYPE D'OUVRAGE AUX ENJEUX MULTIPLES, URBAINS, TECHNICO-ÉCONOMIQUES ET DE SÉCURITÉ, N'A JAMAIS FAIT L'OBJET D'IDENTIFICATION NI D'ANALYSES SPÉCIFIQUES, LE PROJET CANOPÉE S'EST DONNÉ COMME OBJECTIF DE PALLIER CETTE LACUNE.



© PSS-ARCHI

## INTRODUCTION

Le projet Canopée, issu de réflexions engagées dans le cadre des couvertures du boulevard périphérique à Paris, a permis à une équipe pluridisciplinaire (Ville de Paris, Eivp, Irex, Université Paris-Est, Tecomah, Arcadis, Egis,

Cetu) de développer une analyse globale des couvertures d'infrastructures de transports en milieu urbain, afin de développer et de proposer aux maîtres d'ouvrage et aux maîtres d'œuvre un état de l'art, des retours d'expérience, des analyses et des orientations pour

**1- Paris Rive Gauche.**

**1- Paris Left Bank.**

la programmation, la conception et la construction de ces ouvrages aux multiples enjeux.

Ce travail, financé par l'Agence nationale de la recherche (Anr) dans le cadre du programme « Bâtiments et villes durables », a été lancé en 2012





2

© ARCADIS

et est venu à son terme fin octobre 2015, avec la publication d'un rapport qui a été rendu public.

Au 19<sup>e</sup> siècle avec les chemins de fer, puis au 20<sup>e</sup> siècle avec les autoroutes, les infrastructures de transport ont profondément transformé les villes, en générant des nuisances visuelles, acoustiques et atmosphériques et de profondes coupures dans le tissu urbain qui ont longtemps été acceptées au nom du progrès.

En ce début du 21<sup>e</sup> siècle, la volonté de créer des espaces urbains apaisés et conviviaux, de recréer les continuités perdues, conduisent les urbanistes à repenser la relation entre ces infrastructures et la ville.

Il y a essentiellement deux approches possibles.

La première, qui en fait ne s'applique qu'aux infrastructures routières, consiste à transformer ou retransformer la voie rapide en boulevard urbain, avec, en général, un aménagement paysager.

La seconde consiste à couvrir l'infrastructure par un ouvrage assurant à la fois la protection contre les nuisances et la continuité urbaine (exemples : couvertures du boulevard périphérique à Paris, couverture du faisceau des voies d'accès à la gare d'Austerlitz dans le cadre de la ZAC Paris Rive Gauche).

## 2- Zuidas (Amsterdam).

## 2- Zuidas (Amsterdam).

C'est cette deuxième approche que nous avons étudiée, qui non seulement permet de réduire les nuisances, mais aussi la restauration de la continuité urbaine et la création de foncier.

Ces couvertures sont des ouvrages d'un type particulier : ni ponts, ni tunnels, ni bâtiments, ni voiries, mais tout cela à la fois. Devant cette situation, le projet Canopée s'est donné comme objectifs :

- D'établir un état de l'art de ces ouvrages, travail réalisé par l'Eivp ;
- D'examiner les aspects juridiques de ces projets, travail réalisé par l'Université de Paris-Est - Créteil ;
- D'examiner comment les interactions fortes qui existent entre le projet d'infrastructure d'une part et le projet urbain d'autre part (le « dessous » et le « dessus ») se traduisent au niveau des jeux d'acteurs entre maîtres d'ouvrage et concessionnaires, travail réalisé par l'Université de Paris-Est - Marne-la-Vallée ;

→ D'analyser de façon systématique et rationnelle les fonctions de cet objet « couverture », travail réalisé par l'Université de Paris-Est - Marne-la-Vallée ;

→ De rechercher quelles réponses l'ingénierie et l'industrie du Génie Civil peuvent apporter aux problématiques propres à ces ouvrages, travail réalisé par Egis, Arcadis et Tecomah.

Nous présentons ici l'état de l'art et les réponses que peuvent apporter les ingénieries et les entreprises aux défis posés par ces projets. Le lecteur souhaitant avoir accès au rapport complet pourra le télécharger sur le site de l'Irex (<http://www.irex.asso.fr/rapport-final-canopee/>).

