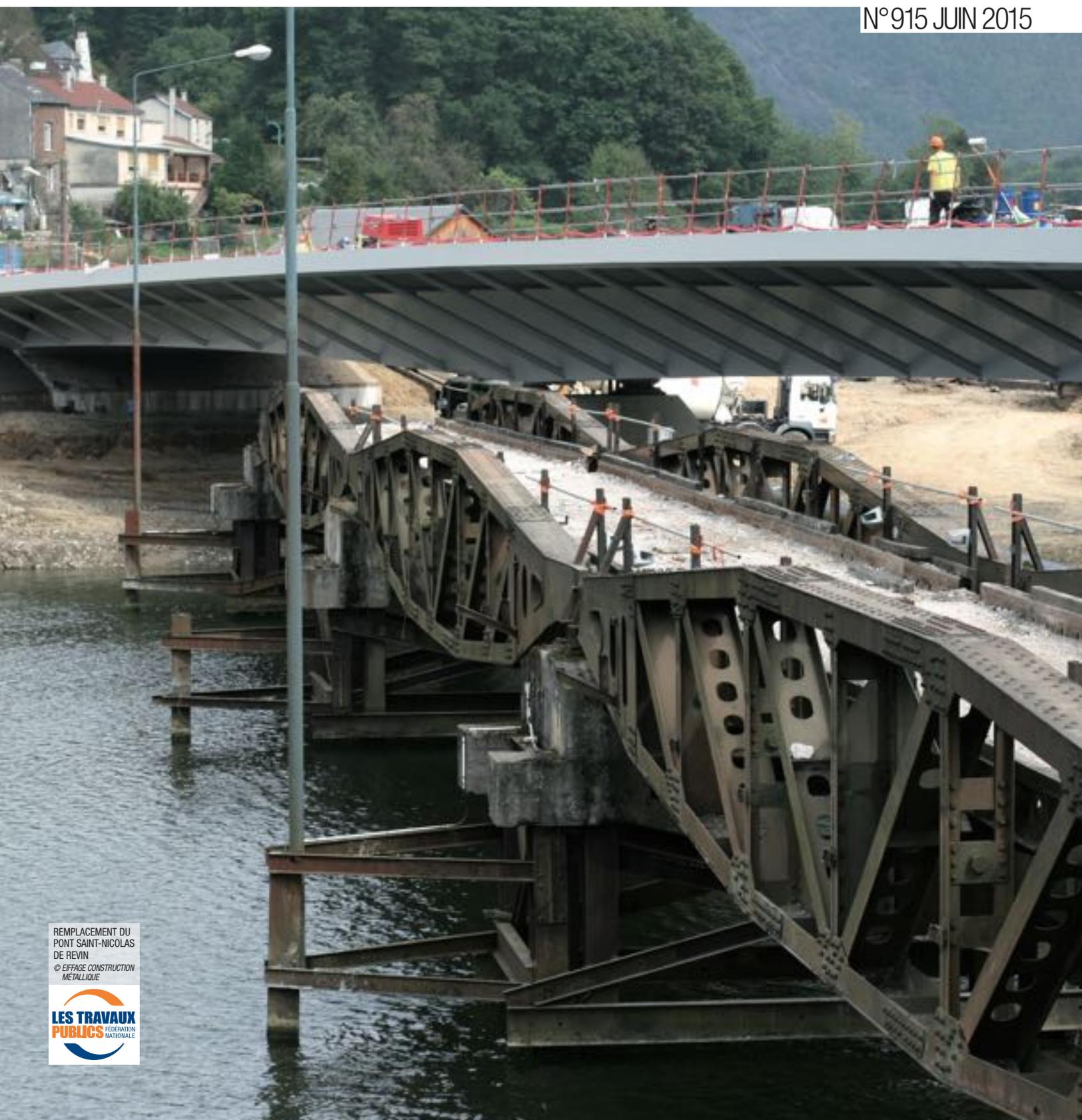


# TRAVAUX

REVUE TECHNIQUE DES ENTREPRISES DE TRAVAUX PUBLICS

**OUVRAGES D'ART. MEMORIAL INTERNATIONAL DE NOTRE-DAME-DE-LORETTE. CONSTRUCTION DE LA PASSERELLE DE VILLETANEUSE UNIVERSITE. ECHANGEUR EN MARTINIQUE. REMPLACEMENT DU PONT SAINT-NICOLAS DE REVIN. LGV SEA - LES BIPOUTRES A OSSATURE MIXTE. DECONSTRUCTION DU VIEUX PONT DE TEREZEZ. LGV SEA - DES OUVRAGES POUR FRANCHIR LE RESEAU EXISTANT ET S'Y RACCORDER. PONT SCHUMAN A LYON. PONT DE HONG-KONG MACAO**

N°915 JUN 2015



REMPLACEMENT DU  
PONT SAINT-NICOLAS  
DE REVIN  
© EFFAGE CONSTRUCTION  
MÉTALLIQUE



partout

NGE développe son approche multimétiers  
et bâtit des relations durables avec ses clients...

... et certains signes  
ne trompent pas !



Grâce à ses 40 filiales et plus de 100 implantations, NGE dispose en tout point du territoire d'une capacité à répondre en totale autonomie à chaque type de projet de **Travaux Publics**.

Ces entreprises expertes dans chacun des métiers des Travaux Publics, alliant innovation et créativité apportent des solutions sur mesure aux problématiques des donneurs d'ordre.

NGE, avec le savoir-faire de ses filiales, notamment, GUINTOLI, E.H.T.P., NGE Génie Civil, SIORAT, AGILIS, G.T.S, TSO... poursuit en permanence l'ambition de maîtriser l'impact de chacune de ses interventions sur l'environnement, notamment en maximisant le réemploi des matériaux, en développant des procédés durables, en optimisant les ressources, etc.

Avec de nombreuses références sur les opérations de TCSP, de viabilité urbaine et périurbaine, sur les marchés d'entretien (réseaux, chaussées...), les réalisations de NGE ont pour vocation essentielle l'amélioration de la qualité de vie des citoyens, notamment en leur facilitant les déplacements, la communication ou l'accès à la ressource.

→ Vous avez des projets ?  
Rencontrons-nous !

Vous n'avez pas fini de découvrir le multimétiers... [www.groupe-nge.fr](http://www.groupe-nge.fr)

NGE

**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 (Ingérop), David  
Berthier (Vinci Construction France),  
Sami Bounatirou (Bouygues TP),  
Jean-Bernard Datry (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.frFrance (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**Édition déléguée**  
Com'1 évidence  
Siège :  
101, avenue des Champs-Élysées  
75008 PARIS  
Tél. bureaux : +33 (0)2 32 32 03 52  
revuetravaux@com1evidence.comLa 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°0116 T 80259  
ISSN 0041-1906

## IMAGINER NOTRE AVENIR



© DR

Écrire sur les ponts est une gageure à l'heure où le monde se fragmente et les civilisations s'affrontent. Le mot pont symbolise d'abord le lien, spirituel ou matériel, entre les hommes, les civilisations, les religions, les territoires et les villes.

Ces ponts ont été, de tout temps, l'occasion pour leurs auteurs, architectes, ingénieurs, artistes et - pourquoi pas - *designers*, de faire la démonstration de leur talent. S'agissant des ponts modernes, des ouvrages d'art iconiques surgissent partout dans le monde : d'abord en France et en Europe depuis le 19<sup>e</sup> siècle, puis aujourd'hui au Moyen-Orient, et plus loin en Chine, en Corée, au Japon. Qu'ils soient situés dans les grandes capitales, ou qu'ils accompagnent routes et trains rapides à travers le grand territoire, ils sont les marqueurs des villes et des paysages. Le dernier concours lancé à Londres, cette année, pour proposer une passerelle pour piétons entre Pimlinco et Nine Elms nous a montré la richesse de l'offre des architectes et des ingénieurs.

Leur dessin ? Multiple. De la complexité volontaire et ostentatoire, recherche éperdue de l'originalité d'un ouvrage urbain, presque provocation, à l'extrême simplicité d'une passerelle ruban comme celle de Suransus, joyau perdu au cœur des Alpes suisses, tout est prodige d'ingénierie, de savoir-faire et de savoir entreprendre.

Le pont exprime la liaison et la traversée : il se doit d'être l'expression d'une séquence dans le paysage, comme un arrêt sur image. Il suggère le déplacement, le voyage, un symbole, parfois un exploit, composition technique de l'intelligence humaine et du grand paysage.

Mais au-delà de ces ouvrages remarquables, célèbres et visités, il y a le juste besoin au service du développement des territoires, quand l'isolement et les conditions difficiles transforment toute construction en prouesse. Fiabilité, économie de moyen, durabilité et méthodes sont alors les maîtres mots. Le besoin est immense, et l'urgence se déplace, notamment en Afrique et en Amérique.

Quelle sera alors le rôle de nos concepteurs, de nos ingénieries, et de nos constructeurs dans les trente ans qui viennent face à la concurrence ouverte, qu'elle vienne d'Europe, d'Amérique du nord, d'Asie et même des pays émergents ? Et quels sont donc nos atouts, à nous ingénieristes et constructeurs, pour affronter la compétition et assurer notre pérennité ?

Innovation, technicité, bien sûr, mais surtout imagination : pour surprendre, inventer, réunir et partager l'enthousiasme de la création. Et relier.

Relisons alors sans attendre « L'art des ponts » de Michel Serres : « *Construisez un pont de pierre ou de béton : mais à la condition de le faire précéder par un pont de langues. Ainsi le doux fonde-t-il le dur : qui l'eût cru ?* »

**JEAN-BERNARD DATRY**

SETEC TPI - VICE-PRÉSIDENT DE L'ASSOCIATION FRANÇAISE DE GÉNIE CIVIL

# OUVRAGES D'**ART**

IMAGINER  
CONCEVOIR  
CONSTRUIRE



04 ALBUM

06 ACTUALITÉ



16

**ENTRETIEN AVEC THOMAS JOINDOT**  
SNCF RÉSEAU - RÉGÉNÉRER LE RÉSEAU : UNE POLITIQUE À LONG TERME

20 CMG : L'ACIER POUR DÉNOMINATEUR COMMUN



26

**MÉMORIAL INTERNATIONAL DE NOTRE-DAME-DE-LORETTE**  
Études de justification de l'ouvrage et ajustement du projet



34

**CONSTRUCTION DE LA PASSERELLE DE VILLETANEUSE UNIVERSITÉ**



40

**ÉCHANGEUR DE LA POINTE DES SABLES EN MARTINIQUE**  
Construction d'un viaduc précontraint coulé sur cintre



48

**REMPLACEMENT DU PONT SAINT-NICOLAS DE REVIN**



56

**LGV SEA -**  
Les bipoutres à ossature mixte



75

**LA DÉCONSTRUCTION DU VIEUX PONT DE TÉRÉNEZ**  
Une première de cette envergure en Bretagne



82

**LGV SEA -**  
Des ouvrages pour franchir le réseau existant et s'y raccorder



94

**PONT SCHUMAN À LYON**  
De la conception à la construction



102

**LE PONT DE HONG-KONG MACAO**





## L'ART DE DÉCONSTRUIRE ÉLOGE DE L'ANTINOMIE

**DÉCONSTRUIRE** est un art à part entière, mal connu, peu valorisant et bien à tort, mais tout aussi savant que celui de construire. Si l'enfant qui a construit un beau château de sable peut le détruire en quelques coups de pieds, il est loin d'en être de même pour un pont suspendu comme celui de Térénez. Une grande maîtrise technique est nécessaire pour déterminer la méthode et notamment le phasage permettant la déconstruction rationnelle d'un tel ouvrage en toute sécurité. La préservation de l'environnement exige un recyclage sélectif rigoureux des produits de démolition. Des entreprises et des bureaux d'étude spécialisés, conduits par Ingerop en qualité d'assistant à maîtrise d'œuvre, ont administré là une brillante démonstration de leur savoir-faire.

(voir article page 75).



© FLY HD

## LES GÉOSYNTHÉTIQUES TROUVENT DE NOUVELLES APPLICATIONS

**Géotextiles, géocomposites, géogrilles sont de plus en plus utilisés en renforcement de terrain à côté de leurs fonctions traditionnelles comme le drainage et l'étanchéité. De nouvelles applications voient le jour.**



1<sup>er</sup> prix du concours photos des Rencontres géosynthétiques 2015, catégorie mise en œuvre : "Vents et poussières au sommet du talus raidi" aux Deux-Alpes (Isère).

Entre 300 et 350 personnes ont participé aux 10<sup>es</sup> Rencontres géosynthétiques organisées par le Comité français des géosynthétiques (CFG) à La Rochelle (Charente-Maritime), du 24 au 26 mars. « L'ambiance était détendue, relate Yves Durkheim, vice-président du CFG. L'heure est à l'optimisme même si les attentes sont différentes selon les secteurs. » La manifestation biannuelle réunit ingénieurs et techniciens proches du terrain. « Les rencontres sont destinées aux acteurs en dehors des membres du CFG (110 adhérents) contrairement à la journée technique plus centrée sur un thème en direction de la profession<sup>(1)</sup>, précise Nathalie Touze-Foltz, présidente du comité scientifique de ces manifestations. Elles s'adressent aux utilisateurs finaux pour leur dire ce que sont les géosynthétiques et ce qu'il est possible d'en faire sur la base d'applications concrètes, de chantiers. Les rencontres contribuent beaucoup à l'accroissement des connaissances. » Cette année, elles ont donné lieu à 46 communications.

### → Transfert de charge entre pieux

Les industriels du secteur apprécient ces journées. « C'est un lieu pour être en prise avec les concepteurs-prescripteurs et les utilisateurs, et pour créer des connexions avec l'ensemble des acteurs, précise Patrick Favand, président de l'Association française des producteurs de géotextiles et produits apparentés (AFPGPA). En 2014, le marché a été compliqué et nous sommes prudents pour 2015. Je préfère parler du développement de nouvelles solutions techniques. » De plus en plus de géosynthétiques sont

utilisés à la place de solutions traditionnelles plus longues à mettre en œuvre, plus coûteuses. Le renforcement par géotextiles a été très développé. Solidarisés à une paroi en blocs de gabion, ils renforcent un remblai ou un talus abrupt. Ils évitent le recours à de gros équipements nécessaires pour monter un mur vertical en béton, un mur-poids ou en L. Par exemple, il a suffi d'une pelle mécanique et d'un compacteur à bille pour réaliser un merlon de 9 m de haut sur 60 de long, constitué de géogrilles, de matériaux granulaires et de pneus, afin de protéger des chutes de pierres la route départementale qui mène à La Grave (Hautes-Alpes). En juin 2014, il a stoppé la course d'un rocher de 1,50 m.

L'une des 46 communications des rencontres portait sur la capacité d'un géosynthétique à transférer des charges entre pieux dans le cas d'une fondation à inclusions rigides, et comment le dimensionner. « Cela ouvre sur des applications bien spécifiques, entrevoit Yves Durkheim. Nous allons de plus en plus vers l'implantation d'infrastructures de transport sur des sols moins porteurs, disponibles car moins favorables à la construction. »

### → Séchage de boues

Les fonctions traditionnelles de drainage et d'étanchéité des géosynthétiques continuent de se développer. Des opérations d'aménagement prennent place sur des terrains industriels qu'il faut alors confiner efficacement et dont il faut drainer les eaux qui peuvent être polluées. Lors des rencontres, a été présenté un système d'essorage des boues d'une papeterie par des tubes en géotextile

## MONTRER LA BEAUTÉ DES CHANTIERS

Pour la 2<sup>e</sup> fois, le Comité français des géosynthétiques (CFG) organisait un concours photos. L'idée vient des jeunes du conseil du CFG. Ces photos sont l'occasion de montrer de belles réalisations et de faire participer des professionnels autrement que par des interventions écrites.

tissé de grand diamètre. Ces tubes sont moins chers que des machines et n'ont pas besoin d'énergie. En revanche, ils allongent l'essorage et ne sont utilisables qu'une fois, observent les auteurs de cette présentation. Selon Nathalie Touze-Foltz, les géocomposites trouvent de plus en plus d'applications dans le séchage des boues d'origine minière et font l'objet de recherches.

« La fonction séparation reste le principal marché des géotextiles, » observe Patrick Favand. Par exemple, ils empêchent le mélange des couches d'une assise d'infrastructure. Les graviers s'enfoncent moins dans le sol, d'où des épaisseurs moindres à épandre. Est en progression, toujours selon l'AFPGPA, l'emploi de géotextiles tridimensionnels contre l'érosion des pentes raides.

### → Plus de retours d'expérience

Enfin, la connaissance de la durabilité

des géosynthétiques s'enrichit toujours. Ils sont amenés à durer de plus en plus longtemps dans des ouvrages. « Les retours d'expérience sur vingt-trente ans permettent de rédiger des recommandations sur le type de produit à utiliser pour une application donnée, développe Nathalie Touze-Foltz. Des préconisations peuvent être données pour l'utilisation de telle ou telle membrane. Ainsi, les géosynthétiques sont-ils utilisés au mieux, les malfaçons reculent, les utilisateurs sont satisfaits. Tout cela contribue à pérenniser la filière. »

**Conférences en ligne sur <http://www.cfg.asso.fr/publications/les-rencontres-geosynthetiques/actes-colloques-rencontres-2015>.** ■

<sup>(1)</sup> Les rencontres ont lieu un an sur deux en alternance avec une journée technique.



1<sup>er</sup> prix du concours photos des Rencontres géosynthétiques 2015, catégorie protection et sécurisation de notre environnement : sécurisation d'une voie ferrée à Massilly (Saône-et-Loire).

## PLUS DE GÉOTEXTILES ET MOINS DE CO<sub>2</sub>

La dernière brochure de l'Association française des producteurs de géotextiles et produits apparentés (17 membres) précise les atouts de ces matériaux dans la lutte contre le changement climatique, c'est-à-dire leur pouvoir de réduire les émissions de gaz à effet de serre et d'économiser l'énergie. L'AFPGPA fournit des arguments environnementaux aux utilisateurs potentiels.

Le document calcule ces avantages pour 4 exemples précis en filtration, stabilisation d'une couche de forme, drainage et dans un ouvrage de soutènement.

## LA PROGRAMMATION DE L'ÉNERGIE 2016-2018 EST LANCÉE



Récupération de chaleur du sous-sol à Auxerre (Yonne) : raccordement de pieux géothermiques au circuit climatique d'une salle de spectacles.

« Les débats de la programmation pluriannuelle de l'énergie (PPE) ne doivent pas se réduire à des discussions sur l'électricité qui ne concerne que le quart de la consommation d'énergie, » a insisté Ségolène Royal à la première

réunion du comité de suivi de la PPE, début mars. La PPE traitera de toutes les énergies dont la récupération de chaleur renouvelable. En lançant dès maintenant ces discussions, la ministre de l'Écologie, du Dé-

veloppement durable et de l'Énergie devance la loi sur la transition énergétique encore en examen (début mai). Le comité a pour objectif d'en accélérer la mise en œuvre, une fois votée.

L'anticipation doit donner le temps de réaliser un diagnostic du potentiel d'économies d'énergie et du développement des énergies renouvelables. La PPE traitera de maîtrise de la demande, de diversification des sources, de sécurité d'approvisionnement, du stockage et des réseaux.

### → Coûts, investissements, emplois

La programmation sera élaborée avec tous les acteurs dont les associations et les syndicats. Elle sera décidée pour trois ans (2016-2018) puis cinq ans jusqu'à 2023 et, ensuite "recalée" sur les périodes présidentielles. Le comité d'experts pour la transition énergétique et climatique, et le Conseil national de la transition énergétique donneront leur avis.

La ministre a rappelé que « les travaux porteront une attention particulière aux coûts, aux investissements, aux emplois et aux impacts sur les prix de l'énergie. » ■

## DÉCLARATION FAVORABLE AU LYON-TURIN

Le tunnel ferroviaire Lyon-Turin va bénéficier de la déclaration d'Innsbruck (Autriche). Le 20 mars, plusieurs membres de l'Union européenne - Autriche, Allemagne, France, Italie, Suisse et Slovénie - ont signé un engagement à promouvoir les transports durables dans les vallées alpines.

Cette signature a eu lieu au sommet des projets du réseau transeuropéen de transport (RTE-T) organisé par la Commission européenne. Le tunnel Lyon-Turin de 57 km est estimé à 3 milliards d'euros d'ici à 2020 avec une aide du Mécanisme pour l'interconnexion en Europe de 1,2 milliard.

## SÉCURISATION DE LA LIGNE CUNEO/VENTIMIGLIA

SNCF Réseau (ex-RFF) et Rete Ferroviaria Italiana (RFI) ont signé fin mars une convention de financement pour remettre à niveau le tronçon de la ligne italienne Cuneo-Ventimiglia qui traverse les Alpes-Maritimes par Breil-sur-Roya et Tende. L'Italie apporte 29 millions d'euros, ce qui va permettre de lancer les études puis les travaux, en particulier ceux de sécurisation.

## TÉLÉPHÉRIQUE À ROISSY

La Communauté d'agglomération Roissy Porte de France s'associe aux travaux de réflexion de l'Association Pays de Roissy pour installer un téléphérique entre Goussainville et Roissy, deux communes du Val-d'Oise. Ce transport par câble relierait la gare de RER D de Goussainville et la zone d'activités en bordure de l'aéroport Charles-de-Gaulle en passant par Le Thillay et Roissy-en-France.

## DES PLANS INDUSTRIELS TRANSPORT CONTRIBUENT À LA TRANSITION ÉNERGÉTIQUE

Quatre domaines relatifs au transport font l'objet de plans industriels soutenus par le ministère de l'Économie et celui de l'Écologie pour leur contribution à la transition énergétique.

Les volets transport et mobilité de l'opération "nouvelle France industrielle" se concentrent sur le TGV du futur, le stockage de l'énergie, les bornes de recharge électrique et les navires écologiques.

Le TGV du futur sera moins axé sur la performance technique mais plus sur son moindre coût. Il contiendra 25 % de places en plus qu'un Euroduplex. Son tronçon central sera modulable. Il faudra deux fois moins d'électricité pour le tractier par rapport au modèle actuel.

Le plan TGV réunit des industriels et des laboratoires de recherche autour d'Alstom Transport. « L'État a demandé à l'Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie d'examiner, dans le cadre des investissements d'avenir, la faisabilité d'un apport en capital, en investisseur

avisé aux côtés d'Alstom Transport, dans une entreprise commune destinée à porter la recherche et le développement nécessaires à la concrétisation de ce TGV du futur, » est-il écrit dans un communiqué.

### → L'hydrogène sollicité

En matière de stockage de l'énergie, les actions portent sur la construction d'une usine de composants pour batteries à haute performance, sur le développement d'un cœur de pile à combustible et sur deux stockages d'hydrogène, un "nomade" et un réservoir composite à haute pression. Le plan sur la recharge électrique de véhicules inclut dorénavant un volet sur les modes de charge du futur dont celui par induction, sans fil.

Enfin, les navires dits écologiques consommeront 50 % de fuel en moins et leur impact sur l'environnement sera réduit de moitié sur toute leur durée de vie. Pour cela, un appel à projets a été ouvert en avril. ■



Des industriels étudient la recharge de véhicules électriques sans fil. Ici, chargement classique d'une fourgonnette de la Poste.

## FONDS CHALEUR EN HAUSSE

Auront désormais accès au Fonds chaleur renouvelable : les équipements de récupération de chaleur reliés à des réseaux ; la production de biogaz par méthanisation avec injection du gaz dans le réseau existant ; les productions de froid à partir de renouvelables (appel à projets sur les technologies émergentes). La filière de la biomasse (bois) y aura droit plus largement. Les petits projets de chaleur renouvelable pourront y prétendre si plusieurs acteurs sont impliqués. Ceux de taille moyenne bénéficieront d'un forfait.

La ministre de l'Écologie a annoncé fin avril le doublement progressif du budget du fonds chaleur en trois ans afin d'atteindre 420 millions d'euros en 2017. La production de chaleur représente la moitié de la consommation d'énergie en France. Le Fonds chaleur renouvelable soutient la chaleur produite par biomasse, la géothermie, le solaire thermique, le biogaz et les énergies de récupération (déchets, eaux usées, etc.).

Enfin, deux appels à projets sur les grandes installations de production d'eau chaude solaire et de biomasse sont ouverts.

## BILAN GES EN TRAVAUX PUBLICS

Le guide "Réaliser une analyse environnementale dans les travaux publics" aidera les entreprises dans leurs démarches environnementales, en particulier pour le bilan des émissions de gaz à effet de serre et les analyses de cycle de vie.

La publication de 126 pages associe la Fédération nationale des travaux publics qui l'a coordonnée et l'Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie.

Y a participé un groupe d'entreprises et d'organismes scientifiques et techniques.

À lire sur :

[www.bilans-ges.ademe.fr](http://www.bilans-ges.ademe.fr)

## BOUFFÉES D'AIR POUR LES TRAVAUX PUBLICS

« Merci pour le plan autoroutes, merci pour la plus grande visibilité sur l'avenir », a répondu Bruno Cavaigné, président de la Fédération nationale des travaux publics, aux propositions du ministre de l'Économie, Emmanuel Macron, à l'assemblée générale de la FNTF, début avril. « Nous nous sentons entendus, a abondé Laurent Girou, président des affaires économiques à la fédération. La décision de s'appuyer sur le fonds de compensation de la TVA (FCTVA) est très importante, elle aura un effet immédiat. »

Le soulagement était palpable à l'AG même si, sur 17 propositions de la FNTF pour la relance en infrastructures, plusieurs ont été rejetées et « six seront étudiées d'ici à juin 2015 », a assuré M. Macron qui a parlé de ce qui est déjà en cours. En voici des extraits.

### → Calendrier crédible

« Dix-sept contrats de plan État-Région sur cinq ans sont déjà signés et les autres le seront d'ici l'été, a affirmé le ministre. Ils comprennent un volet mobilité. »

Le Grand Paris et le Canal Seine Nord Europe sont relancés sur un « calendrier crédible » et les suites du rapport Duron (hiérarchisation des projets de transport) devraient être engagées sur une voie



Les collectivités territoriales auront accès à des prêts à taux 0. Ici, pôle d'échanges de transports à Aix-en-Provence inauguré par le Conseil général des Bouches-du-Rhône en 2014.

© CONSEIL GÉNÉRAL BOUCHES-DU-RHÔNE

similaire « dans les prochains mois ». Le seuil minimum des partenariats public privé sera supprimé par ordonnance.

Des prêts à taux 0 seront accordés aux collectivités territoriales par la Caisse des dépôts sur le fonds de compensation de la TVA (part des revenus de TVA de l'État reversée à l'investissement local).

La fiscalité sur les carburants contribue à augmenter le budget de l'Agence française des investissements de transport de France (Afitf). De leur côté, les concessionnaires d'autoroutes vont lui verser 1 milliard d'euros en échange de la négociation de leurs contrats avec l'État au lieu de leur résiliation. Ils apportent aussi

200 millions d'euros au fonds infrastructures (CDC).

### → Travaux autoroutiers débloqués

Emmanuel Macron a annoncé les dispositions prises par le gouvernement pour sortir de la crise État/sociétés autoroutières. Parmi les compensations au rallongement des contrats pour deux ans, les concessionnaires vont investir dans des travaux dès 2015, pour un montant total de 3,2 milliards d'euros à réaliser à 80% d'ici trois ans.

Les trois quarts des chantiers seront ouverts à la concurrence donc aux PME. Enfin, un cadre a été créé pour plus de transparence dans les contrats avec l'État. ■

## LE CIMENT AU CREUX DE LA VAGUE



© VICAT

Cimenterie Vicat à la Grave de Peille (Alpes-Maritimes).

« La consommation de ciment pourrait ne baisser que de 3,5% en 2015 si la reprise est là », indique Jean-Yves Le Dreff, président du Syndicat français de l'industrie cimentière (Sfic).

Les mesures gouvernementales de mars-avril ont été perçues comme favorables à la mise en chantier dans le bâtiment et les travaux publics fin 2015 et plus sûrement en 2016.

2015 avait mal commencé avec une baisse de 15% de l'activité, il est vrai à comparer à un premier trimestre 2014 faste. « Le deuxième trimestre se situera à -5% par rapport à la même période de 2014 et les troisième et quatrième seront équivalents à ceux de 2014, ajoute M. Le Dreff. Sur le long terme, les cimentiers vont se repositionner sur une consommation de 20-25 millions de tonnes en France. C'est possible avec les usines actuelles. »

### → Changement de mains

L'année 2014 ne devrait rester qu'un mauvais souvenir avec 18 millions de

tonnes de ciment consommées, soit -30% par rapport à 2007, l'année la plus haute récemment.

Les importations de ciment sont restées stables l'année dernière, à 10% de la consommation nationale. Les exportations ont baissé de 20% par rapport à 2013. Aujourd'hui, les cimentiers continuent d'investir à l'échelle européenne qui est la leur, mais, à l'avenir, ils feront les choix de produire en Europe ou hors d'Europe, d'après le Sfic. Le nombre de cimenteries ne va pas augmenter mais elles pourraient changer de mains.

### → Penser énergie thermique

Les industriels du secteur continuent de réduire leurs dépenses d'énergie. « La crise nous amène à penser plus à l'énergie thermique qu'à l'électricité », précise M. Le Dreff. Les membres du Sfic ont réussi à substituer 36% de leurs combustibles traditionnels (pétrole, charbon) par des combustibles à base de déchets industriels ou ménagers, en 2014, et espèrent atteindre 50% vers 2020. ■

## PASSERELLE LEVANTE À COPENHAGUE



© BARBARA FEICHTINGER-FELBER

Les deux tabliers se lèvent sans l'aide de contrepoids.

Une passerelle qui se lève pour laisser passer les bateaux a été construite entre trois îles à Copenhague (Danemark). Enjambant deux canaux, elle raccourcit les trajets des piétons et des vélos. Elle a été baptisée "pont papillon" (Butterfly bridge) par ses concepteurs, Dietmar Feichtinger Architectes, qui ont également conçu la passerelle Simone de Beauvoir (Paris 13<sup>e</sup>) et le nouveau pont du Mont-Saint-Michel. L'ouvrage est constitué d'une poutre principale de forme trapézoïdale en acier.

Deux des trois tabliers de la passerelle en Y sont articulés. Ils sont fixés à la plate-forme centrale mais peuvent bouger indépendamment l'un de l'autre. La levée fonctionne sans l'aide de contrepoids. La passerelle mesure 8 m de large et la hauteur de sa section varie de 0,50 m à 1,70 m. Dessous, la poutre longitudinale a une largeur de 0,40 m à l'endroit de l'axe de rotation sur la partie centrale. Elle s'élargit jusqu'au point d'attache du cylindre hydraulique, situé à 5 m, puis s'amincit vers l'extérieur du tablier.

Chaque partie mobile mesure 23 m depuis le point de pivot et repose sur la berge. Il est prévu que leur extrémité puisse être remplacée, par exemple si le quai est modifié, sans bouleverser tout l'ouvrage.

### → Trois couples de piliers en V

Les ailes du papillon sont levées par vérins hydrauliques avec un système de recentrage pendant l'opération. Ces équipements ainsi que les joints d'appui, sont installés en cantilever (porte-à-faux) sur la partie centrale fixe de la passerelle. Celle-ci repose sur trois couples de piliers en V, placés sous les axes de rotation des tabliers mobiles. ■



© CHRISTIAN LINDGREN

L'extrémité du tablier qui repose sur la berge pourra être changée si la route (à gauche) est agrandie, sans bouleverser toute la passerelle.

## PROJETS NEUFS ET RÉNOVATION AU PLATEAU DE SACLAY



© SOU FUJIMOTO ARCHITECTS

Intérieur invitant à la rencontre dans le Bâtiment d'enseignements mutualisés.

La zone d'aménagement du plateau de Saclay (Essonne) dite de Paris-Saclay accueille de nombreux chantiers neufs ou de réhabilitation, sous l'égide d'un établissement public. Parmi les projets au stade des travaux sur le pôle scientifique

et technologique, citons le Bâtiment d'enseignements mutualisés de Sou Fujimoto Architects, lauréat du concours. L'enseignement y sera commun à six écoles supérieures dont l'École polytechnique. La construction du bâtiment de 10 000 m<sup>2</sup> est évaluée à 32,5 millions d'euros. Un large espace intérieur à passerelles et escaliers invite au brassage des disciplines.

Favoriser les échanges est aussi au programme de la rénovation du laboratoire de physiques des solides (11 000 m<sup>2</sup>) du Centre de physique matière et rayonnement (Université Paris-Sud). Ont été confiées au bureau d'études techniques CET associé à Patricarce & Co, architectes et ingénieurs : la mise aux normes, l'adaptation aux équipements modernes (champ magnétique, vibrations, etc.), la révision de la ventilation, le désamiantage et une démarche de haute qualité environnementale.

Sur le même site, va être construit un immeuble d'enseignement de la physique

conçu par Du Besset-Lyon (10 700 m<sup>2</sup>) avec une architecture en deux parties dont une sur 4 niveaux avec effet de diagonale.

### → Centre de formation à reconvertir

Enfin, un appel à projets a été lancé pour la reconversion du bâtiment F, ancien Centre national d'études et de formation de la police nationale, soit 5 000 m<sup>2</sup> des années 1970, à Gif-sur-Yvette. Les candidats, dont une poignée a été retenue fin mai pour concourir, devront lui trouver une destination en cohérence avec le projet du plateau de Saclay inscrit dans la loi du Grand Paris. ■

© ÉTABLISSEMENT PUBLIC PARIS-SACLAY



Ce bâtiment des années 1970 cherche une nouvelle destination.

## VINCI AU PAYS-DE-GALLES ET EN ÉGYPTE

Le gouvernement du Pays-de-Galles (Royaume-Uni) a attribué la première phase d'une section autoroutière de 24 km à une joint-venture détenue par Taylor Woodrow et Vinci Construction, deux filiales de Vinci, et par Costain. Le projet qui inclut un viaduc haubané de 2,5 km au-dessus de la rivière Husk, est estimé à 1 015 millions d'euros (750 millions de livres britanniques). Les travaux commenceront en 2018 si le feu vert est donné par les autorités.

En Égypte, le groupement piloté par Vinci Construction Grands Projets et Bouygues Travaux Publics a remporté l'extension de la ligne 3 du métro du Caire.

Les deux entreprises, associées à Orascom Construction et Arab Contractors, vont construire un tunnel de plus de 5 km et 5 stations enterrées. Montant : 264 millions d'euros. Livraison 2018.

## CNR COOPÈRE AVEC LE LAOS

La Compagnie nationale du Rhône (CNR) a signé un accord de coopération avec le ministère de l'Énergie et des Mines de la République démocratique populaire du Laos fin mars.

L'entreprise française apporte son expertise en ingénierie hydroélectrique et fluviale à travers l'évaluation de projets sur le Mékong, de la formation et de la recherche de fonds.

Présente depuis vingt ans aux côtés des Laotiens, elle apporte déjà son assistance à plusieurs barrages sur le grand fleuve.

### ATEX POUR UN MUR ISOLANT

Ce double mur en béton banché intègre un isolant. Il peut être mis en œuvre par toute entreprise maîtrisant le béton banché, selon GBE et Lafarge, associés dans ce produit. L'Ultra Twin vient d'obtenir un avis technique expérimental favorable (Atex n°2127), étape indispensable à son développement. Le système qui comporte deux voiles en béton auto plaçant autour d'un isolant en panneaux, élimine les ponts thermiques, siège de fuites de chaleur, et améliore l'étanchéité à l'air d'une construction.



© GEB-LAFARGE

Procédé accessible à nombre d'entreprises.

### CRÉATION D'ENGIE

GDF Suez s'appelle Engie depuis le 24 avril. Le projet d'entreprise au cœur de la transition énergétique, a été confié à Isabelle Kocher, directrice générale déléguée. Le groupe se réorganise sur une base géographique et non plus par métiers (service, gaz, infrastructures)\*. Notons qu'il a pris des parts dans Redbird, opérateur de drones, à travers sa filiale GDF Suez New Ventures. Par ailleurs, le groupe investit dans la gestion en temps réel du réseau de distribution alimenté par différentes sources dont le biogaz (projet Gontrand avec Sigfox, 17<sup>e</sup> appel du fonds unique interministériel).

\* Cf. Le Monde, 3 avril 2015.

## EAU : PROGRAMME D'INVESTISSEMENTS À PARIS



© EAU DE PARIS

L'entretien des 470 km d'aqueducs reçoit 44 millions d'euros. Ici, l'aqueduc du Loing entre Seine-et-Marne et Paris.

Eau de Paris va investir 450 millions d'euros d'ici à 2020 dans le réseau d'alimentation en eau potable de la capitale, soit une hausse de 7% par rapport à son premier programme. La régie, municipale depuis 2010, décline son deuxième plan 2015-2020 en trois axes. Plus de la moitié du programme va aux infrastructures, avec 250 millions d'euros dont 97,5 dédiés à la réduction des pertes d'eau. Le réseau qui comporte 2 050 km de tubes sous pression, a déjà un rendement de 92%. Les canalisations de petit diamètre seront renouvelées ainsi que des conduites majeures. L'entretien des 470 km d'aqueducs diagnostiqués en 2008, obtient 44 millions

d'euros. Douze millions d'euros iront aux galeries d'eau, installations hydrauliques et stations de pompage, et 28, aux usines d'eau potable existantes : renouvellement des membranes à Saint-Cloud et à l'Haÿ-les-Roses (Hauts-de-Seine), automates industriels, installation d'un pilote de suivi des filtres à charbon actif en grain sans ozonation à Joinville (Val-de-Marne). Eau de Paris envisage aussi d'implanter de la maintenance assistée par ordinateur. La qualité de l'eau et du service reçoit 145 millions d'euros dont 30 pour la rénovation de l'usine d'eau potable d'Orly (Val-de-Marne), 18 pour la reconstruction du décanteur de l'usine d'eaux de rivière de Joinville, et 10 pour une nouvelle unité

de traitement des eaux acheminées par l'aqueduc du Loing.

#### → Utiliser l'eau non potable

En matière de qualité, la régie va favoriser l'agriculture biologique sur ses aires de captage, qu'elle soit ou non propriétaire des terrains protégés. Eau de Paris entend limiter ses consommations d'énergie, notamment dans ses filières de traitement. Elle va aussi contribuer à la production d'énergies renouvelables en investissant dans des puits géothermiques, sources d'eau chaude de la Zac Clichy-Batignolles et de celle de Bercy-Charenton, à Paris. Enfin, elle va consacrer près de 37 millions d'euros à l'entretien et au développement de son réseau d'eau non potable qui sert aux usages moins nobles comme l'arrosage. ■



© VITTORIA VERLEYVOZONIA

Réacteurs à ultraviolets de la future usine de traitement sur les eaux acheminées par l'aqueduc du Loing.

## CLOUAGE DE PAROI EN SITE URBAIN ÉTROIT

Spie Fondations a renforcé un mur par clouage dans la partie très étroite d'une rue du quartier Montmartre à Paris. Les équipes de la filiale de Spie Batignolles ne disposaient que de 1,25 m pour évoluer au sol. Le mur de soutènement qui fait face à des habitations montrait des signes de fatigue : fissures, affaissements, divisions. Le remblai qu'il stabilise est posé sur de l'argile verte et le mur lui-même, de 14 m de haut, est constitué de tout-venant derrière un parement de pierre sur 350 m<sup>2</sup>. Impossible d'employer une foreuse. Après une phase de reconnaissance et d'études, des clous ont été testés fin 2014. À fin mars 2015, 63 clous avaient été plantés, de 76 mm de diamètre et 12-13 m de longueur, à l'exception de quelques uns de 5 m de long, le tout sur six niveaux. Avant de procéder au clouage, les pans de mur les moins résistants ont été régénérés par injection d'un coulis puis



© SPIE BATIGNOLLES

Un mât de forage léger a été utilisé afin de ne pas déstructurer le parement.

reprise de la maçonnerie par coulage de dalles en béton sur les cailloux décoratifs. Ainsi consolidé, il pouvait supporter un mât de forage adapté à la situation et ancré sur la paroi. → Les tiges de forage restent en place Après carottage, les clous ont été réalisés

par assemblage d'armatures métalliques utilisées comme tiges de forage et qui restent en place. Le fluide de forage a été ensuite remplacé par un coulis de scellement. L'ensemble a été recouvert de béton projeté. ■

# Lundi, 7h00, mon véhicule ne démarre plus.

- Mon chantier attendra.
- J'emprunte la voiture de ma femme.
- Je reste serein : mon assureur SMABTP a tout prévu !



## Franck, conseiller en assurance SMABTP

« Quand un problème arrive à l'un de nos clients, ce n'est jamais celui qu'il imaginait ! Heureusement notre savoir-faire nous permet d'anticiper pour lui : nous avons déjà tout envisagé. C'est pour cela que nous apportons à nos assurés la meilleure solution pour l'entreprise, leurs dirigeants et leurs collaborateurs. »

Fort de plus de 150 ans d'expérience, SMABTP assure les professionnels du BTP. Ses experts vous accompagnent à chaque instant.

Par exemple, en cas de sinistre auto, vos collaborateurs et vous-même bénéficiez d'une **assistance performante et complète**, avec la fourniture d'un véhicule de remplacement et l'expertise à distance. Tout ce dont vous avez besoin pour protéger votre activité !

**Notre métier : assurer le vôtre**

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

**ACTIVITÉ** Responsabilité décennale - Responsabilité civile  
Dommages en cours de travaux - Protection juridique

**BIENS PROFESSIONNELS** Engins de chantier - Locaux - Véhicules

**DIRIGEANTS ET SALARIÉS** Couverture des engagements sociaux - Épargne  
Prévoyance - Retraite collective et individuelle



**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

## RECYCLEUR À ÉPANDAGE INTÉGRÉ

Le WR250 de Wirtgen à unité d'épandage intégrée S-Pack a été dévoilé à Paris, à Intermat. Grâce à cette intégration, le recycleur-stabilisateur de sol, destiné aux travaux routiers, peut travailler par tous les temps et sans déplacement du liant par les véhicules roulant à proximité.

Le liant est déposé juste devant le rotor de fraisage et de malaxage par le module d'épandage et incorporé immédiatement dans le sol. Le carter du tambour fermé et le double tablier de protection en caoutchouc empêchent la formation de poussière et la quantité épandue reste dans la bande fraisée.



Préparation de l'épandeur sur chantier.

© WIRTTGEN GROUP

## TABLETTE DE TOPOGRAPHIE

Atlog a remporté une médaille d'or au concours innovation du salon Intermat dans la catégorie applications numériques.

Le spécialiste en instruments de topographie a réuni dans un même logiciel et sur une tablette les relevés, le bornage, le récolement, la détection géolocalisée des réseaux, l'implantation de projets routiers ou de génie civil. La tablette se fixe aux instruments de terrain. Cette interface tactile dessine en temps réel le plan Autocad au fur et à mesure que le levé avance et le restitue ensuite à l'informatique de bureau.

## INTERMAT

### NOUVEAUTÉS PAR LIEBHERR FRANCE



© LIEBHERR FRANCE

Écran de contrôle de l'équipement de démolition d'une pelle hydraulique.

Liebherr France rafle deux prix de l'innovation au salon Intermat (20-25 avril, Villepinte). Tout d'abord, son système de contrôle d'un équipement de démolition remporte une médaille d'argent dans la catégorie ingénierie et systèmes. Pour être plus précis, c'est l'automatisation du contrôle de la position de l'équipement qui est primé.