## ÉTAT DE L'ART (ÉTUDES RÉALISÉES PAR L'EIVP)

La première tâche a consisté à établir une base de données qui détaille plus de cent opérations de ce genre, réalisées le plus souvent en France mais aussi en Europe, en Amérique du Nord et en Australie. Après examen de nombreux cas, trois questionnements en particulier sont apparus déterminants dans la décision de couvrir ou pas :

→ La question de l'usage de l'infrastructure majeure qui traverse le site : veut-on maintenir un trafic intense, voire l'augmenter, ou veut-

on déclasser la voie et réduire, voire supprimer, le trafic ?

→ La nature du développement immobilier envisageable sur ce site. Peut-on valoriser un sol artificiel ? La densité humaine nette, l'intensité urbaine justifient-elles qu'on limite les nuisances de la voie ?

→ La configuration topographique du site, favorable ou non à une opération de génie civil. Une voie existante en tranchée se prête bien à une opération de couverture, dont le dessus viendra naturellement se situer au niveau des voiries et terrains adjacents. Par contre, lorsque l'infrastructure de transport se trouve au niveau des voiries adjacentes, l'opération de couverture ne peut s'insérer dans le tissu urbain qu'au prix d'aménagements importants de part et d'autre. Toutefois le retour d'expérience de quelques projets emblématiques, comme le quartier de Paris Rive Gauche ou l'opération de Sijtwende en Hollande, montre que la couverture d'infrastructures routières ou ferroviaires situées au niveau du sol était tout à fait possible et pouvait conduire à des aménagements urbains d'une grande qualité, à condition que l'opération puisse être étendue de part et d'autre de la voirie couverte. ▷

L'établissement de la base de données et son analyse ont aussi confirmé - s'il était nécessaire - les différences fondamentales qui existent entre les projets de couverture de voiries routières et ceux de voiries ferroviaires. Pour l'infrastructure ferroviaire il n'y a que deux alternatives, la supprimer, ce qui est rarement faisable ni souhaitable en milieu urbain dense, ou la maintenir quasiment en l'état, tout en tenant compte des projets à venir. Alors que pour les infrastructures routières il y a une grande variété de solutions, dans un contexte globalement peu favorable au maintien de la circulation automobile en ville, du moins aux niveaux d'intensité et de vitesse actuels. Ces deux modes de transport se distinguent aussi très nettement par les contraintes qu'ils génèrent, qu'il s'agisse des contraintes d'exploitation, notamment en phase de construction, ou des contraintes liées à la sécurité dans les tunnels, qui sont fixées par des réglementations différentes.

Les projets les plus remarquables et les plus riches d'enseignements ont été la ZAC Paris Rive Gauche (figure 1) et le site de Zuidas (figure 2), quartier d'affaires en plein développement au sud d'Amsterdam.

### RÉPONSES DU GÉNIE CIVIL URBAIN AUX FONCTIONS ET CONTRAINTES DES COUVERTURES (ÉTUDES RÉALISÉES PAR EGIS, ARCADIS ET TECOMAH)

L'objectif de ces études a été de décrire et d'évaluer les réponses que peut apporter le génie civil aux enjeux de tous ordres des projets de couverture. Elles ont été décomposées en cinq parties :

- Typologie, analyse et évaluation des structures lourdes ;
- Typologie, analyse et évaluation des structures légères ;
- Interface dessus-dessous - aspects réglementaires et contraintes techniques ;
- Modules d'aménagements environnementaux ;
- Synthèse faisant l'inventaire des réponses aux fonctions attendues.

### TYPOLOGIE, ANALYSE ET ÉVALUATION DES STRUCTURES LOURDES

Une couverture lourde est définie comme une structure apte à supporter des voiries urbaines, des aménagements paysagers et/ou des immeubles tout en respectant toutes les fonction-