Le conducteur de la pelle de démolition suit la progression de l'outil sur écran en temps réel et au centimètre près. L'écran lui montre où il peut travailler sans perte de stabilité, là où les mouvements sont autorisés à partir de la position de l'outil et de son poids. Tout mouvement qui menacerait l'équilibre de l'engin est empêché.

Ce contrôle s'effectue grâce à une détection automatique de la longueur d'équipement en plus des capteurs d'angle existants. Le système "Liebherr Demolition Control" (LDC) est intégré à l'électronique de la pelle.

Le LDC était présenté sur la pelle R960 disponible en deux versions, avec un équipement qui développe 28 m ou 34 m. Elle remplace la R954C. Cette gamme comprend un modèle plus puissant, la 974.

Toutes les nouvelles machines de Liebherr ont des moteurs respectant les exigences européennes d'émissions de gaz (Tier IV final), comme la pelle LH30 destinée à la manutention de déchets dans les centres de recyclage.

→ **Monte-grutier sur batterie**  
Le monte-grutier de Liebherr France, médaille d'or à Intermat dans la catégorie équipements et accessoires, s'installe à l'intérieur de la mât d'une grue si elle a une section minimum de 2,30 m par 2,30 m, ou à l'extérieur pour les plus petites. Il peut se monter sur un modèle existant de la marque.

Cet ascenseur, obligatoire à partir de 60 m de haut (30 m en 2017), reste en place au montage-démontage de la grue. En effet, le LiUp n'est pas raccordé au réseau électrique.

Il tire son énergie d'une batterie lithium-ion qui se recharge en partie à la descente, soit 40 % environ de la consommation ainsi récupérée. ■

La fréquentation a toutefois baissé de 8,5% par rapport à 2012, année record, avec 183 000 entrées pour 132 000 visiteurs identifiés. Les exposants, en revanche, sont plus nombreux de 5%, à 1 410.

## SALON COSMOPOLITE

**Cosmopolite, c'est la première impression qui se dégage du salon Intermat, exposition de matériels et techniques pour les industries de la construction et des matériaux, fin avril au Parc des expositions de Villepinte. Toutes les langues se parlent. Des stands sont tenus par des Asiatiques qui se promènent aussi dans les allées.**

**Plus du tiers des visiteurs sont venus de 169 pays différents avec une bonne participation du Moyen-Orient, d'Afrique du Nord et de Turquie, représentés aussi par leurs ambassadeurs ou une délégation officielle.**

**La fréquentation a toutefois baissé de 8,5% par rapport à 2012, année record, avec 183 000 entrées pour 132 000 visiteurs identifiés. Les exposants, en revanche, sont plus nombreux de 5%, à 1 410.**

## POSE ET DÉPOSE DE RÉSEAUX SANS DOMMAGES

Rivard propose plusieurs machines pour le creusement de tranchées étroites et les interventions sur réseaux. À Intermat, il exposait son Exvac SE 10, excavateur qui déblaie par aspiration les terres autour d'un réseau existant sans l'endommager. Il s'inspire des engins de curage de canalisation d'assainissement, une des spécialités du fabricant qui souhaite développer le principe en réalisation de fouilles dans les travaux publics.

→ **Coordonnées X, Y, Z enregistrées**

En ce concerne les machines pour mini tranchées, Rivard a présenté à Intermat son modèle de trancheuse Riv City. Sa faible hauteur - 1,40 m - dégage la vue sur l'environnement de travail, très utile en ville.

Toutes les petites machines sont radio-commandées par l'opérateur situé à

quelques pas. Sur la trancheuse Riv 104 TR 80T, le fabricant va incorporer un enregistrement des coordonnées X,Y,Z de l'endroit exact où est implanté un réseau par l'engin.

Ainsi, l'entreprise de pose peut-elle fournir aux concessionnaires un plan de récolement le plus précis possible.

La réglementation exige une localisation à 2 cm près. ■



L'Exvac aspire les matériaux autour de réseaux enfouis.

© RIVARD



### 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'œuvre, de contrôle et d'ingénierie de la construction partout dans le monde.

[www.tpi.setec.fr](http://www.tpi.setec.fr)



Pont sur le Bouregreg - Maroc  
Conception et assistance à la maîtrise d'œuvre



Troisième pont sur le Bosphore - Turquie  
Indépendant Checker



Pont de Ruzsky - Russie  
Expertise pour la Fédération de Russie



Route de la Corniche (Brazzaville) - Congo  
Maîtrise d'œuvre en groupement avec SOI

Crédit Photos: setec - François Herveaux - Desbrières & Associés - (378)

## GRUE ET WAGONS ACCÉLÈRENT LE CHANGEMENT D'AIGUILLAGES



La grue peut manipuler des aiguillages pré-assemblés jusqu'à 28 m de long.

Le secrétaire d'État aux transports a assisté de nuit à une expérimentation sur des travaux en gare de l'Est à Paris, en mars. « Ces innovations doivent permettre de réaliser davantage de maintenance et de manière plus efficace, » a indiqué Alain Vidales.

Cette visite confirme son engagement à décaler les projets de développement afin de consacrer tous les moyens disponibles à la maintenance, pris lors du 1<sup>er</sup> comité de suivi de la sécurité ferroviaire en

février, au nom de la sécurité de circulation des trains.

Une grue de haute technologie a servi à déposer les aiguillages et à les remplacer, le tout en deux mois. L'opération en gare de l'Est concernait 7 aiguillages et 120 m de voie courante pour un montant de 3 millions d'euros. Ce marché a été attribué à la société Pichenot Bouillé.

#### → Wagon pupitre

L'innovation consiste à éviter un des deux montages-démontages des aiguillages,

celui qui avait lieu sur les voies. Désormais, la grue Kirow peut manipuler des appareils de voie de 28 m de long et 14 tonnes, dans l'environnement ferré. Elle est associée à des wagons spéciaux qui les transportent tels quels, depuis les ateliers, sans avoir à les démonter et à les remonter sur chantier.

Un wagon pupitre achemine des appareils dotés de traverses jusqu'à 4,8 m, posés en biais sur un plateau qui descend à l'horizontale sur chantier. Une fois à plat, le plateau peut être déplacé latéralement de 50 cm pour éviter poteaux et quais ou ne pas empiéter sur une voie adjacente. Ainsi, le "chantier" occupe-t-il une surface plus restreinte et sans risque pour la caténaire.

#### → Durée de vie plus longue

Cet ensemble innovant diminue la durée des travaux qui peuvent alors avoir lieu de nuit en semaine. La durée de vie des aiguillages devrait monter à trente-cinq ans au lieu de trente.

Deux cents "appareils de voie" vont être changés d'ici à 2017 en Île-de-France dans le cadre de Vigirail. ■

## CHARGEUSE MULTI TÂCHES

La chargeuse-pelleteuse 3CX Potholemaster peut raboter et balayer une chaussée en ville. Le conducteur passe d'une tâche à l'autre sans la reprogrammer. Elle roule sur la route à 40 km/h.

« Le circuit hydraulique à débit variable et à régulation de pression fournit la puissance maximale à la raboteuse tout en maintenant le contrôle intégral de toutes les fonctions de la flèche et du balancier pendant le rabotage, » écrit JCB qui la propose. Une fonction levage hydraulique permet de collecter les fraisats bitumineux et de les charger à l'arrière d'un camion-benne, pratique si le chantier est cantonné à une voie.



Chargeuse-pelleteuse d'entretien de chaussée.



Membre du Réseau Congés Intempéries RTP

## 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 plus 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



## BRISE-SOLEIL EN TERRE CUITE

Les brise-soleil du restaurant universitaire du Technopôle de Metz (Moselle) sont en terre cuite. Leur calepinage est un des apports de cette réalisation, selon Salmon qui a posé les bardages. Les lames Barro sont mobiles. Appliquées aux façades, elles régulent la lumière et la chaleur du Metz'in, conçu par KL Architectes pour 500 convives, notamment des ingénieurs des trois écoles voisines.



© WIENERBERGER

Les lames sont mobiles.

## USINE MARÉMOTRICE BRITANNIQUE

Les Britanniques relancent le concept d'usine marémotrice. Leur version consiste à accumuler de l'eau derrière une digue, côté mer mais sans la barrer. Les vannes s'ouvrent à marée haute pour produire de l'électricité. Puis, à marée descendante, le processus s'inverse. Tidal Lagoon Power attend les dernières autorisations pour commencer la construction d'un mur formant lagon dans la baie de Swansea, au Pays de Galles. Ce sera la première installation grandeur nature, d'une puissance de 320 MW pouvant produire 14 heures par jour. L'organisation qui regroupe des spécialistes en énergies renouvelables prépare parallèlement un projet de plus grande envergure dans la baie de Cardiff, plus à l'est dans le Pays de Galles, sur l'immense embouchure de la Severn. Il s'agit de former un lagon grâce à un mur de 22 km de long. Le lagon, se situant sur le bord nord de la baie, ne barre pas la rivière. Des mesures sont prévues pour ne pas perturber

la faune : vitesse lente des turbines et vannes spécifiques.

### → 1 800 MW de puissance

À Cardiff, la différence de hauteur entre deux marées est de 8,50 m. La puissance peut atteindre 1 800-2 000 MW avec une production de 4 à 6 térawatt-heures par an, de quoi alimenter tout le Pays de Galles sans problème. La durée de vie d'une telle usine est estimée à

cent-vingt ans par Tidal Lagoon Power. Coût : 8,3 milliards d'euros pour une mise en service en 2023 si le projet franchit tous les obstacles<sup>(1)</sup>. Le Royaume-Uni cherche à augmenter sa part des énergies renouvelables à 15% dans la four-niture d'énergie contre 5% en 2014. ■

<sup>(1)</sup> Cf. *Le Monde* 8-9 mars 2015, article d'Eric Albert.



Vue de la future digue dans la baie de Swansea (Pays-de-Galles).

© TIDAL LAGOON SWANSEA BAY PLC

## AGENDA

## ÉVÉNEMENTS

• 1<sup>er</sup> AU 3 JUILLET**Grands ponts multi travées***Lieu : Porto (Portugal)*<http://paginas.fe.up.pt/~mslb2015>

## • 12 AU 15 JUILLET

**Applications des statistiques et de la probabilité au génie civil***Lieu : Vancouver (Canada)*[www.icasp12.ubc.ca](http://www.icasp12.ubc.ca)

## • 13 AU 17 SEPTEMBRE

**16<sup>e</sup> conférence mécanique des sols et géotechnique***Lieu : Édimbourg (Écosse)*<http://xvi-ecsmge-2015.org.uk>

## • 15 AU 17 SEPTEMBRE

**Auscultation non destructive des ouvrages d'art***Lieu : Berlin (Allemagne)*[www.ndt-ce2015.net](http://www.ndt-ce2015.net)

## • 15 AU 17 SEPTEMBRE

**16<sup>e</sup> symposium ISAVFT sur l'aérodynamique, la ventilation et l'incendie dans les tunnels***Lieu : Seattle (Washington, États-Unis)*[www.bhrconferences.com](http://www.bhrconferences.com)

## • 16 AU 18 SEPTEMBRE

**1<sup>re</sup> conférence sur la résilience des transports de surface face au changement climatique et aux événements météorologiques extrêmes***Lieu : Washington DC (États-Unis)*[www.trb.org](http://www.trb.org)

## • 21 AU 25 SEPTEMBRE

**4<sup>e</sup> conférence sur les ponts orthotropiques***Lieu : Tianjin (Nord-Est Chine)*<http://en.chinabridge.org.cn>

## • 24 SEPTEMBRE

**Ponts en maçonnerie : du diagnostic à la réparation (journée technique)***Lieu : Nancy (Meurthe-et-Moselle)*[www.cerema.fr](http://www.cerema.fr)• 30 SEPTEMBRE ET 1<sup>er</sup> OCTOBRE**5<sup>e</sup> assises Port du futur***Lieu : Paris*[www.eau-mer-fleuves.cerema.fr](http://www.eau-mer-fleuves.cerema.fr)

## • 30 SEPTEMBRE AU 2 OCTOBRE

**Rencontres nationales du transport public***Lieu : Lyon (Eurexpo)*[www.objectiftransportpublic.com](http://www.objectiftransportpublic.com)

## • 5 AU 7 OCTOBRE

**4<sup>e</sup> conférence sur la réparation, la réhabilitation et le recyclage du béton***Lieu : Leipzig (Allemagne)*[www.iccrr.com](http://www.iccrr.com)

## • 5 AU 9 OCTOBRE

**Congrès mondial systèmes de transport intelligents***Lieu : Bordeaux*<http://itsworldcongress.com>

## • 7 ET 8 OCTOBRE

**Congrès Smartgrid Smartcity***Lieu : Paris (Porte de Versailles)*[www.smartgrid-smartcity.com](http://www.smartgrid-smartcity.com)

## • 13 AU 15 OCTOBRE

**Preventica (sécurité sur chantiers)***Lieu : Lyon (Eurexpo)*[www.preventica.com](http://www.preventica.com)

## • 14 ET 15 OCTOBRE

**Colloque Le Pont : entretien et réparation des ouvrages d'art***Lieu : Toulouse*[www.le-pont.com](http://www.le-pont.com)

## • 20 AU 23 OCTOBRE

**Congrès de la Société de l'industrie minérale***Lieu : Mons (Belgique)*[www.lasim.org](http://www.lasim.org)

## • 2 AU 6 NOVEMBRE

**25<sup>e</sup> congrès mondial de la route***Lieu : Séoul (Corée du Sud)*[www.piarc.org](http://www.piarc.org)

## • 2 AU 6 NOVEMBRE

**Interclima et Elec***Lieu : Villepinte*[www.interclimaelec.com](http://www.interclimaelec.com)

## • 30 NOVEMBRE AU 11 DÉCEMBRE

**Cop 21 : conférences des parties sur les changements climatiques***Lieu : Le Bourget (Seine-Saint-Denis)*[www.cop21.gouv.fr](http://www.cop21.gouv.fr)

## FORMATIONS

• 30 JUIN ET 1<sup>er</sup> JUILLET**Exécution des travaux de réparation d'ouvrages d'art***Lieu : Paris*<http://formation-continue.enpc.fr>

## • 23 AU 25 SEPTEMBRE

**Géotechnique et génie civil : risques naturels et environnement***Lieu : Paris*<http://formation-continue.enpc.fr>

## • 6 ET 7 OCTOBRE

**Gestion des eaux pluviales : élaborer une politique territoriale***Lieu : Paris*<http://formation-continue.enpc.fr>

## • 16 AU 18 NOVEMBRE

**Inspection des ouvrages d'art : tunnels***Lieu : Paris*<http://formation-continue.enpc.fr>

## NOMINATIONS

## BOUYGUES :

Jean-Philippe Trin est nommé directeur général délégué chargé de Bouygues Travaux Publics, DTP et VSL International. Olivier-Marie Racine est directeur général délégué chargé de Bouygues Bâtiment International et Bouygues Énergies & Services. Bernard Mounier devient directeur général de Bouygues Bâtiment Île-de-France.

## ÉCOLOGIE :

Laurent Bouvier (ex-Agence de l'eau RMC) est nommé conseiller eau, risques naturels et santé environnement auprès de la ministre. Sandrine Ménard occupe la même fonction à propos de la conférence climat Cop 21.

## ÉCONOMIE RÉGIONALE :

Frédéric Cuvillier a été élu président du Conseil national des éco-

nomies régionales qui fédère les agences de développement et les comités d'expansion économique. Il succède à Pascal Allizard.

## ÉNERGIE :

Olivier David devient sous-directeur du système électrique et des énergies renouvelables à la Direction générale de l'énergie et du climat.

## FER DE FRANCE :

Nicola Jachiet - PDG Egis et Syntec Ingénierie - a été élu à la présidence de l'organisme interprofessionnel du transport ferroviaire.

## GDF SUEZ :

Pierre Mongin a été choisi pour être secrétaire général et directeur général adjoint d'Engie, nouveau nom de GDF Suez.

## INFRASTRUCTURES :

Michel Hersemul a été promu sous-directeur de l'aménagement du réseau routier national à la Direction générale des infrastructures, du transport et de la mer (ministère de l'Écologie).

## RATP :

Élisabeth Borne est nommée PDG de la Régie parisienne de transports parisiens en remplacement de Pierre Mongin, après avoir intégré le conseil d'administration en avril.

## SNBPE :

Philippe Chaize succède à Philippe Labbé à la présidence du collège béton prêt à l'emploi en Languedoc-Roussillon. Jean-Paul Lucas prend la suite de Thomas Watrin en Île-de-France, et Alain Etrillard, celle de Bruno Cloirec en région Centre.

## SOLETANCHE FRESYSSINET :

Benoît de Ruffray devient directeur général de la filiale de Vinci Construction.

## UNTEC :

Pascal Asselin a été élu président de l'Union nationale des économistes de la construction. Il remplace Pierre Mit.

# SNCF RÉSEAU RÉGÉNÉRER LE RÉSEAU : UNE POLITIQUE À LONG TERME

DEPUIS LE 1<sup>er</sup> JANVIER 2015, LA LOI SUR LA RÉFORME FERROVIAIRE PROMULGUÉE LE 4 AOÛT 2014 EST ENTRÉE EN VIGUEUR, DONNANT NAISSANCE AU NOUVEAU GROUPE SNCF. C'EST AINSI QUE SNCF INFRA, LA DIRECTION DE LA CIRCULATION FERROVIAIRE ET RÉSEAU FERRÉ DE FRANCE SE SONT RASSEMBLÉS POUR FORMER SNCF RÉSEAU.

**THOMAS JOINDOT, CHEF DU DÉPARTEMENT OUVRAGES D'ART AU SEIN DE SNCF RÉSEAU, NOUS PRÉSENTE LES NOUVELLES ORIENTATIONS DU SERVICE DONT IL A LA RESPONSABILITÉ.** PROPOS RECUEILLIS PAR MARC MONTAGNON



1

© MARC MONTAGNON

AU SEIN DU MÉTIER « INGÉNIERIE ET PROJETS » DE SNCF RÉSEAU, L'ACTIVITÉ DU DÉPARTEMENT DES OUVRAGES D'ART IGOA CONNAÎT UNE NOUVELLE PHASE DE DÉVELOPPEMENT DIRECTEMENT LIÉE À LA RÉGÉNÉRATION DES LIGNES ET, TOUT PARTICULIÈREMENT, DES QUELQUE 15 000 PONTS ET 1 500 TUNNELS EXISTANTS, MAIS AUCUN AUX TRÈS NOMBREUX TRAVAUX DE RACCORDEMENT ENGENDRÉS PAR LA CRÉATION DE LIGNES NOUVELLES TANT EN RASE CAMPAGNE POUR LES TGV, QU'EN ZONE URBAINE, NOTAMMENT EN RÉGION PARISIENNE AVEC LE PASSAGE DES NOUVELLES INFRASTRUCTURES DU GRAND PARIS SUR OU SOUS LE RÉSEAU FERRÉ EXISTANT - CE QUI EST MOINS MÉDIATISÉ.

**Depuis la réforme votée le 1<sup>er</sup> janvier dernier, quels sont les principaux changements intervenus au sein de la nouvelle entité SNCF Réseau ?**

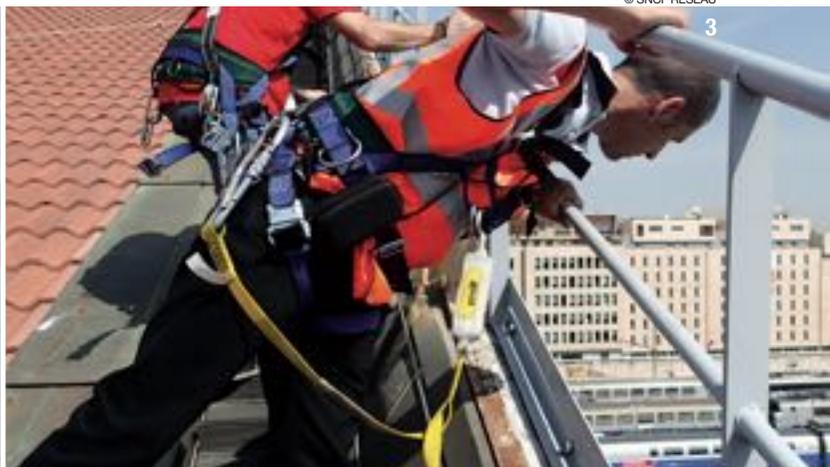
La mise en place de la réforme ferroviaire a abouti à la fusion, au sein de

SNCF Réseau, de RFF et de la SNCF. Nous sommes désormais l'ingénierie de référence en Ouvrages d'Art de SNCF Réseau, au sein de la direction technique du métier « Ingénierie et Projets » qui est l'un de ses quatre métiers de SNCF Réseau.



2

© SNCF RÉSEAU



3

© SNCF RÉSEAU

L'entreprise est actuellement dans la phase de mise en place des nouvelles structures qui interviendra de façon effective le 1<sup>er</sup> juillet prochain.

### Quels sont ces quatre métiers ?

Le premier est « Accès Réseau ». Il comprend la commercialisation des sillons qui sont les créneaux d'utilisation du réseau par les entreprises ferroviaires ainsi que la définition de l'évolution du réseau (le « design » du réseau), notamment pour tout ce qui concerne la création de lignes nouvelles ou l'augmentation de capacité ou des performances. « Accès réseau » sera en amont sur la définition de ces programmes en liaison avec les autorités concernées - l'État et les régions - sur leurs besoins, leur financement, etc. Le deuxième métier est celui de la « Circulation », qui regroupe l'ensemble des services en charge de la gestion du trafic et des circulations.

Le troisième métier, « Maintenance et Travaux », sera en charge de la maintenance du réseau et aura aussi pour fonction de piloter les programmes de régénération des installations dans le cadre de sa mission d'« asset management ».

Le quatrième métier, qui est le nôtre, est « Ingénierie et Projets ». Il a pour mission, d'une part, l'élaboration du référentiel de conception de l'infrastructure ainsi que l'assistance à l'ingénierie de maintenance (le terme « ingénierie » inclut l'ensemble des compétences techniques sur la conception et la maintenance des installations, notamment pour les ouvrages d'art) et, d'autre part, le management des projets, aussi bien de développement que de régénération.