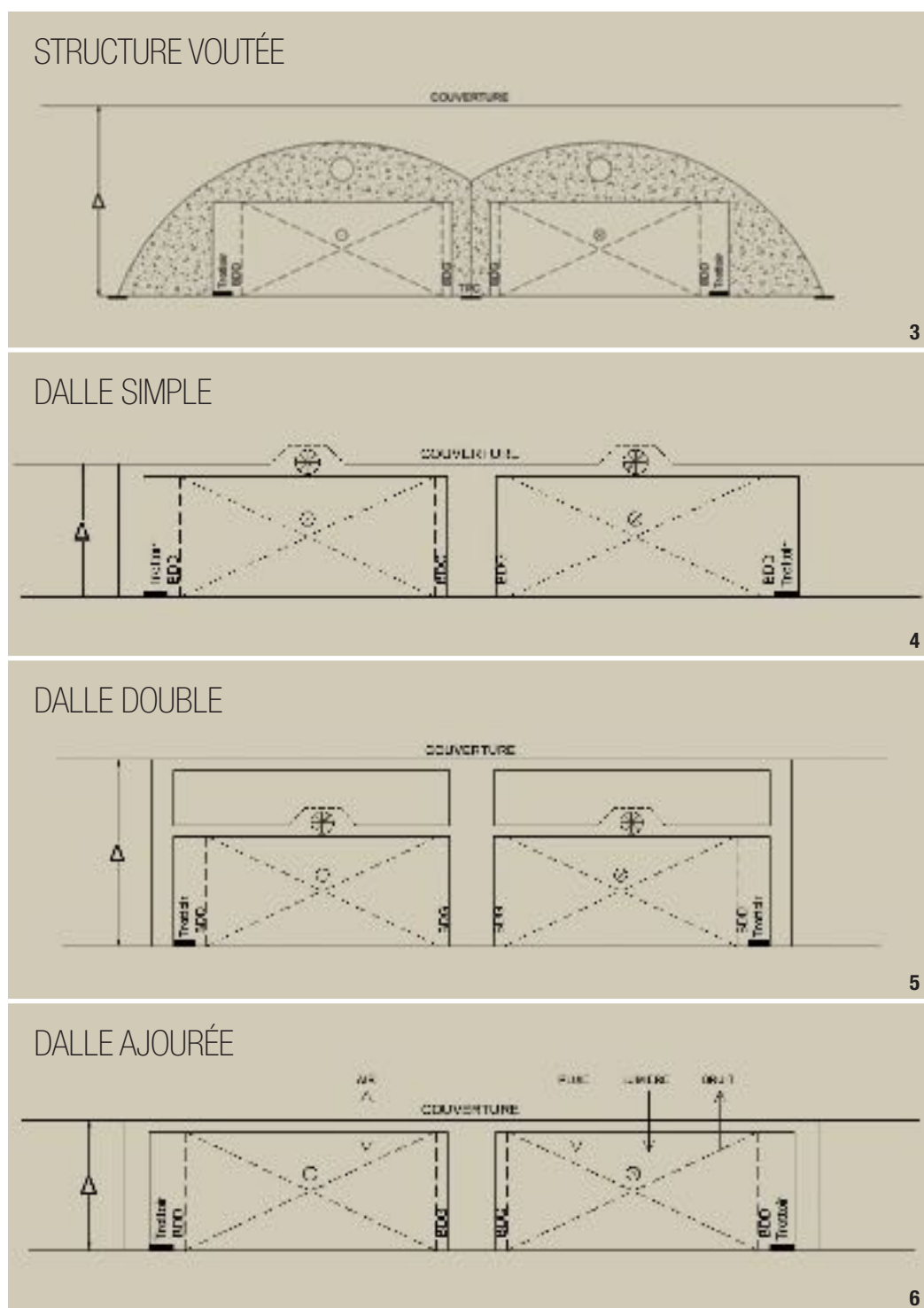
nalités de l'infrastructure couverte. Pour l'analyse nous avons retenu quatre types de couvertures :

- Les **structures voûtées**, associant des ouvrages en béton ou en maçonnerie à des remblais de couverture qui restituent la continuité du sol « végétal » (figure 3).
- Les **dalles simples**, au sens large, qu'il s'agisse de dalles pleines en béton armé ou précontraint, ou de structures à poutres en béton, métalliques ou mixtes (figure 4).

- 3- Structure voûtée.
- 4- Dalle simple.
- 5- Dalle double.
- 6- Dalle ajourée.

- 3- Roofed structure.
- 4- Single slab.
- 5- Double slab.
- 6- Openwork slab.

- Les **dalles doubles**, comportant deux niveaux séparés par un espace utilisable (parkings, circulations, réseaux), les deux niveaux étant structurellement reliés entre eux pour bénéficier de la grande capacité portante qui en résulte (figure 5).
- Les **dalles ajourées**, variante des dalles simples, où la présence d'ouvertures permet de répondre à certaines fonctions, comme la transparence aéraulique (figure 6).



3

4

5

6

© ARCADIS

© ARCADIS

© ARCADIS

© ARCADIS



Nos analyses ont montré que le coût des différentes couvertures lourdes varie relativement peu d'une solution à une autre, si l'on considère le coût global de l'opération.