Dans cette fonction « management de projet », on retrouve les équipes de gestion de projet de l'ingénierie qui étaient précédemment au sein de la SNCF mais également les équipes de direction d'opérations qui étaient précédemment chez RFF.

### Comment cela se traduit-il dans la pratique ?

Une fois qu'un projet sera défini, stabilisé et financé, sa maîtrise d'ouvrage (on parle alors de maîtrise d'ouvrage opérationnelle) et sa maîtrise d'œuvre seront toutes les deux au sein du métier « Ingénierie et projets » qui en aura donc l'entière responsabilité, y compris la responsabilité financière sur les coûts finaux de l'ouvrage.

Les équipes de SNCF et de RFF vont ainsi être regroupées dans de nouvelles « agences projets » pour assurer la gestion des projets sur le réseau, par exemple, le renouvellement d'un ouvrage d'art ou la construction d'un nouvel ouvrage.

**1- Thomas Joindot, chef du département des ouvrages d'art à SNCF Réseau - Ingénierie & Projets.**

**2- Réhabilitation du viaduc routier sur la Loire, à Ancenis (maîtrise d'œuvre IDOA pour le Conseil Général de Loire Atlantique).**

**3- Inspection et cotation de 42 grandes halles voyageurs pour RFF.**

**4- Un ouvrage visité en 2014 dans le cadre du programme de priorisation des ouvrages métalliques : le pont de la Bohémienne au Monastier.**

**5- Couverture des voies de la gare d'Austerlitz.**

### Comment le service IGOA s'intègre-t-il dans cette réforme ?

En tant qu'ingénierie technique, nous sommes finalement assez peu impactés par la réforme sur le plan de notre organisation. Ce qui change, c'est notre relation avec les chefs de projet. Celle-ci est différente puisque nous n'avons plus de relation client/fournisseur avec RFF : nous n'avons plus qu'une relation en interne.

Dans SNCF Réseau, IGOA conserve son positionnement mais avec des évolutions de sa typologie d'activité qui étaient déjà entamées avant la réforme. L'état général du réseau, qui a vieilli, et le fait que nous ayons engagé depuis quelques années - et encore plus maintenant - un programme de renouvellement, fait que nous développons de plus en plus d'activités en maintenance et en renouvellement tandis que, parallèlement, nous intervenons de façon moins significative en développement. Ceci pour deux raisons : d'une part la construction de lignes nouvelles est moins d'actualité, tout au moins dans l'immédiat (et de toute façon, le choix d'en externaliser la maîtrise d'œuvre n'a pas vocation à être remis en cause), d'autre part la situation économique conduit au ralentissement de certains projets en région. C'est toutefois une appréciation un peu en trompe l'œil car le volume très important des opérations à venir en région parisienne, avec de nombreux projets en interface très forte avec le réseau exploité, génèrent quand même une très forte activité de développement.

### Dans ce cadre différent, quelle est l'actualité de votre département ?

Nous avons un programme très soutenu de renouvellement des ouvrages et nous voyons apparaître de nombreuses opérations de développement en Île-de-France. L'activité monte en puissance dans cette région. Elle est largement externalisée quant il s'agit de

réalisations de nouvelles lignes comme le nouveau tunnel pour Eole, prolongement du RER E vers l'ouest. Par contre, lorsque ces travaux rejoignent le réseau exploité, nous avons des prestations d'étude et des opérations importantes qui relèvent de notre compétence. Sur Eole, par exemple, pour le côté ouest, nous réalisons un saut de mouton et un franchissement de la Seine à Bezons, nous pilotons la construction de plusieurs ouvrages de soutènement à l'approche de Poissy pour la création d'une voie supplémentaire. Sur le côté est, nous sommes très présents pour la construction de la gare de Rosa Parks, à hauteur de Pantin, et nous avons plusieurs études pour la réalisation d'ouvrages divers pour la réalisation d'une voie supplémentaire à l'est de cette gare. D'autres opérations sont motivées par le fait que les nouvelles lignes du Grand Paris croisent à plusieurs endroits des lignes du réseau ferré national avec des créations de gares et d'ouvrages généralement souterrains de franchissement de voies qui vont être construits dans le cadre de lignes maintenues en exploitation pendant les travaux : Clamart, La Défense ou Vert-de-Maisons, près de Créteil. Nous contribuons également à la mise en accessibilité des gares du réseau Île-de-France, ce qui veut dire créations de passages souterrains, modernisation et parfois créations de passerelles avec l'adjonction d'ascenseurs...

### Serez-vous impliqués dans le projet CDG Express qui prévoit de relier directement, la Gare de l'Est à l'aéroport Paris - Charles-de-Gaulle ?

Ce projet a effectivement été relancé par le gouvernement en 2014 avec des travaux qui pourraient commencer d'ici deux à trois ans.

La construction de CDG Express se traduira par des travaux très importants : l'aménagement des quais en gare de l'Est, la création d'un tunnel ▷

© SNCF RÉSEAU

4



© SNCF RÉSEAU

5



entre la gare de l'Est et les voies ferrées de Paris-Nord, la rénovation et la réhabilitation de plusieurs ouvrages d'art existants, la création d'une bifurcation et d'une voie nouvelle d'environ 8 km entre Mitry-Mory et l'aéroport, la construction de 4 nouveaux ponts et d'un tunnel sous les pistes de Roissy. À IGOA, nous sommes actuellement impliqués dans la reprise des études d'avant-projet. Certaines parties du projet seront externalisées, d'autres, notamment celles qui sont très adhérentes au réseau exploité ou ayant trait à des ouvrages anciens, seront réalisées en propre par Ingénierie & Projets, dont IGOA.

### À côté des projets de développement dans la région parisienne, quels sont ceux dans lesquels vous êtes engagés en province ?

En région PACA, nous intervenons sur la seconde phase du doublement de la voie ferrée entre Marseille et Aix en Provence. C'est un projet important qui inclut notamment l'agrandissement de tunnels et le doublement d'ouvrages. En PACA également, mais à un horizon plus lointain, la réalisation en plusieurs phases d'une ligne nouvelle entre Marseille et Nice est prévue.

Parmi les grosses opérations annoncées, le passage en souterrain sous la gare Saint-Charles de Marseille jusqu'à Aubagne, une ligne nouvelle au départ de Nice, qui desservira Sofia Antipolis avec un raccordement à hauteur de Grasse comportant de nombreux ouvrages souterrains, ainsi qu'une gare nouvelle au niveau de l'aéroport de Nice. Sur ce projet en phase amont, nous intervenons pour le moment en assistance à l'Agence Projets sur certains points particuliers. À Toulouse et Bordeaux, dans le cadre du projet de ligne nouvelle reliant ces deux villes, nous avons des études en cours pour les ouvrages de raccordement de cette ligne au niveau de chacune de ces deux agglomérations.

## SNCF RÉSEAU ET LIGNES NOUVELLES

**Certes, la SNCF n'est plus maître d'œuvre pour la construction des lignes à grande vitesse. Elle n'en est pas pour autant absente de la plupart des grands chantiers, ainsi qu'en témoigne Thomas Joindot :**

*« Sur les chantiers de ligne nouvelle actuellement en construction - SEA, BPL, CNM<sup>(2)</sup>, trois lignes à grandes vitesse qui sont des PPP<sup>(3)</sup> et LGV Est phase 2, confiée à l'époque par RFF sous maîtrise d'ouvrage technique à Tractebel - nous n'intervenons pas directement mais nous assurons des prestations de diverses natures.*

*Sur BPL, nous sommes intervenus en études d'exécution pour Eiffage sur les viaducs du Quartier, du Vicoin et de la Courbe, entre Le Mans et Rennes, dans le développement d'un ouvrage innovant dit "à double action mixte" sur lequel le hourdis en béton inférieur participe à la flexion générale du tablier, ce qui permet une économie en matériaux supérieure à 15%.*

*Sur les autres lignes, nous sommes présents sur la plupart des raccordements au réseau ferré national : sur la LGV Est phase 2, par exemple, bow string de Vendenheim, franchissements de voie, sauts de mouto, etc. »*

### Le renouvellement du réseau constitue l'une des obligations de SNCF Réseau. Quelle est la politique de votre département dans ce travail de grande envergure ?

La politique n'est pas de renouveler systématiquement les ouvrages, sauf dans trois cas particuliers : les ponts métalliques, les tunnels, les parois revêtues.

Pour la plupart, les grands ponts métalliques datent de la fin du 19<sup>e</sup> siècle et deviennent, surtout sur les lignes à fort trafic, difficiles à maintenir en vie sauf au prix d'un coût de maintenance extrêmement élevé ; ce sont donc des ouvrages sur lesquels une maintenance préventive (par remplacement systématique) est organisée. Une démarche d'examen systématique de ce patrimoine avait déjà été engagée dans les années 80, et conduit à un programme de remplacement dont nous voyons arriver les dernières opérations.

Depuis deux ans, nous avons réengagé une démarche similaire l'ensemble de

notre patrimoine d'ouvrages métalliques de plus de 20 m.

Les ouvrages ont tous été répertoriés et classés en fonction de critères techniques (conception, matériaux...), d'exploitation (type de ligne, volume de trafic...), et de pathologie (à partir de la lecture des procès-verbaux d'inspection) qui nous ont permis de faire une première analyse documentaire du niveau de priorité accordé à chaque ouvrage.

À partir de ce classement effectué courant 2013, IGOA procède, en compagnie des experts régionaux, à une visite de chaque ouvrage en commençant par ceux figurant en priorité 1 (courant 2014), puis en priorité 2 depuis 2015 et enfin en priorité 3 dans les années à venir.

À l'issue de ces visites, nous confirmons ou non la nécessité de les remplacer ou de les réparer.

Nous procédons ensuite à un chiffrage à grosses mailles de l'opération, en imaginant par exemple les méthodes de construction et de mise en place pos-

sible du nouvel ouvrage, puis proposons une échéance temporelle pour le remplacement (2017/2022, 2022/2027, 2027/2032 et 2032/2037). Cela permet d'alimenter la discussion avec le gestionnaire du patrimoine - l'« asset manager » que j'évoquais précédemment - afin de nourrir le programme de renouvellement de ces ouvrages jusqu'à l'horizon 2040.

### Votre démarche est-elle comparable dans le cas des tunnels ?

Pour les tunnels, nous avons un système de cotation de leur état. Les tunnels sont notés entre 0 et 100. Plus la note est élevée, puis leur état demande une intervention. La programmation des travaux de confortement et de régénération s'effectue en fonction de cet indicateur ; elle est systématique sur les tunnels dont la cote d'état se situe au dessus d'une valeur prédéfinie.

Nous avons également, pour les tunnels, deux autres programmes spécifiques qui sont l'élimination des revêtements en brique, avec des critères et des objectifs qui peuvent différer suivant la catégorie de ligne, ainsi que l'élimination des tunnels non revêtus. Classiquement, la méthodologie utilisée pour ces opérations est la mise en œuvre de béton projeté sur treillis soudé avec, éventuellement, des augmentations de gabarit par rescindement.

Pour les tunnels, nous avons une vision du programme de régénération tunnel par tunnel jusqu'à l'horizon 2035.

### Et pour les parois revêtues ?

Les parois revêtues nécessitent une approche particulière. Nous avons mis en évidence depuis plusieurs années qu'elles constituent des ouvrages très sensibles. Les méthodes mises en œuvre à l'époque de leur construction, où les moyens techniques étaient moins performants qu'aujourd'hui, faisaient appel à la mise en œuvre de maçonneries afin d'éviter la chute de petits éléments sur les voies, dans des

© SNCF RÉSEAU

6



© SNCF RÉSEAU

7



tranchées quasi-verticales. Il s'est avéré avec le temps que ces maçonneries empêchent également de voir et de comprendre ce qui se passe derrière, dans le massif.

Nous avons connu plusieurs incidents, notamment la chute de blocs importants sur la ligne Paris-Austerlitz - Toulouse à Mercuès en mai 2012, heureusement sans autre conséquence que matérielle. La cause directe de l'accident est précisément l'effondrement, sur une longueur de 12,50 m, d'une partie du mur de parement de la tranchée rocheuse surplombant la ligne ferroviaire au sud du tunnel de Mercuès. Cet effondrement a été provoqué par le glissement des masses rocheuses auxquelles le mur en pierres maçonnées en cause est adossé.

Cet événement et plusieurs autres similaires d'ampleur plus limitée nous ont amenés à prendre des mesures de ralentissement ou de confortement et nous ont fait prendre conscience que nous avions, avec les parois revêtues, un patrimoine assez sensible.

Le sujet est travaillé en commun par les spécialistes « ouvrages d'art » et par les spécialistes « ouvrages en terre » et la première étape a consisté à mettre au point une méthode de classification de ces ouvrages en fonction d'un certain nombre de critères sur leur état connu ou leur sensibilité. Nous avons ensuite testé cette méthode sur une section de ligne entre Brive-la-Gaillarde et Souillac, l'objectif étant désormais, à partir des éléments de méthodologie mis ainsi en évidence, de construire une politique de maintenance et de régénération préventive des parois revêtues. Cette politique va certainement s'appuyer sur le référencement détaillé de ce patrimoine, sa classification en terme de risque et la définition, en lien avec l'« asset manager », des objectifs d'intervention raisonnables en fonction des surfaces à traiter, des niveaux de risque, des moyens financiers et des capacités techniques disponibles.

### **Avez-vous déjà chiffré l'importance des surfaces de parois revêtues à traiter et quelle échéance peut-être établie pour mener à bien l'opération ?**

La superficie est énorme. Elle se situe autour de 1,3 millions de m<sup>2</sup> ; le programme de régénération à construire sera assurément sur une durée de 10 à 20 ans.

La programmation des travaux est ensuite un exercice qui doit prendre en compte plusieurs contraintes car, en plus de la contrainte financière, il faut aussi prendre en compte les moyens techniques pour faire les études, encadrer les entreprises sur les chantiers et mettre en œuvre les mesures de sécurité, mais aussi assurer la cohérence entre les différentes spécialités sur une même ligne en définissant des programmes de travail par axe.

Pour vous citer un exemple dans le cadre des tunnels, nous avons plusieurs programmes de régénérations de tunnels en Normandie car ces ouvrages, qui datent des débuts du chemin de fer, ont été construits majoritairement en brique. Nous sommes intervenus sur

**6- À Auxonne, pose du tablier neuf du pont sur la Saône (ligne Dijon-Vallorbe).**

**7- Saut de mouton en béton armé au raccordement à Rennes de la ligne à grande vitesse BPL.**

**8- Tunnel de Monte-Carlo : travaux de renouvellement du radier.**

**9- Pôle d'échanges multimodal de Cenon en Gironde.**

le tunnel de La Motte, à l'ouest de Lisieux et nous intervenons actuellement sur le tunnel de Rolleboise, l'un des plus anciens en France, entre Bonnières et Rosny sur la ligne Paris - St-Lazare - Le Havre. Nous savons que, dans les prochaines décennies, nous allons devoir faire périodiquement des travaux sur les lignes normandes et donc, avec la direction régionale SNCF Réseau de Normandie, nous avons décidé d'une logique de programmation d'une série d'interventions systématiques, tous les 10 ans, dans les tunnels d'une des lignes normandes. L'idée est de massifier ce type d'interventions avec pour objectif de minimiser la gêne pour nos clients finaux.

### **Disposez-vous de matériels ou de moyens particuliers pour l'ensemble de ces travaux ?**

Les moyens techniques pour la réalisation des travaux de confortement ou de régénération sont du ressort des entreprises de travaux. Elles savent innover pour améliorer la productivité des chantiers en lien avec les évolutions de conception que nous pouvons introduire. Nous avons aussi pour objectif de favoriser ce type de démarche, qui passe avant tout par la recherche de la visibilité sur le volume d'opérations à venir. Au sein du département, nous menons de nombreux projets de recherche ou d'expérimentation sur des technologies de mesure ou de détection. Nous avons expérimenté la caméra infrarouge ainsi que des dispositifs de type radar pour l'expertise des désordres sur certains ouvrages, et nous travaillons à des dispositifs innovants pour détecter la chute de blocs des parois rocheuses.

En ce qui concerne la surveillance des ouvrages, elle repose principalement sur des visites d'inspection détaillée avec des pas de visite de 3, 6 ou 9 ans suivant les ouvrages.

La question qui se pose pour une inspection détaillée est d'utiliser le meilleur moyen tant au niveau technique qu'éco-

nomique. Les moyens ferroviaires - des passerelles négatives - sont coûteux et consommateurs de capacité puisqu'ils nécessitent une interruption de la circulation des trains. Mais ils sont indispensables dans bien des cas pour accéder à certaines parties des ouvrages.

Nous privilégions les moyens routiers, par exemple dans le cadre de petits ouvrages situés au-dessus d'une route. Nous sommes en train d'équiper en passerelles de visite certains ouvrages qui ne l'étaient pas ou qui l'étaient très mal. Ceci constitue un outil permettant à la fois de la diminution des coûts et l'amélioration de la qualité de la surveillance puisque l'inspecteur est dans une situation plus confortable.

Le groupe Ouvrages d'Art de Lille a également expérimenté l'utilisation de filets accrochés sous un tablier et permettant aux inspecteurs de cheminer sous celui-ci. Ils ont donné satisfaction. Nous avons une réflexion sur ces sujets mais nous sommes convaincus qu'il ne sera jamais possible de se passer d'engins ferroviaires pour faire une inspection. Par contre, nous allons chercher à diversifier, dès que possible, les outils techniques et les sources d'information. La partie instrumentation elle-même a considérablement évolué depuis 5 ans. Nous sommes capables aujourd'hui, en particulier grâce à un réseau de prestataires spécialisés, d'installer une multitude de jauges de contrainte sur un ouvrage avec un rapatriement des informations par GSM sur une plateforme Web en temps réel.

Nous menons également une action de veille permanente afin d'utiliser les meilleurs moyens de rapatriement et d'alertes des informations. □

1- Le tunnel de Rolleboise est un des plus anciens tunnels ferroviaires de France. Ouvert en 1843 et long de 2 613 m, il se situe sur la ligne de Paris-Saint-Lazare au Havre, dans le département des Yvelines.

2- SEA : Sud Europe Atlantique ; BPL : Bretagne Pays de Loire ; CNM : Contournement Nîmes Montpellier.

3- PPP : Partenariat Public Privé.

© SNCF RÉSEAU

8



© SNCF RÉSEAU

9





© CMG

**CMG**

# L'ACIER

## POUR DÉNOMINATEUR COMMUN

REPORTAGE DE MARC MONTAGNON

**SAINT-CALAIS, AU CŒUR DU PAYS CALAISIEU, SE PROCLAME CAPITALE MONDIALE DU CHAUSSON AUX POMMES, DONT LA FÊTE EST CÉLÉBRÉE LE PREMIER WEEK-END DE SEPTEMBRE DEPUIS 380 ANS !<sup>(1)</sup>. CETTE COMMUNE DE 3 400 HABITANTS SITUÉE ENTRE LE MANS ET VENDÔME, EST ÉGALEMENT LE SIÈGE D'UNE ENTREPRISE DONT LA DISCRÉTION N'A D'ÉGALES QUE LES COMPÉTENCES : CMG. C'EST UNE PME DE 45 PERSONNES DONT LE CHAMP D'ACTIVITÉ EST EN CONSTANT ÉLARGISSEMENT GRÂCE À UNE DIVERSIFICATION ENTREPRISE DEPUIS PLUSIEURS ANNÉES ET POURSUIVIE AUJOURD'HUI. RÉGIS VIAN, PRÉSIDENT-DIRECTEUR GÉNÉRAL ET PROPRIÉTAIRE DE L'ENTREPRISE NOUS PRÉSENTE LES SPÉCIFICITÉS DE CMG DANS LE DOMAINE DES CONSTRUCTIONS MÉTALLIQUES, TANT EN NEUF QU'EN RÉHABILITATION, Y COMPRIS DANS LE DOMAINE DES OUVRAGES D'ART.**

**CMG** (Constructions Métalliques Grésillon) a été créée par Camille Grésillon en 1936 à Saint-Calais, dans la Sarthe, où se trouvent toujours le siège social, les bureaux et l'usine de l'entreprise.

Camille Grésillon était à cette époque maréchal-ferrant et métallier. Par la suite l'entreprise a évolué à plusieurs reprises et a largement étendu le champ de ses activités, tout en restant dans le domaine de la construction métallique.

**1- Le chantier de la place des Jacobins au Mans constitue l'une des références emblématiques de CMG.**

Jusqu'au milieu des années 60, CMG s'occupait essentiellement de construction de bâtiments agricoles et assurait des services de proximité, sous les directions successives de Guy Grésillon, fils du fondateur puis de Jean-Camille Grésillon, son petit-fils.

L'arrivée en 1964 d'un jeune technicien - Yves Quentin - devenu l'associé de Jean-Camille Grésillon à partir de 2000, donne à CMG une vive impulsion dans le sens de la diversification.

À l'occasion du départ à la retraite des deux associés, l'entreprise est mise en vente en 2007, date à laquelle elle est reprise par son PDG et propriétaire actuel Régis Vian, un « homme du métal » qui exerçait précédemment des fonctions de responsabilités au sein de SMB, une entreprise de constructions métalliques, basée à Ploufragan, près de Saint-Brieuc (22).

En 2015, CMG emploie environ 45 personnes et réalise un chiffre d'affaires de 6,5 à 7 millions d'euros.

### UNE USINE SOUS LE SIGNE DE LA SOUPLESSE

L'équipement de l'usine, installée dans un vaste hall de 3 000 m<sup>2</sup>, est traditionnel, même s'il comporte plusieurs machines de découpe et de soudure à commande numérique.