Il s'ensuit que le choix d'un type de structure doit être fait avant tout en fonction des contraintes du site, notamment de la topographie, et des fonctions que l'on souhaite privilégier. L'analyse des typologies structurelles vis-à-vis des fonctions attendues et des contraintes a permis d'établir les conclusions suivantes :

- La structure voûte apporte la meilleure réponse lorsque l'objectif principal du client est la réduction des nuisances aux riverains de l'infrastructure ainsi que l'aménagement paysager. Le remblai, indissociable de la voûte, restitue la continuité du sol et constitue le support idéal pour la création d'un environnement naturel.
- La dalle ajourée présente de nombreux avantages, notamment de



7 © CITÉ DE MUNICH

**7- Couverture légère - tunnel anti-bruit à Munich.**

**7- Light roof covering - noise-abatement tunnel in Munich.**

permettre une ventilation naturelle, et représente surtout, grâce à la flexibilité d'utilisation des ouvertures, la réponse la plus adaptée aux évolutions des fonctionnalités, facteur de durabilité.

- La dalle double, lorsque la topographie du site le permet, apporte une réponse très adaptée à la gestion des réseaux et à l'installation de parkings.

## TYPLOGIE, ANALYSE ET ÉVALUATION DES COUVERTURES LÉGÈRES

Contrairement aux structures lourdes, les couvertures légères (figure 7) ne sont pas accessibles à la circulation (piétonne ou automobile) et ne peuvent pas servir de support à des bâtiments. Elles ne sont donc pas capables de répondre à l'ensemble des fonctions identifiées dans le cadre de la tâche 4, mais essentiellement aux fonctions de protection des nuisances environnementales.

## INTERFACE DESSUS-DESSOUS, ASPECTS TECHNIQUES ET RÉGLEMENTAIRES

Nous avons étudié les impacts des réglementations vis-à-vis de la sécurité dans les tunnels sur les projets de couvertures suivant trois thèmes :

**Le premier thème** concerne la longueur couverte, qui est un paramètre prépondérant. Pour les couvertures d'infrastructures routières, les exigences réglementaires sont fonction de seuils : 300 m, 500 m, 800 m, 1 000 m, 1 500 m, 3 000 m et 5 000 m. Les différentes solutions fonctionnelles envisageables, ainsi que leurs avantages et inconvénients, sont présentés dans le tableau A.

**Le deuxième thème** concerne l'insertion dans leur environnement les ouvrages techniques liés à l'ouvrage souterrain ayant un impact en surface (émergences). À titre d'exemple, deux intégrations d'émergences particulièrement réussies : la cheminée de ventilation du tunnel de la Croix Rousse à Lyon et une issue de secours sur les quais de la Seine à Paris (figures 8 et 9).

**Le troisième thème** concerne la gestion de la phase de travaux. Il fait état des solutions permettant de réaliser des travaux sur des ouvrages en exploitation (routiers ou ferroviaires), tout en assurant la sécurité des personnes (usagers et travailleurs), le maintien des conditions nécessaires à l'exploitation, ainsi que l'acceptabilité sociale (maintien de capacités de transport suffisantes, préservation du cadre de vie). Trois solutions peuvent être mises en œuvre :

- Neutralisation permanente de voies de circulation ;
- Fermeture totale de l'axe ;
- Ripage de balisage amovible.

Le tableau B recense les conclusions de cette partie, en évaluant les différentes solutions selon trois critères fondamentaux : sécurité des travailleurs, gêne à l'utilisateur et coût.

TABLEAU A : LES DIFFÉRENTES SOLUTIONS FONCTIONNELLES ENVISAGEABLES

Solutions	Aménagements particuliers	Avantages	Inconvénients
1. Succession de plusieurs tranchées couvertes courtes (< 300 m) sans système de ventilation.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 1 Issue de secours vers la surface par tube et ouvrage.</li> <li>• 1 niche de sécurité et 1 niche d'incendie par tube et par ouvrage.</li> </ul>	Coûts de construction et d'exploitation faibles.	Tranchée ouverte >100 m entre les TC (impact visuel, bruit et pollution).
2. Tranchée couverte moyenne (entre 300 et 500 m) avec ventilation longitudinale.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 2 Issues de secours vers la surface par tube.</li> <li>• 3 niches de sécurité et 2 à 3 niches d'incendie par tube.</li> <li>• Bossages supérieurs ou latéraux pour positionnement des accélérateurs.</li> <li>• Murs d'anti-recyclage de fumés à chaque tête.</li> </ul>	Coûts de construction et d'exploitation limités.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Interdiction de congestion dans le tunnel.</li> <li>• Interdiction des TMD.</li> <li>• Sécurité limitée en cas d'incendie dans le tunnel.</li> <li>• Longueur de la TC limitée à 500 m.</li> </ul>
3. Tranchée couverte longue (> 500 m) avec ventilation transversale.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Issues de secours tous les 200 m.</li> <li>• Niches de sécurité et d'incendie tous les 200 m.</li> <li>• Bossages supérieurs ou latéraux pour positionnement des accélérateurs.</li> <li>• Murs d'anti-recyclage de fumées à chaque tête.</li> </ul>	Impact minimal pour les aménagements en surface.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Coûts de construction et d'exploitation plus élevés.</li> <li>• Problématique de sécurité si permission des TMD en période de congestion.</li> </ul>

TABLEAU B : ÉVALUATION DES DIFFÉRENTES SOLUTIONS SELON TROIS CRITÈRES FONDAMENTAUX

	Sécurité des travailleurs et des usagers	Gêne à l'utilisateur	Coût
Neutralisation permanente de voies	Bonne	Congestion du trafic aux heures de pointe	Peu onéreux
Fermeture totale	Optimale	Longue déviation	Onéreux
Ripage de balisage	Acceptable	Minimisée	Très onéreux

Enfin, une étude complémentaire a été développée autour du thème de « la perception des ouvrages souterrains ». Une étude de cas du tunnel de la Croix Rousse à Lyon a permis d'illustrer cette démarche.

### MODULES ENVIRONNEMENTAUX ET VÉGÉTALISATION

Qu'il s'agisse d'une structure lourde ou d'une structure légère, celle-ci peut être le support d'équipements permettant d'agir sur l'environnement, afin de réduire ou de compenser son impact. Des solutions nouvelles ou innovantes sont présentées :

- Solutions passives : assurer des fonctions/performances (confort, gestion des nuisances, ...) sans apport d'énergie ;
- Solutions bioclimatique, interagissant avec le contexte naturel local (climat, vent, ensoleillement, topographie, ...);
- Solutions alternatives : mise en œuvre d'énergies renouvelables.

Les solutions environnementales sont envisagées sous la forme de modules rapportés localement, adaptables aux différentes configurations des sites et démontables ou interchangeable au cours de la vie de l'ouvrage (figure 10). Elles profitent des échanges entre le dessus et le dessous pour :

- Traiter à l'interface entre l'intérieur et l'extérieur la question de la nuisance et du confort urbain ;
- Produire/mettre à disposition des ressources renouvelables pour couvrir les besoins locaux.

Afin de réaliser ces fonctions, des micromodules peuvent être installés. Ce sont des éléments standard, démontables, qui peuvent assurer plusieurs fonctions.