« Dans cet équipement, je vise plutôt la souplesse, précise à ce sujet Régis Vian, que la spécialisation. Plutôt que de nous doter d'outils très sophistiqués dont le champ d'application est limité à des ouvrages également sophistiqués et donc en nombre limité, j'ai choisi de privilégier la réactivité de l'entreprise à l'aide d'équipements qui ne nous enferment pas dans une spécialité pointue mais qui répondent bien à la diversité de nos activités ».

### DES PAPETERIES ARJO AUX CENTRES COMMERCIAUX

Quelques réalisations ont jalonné son histoire : pour exemple le plus marquant, la papeterie Arjo à Bessé-sur-Braye, vaste ensemble industriel à l'évolution et au développement duquel CMG a participé au fil des années.

Mais, c'est au début des années 90 qu'elle va connaître le développement le plus significatif en abordant le marché des constructions pour la grande distribution sur des enseignes telles que Carrefour et Auchan.

L'entrée sur ce marché va également lui permettre d'élargir son champ d'action puisque, pour suivre ses clients sur leurs différentes opérations de développement, elle est amenée à travailler dans le grand quart nord-ouest de la France, voire au delà, avec une zone de prédilection dans un rayon de 300 km autour de Saint-Calais.

Toutefois, ceci ne l'empêche pas d'intervenir ponctuellement, pour répondre à la demande, loin de ses bases, par



© MARC MONTAGNON

**2- Régis Vian, président-directeur général de CMG.**

**3- Le siège social et les bureaux de CMG à Saint-Calais.**

exemple dans le Nord ou en région Midi-Pyrénées.

En 2008, CMG a participé à une extension importante de l'établissement Auchan du Mans, qui constitue une référence dans le domaine des bâtiments commerciaux, tout comme la concession Audi, sur la route de Tours, en bordure du circuit des 24 heures du Mans, dont le constructeur a tenu à faire un bâtiment emblématique tant au niveau de la qualité architecturale que des exigences techniques constructives, en liaison avec ses 13 victoires dans l'épreuve entre 2000 et 2014<sup>(2)</sup>.

Parmi les réalisations qui contribuent à affirmer les compétences techniques de l'entreprise, il faut également citer Valor Pôle, au Mans, un centre de tri dont le bâtiment principal comporte des portées de 50 m sans appui, une première pour CMG.

### LES QUINCONCES : ACIER ET ARCHITECTURE

Dans un tout autre domaine, mais qui est bien significatif de son engagement dans les projets de référence au niveau architectural, l'espace culturel des Quinconces, inauguré en 2014 et situé place des Jacobins, dans le centre historique du Mans, s'avère exceptionnel à plusieurs égards.

L'architecture du bâtiment repose sur un traitement en transparence assurant légèreté et fluidité de l'ensemble. L'équilibre des volumes, en harmonie avec ceux construits autour de la place et l'utilisation de matériaux nobles, assurent une bonne insertion

du projet dans son environnement. L'acier contribue pour une part significative aux qualités architecturales de l'ensemble, conçu par les architectes Éric Babin et Jean-François Renaud (cabinet babin + renaud).

Le volume semi-transparent revêtu de vitres et de panneaux à rayures verticales accueille le théâtre, tandis que le cinéma multisalle, revêtu de pierre blanche, se trouve sur la gauche.

Les deux volumes sont reliés par un toit horizontal qui protège également la zone délimitée par les corps de bâtiment

Le projet de l'espace culturel des Quinconces s'inscrit dans une démarche durable de préservation des ressources naturelles.

« Pour nous, ce projet a été exceptionnel à tous égards, précise Régis Vian, tant par le volume de l'opération - 1 300 t d'acier - que par l'architecture. Il s'agissait d'un marché en entreprise générale avec une coordination technique déterminante entre notre entreprise et Heulin du groupe Vinci, adjudicataire du marché de gros-œuvre, en raison de l'imbrication entre eux des différents matériaux : l'acier, le verre et le béton ».

### UNE STATION QUI NE MANQUE PAS DE CONTENU

À Rosny-sur-Seine, à l'ouest de la région parisienne, sur l'autoroute de Normandie (A13), la réalisation en 2014 de la station-service Shell relève également d'une démarche originale. Conçue par le cabinet SECC, cette station est constituée d'anciens conteneurs rénovés, décorés et disposés avec originalité sur une aire qui sort ainsi de la banalité de la plupart des établissements de ce type.

« Construite en entreprise générale par Sadrin Rapin, indique Régis Vian, elle se distingue par une imbrication soigneusement organisée des conteneurs sur lesquels est intervenue CMG pour pratiquer des découpes et des renforcements et assurer l'ensemble de l'aménagement intérieur ».

### L'ARCHITECTURE AU CŒUR DU DÉBAT

Les deux années qui viennent de s'écouler ont confirmé l'engagement de l'entreprise du pays calaisien de s'impliquer de plus en plus dans la participation à des réalisations dont le caractère architectural contribue à valoriser l'image commerciale de ses propriétaires : c'est le cas des derniers Intermarché ouverts à Uzerche dans ▷



4

© CMG



5

© MARC MONTAGNON



6

© MARC MONTAGNON

le Limousin et à Neuvic en Dordogne ainsi que du tout nouveau Super U de Bessières, près de Toulouse, en service depuis 2014.

CMG est également intervenue à plusieurs reprises l'année dernière pour la réalisation de stations-service dans la région Rhône-Alpes ainsi que sur la station Shell de l'aire de Montélimar, sur l'autoroute A6, en collaboration avec l'entreprise mancelle Sadrin-Rapin et le cabinet SECC, comme pour celle de Rosny-sur-Seine.

#### PREMIER PAS VERS LES OUVRAGES D'ART

L'une des opérations en cours, qui permet à CMG d'élargir à nouveau le champ de ses compétences, est celui de la réhabilitation du pont de Maulny, au Mans dans le cadre du chantier de la future ligne de « Super-Bus » Le Mans-Allonnes.

Le Pont de Maulny, qui enjambe l'Huisne après le quartier des Sables d'Or au Mans, fait l'objet de travaux spectaculaires pour accueillir le « Super Bus », qui roulera en site propre entre la gare du Mans et Allonnes.

Avec GTM, CMG assure la réfection lourde de l'ouvrage et, en particulier, la dépose de l'ensemble des caissons métalliques supports des trottoirs piétons et leur remplacement par des consoles également en acier.

« Il s'agit d'un ouvrage en béton sur lequel existaient déjà des élargissements en caissons métalliques anciens précise Régis Vian. Ces caissons sont déposés et évacués et remplacés par 60 consoles en acier autopatinable Corten. Nous étions déjà familiers de l'utilisation d'un tel acier mais essentiellement dans le cadre de chantiers architecturaux. C'est la première fois que nous en mettons en

**4- La concession Audi en bordure du circuit des 24 heures du Mans.**

**5- Le bâtiment en structure métallique de Valor Pôle au Mans : des portées de 50 m sans appui.**

**6- L'espace culturel des Quinconces, place des Jacobins, au Mans.**

œuvre pour des éléments structurels ». Le choix de cet acier répond à la volonté du maître d'ouvrage de faire appel à un produit ne nécessitant aucun entretien dans le temps puisqu'il demeure avec un état de surface brute, sans aucun revêtement.

C'est ainsi que l'acier Corten est un acier auto-patiné à corrosion superficielle forcée, utilisé pour son aspect et sa résistance aux conditions atmosphériques, aussi bien dans l'architecture et la construction métallique que dans l'art, principalement en sculpture d'extérieur.

Pour ce chantier, CMG a fabriqué dans son usine de Saint-Calais les consoles en tôles reconstituées de 4 m de longueur.

La dépose des caissons a été effectuée en deux nuits et en deux phases - deux par côté - en février et mai 2015, entre 20 heures et 7 heures du matin, à l'aide d'une grue de 300 t, sans interruption de la circulation.

Régis Vian met en évidence les spécificités du chantier de dépose : « Le poids total des caissons est de l'ordre de 80 t par côté. L'une des difficultés de l'opération était de définir une méthodologie



7

© CMG



8

© MARC MONTAGNON

permettant la dépose et l'évacuation des caissons tout en maintenant en service une voie de circulation alternée et en évitant tout risque de chute d'éléments métalliques dans la rivière». « Compte tenu du fait que le pont de Maulny n'était pas en mesure de supporter le poids d'une grue de très forte capacité, il s'agissait également de trouver le bon compromis entre la capacité de la grue et le poids des caissons - de l'ordre de 20 t par colis. Si les caissons pré-découpés étaient trop petits, le délai impératif de deux nuits ne pouvait être respecté. S'ils étaient trop grands, ils nécessitaient une grue trop lourde pour être instal-

**7- L'aire de service de Rosny-sur-Seine : une imbrication originale de conteneurs aménagés.**

**8- CMG intervient de longue date sur les créations et extensions des hypermarchés Auchan un peu partout en France.**

**9- Deux aspects de la contribution architecturale de l'acier dans l'espace culturel des Quinconces.**

lée sur le tablier du pont. Nous avons trouvé le bon équilibre entre les deux, tout en respectant les impératifs de budget».

Même si elle est encore beaucoup plus orientée « bâtiment », les ouvrages d'art constituent l'un des axes privilégiés de diversification de l'entreprise qui possède déjà d'autres références en la matière. C'est le cas de plusieurs passerelles routières. C'est aussi celui de la passerelle de la polyclinique Sévigné, à Rennes, (maître d'œuvre : Jean Pierre Meignan) où CMG a mis en place un bel ouvrage de 15 m de portée assurant la liaison entre les bâtiments existants et la nouvelle maison médicale.

### RÉHABILITATION : DES COMMERCES AUX BUREAUX

Les chantiers de réhabilitation, à l'image de celui du pont de Maulny mais dans le secteur du bâtiment, sont également à mettre au crédit de CMG. Un bon exemple en est donné à Issy-les-Moulineaux, rue du Colonel Avia, à la périphérie sud de Paris, par le projet Peri XV, confié à l'architecte Christian de Portzamparc (AECDP) par Bouygues Immobilier.

L'ensemble immobilier PERI XV est actuellement constitué de 5 bâtiments, pour une surface totale de 55 610 m<sup>2</sup> SHON. Le projet est à usage principal de bureaux, avec des commerces de ▷



© MARC MONTAGNON



© MARC MONTAGNON

9

## L'ESPACE CULTUREL DES QUINCONCES

La place des Jacobins est l'une des plus importantes du Mans, préfecture du département de la Sarthe. Située en contrebas de la Cathédrale Saint-Julien, elle est limitée à l'est par l'Espace Culturel des Jacobins (y était implanté jusqu'en 2009 le théâtre municipal, aujourd'hui détruit) et au sud par une Cité judiciaire créée à la fin des années 1980. Du couvent des Jacobins, auquel elle doit son nom, il ne reste que les Quinconces. Ce fut probablement le premier lieu habité de la ville, avant même le vieux Mans et le forum romain, actuelle place Saint-Michel.

Le projet d'espace culturel érigé au cœur de la ville offre aux manceaux un espace de convivialité dédié à tous les arts de la scène. Le bâtiment abrite :

- Un théâtre de 832 places, sur 3 800 m<sup>2</sup>, pouvant accueillir les spectacles vivants, l'art lyrique, les concerts, la danse et la création ;
- Une salle de répétition de 320 m<sup>2</sup> ;
- Un espace cinéma de 5 250 m<sup>2</sup> avec 11 salles permettant une programmation variée, comprenant un café littéraire (210 m<sup>2</sup>) et une galerie d'exposition (130 m<sup>2</sup>) ;
- Des salles d'exposition et d'animation, dont un espace polyvalent de 330 m<sup>2</sup>, une salle d'art contemporain de 320 m<sup>2</sup> fonctionnant en lien avec les manifestations du Quinconce ;
- Un parking souterrain d'une capacité de 610 places, sous l'espace culturel ;
- Un parvis central, formant une galerie traversière entre la place et le quinconce des Jacobins. Il assure ainsi la liaison entre les différents équipements et constitue un espace de convivialité, avec café en terrasse.



10

© MARC MONTAGNON

proximité en rez-de-chaussée. L'opération de réhabilitation concerne quatre d'entre eux, l'îlot dit « V » faisant l'objet d'une étude de démolition et reconstruction d'une tour de bureaux bioclimatique d'environ 80 000 m<sup>2</sup> SHON.

Le projet a plusieurs objectifs :

- Une mise en conformité vis-à-vis des dispositions réglementaires ;
- Une meilleure maîtrise de son impact environnemental ;
- Une redéfinition architecturale : s'inscrire dans la requalification urbaine du quartier, améliorer le fonctionnement de l'immeuble de bureaux en assurant une meilleure

qualité de travail et de confort pour les utilisateurs et les visiteurs.

C'est principalement dans la redéfinition architecturale qu'intervient CMG qui réalise plusieurs ouvrages métalliques dont des passerelles/bureaux d'un poids unitaire de 50 t, de 20 m x 20 m de section, « perchées » à une quinzaine de mètres de hauteur entre deux des immeubles existants en cours de réhabilitation.

« Pour ce chantier, les passerelles sont fabriquées en usine, partiellement assemblées à Saint-Calais, puis transportées par la route en convois exceptionnels par éléments d'un poids

**10- Le chantier de l'ensemble immobilier Peri XV à Issy-les-Moulineaux avec les deux passerelles métalliques (architecte : AECDP).**

**11- Détail de l'une des passerelles mise en place à 15 m de hauteur.**

**12- Schéma de structure des passerelles réalisées par CMG pour Peri XV.**

de l'ordre de 3 t, et boulonnées sur chantier, indique Régis Vian ».

« Le degré de préfabrication des passerelles est fonction des capacités de transport et des capacités de levage sur le site, en l'occurrence, ceux de la grue à tour du chantier. Toutes les soudures ont été réalisées en atelier. Seuls les boulonnages ont été effectués sur chantier ».

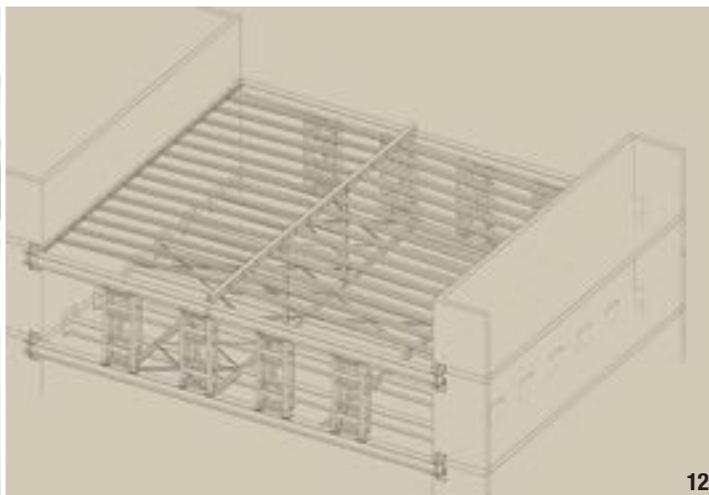
Pour le transport, l'entreprise utilise ses propres camions semi-remorques plateaux.

Toujours en réhabilitation, CMG est également intervenue sur la rénovation de la charpente métallique de couverture



11

© MARC MONTAGNON



12

© CMG



© MARC MONTAGNON

13

14

de la piscine de Fontenay-sous-Bois. « En réalité, nous avons toujours fait du "remodeling" de bâtiments commerciaux et je me suis rendu compte que cela nous donnait des compétences en bâtiments métalliques anciens ce qui nous a conduit tout naturellement, depuis un peu plus de deux ans, à aborder le marché de rénovation lourde de bâtiments tels que des immeubles de bureaux ».

Le grand chantier de rénovation des quelques 15 000 ponts, dont de nombreux ouvrages métalliques, engagé par SNCF Réseau dans le cadre de la régénération de ses lignes, pourrait constituer une importante source d'activité pour les années à venir. □

**13- La rénovation du pont de Maulny constitue l'un des premiers grands chantiers d'ouvrages d'art de l'entreprise.**

**14- Le tablier du pont de Maulny avec les nouvelles corniches en acier Corten.**

**15- L'une des réalisations de référence de CMG au Mans : le Pôle Santé Sud du Tertre Rouge, (maître d'œuvre : ATA associés).**

## PONT DE MAULNY : UN LIEU CHARGÉ D'HISTOIRE

**Le Gué-de-Maulny que franchit le pont éponyme est aujourd'hui un parc public situé dans la ville du Mans, entre la gare Sud et la rocade dans le secteur sud-ouest, au bord de l'Huisne. C'est le lieu même d'un ancien gué excentré de la ville qui permettait de rallier à pied ou en chariot Le Mans et Allonnes. Le lieu est également un endroit historique important à cause de ses batailles, de son château ou de ses moulins.**

1- Saint-Calais et le chausson aux pommes : de juin à octobre 1630, la ville est touchée par une terrible épidémie de dysenterie qui décime les deux-tiers de la population. Afin de venir en aide à ses habitants, et selon la légende, la châtelaine de Saint-Calais distribue aux nécessiteux un brouet de farine et de pommes. De ces ingrédients sommaires, naît « le pâté aux pommes », appelé aujourd'hui « chausson

aux pommes ». En souvenir de ce geste, la fête du chausson aux pommes est célébrée le premier week-end de septembre depuis plus de 380 ans.

2- Audi a remporté 13 fois les 24 heures du Mans depuis 2000 (R8, R10 TDI, R15+TDI, R18 TDI, R18 e-tron quattro) avec deux interruptions en 2003 (Bentley Speed 8) et 2009 (Peugeot 908).



© GUILLAUME SATRE

15



# MÉMORIAL INTERNATIONAL DE NOTRE-DAME-DE-LORETTE. ÉTUDES DE JUSTIFICATION DE L'OUVRAGE ET AJUSTEMENT DU PROJET

AUTEURS : JÉRÉMIE BURLOT, RESPONSABLE DU PÔLE GÉNIE CIVIL D'AMÉNAGEMENT, EIFFAGE TP DMI - BIEP – RICHARD PETIT, INGÉNIEUR D'ÉTUDES, EIFFAGE TP DMI - BIEP – PHILIPPE JANDIN, DIRECTEUR DE PROJETS, CTOA - CEREMA – JÉRÔME MICHEL, CHARGÉ D'ÉTUDE, CTOA - CEREMA

LE MÉMORIAL INTERNATIONAL DÉDIÉ AUX SOLDATS DE LA PREMIÈRE GUERRE MONDIALE TOMBÉS DANS LE NORD-PAS-DE-CALAIS EST SITUÉ SUR LE SITE DE LA NÉCROPOLE NOTRE-DAME-DE-LORETTE À ABLAIN-SAINT-NAZAIRE. C'EST NON SEULEMENT UN OUVRAGE EMBLÉMATIQUE RÉPONDANT AU DEVOIR DE MÉMOIRE MAIS ÉGALEMENT UNE PROUESSE TECHNIQUE QUANT À L'INGÉNIERIE ET À LA RÉALISATION. CET OUVRAGE, DÉNOMMÉ « ANNEAU DE LA MÉMOIRE », A ÉTÉ INAUGURÉ LE 11 NOVEMBRE 2014 DANS LE CADRE DES CÉRÉMONIES DE COMMÉMORATION DU CENTENAIRE DE LA PREMIÈRE GUERRE MONDIALE.

## INTRODUCTION

La Région Nord-Pas-de-Calais a confié à Philippe Prost, architecte, la conception du Mémorial International de la Première Guerre Mondiale, situé sur le plateau de Notre-Dame-de-Lorette à Ablain-Saint-Nazaire (62). Suite à un appel d'offres en 2013, le

lot 1 gros-œuvre étendu a été confié aux équipes d'Eiffage TP et d'Eiffage Énergie.

L'ouvrage est un anneau semi-elliptique de 328 m, constitué d'éléments préfabriqués en BFUP (en l'espèce le BSI® d'Eiffage) ; sur environ 125 m, ils sont assemblés par précontrainte

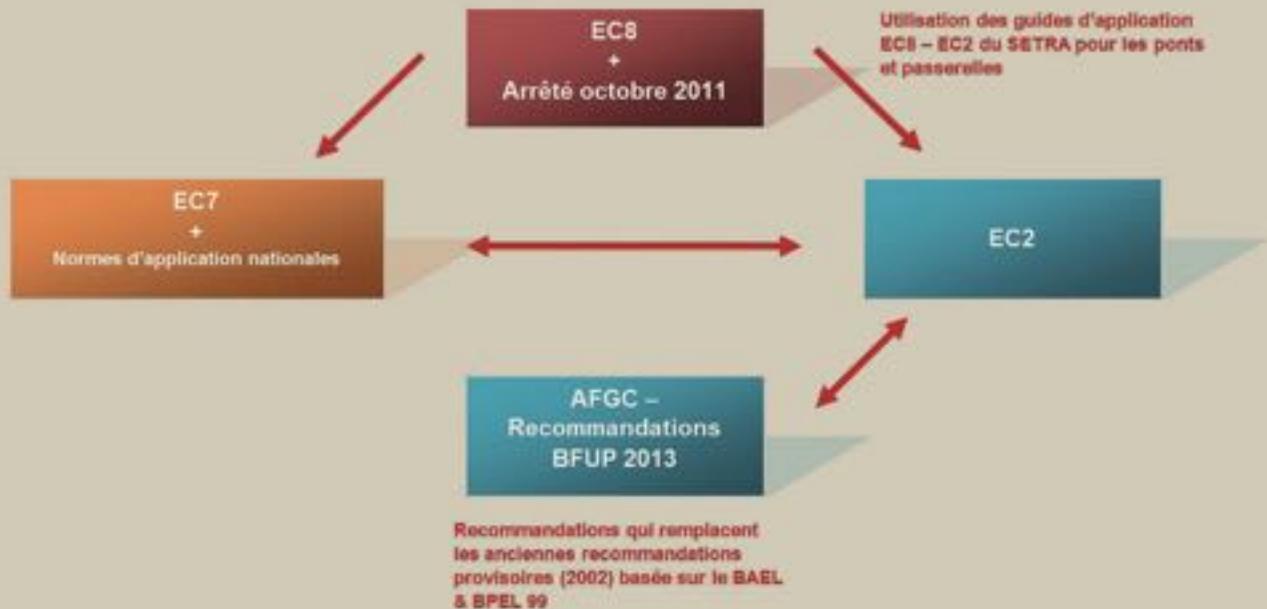
## 1- Le Mémorial Notre-Dame-de- Lorette.

## 1- The Notre- Dame-de-Lorette Memorial.

pour constituer une passerelle courbe. Les mises au point de cette seule partie de l'ouvrage sont décrites dans cet article.

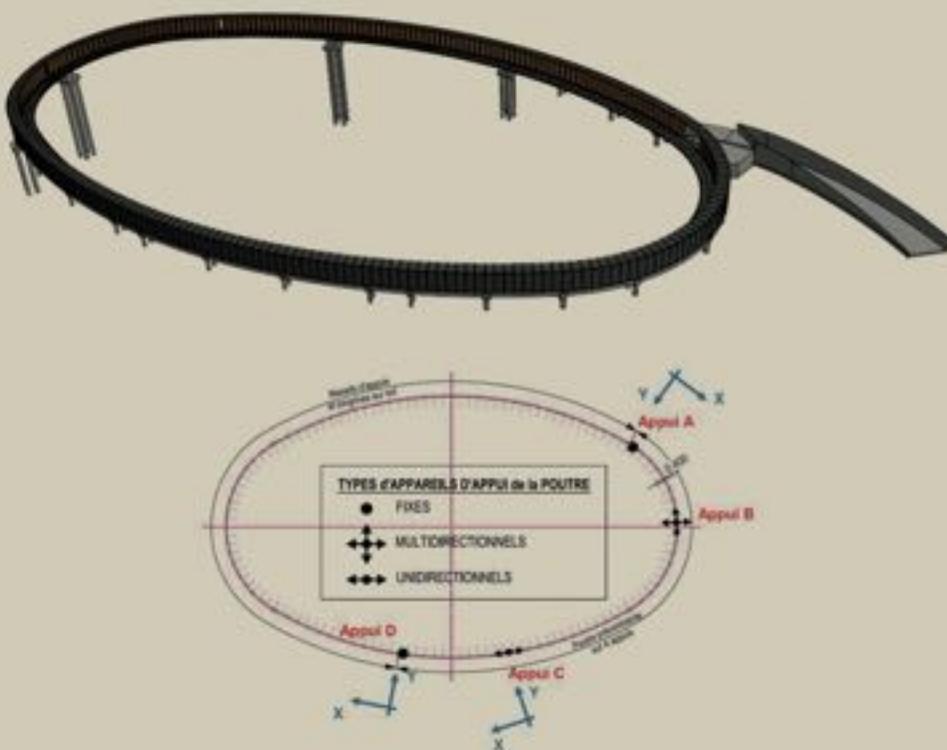
Une présentation de l'ouvrage sous l'angle du chantier et de la préfabrication a été effectuée dans le N° 911 de décembre 2014 de la revue *Travaux*.

## PRINCIPE D'ORGANISATION DU CADRE NORMATIF BASÉ SUR L'UTILISATION DES EUROCODES



© DR 2

## PRÉSENTATION DE LA STRUCTURE



© DR 3

2- Principe d'organisation du cadre normatif basé sur l'utilisation des Eurocodes.  
3- Présentation de la structure.

2- Principle of organisation of the normative framework based on the use of Eurocodes.  
3- Appearance of the structure.

### POSITIONNEMENT VIS-À-VIS DES RÈGLEMENTS DE CALCUL

Le Dossier de Consultation des Entreprises, antérieur à juin 2013, faisait référence aux documents disponibles à l'époque, notamment les règles provisoires AFGC BFUP 2002, et les textes BAEL - BPEL (91 révisé 99).

La réglementation pour la justification des ouvrages en béton fibré à ultra hautes performances (BFUP) ayant été modifiée suite à la parution des recommandations AFGC BFUP de juin 2013, après avis du Cerema et en accord avec la Maîtrise d'Ouvrage et la Maîtrise d'Œuvre, il a été décidé, pour

cet ouvrage exceptionnel, de disposer d'un cadre réglementaire parfaitement homogène et cohérent basé sur l'utilisation des Eurocodes (figure 2).

### DÉMARRAGE DES ÉTUDES

L'anneau, d'une emprise de 129 m x 75 m, est composé de 2 structures,

une zone reposant sur le sol et une zone en libre réalisée à l'aide de voussoirs préfabriqués en BSI® (BFUP d'Eiffage) assemblés par précontrainte par post-tension. L'ouvrage précontraint constitue une poutre courbe à 3 travées de 125 m de longueur totale dont la courbure minimale est de l'ordre de 27 m (figure 3).

Après plusieurs calculs sommaires, une modification a été apportée au projet en libérant l'appui B afin de limiter les contraintes sous charge thermique et charge de vent.

Cela a permis une diminution notable des réactions d'appuis, du dimensionnement des pieux, des efforts de flexion transversale.



4

© KARINE WARNY

**4- Éléments constitutifs de la passerelle.**

**5- Coupe type de la passerelle précontrainte.**

**4- Component parts of the foot bridge.**

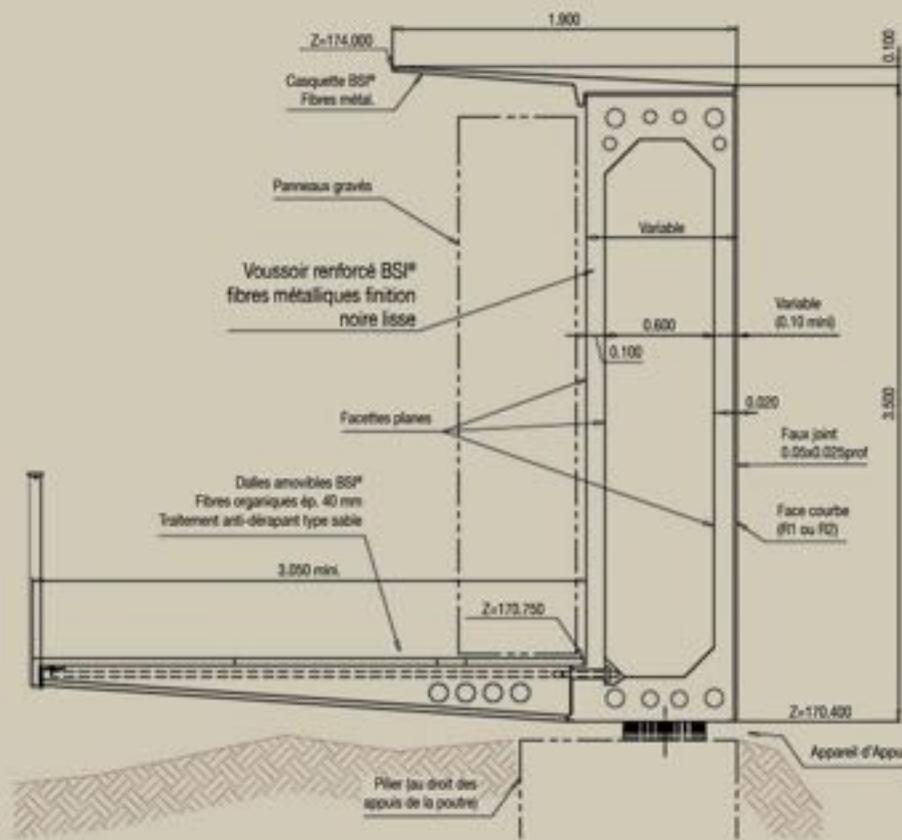
**5- Typical cross section of the prestressed foot bridge.**

En effet, dans cette zone, la structure pouvant bénéficier de la rigidité naturelle due à la courbure, l'appui horizontal aurait créé une inflexion au niveau des déformées horizontales. En contrepartie, ce changement de type d'appui a déplacé les fréquences propres horizontales de l'ouvrage vers un domaine où des études de confort sous chargement piétonnier sont rendues nécessaires.

La coupe type de la passerelle comporte 3 éléments en BSI® (figures 4 et 5) :

- Le voussoir préfabriqué permettant de réaliser la poutre précontrainte et la fixation des plaques commémoratives ;
- Les « casquettes » permettant la protection de ces plaques et une fermeture supérieure de l'ouvrage ;
- La passerelle constituée de support

COUPE TYPE DE LA PASSERELLE PRÉCONTRAINTÉ



5

© BSI

de dalles et de dalles amovibles équipées en rive d'un garde corps. L'intégralité de ces éléments en béton est réalisée en BSI® : les voussoirs, les supports et les casquettes en BSI® avec fibres métalliques, les dalles de sol amovibles en BSI® avec fibres synthétiques.

Les principaux chargements de la structure sont :

- Le poids propre des différents éléments ;
- Les circulations piétonnes statiques et dynamiques ;
- Les chargements climatiques (vent, température, neige) ;

**6- Contraintes normales enveloppes en phase définitive.**

**7- Évolution de la précontrainte en phase conception et exécution.**

**6- Normal stress envelopes in the final phase.**

**7- Evolution of prestressing in the design and execution phase.**

→ Les charges d'entretien pour des vérifications locales ;

→ L'action du séisme selon l'eurocode 8 et l'arrêté pont d'octobre 2011.

**MODÉLISATION AUX ÉLÉMENTS FINIS - CHOIX DES LOGICIELS**

Pour appréhender le plus finement possible le fonctionnement structural de la passerelle, le Bureau d'Études s'est appuyé sur 3 types de modélisations :

→ Le comportement général de la structure a été étudié à l'aide d'un modèle filaire réalisé avec le logiciel ST1. Compte tenu de la très forte

complexité des calculs, Eiffage TP a décidé de confier au Cerema, au titre du contrôle externe, un modèle de contre-calcul réalisé à l'aide du logiciel PCP. La maîtrise d'œuvre ayant utilisé le logiciel Sofistik, l'étude du Mémorial a bénéficié de la convergence de trois modèles de calcul distincts.

→ Des modélisations aux éléments finis pour des vérifications de phénomènes locaux (diffusion des contraintes de compression et tractions locales au droit des fenêtres de vue, diffusion des efforts concentrés au droit des voussoirs d'appuis). Pour étudier ces phénomènes locaux, des modèles aux éléments finis 3D ont été réalisés à l'aide du logiciel Robot Structural Analysis.

→ Enfin, pour étudier qualitativement le comportement attendu, et contrôler les résultats des modèles numériques, il a été fait utilisation de modèles simplifiés calculés manuellement sur Excel.

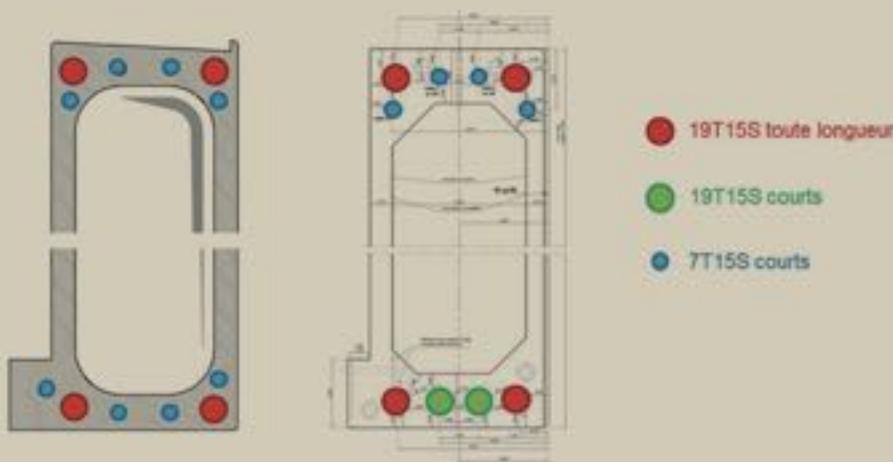
Le modèle ST1 permet de prendre en compte non seulement le phasage général de la structure afin de déterminer au mieux la précontrainte mais aussi l'évolution des caractéristiques des matériaux et notamment le fluage des BFUP. Les pertes de précontraintes sont calculées automatiquement par le logiciel. Dans ce modèle, chaque voussoir est modélisé par 4 barres soit un total de 196 barres. Les charges appliquées à la structure sont ramenées au centre de gravité de la section (ce qui correspond à la position des barres modélisant les voussoirs).

CONTRAINTES NORMALES ENVELOPPES EN PHASE DÉFINITIVE



© DR 6

ÉVOLUTION DE LA PRÉCONTRAINTE EN PHASE CONCEPTION ET EXÉCUTION



© DR 7

**PREMIERS RÉSULTATS DES CALCULS**

Les vérifications des contraintes normales respectent bien les limites réglementaires (figure 6) :

→ Compression limitée en service à  $0,6 \times f_{cj} = 99 \text{ MPa}$  ;

→ Traction limitée à :  
 - Zone BSI® à  $f_{tj}$  soit : - 4,25 MPa,  
 - Zone de joints : 0 MPa.

En revanche, il est apparu un problème majeur pour la justification de la structure sous sollicitations tangentes (efforts tranchant et moment de torsion). En effet, la torsion générée par la poutre courbe sous chargement vertical seul est supérieure à la capacité résistante de la section.

La part principale de ce moment de torsion est due aux charges permanentes largement prépondérantes sur cette structure.



Les premiers résultats conduisent à une contrainte de cisaillement maximale dans les âmes de 14,85 MPa aux ELS et un critère de cumul de torsion et de tranchant selon les règles AFGC BFUP 2013 (basée sur les Eurocodes) de 1,22, largement supérieur à 1.

Il a donc fallu modifier le tracé de la précontrainte afin de maximiser la compression au droit des zones de torsion maximale et de rééquilibrer au maximum les deux pics de torsion positifs et négatifs.

Toutefois, cet ajustement de la précontrainte (figure 7) entre les deux phases de conception et d'exécution était encore insuffisant pour justifier réglementairement l'ouvrage. Il s'est avéré nécessaire de redistribuer les portées des trois travées, en accord avec l'architecte, en réduisant la longueur de la travée centrale à 56 m environ (figure 8). L'équilibrage des 3 travées est alors mieux assuré (28,33 - 56 - 37,9) et l'effet est extrêmement favorable car la torsion naturelle générée par la poutre courbe est diminuée de 50%.

#### MODÉLISATION DÉFINITIVE

Le câblage finalement retenu pour la structure se décompose de la façon suivante (figure 7) :

- Une précontrainte filante importante de 4 x 19 T 15 S (2 en fibre supérieure, 2 en fibre inférieure) - Câbles 1 à 4 ;
- Des câbles longs 2 x 19 T 15 S (Câbles 7 & 8) en partie inférieure de la travée centrale ;
- Des câbles courts (Câbles 5/6 et 105/106) et longs (Câbles 9 & 10)

de plus petites unités 7 T 15 S en fibre supérieure.

Le phasage du modèle de calcul reprend évidemment les différentes étapes de mise en place de la structure :

- Mise en place des voussoirs, des supports et des casquettes ;
- Mise en tension symétrique des câbles 1 à 4 ;
- Clavage des appuis définitifs intermédiaires et décintrage des travées de rive ;
- Mise en tension des câbles inférieurs (7 et 8) de la travée centrale

#### 8- Travée centrale de la poutre.

9- Respect du critère de cisaillement aux ELS caractéristiques à la fin des études d'exécution.

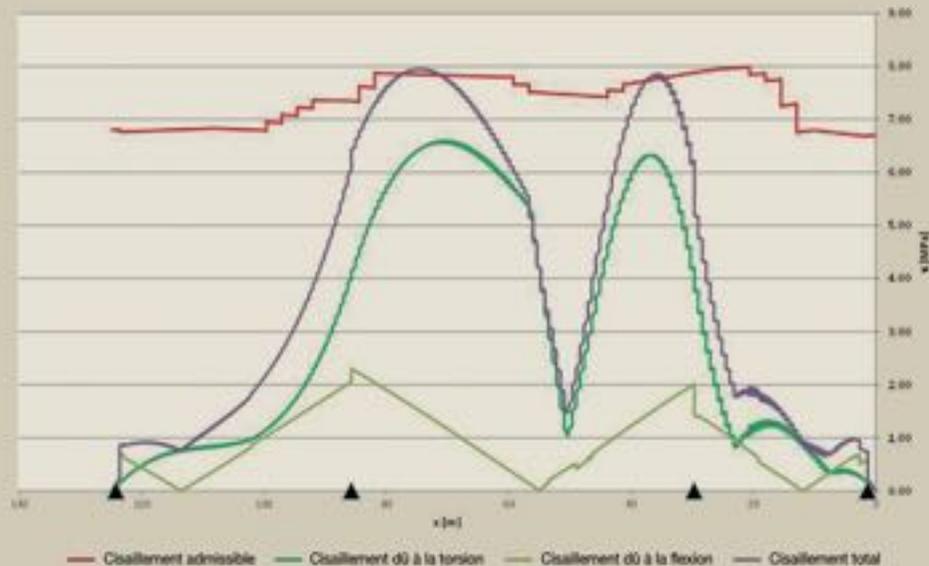
#### 8- Centre span of the beam.

9- Compliance with the shear criterion in characteristic SLS's on completion of the detailed design.

- Décintrage de la travée centrale ;
- Mise en tension des câbles longs supérieurs (9 et 10) ;
- Mise en tension des câbles courts sur appuis (5, 6 et 105, 106) ;
- Pose des dalles de passerelle et des garde corps.

Les ancrages actifs sont mis en place à proximité des zones de torsion maximale ce qui permet de limiter l'influence des pertes de précontrainte par frottement. Cela rend également plus facile l'accessibilité à la structure, les ancrages actifs étant plus proches des extrémités.

### RESPECT DU CRITÈRE DE CISAILLEMENT AUX ELS CARACTÉRISTIQUES À LA FIN DES ÉTUDES D'EXÉCUTION



Le contre-calcul du Cerema a mis en évidence des comportements locaux de torsion complémentaire à proximité des ancrages initialement disposés sur la face intérieure de l'anneau : les ancrages ont donc été rentrés dans l'espace disponible des caissons.

Les câbles courts ont pour effet de rééquilibrer les pics de torsion et de garantir une compression maximale au droit de ces mêmes pics.

Basée sur les notions présentées dans l'Eurocode 2, la justification sous sollicitations tangentées de la structure, (guide AFGC BFUP 2013) (figure 9) fait intervenir 3 paramètres :

→ Résistance du béton seul, celle-ci étant majorée dans le cas d'un béton comprimé ;

→ Résistance des fibres métalliques ;

→ Résistance éventuelle des armatures passives : dans notre cas, en section courante, ces armatures sont inexistantes, cette valeur est donc nulle.

La vérification des plans de contact de voussoirs a été menée en considérant les justifications relatives aux surfaces de reprises de bétonnage de l'Eurocode 2, en bénéficiant de l'effort de compression due à la précontrainte longitudinale.

Les paramètres de calcul pris en compte considèrent une surface de reprise la plus lisse possible.

Cette méthode de calcul, mise au point avec le Cerema, est identique à celle appliquée pour la justification du viaduc de Compiègne constitué d'un tablier réalisé à l'aide de voussoirs préfabriqués mis en place à l'avancement.

Les « clés de cisaillement » ne sont plus alors que des éléments de centrage des voussoirs lors de leur mise en place.

En effet, les voussoirs étant posés sur cintre, il n'y a pas d'effort sur les clés en phase provisoire.

## ÉTUDE DES VOUSSOIRS-FENÊTRES

Les voussoirs-fenêtres présentent des ouvertures de 3 m de haut sur une longueur moyenne de 80 cm placées dans la structure précontrainte. Au niveau de ces voussoirs, toutes les contraintes sollicitant la structure doivent passer dans les linteaux supérieurs et inférieurs d'épaisseur 35 cm environ. Leur justification s'est faite en 3 étapes :

→ Dans un premier temps, l'influence de ces ouvertures sur le comportement général de la poutre a été appréhendée. Cette étude a montré que ces fenêtres ont une influence faible sur le fonctionnement d'ensemble de la passerelle, grâce à leur positionnement éloigné des pics de torsion.

→ Dans un second temps, les principaux flux de contraintes au voisinage de ces fenêtres ont été étudiés. La principale action sollicitant ces voussoirs est l'effort normal de précontrainte, qui passe d'une répartition diffuse sur toute la hauteur du voussoir en section courante à une répartition concentrée sur les linteaux au niveau de la fenêtre. La transition entre ces deux états de contrainte passe par une bielle de compression équilibrée par un tirant au niveau de la paroi des fenêtres (figure 10).

→ Enfin dans un troisième temps, le voussoir et les efforts sollicitant en trois dimensions ont été modélisés sur Robot, de façon à recouper les estimations du modèle par bielles-tirants et à déterminer le ferrailage nécessaire dans les cloisons. Les principaux résultats sont les suivants :

- Compression maximale dans le linteau supérieur aux ELS caractéristiques : environ 80 MPa,
- Traction maximale dans les parois aux ELS caractéristiques : environ -20 MPa.

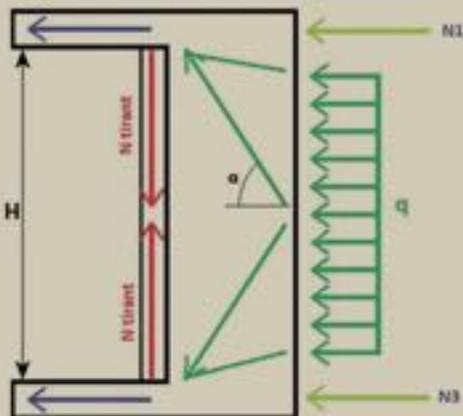
Pour justifier ces voussoirs, le BSI® a été mis à contribution au maximum de ses possibilités réglementaires : d'une part en compression (90 MPa maximum aux ELS caractéristiques), d'autre part en traction (mobilisation des fibres dans les parois), et enfin pour réduire la longueur d'ancrage des aciers complémentaires, ce qui a permis de placer 14 HA32 dans chacune des parois sans gêner le passage des câbles.