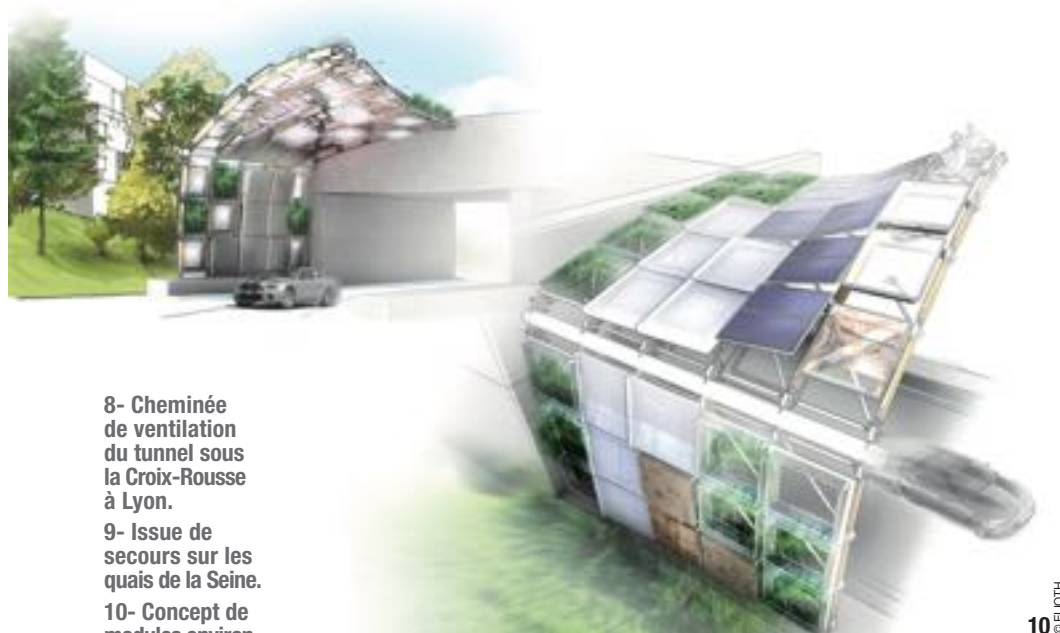
8

© GOOGLE MAP



9

© EGIS



10

© ELIOTH

**8- Cheminée de ventilation du tunnel sous la Croix-Rousse à Lyon.**

**9- Issue de secours sur les quais de la Seine.**

**10- Concept de modules environnementaux.**

**8- Ventilation shaft for the tunnel under Croix-Rousse in Lyon.**

**9- Emergency exit on the quays of the Seine.**

**10- Concept of environmental modules.**

### CONCLUSION

Le projet Canopée a exploré l'identité et la complexité des projets de couvertures d'infrastructures de transport en milieu urbain, en leur apportant un éclairage pluridisciplinaire.

L'hypothèse selon laquelle ils constituent un type particulier d'ouvrages de génie civil a été pleinement vérifiée. Le rapport final et la synthèse des tra-

vaux constituent une somme d'informations, à la fois retours d'expériences et pistes d'amélioration et d'innovation, qui sont ainsi mises à la disposition de tous ceux qui s'engagent dans de tels projets, à différents niveaux de responsabilité et à différentes étapes.

Ce rapport est disponible et téléchargeable : <http://www.irex.asso.fr/rapport-final-canopée/> □

### ABSTRACT

#### COVERING LARGE TRANSPORT INFRASTRUCTURE IN URBAN ENVIRONMENTS. STATE-OF-THE-ART PRACTICE AND PROPOSALS BASED ON THE ANR'S "CANOPEE" RESEARCH PROJECT

MICHEL MOUSSARD, ARCADIS

**The Canopée project**, based on research undertaken for roof covering of the Paris ring road, allowed a multi-disciplinary team to develop a general analysis of the roof covering of transport infrastructures in urban environments, in order to propose to clients and project managers tools for analysis, decision support and design of these structures involving numerous challenges. This work showed, in particular, the great difficulties encountered in the field to coordinate the urban project and the transport project: different actors, different issues and different time horizons. Creating a roof covering means creating artificial urban ground from a long-term perspective, which means there are extremely high demands regarding quality, durability, maintainability and adaptability. □

#### CUBRIR LAS GRANDES INFRAESTRUCTURAS DE TRANSPORTE EN MEDIO URBANO. ESTUDIOS Y PROPUESTAS DERIVADOS DEL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN ANR "CANOPEE"

MICHEL MOUSSARD, ARCADIS

**Le projet Canopée**, issu de réflexions engagées dans le cadre des couvertures du boulevard périphérique à Paris, a permis à une équipe pluridisciplinaire de développer une analyse globale des couvertures d'infrastructures de transports en milieu urbain, afin de proposer aux maîtres d'ouvrages et aux maîtres d'œuvre des outils d'analyse, d'aide à la décision et de conception de ces ouvrages aux multiples enjeux. Ces travaux ont montré en particulier les grandes difficultés rencontrées sur le terrain pour coordonner le projet urbain et le projet de transport : différents acteurs, différents enjeux et différentes temporalités. Créer une couverture c'est créer un sol urbain artificiel en s'inscrivant dans la durée, d'où une exigence particulièrement élevée de qualité, de durabilité, de maintenabilité, d'adaptabilité. □






# BESOIN DE SIMPLIFICATION

Prévoyance conventionnelle  
Complémentaire santé  
Déclaration sociale nominative





# PRÉSERVONS L'AVENIR

 Réalisation de murs poids  
en gabions PRAE Via  
Domitia-lien Vendargues.

Dans une volonté de concevoir des solutions de soutènement durables et écoresponsables, Maccaferri apporte son expérience et sa capacité d'innovation dans la réalisation d'ouvrages de haute technicité et d'une exceptionnelle longévité.

Ses solutions sont pensées pour protéger les populations et les infrastructures autour d'une double préoccupation : s'intégrer au cadre naturel et réduire l'impact carbone du site.

Une réponse adaptée à la dimension financière et écologique de chaque projet.

**MACCAFERRI**

**Castries, Hérault**  
Gabions électrosoudés - 2165 m<sup>3</sup>  
Gabions double torsion - 4100 m<sup>3</sup>

[www.maccaferri.com/fr](http://www.maccaferri.com/fr)