## ÉTUDE DYNAMIQUE

L'étude dynamique de l'ouvrage comporte deux volets distincts :

### MODÈLE DE BIELLES-TIRANTS

pour la transmission de la précontrainte dans les voussoirs-fenêtres



10- Modèle de bielles-tirants pour la transmission de la précontrainte dans les voussoirs-fenêtres.

11- Modélisation 3D des ancrages de précontrainte.

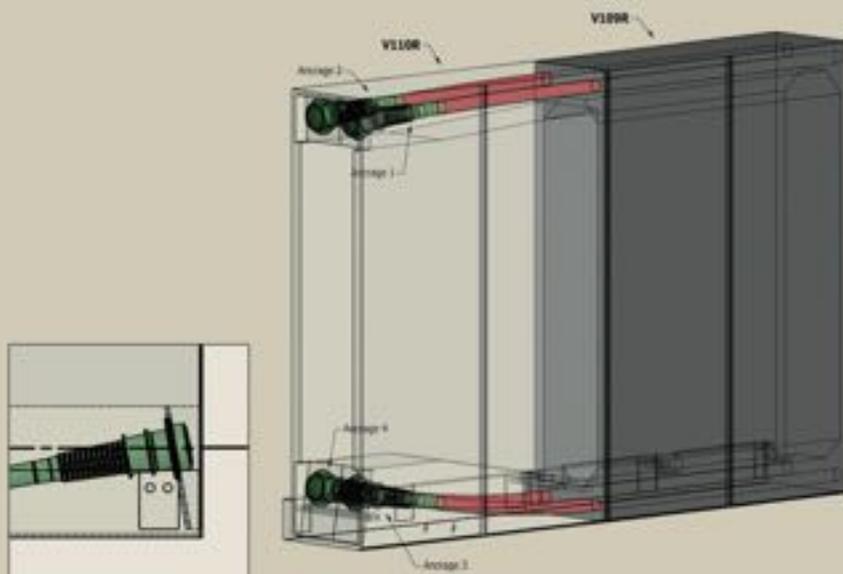
10- Strut-and-tie model for transmission of prestressing in the window segments.

11- 3D model of prestressing anchors.

© DR 10

### MODÉLISATION 3D DES ANCRAGES DE PRÉCONTRAITE

Voussoirs V110R et V109R



© DR 11



12

© KARINE WARNY

- D'une part, la justification de la structure sous sollicitations sismiques ;
- D'autre part, la vérification des critères de confort dynamique sous chargement piétonnier.

#### Modèle éléments finis pour l'analyse dynamique

La poutre courbe a été modélisée sur Robot Structural Analysis, sous la forme d'un modèle filaire avec des masses excentrées au niveau des casquettes et de la plateforme. La raideur du sol sous appuis a été négligée, ce qui est une hypothèse défavorable pour l'étude sismique puisque cela tend à surestimer la raideur des appuis. Ce modèle a permis de déterminer les modes propres de la poutre, à partir desquels ont été menées aussi bien l'étude sismique que l'étude de confort piétonnier. Cette étude a mis en évidence des modes de vibrations complexes, mêlant déplacements horizontaux, verticaux et de torsion. Les 11 premiers modes sollicitent 80 % de la masse modale horizontale, et les 20 premiers 95 %. Par ailleurs, il a été constaté que le premier mode (horizontal) et le troisième mode (vertical) se situent dans la plage de risque de mise en résonance par les piétons, conduisant à vérifier les critères de confort sous sollicitation dynamique.

#### Étude sismique

Pour étudier le comportement de la passerelle au séisme, les hypothèses suivantes ont été prises :

- Catégorie d'importance de l'ouvrage : II,
  - Zonage sismique : 2 (faible),
  - Classe de sol : C,
  - Méthode d'analyse spectrale.
- Cette étude a montré que les sollicitations sismiques ne sont dimensionnantes ni pour la passerelle, ni pour les fondations de l'ouvrage. Ce résultat s'explique notamment par le zonage sismique faible et la classe de sol.

**12- Vue aérienne du site avec la nécropole Notre-Dame-de-Lorette.**  
**13- Synthèse sur maquette 3D.**

**12- Aerial view of the site with the Notre-Dame-de-Lorette necropolis.**  
**13- Synthesis on 3D mock-up.**



© DR

13

#### Étude de confort sous chargement dynamique de foule

Parmi les adaptations apportées en phase d'exécution, la libération des déplacements horizontaux au niveau de l'appui B fût l'une des plus impactantes. Cette modification a permis de laisser respirer la structure, diminuant nettement les contraintes internes et les réactions aux appuis. Mais ce fut au prix d'une diminution des fréquences propres, plaçant l'ouvrage dans la plage de risques de mise en résonance sous chargement de foule.

Les hypothèses suivantes ont été considérées :

- Ouvrage de classe III, correspondant à une passerelle normalement utilisée, pouvant parfois être utilisée par des groupes importants mais sans jamais être chargée sur toute sa surface ;
- Pression dynamique de base de 0,6 kPa par piéton ;
- Raideur du sol négligée ;
- Coefficient d'amortissement critique  $\xi = 0,6\%$ . Cette valeur résulte des retours d'expériences sur d'autres passerelles en BFUP précontraint. Cette hypothèse est plus contraignante que celle proposée par le guide Cerema qui suggère  $\xi = 1\%$  pour un ouvrage en béton précontraint.

Sur la base de ces hypothèses, les sollicitations dynamiques horizontales engendrent des accélérations de l'ordre de 0,08 m/s<sup>2</sup>, valeurs infé-

rieures au seuil de synchronisation forcée (0,10 m/s<sup>2</sup>) au-delà duquel, dans un phénomène auto-amplificateur, les vibrations de la structure poussent les piétons à caler leur cadence sur ces dernières. Verticalement, le troisième mode est susceptible d'engendrer des accélérations d'environ 0,80 m/s<sup>2</sup>, ce qui place la structure dans la plage de confort moyen.

De son côté, le contre-calcul du Cerema a déterminé des accélérations moins importantes encore, confirmant qu'il n'était pas nécessaire de mettre en place des amortisseurs dynamiques comme c'est souvent le cas pour des passerelles piétonnes. Cet écart s'explique notamment par la prise en compte de la raideur du sol dans leur modèle.

### LA 3D AU CŒUR DES ÉTUDES D'EXÉCUTION

Dans le domaine du génie civil, les plans sont à la base du processus de transmission de l'information des études vers le chantier. Des années de pratique, et l'expansion de logiciels de DAO 2D ont contribué à standardiser

les processus de réalisation des plans. Ce mémorial à la géométrie complexe fut l'occasion de franchir un pas de plus dans la troisième dimension.

Les modèles 3D de la structure ont été effectués sous Inventor version 2014 d'Autodesk.

La maîtrise du logiciel liée à une utilisation régulière a permis de valider un certain nombre de points singuliers du projet.

Comme indiqué plus haut, les études menées conjointement avec le Cerema ont révélé la nécessité de mettre en place la précontrainte à l'intérieur du caisson. Les 24 ancrages de précontrainte (figure 11) ont donc tous été modélisés en 3D ainsi que les vérins de mise en précontrainte afin de valider la solution.

La marge de manœuvre pour les vérins de 19 T15 S était inférieure à 2 cm. La 3D a permis une modélisation précise qui a été validée à l'usine dans les voussoirs par une maquette simplifiée du vérin.

Par ailleurs, ces modélisations se sont révélées des plus précieuses dans l'échange avec les fabricants de cof-

frage, permettant de concevoir les abouts de coffrage spéciaux sous forme d'un dispositif de tôle pliée. Les abouts de positionnement d'ancrage ont pu être fabriqués directement par une machine à commandes numériques en exploitant le modèle des voussoirs. Les échanges de fichier ont été réalisés avec le format « .step ».

La 3D s'est révélée également très performante dans la synthèse des inserts à prévoir en interface avec le lot n°2 (figure 13) (Éléments métalliques : Tôles et gardes corps de rive réalisés par Citynox) et ceux nécessaires à la

mise en place des dispositifs provisoires (brélage des voussoirs après encollage de la face).

### CONCLUSION

Grâce à un dialogue constant et constructif avec tous les intervenants du projet, les études ont pu être menées à bien et le chantier finalisé dans le délai très court annoncé. Les études d'exécution de ce projet ont permis au bureau d'études de franchir une nouvelle étape dans l'évolution numérique du déroulement de l'ingénierie pour des projets à forte complexité. □

## INTERVENANTS

**MAÎTRISE D'OUVRAGE :** • Conseil Régional Nord-Pas-de-Calais  
• Direction des grands équipements

**MAÎTRISE D'ŒUVRE :** Aapp-Agence d'architecture Philippe Prost

**PAYSAGISTE :** David Besson Girard

**ÉCONOMISTE :** Bureau Michel Forgue

**STRUCTURE :** C&E ingénierie

**FLUIDES ET HQE :** Bureau Louis Choulet

**ARTISTE LUMIÈRE :** Yann Toma - Ouest Lumière

**GRAPHISTE TYPOGRAPHE :** Pierre Di Sciullo

**BUREAU DE CONTRÔLE :** Btp Consultant

**COORDINATEUR SÉCURITÉ :** Becs

## QUELQUES CHIFFRES

**7 500 h** de travail en génie civil (hors fabrication BSI®)

**700 m<sup>3</sup>** de béton mis en place sur site

**125 m<sup>3</sup>** de BSI® précontraint (voussoirs préfabriqués)

**80 m<sup>3</sup>** de BSI® non précontraint (voussoirs uniquement)

**90 t** d'armatures passives

**17 t** d'armatures de précontrainte

**1 195** éléments préfabriqués en BSI®

Plus de **300** luminaires et plus d'**1 km** de câbles électriques

## LES ENTREPRISES

**LOT 1 :** Groupement Eiffage TP & Eiffage Énergie

• **GÉNIE CIVIL :** Eiffage TP

• **ÉTUDES D'EXÉCUTION :** Dmi-Biep

• **BSI® ET PRÉCONTRAINTE :** Viapontis

• **COURANT FORT, COURANT FAIBLE, ÉCLAIRAGE, ALARME :** Eiffage Énergie

**LOT 2 :**

• **PANNEAUX GRAVÉS ET GARDES CORPS :** Citynox

## ABSTRACT

### INTERNATIONAL MEMORIAL OF NOTRE-DAME-DE-LORETTE. STRUCTURE VERIFICATION AND PROJECT ADJUSTMENT STUDIES

JÉRÉMIE BURLLOT, EIFFAGE TP DMI - BIEP – RICHARD PETIT, EIFFAGE TP DMI - BIEP – PHILIPPE JANDIN, CTOA - CEREMA – JÉRÔME MICHEL, CTOA - CEREMA

*The Notre-Dame-de-Lorette memorial is one of the first structures in UHPFRC (BSI®) to have been verified according to the 2013 UHPFRC recommendations of French civil engineering association AFGC. This prestressed curved structure, produced from prefabricated BSI® segments, was verified making perfect use of the material's properties under shear loading. The use of a 3D tool made it possible to go one step further in the digital development of design engineering work. This was an architectural challenge for both detailed design and execution. □*

### MEMORIAL INTERNACIONAL DE NOTRE-DAME-DE-LORETTE. ESTUDIOS DE JUSTIFICACIÓN DE LA OBRA Y ADAPTACIÓN DEL PROYECTO

JÉRÉMIE BURLLOT, EIFFAGE TP DMI - BIEP – RICHARD PETIT, EIFFAGE TP DMI - BIEP – PHILIPPE JANDIN, CTOA - CEREMA – JÉRÔME MICHEL, CTOA - CEREMA

*El memorial de Notre-Dame-de-Lorette es una de las primeras obras realizadas con hormigón reforzado con fibras de muy alta resistencia (BSI®) justificada según las recomendaciones AFGC BFUP 2013. Esta estructura curva pretensada realizada a partir de dovelas prefabricadas de BSI®, se ha justificado utilizando perfectamente las características del material bajo tensiones tangenciales. La utilización de la herramienta 3D permitió superar una etapa en la evolución digital del desarrollo de la ingeniería de estudio. Este reto arquitectónico se encuentra tanto a nivel de los estudios de ejecución como de la realización. □*



1

© DVD / CYRIL SANCEREAU

# CONSTRUCTION DE LA PASSERELLE DE VILLETANEUSE UNIVERSITÉ

AUTEURS : DANIEL VANICHE, ARCHITECTE-INGÉNIEUR, DVD - VINCENT DOMINGUEZ, ARCHITECTE-INGÉNIEUR, DVD -  
BERTRAND POTEL, ARCHITECTE-INGÉNIEUR, DVD - LOUIS RATAJCZAK, INGÉNIEUR, DVD

LE PÔLE D'ÉCHANGES DE VILLETANEUSE-UNIVERSITÉ, TRÈS ATTENDU, DEVIENT UNE RÉALITÉ. SA CRÉATION, UTILE AU DÉVELOPPEMENT DE LA VILLE, ACCROÎT TOUTEFOIS LA COUPURE URBAINE ENTRE LE NORD ET LE SUD, DU FAIT DE LA CONCENTRATION DE RÉSEAUX ET DE VOIES DE CIRCULATION QU'IL ENGENDRE. CONÇUE PAR L'AGENCE DVD, LA PASSERELLE QUI ENJAMBE CES FLUX EST UN ÉLÉMENT CLÉ DE CE PROJET. RETOUR SUR LES 18 MOIS DE CHANTIER DE CET OUVRAGE HORS NORMES, PLUSIEURS FOIS PRIMÉ.

## PRÉSENTATION DU PROJET

La ville de Villetaneuse s'inscrit dans un territoire populaire de la Seine-Saint-Denis. Les infrastructures de transports collectifs y font cruellement défaut, alors même que la présence de l'Université Paris 13 génère une demande forte. Dans ce contexte, le pôle d'échanges multimodal de Villetaneuse-Université est très attendu.

Utile au développement de la ville, sa création accroît toutefois la coupure urbaine historique nord/sud qui existe depuis la création des voies ferrées de

la Grande Ceinture. Un grand nombre de réseaux se concentre en effet à cet endroit :

- Une double voie ferroviaire dite GC « grande ceinture » existante ;
  - Une double voie ferroviaire RER dite TN « Tangentielle Nord », en création avec une future gare ;
  - Une double voie ferroviaire tramway pour la nouvelle ligne T8 ;
  - Une route deux fois une voie (D25).
- La nouvelle passerelle enjambant ces flux est donc un élément clé de ce projet de PEM. Droite, elle enjambe du

**1 - Projet  
terminé.**

**1 - Completed  
project.**

nord au sud le faisceau ferroviaire et routier. Elle ouvre l'accès à la gare et crée du lien entre quartiers, fluidifiant les échanges. Elle constitue un point de repère urbain, que l'on emprunte de façon naturelle (figure 2).

Les principes simples évoqués ci-dessus ont fortement orienté les choix architecturaux et les solutions techniques qui les sous-tendent.

L'ouvrage intègre ainsi les intentions de belvédère et de circulation fluide et continue. Plus encore, son architecture est inséparable de l'idée d'une déformation du sol, qui semble s'être soulevé pour échapper aux voies et à leurs gabarits.

Ce mouvement s'exprime tant sur sa longueur, pour enjambrer les voies, que sur sa largeur, pour venir protéger les

- 2- La passerelle en son site.
- 3- Prototype avec consoles acier.
- 4- Profilés des travées principales.
- 5- Sous-face acier de la travée principale.

- 2- The foot bridge on its site.
- 3- Prototype with steel cantilever girders.
- 4- Sections for main spans.
- 5- Steel underside of the main span.



© EPA / P. GUIGNARD 2

piétons des caténaires sur les côtés et de la pluie au-dessus d'eux : la passerelle prend une forme végétale, telle une feuille qui s'enroule et se déroule le long de la traversée.

Les aspects de sols (rampe et escalier), de récupération des eaux, de garde-corps, de protection caténaire, de toiture et de support d'éclairage sont ainsi réunis.

Ont également été pris en compte :

- Une démarche de qualité environnementale ;

- L'accessibilité aux Personnes à Mobilité Réduite ;

- La sécurité des personnes, mais aussi des trains et tramways ;

- L'utilisation de matériaux résistants, chaleureux et de maintenance aisée (bois exotique, acier inoxydable, etc.) ;

- L'intégration d'un éclairage tant fonctionnel que de mise en valeur ;

- Le raccordement avec le bâtiment voyageurs et l'intégration du local RATP.

En élévation l'ouvrage est courbe, se libérant des gabarits SNCF, véhicules et RATP :

- Avec deux escaliers à pente constante (avec paliers) inscrits dans la courbe générale ;

- Grâce à sa partie haute en rampe d'un ascenseur à l'autre, avec une pente réduite à 2 % pour permettre un raccordement à la gare sur une horizontale, tout en respectant les normes PMR.

Les emmarchements sont complétés

d'une rampe accessible aux poussettes et aux vélos poussés à la main. Le tablier s'élargit à la clé, par la réunion de la rampe et de l'escalier en une seule rampe. La géométrie s'évase, créant le belvédère souhaité.

#### 18 MOIS DE CHANTIER

Au vu de la complexité du site, les choix des modes constructifs ont été intégrés dès la conception.

La passerelle est constituée de trois travées continues de 40, 75 et 50 m, ▷



3



4



5

pour une longueur totale de 165 m. Leur poids respectif est 120, 190 et 140 t, pour un poids global de 450 t d'acier. Son fonctionnement structural est le suivant : une poutre continue de 165 m, sur appuis glissants à ses extrémités. Cette poutre est supportée par deux piles intermédiaires, réalisées en béton armé, qui remplissent également le rôle de gaine des ascenseurs. Un appui sur pile est glissant, l'autre est articulé, constituant le point fixe de l'ouvrage (figures 3, 4 et 5).

Les différents réseaux à enjamber ont en effet fixé des contraintes fortes : la voie ferroviaire « Grande Ceinture », la double voie de la départementale D25, la ligne de tramway T8 en construction, ainsi que la prise en compte de la future ligne RER tangentielle associée à sa gare.

De plus, la ligne Grande Ceinture est une ligne de transport de fret avec une circulation principalement nocturne et avec un maintien de l'alimentation électrique des lignes caténaïres 24h/24. La réalisation de l'ouvrage au-dessus de ces voies ferroviaires en exploita-

tion fut, pour le chantier, une contrainte majeure.

Pour intervenir à moins de 3 m des voies, il était indispensable d'obtenir de la part de la SNCF des interceptions de trafic.

La maîtrise d'ouvrage, la maîtrise d'œuvre et la SNCF ont donc calé un calendrier d'ITC très en amont du chantier (dès 2010), dont deux week-ends complets dédiés à la pose de la travée centrale. Afin de respecter les plages d'ITC dévolues au chantier, l'équipe de maîtrise d'œuvre a privilégié l'assemblage des tronçons les plus grands possibles sur chantier, en amont du week-end de pose.

Par ailleurs, la co-activité du chantier du tramway T8 avec celui de la pas-

serelle a conduit la maîtrise d'œuvre et le CSPS à limiter les opérations postérieures à la pose de la travée sud, afin d'éviter les risques de chute d'objets sur les opérateurs du chantier du tramway.

Les zones de chantier nord et sud permettaient l'assemblage des éléments de travée, mais avec très peu de marge disponible. Les travaux de génie civil (phase 1) ont donc été réalisés préalablement aux travaux d'assemblage des travées de charpente (phase 2).

#### PHASE 1

Les travaux de la phase 1 se sont déroulés durant le premier trimestre 2011 (figures 6, 7 et 8) :

→ Réalisation des massifs de fonda-

tions des culées nord et sud, fondées sur pieux forés BA de diamètre 1 000 mm ;

→ Réalisation des piles d'appui nord et sud, également fondées sur pieux forés BA, mais de diamètre 1 200 mm.

Les piles d'appui avaient la particularité de servir également de gaines en BA des ascenseurs de l'ouvrage. Cette spécificité a nécessité de reprendre dans les voiles BA de la gaine les efforts des consoles en acier supportant les appuis de l'ouvrage. Pour respecter l'exigence architecturale de finesse des piles, l'entreprise a utilisé des tirants en acier précontraints (type Macalloy) pour transmettre ces efforts dans les voiles BA (figures 9, 10 et 11).

**6- Appui des culées avant bétonnage final.**

**7- Mise en place et réglage des appuis glissants avec ferrailage associé.**

**8- Bétonnage final des appuis glissants des culées.**

**9- Pile intermédiaire et gaine d'ascenseur.**

**10- Bracons avant mise en place et peinture.**

**11- Articulation des bracons.**

**6- Support for abutments before final concreting.**

**7- Installation and adjustment of sliding supports with associated reinforcing bars.**

**8- Final concreting of the abutments' sliding supports.**

**9- Intermediate pier and lift shaft.**

**10- Bracing before installation and painting.**

**11- Links between braces.**





12

© DWD ARCHITECTES INGÉNIEURS

## PHASE 2

Les travaux de la phase 2 se sont déroulés durant les deuxième et troisième trimestres de l'année 2011 et se sont terminés avec la pose des travées centrales durant le week-end des 23 et 24 juillet, week-end d'interception de trafic ferroviaire. Les travaux de génie civil terminés, l'assemblage des colis en acier (ne dépassant pas 20 m de long pour des raisons d'accessibilité du site par convoi routier) a pu débuter simultanément sur les zones de chantier nord et sud dès le mois de mars 2011. La priorité d'assemblage a été donnée à la travée principale, seule concernée par le week-end d'interception ferroviaire. Pour des raisons de poids, celle-ci, longue de 75 m, a été assemblée en 2 éléments respectivement de 35 m (82 t) et 40 m (108 t). Le levage de ces 2 éléments a néces-

**12- Pose du 1<sup>er</sup> tronçon (sud) de la travée principale.**

**13- 2<sup>e</sup> tronçon (nord) de la travée principale.**

**14- Pose du 2<sup>e</sup> tronçon (nord) de la travée principale.**

**12- Placing the first (southern) section of the main span.**

**13- Second (northern) section of the main span.**

**14- Placing the second (northern) section of the main span.**

sité la mise en place d'une grue de 800 tm, assistée d'une grue de 150 tm. L'amené des contrepoids pour la grue de 800 tm a nécessité l'utilisation de 11 semi-remorques.

La pose s'est déroulée sous interception ferroviaire et consignation des caténaires durant le week-end des 23 et 24 juillet 2011, tout comme l'opération de soudure des 2 tronçons. Deux ateliers ont travaillé en 3/8 durant ce week-end pour réaliser les soudures pleine pénétration de rabotage des profilés principaux. Il est à noter que certaines semelles des profilés à rabouter atteignaient 120 mm d'épaisseur (figures 12, 13 et 14).

Durant la phase 2, les travées d'extrémité ont également été assemblées et posées sur leurs appuis définitifs.

La peinture (primaire et couche de finition) a été réalisée chez le charpentier,

mais de nombreuses retouches de peinture ont été réalisées sur place, en particulier les zones de soudure entre tronçons assemblés. Ces retouches ont pu être effectuées lors de la période estivale afin de garantir leur pérennité. La peau extérieure en bois lpé des travées principales a été mise en œuvre préalablement au week-end de pose, afin de limiter les interventions ultérieures au-dessus des caténaires des voies de la grande ceinture. Celle de la travée sud a également été posée durant la phase 2, afin de limiter la co-activité avec le chantier du tramway.

## PHASE 3

La phase 3, de septembre 2011 à mai 2012, a consisté à la mise en place de l'ensemble des finitions de l'ouvrage : consoles acier, dalle béton connectée puis étanchée, marches en béton armé, ▷



13



14

© DWD ARCHITECTES INGÉNIEURS

bardage et platelage bois (ipé) sur l'ouvrage, filet inox anti-jet au-dessus des garde-corps.

La dalle connectée en béton armé a été coulée après la pose de la travée principale pour des raisons de poids maximum de levage. Pour la même raison, la majorité des consoles acier, pièces en caisson reconstitué soudé, de forme cintrée, ont été posées après le coulage de la dalle béton.

Dans les escaliers, l'entreprise a utilisé un béton auto-plaçant en raison des pentes de ceux-ci (17%).

L'étanchéité de la dalle connectée est constituée d'une membrane polyuréthane. Pour garantir la continuité de l'étanchéité après la pose des omegas aluminium supports de lames de platelage, une étanchéité par *flashing* a été appliquée sur les vis de fixations de ces omegas.

Les marches ont été réalisées en béton préfabriqué, sur l'étanchéité de la dalle connectée (figure 15).

La passerelle est entièrement revêtue de bois. L'essence de bois a été choisie avec une grande attention. Il s'agissait



15

© DVID ARCHITECTES INGÉNIEURS

de choisir à la fois un revêtement pérenne sur 20 à 25 ans, sans entretien, et d'éviter tout risque de glissance. Les seuls bois permettant de satisfaire ces objectifs sont des bois exotiques, de type Ipé. L'emploi de ce type d'essence noble, de durabilité 4-5 (classe maximale) garantit la pérennité de l'ouvrage.

Dans un souci de respect de l'environnement, la maîtrise d'œuvre a imposé l'utilisation de bois Ipé de Guyane issu de plantations maîtrisées, dont la provenance peut être vérifiée (certification FSC).

Le platelage, les marches des escaliers et les rampes associées ont nécessité l'utilisation de 60 m<sup>3</sup> de bois Ipé de

15- Bac acier dalle connectée : escaliers.

16- Pose du bardage bois extérieur.

17- Pose du bardage bois intérieur.

18- Pose du platelage.

19- Pose du platelage des marches.

15- Connected slab steel decking: stairs.

16- Placing exterior wooden cladding.

17- Placing interior wooden cladding.

18- Placing the decking.

19- Placing step decking.



16



17



18



19

© DVID ARCHITECTES INGÉNIEURS



Guyane, en lames de 40 mm d'épaisseur, soit une surface de 1 200 m<sup>2</sup>. Le bardage (peau extérieure) a nécessité 36 m<sup>3</sup> d'Ipé de Guyane, en lames de 20 mm d'épaisseur, soit une surface de 1 800 m<sup>2</sup> (figures 16 à 21). Cette prédominance du bois dans l'enveloppe du projet, bardage et platelage, ainsi que sa complexité géométrique, ont demandé une exigence de pose et de calepinage de la part de l'entreprise plus proche de la marqueterie que du bardage bois classique.

**20- Platelage :** plots podotactiles.

**21- Maille anti-jet.**

**20- Decking:** tactile paving surfaces.

**21- Net for protection against thrown objects.**

Pour la pérennité de l'ouvrage, outre le choix de l'Ipé, des inserts et des vis inox pour la fixation des lames de bardage et platelage ont été retenus. Cependant, la dureté des lames en Ipé, ainsi que la difficulté de pose des inserts dans les omegas aluminium ont singulièrement allongé les durées de pose. C'est la raison pour laquelle la phase 3 a duré plus de 8 mois, avec l'intervention de 2 ateliers de pose à temps plein. Les multiples coupes d'onglet et les raccords de géométrie ont néces-

sité une découpe sur chantier de l'ensemble des lames de bardage et platelage. La reprise de certains éléments de bardage extérieur a également nécessité des travaux sous interceptions caténaïres SNCF, avec des nacelles télescopiques. Au final, il a fallu dix-huit mois pour réaliser cet ouvrage de grande ampleur. La passerelle a été ouverte au public en mai 2012, et officiellement inaugurée le 23 juin 2012 (figure 1). □

## QUANTITÉS

**LONGUEUR :** 156 m

**POIDS ACIER :** 450 t

**BUDGET :** 5 000 000 euros

**RÉALISATION :** 18 mois (2010-2012)

**PRIX :** A+ Awards, catégorie Architecture+Mobility, Trophées du Jury et du Public (New York, 2013) ; Trophée Batiactu Construction et Innovation (2013)

## INTERVENANTS

**LIEU :** Villetaneuse, France (93)

**MAÎTRE D'OUVRAGE :** EPA Plaine de France

**ARCHITECTES :** DVDV (Daniel Vaniche, Vincent Dominguez, Bertrand Potel)

**INGÉNIEURS :** DVDV (Daniel Vaniche, Vincent Dominguez, Bertrand Potel, Louis Ratajczak)

**ENTREPRISE CHARPENTE :** Brisard Grands Travaux

**ENTREPRISE GROS ŒUVRE :** Demathieu et Bard

## ABSTRACT

### CONSTRUCTION OF THE VILLETANEUSE-UNIVERSITÉ FOOT BRIDGE

D. VANICHE, DVDV - V. DOMINGUEZ, DVDV - B. POTEL, DVDV - L. RATAJCZAK, DVDV

This foot bridge, 165 m long, straddles a node on several major transport networks. It was created as part of the development of the Villetaneuse-Université communications hub in response to the need to eliminate the discontinuity between the northern and southern parts of the city. Inaugurated in June 2012 after eighteen months of work in stages complicated by the constraints involved notably in crossing the railway network, this steel and wooden structure designed by the DVDV agency has received several awards for its technical and architectural quality. □

### CONSTRUCCIÓN DE LA PASARELA DE VILLETANEUSE UNIVERSITÉ

D. VANICHE, DVDV - V. DOMINGUEZ, DVDV - B. POTEL, DVDV - L. RATAJCZAK, DVDV

Con una longitud de 165 m, esta pasarela atraviesa una concentración de varias redes de transporte importantes. Su creación está relacionada con el desarrollo del intercambiador Villetaneuse Université y responde a la necesidad de comunicar el norte y el sur de la ciudad. Inaugurada en junio de 2012, después de dieciocho meses de varias fases de obras complejas que tuvieron que hacer frente a dificultades debidas, en particular, al cruce de la red ferroviaria, esta estructura de acero y madera, diseñada por la agencia DVDV, ha recibido varios premios por su calidad técnica y arquitectónica. □



© EIFFAGE TP GRANDS TRAVAUX

# ÉCHANGEUR DE LA POINTE DES SABLES EN MARTINIQUE. CONSTRUCTION D'UN VIADUC PRÉCONTRAIT COULÉ SUR CINTRE

AUTEURS : MARCO NOVARIN, CHEF DÉPARTEMENT ÉTUDES OUVRAGE D'ART, EIFFAGE TP / DMI BIEP - JONATHAN STAMP, INGÉNIEUR D'ÉTUDES OUVRAGES D'ART, EIFFAGE TP / DMI BIEP - GUILLAUME DUMONTET, DIRECTEUR DE TRAVAUX, EIFFAGE TP GRANDS TRAVAUX - SÉBASTIEN LEBRANCHU, GÉRANT COFFRAGE&QUIPAGE

LE PROJET S'INSCRIT DANS LE CADRE DE L'AMÉNAGEMENT, PROGRAMMÉ PAR LA RÉGION MARTINIQUE, DE L'ÉCHANGEUR DE LA POINTE DES SABLES EN VUE DE PERMETTRE LE PASSAGE DE LA FUTURE LIGNE DE BUS À HAUT NIVEAU DE SERVICE (BHNS) QUI RELIERA À L'HORIZON 2015 FORT DE FRANCE À L'AÉROPORT DU LAMENTIN. POUR FLUIDIFIER LE TRAFIC, LA VOIE DE BUS (TCSP) ET LES DEUX BRETelles EXISTANTES SERONT DÉNIVELÉES EN UN VIADUC DE 740 M DE LONG, CONSTITUÉ D'UN TABLIER EN CAISSON PRÉCONTRAIT COULÉ EN PLACE. LE PRÉSENT ARTICLE DÉCRIT PLUS EN DÉTAIL LA PHASE D'EXÉCUTION DU VIADUC : LA VARIANTE RÉALISÉE, LES MÉTHODES SPÉCIFIQUES D'EXÉCUTION ET LE DÉROULEMENT DES TRAVAUX.

## DESCRIPTION DE L'OUVRAGE

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

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

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

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

**1- Vue d'ensemble du viaduc précontraint en cours de construction, mai 2015.**

**1- General view of the prestressed viaduct in course of construction, May 2015.**

## PILES

Les piles en béton C35/45 (d'une hauteur variable de 4,20 m à 6,40 m) sont fondées soit sur semelles superficielles en béton C25/30 de 9 m x 5 m x 1,5 m d'épaisseur (12 appuis), soit sur pieux (Ø1 200 mm - 15 m de long) réalisées à la tarière avec foreuse montée sur grue à chenille (8 appuis).

## CULÉES

Les culées en béton C35/45 sont



Pour ces raisons, le bureau d'études d'Eiffage TP a envisagé de simplifier et d'alléger la section transversale du tablier en attribuant à chaque voie une nervure sous hourdis.

Pour améliorer la durabilité de l'ouvrage, une structure en béton précontraint a été retenue.

Afin de limiter la quantité d'étaie à mettre en œuvre, il a été décidé de couler le tablier en deux phases, les U avec les encorbellements d'abord, le hourdis ensuite.

Les U avec les encorbellements, rendus continus après réalisation des clavages sur pile, servent ainsi de cintre pour le coulage du hourdis. La précontrainte (figure 5), dont les bossages sont situés à l'intérieur des U, a été répartie en deux familles :

- Les câbles isostatiques pour le décentrement des caissons et la reprise des moments en travée ;
- Les câbles de continuité pour la reprise des moments sur appui.

Le tablier a pris l'aspect d'un mono, bi ou tri caisson selon les voies portées. Quant aux fondations, de la diminution du poids du tablier découle la possibilité d'une optimisation du nombre ou de la longueur des pieux et, dans certains cas, le passage sur fondations superficielles.

Cela s'est traduit par le passage de 10 piles et culées de fondations sur pieux à des fondations superficielles et par une réduction significative de la longueur des pieux forés en Ø 1 200 mm.

## MÉTHODES D'EXÉCUTION ET DÉROULEMENT DES TRAVAUX

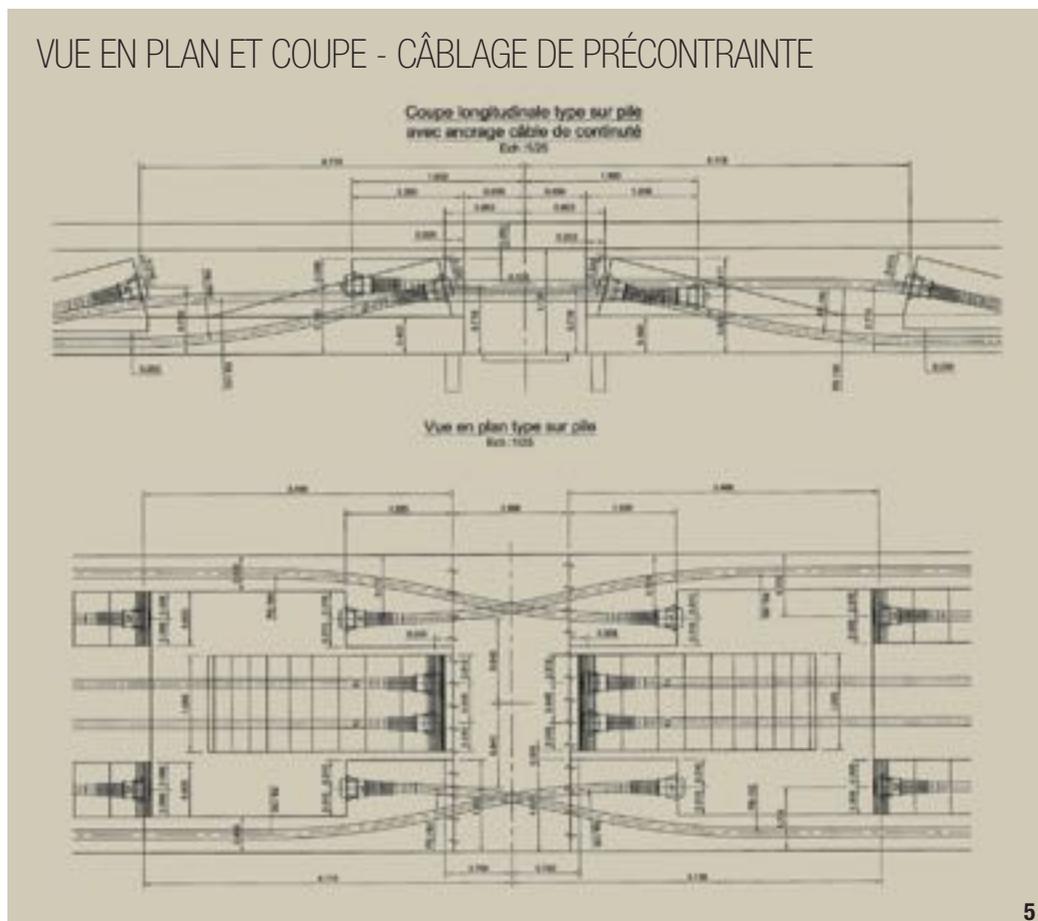
L'échangeur étant circulé par plus de 130 000 véhicules jour, le phasage de construction du viaduc a été conçu pour maintenir en permanence les voies circulées.

### PLANNING DES TRAVAUX

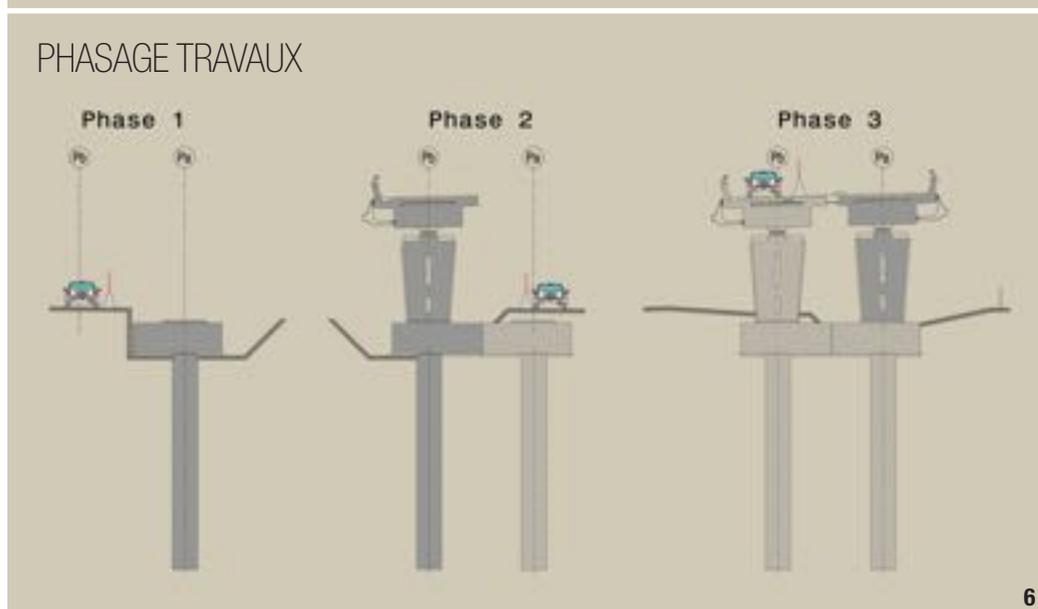
Le délai global des travaux est de 21 mois, décomposé en trois phases rythmées par des déviements successifs de circulation en fonction de l'avancement des travaux (figure 6) :

#### Phase 1 - Réalisation des demi semelles du Viaduc A de C1 à P7 : durée 3 mois

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



5 © DR



6 © EIFFAGE TP GRANDS TRAVAUX

#### Phase 2 - Réalisation des semelles, piles et tabliers des Viaducs B et C : durée 14 mois

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

5- Vue en plan et coupe - Câblage de précontrainte.  
6- Phasage travaux.

5- Plan view and cross section - Prestressing cabling.  
6- Work sequencing.

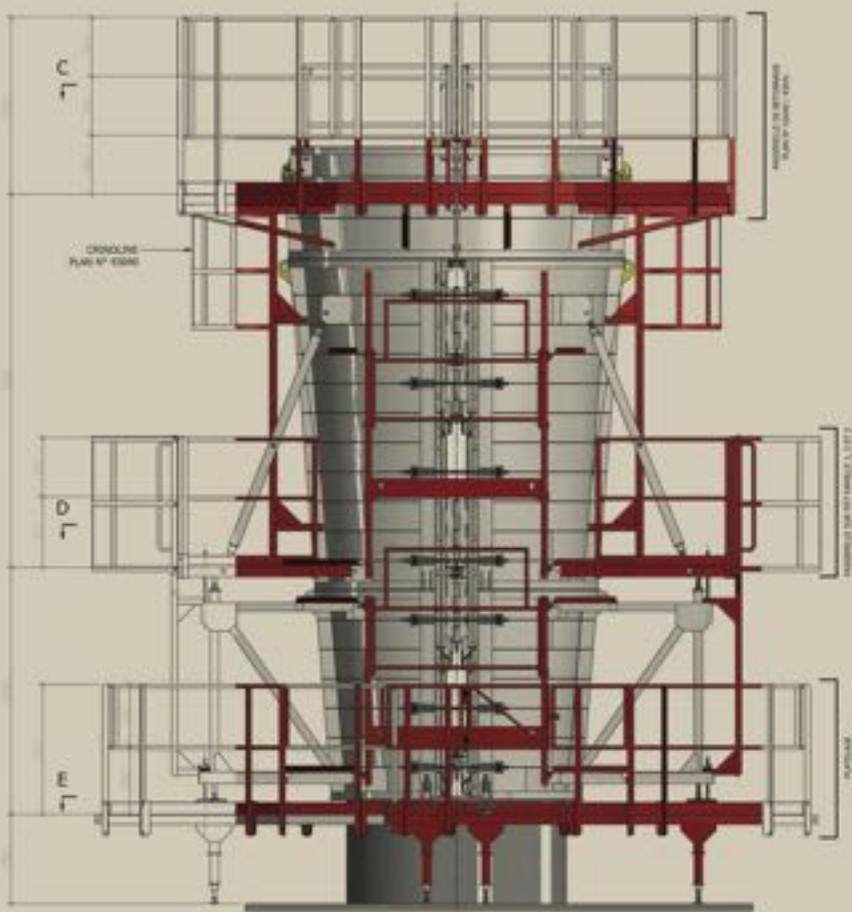
#### Phase 3 - Réalisation des piles et tablier du Viaduc A : durée 4 mois

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

### LA RÉALISATION DES APPUIS

Malgré la forme elliptique de la pile et son évidement central coiffé d'un chevron, l'entreprise a décidé de la béton-

## OUTIL COFFRANT



© COFFRAGE&EQUIPAGE

7

ner en une fois à l'aide d'un coffrage négatif bridé sur deux coquilles.

Cette solution a permis de garantir une qualité de parement optimale ainsi qu'un gain significatif sur le planning. Le climat étant tropical, la solution de coffrage bois n'a pas été retenue.

En effet, compte tenu du nombre de réemplois (20 réutilisations), les peaux des coffrages en bois, certes moins coûteuses, auraient dû être changées après 5 réutilisations.

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

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

**7- Outil coffrant.**  
**8- Coffrage de pile.**

**7- Sectional formwork.**  
**8- Pier formwork.**

initialement prévues à 7 jours ont pu être ramenées à 4 jours par la mise en place d'un second jeu d'outil intérieur.

### LA RÉALISATION DES TABLIERS

Le déroulement de réalisation des tabliers est le suivant (figures 9 et 10) :

- Réalisation des piles P1, P2 et P3 ;

© EIFFAGE TP GRANDS TRAVAUX



8

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

### LES DISPOSITIONS RETENUES PAR L'ENTREPRISE

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

- Réseaux enterrés et aériens ;
- Proximité des riverains - emprise réduite ;
- Climat tropical ;
- Proximité du réseau routier avec l'autoroute A1, ses bretelles d'entrée et de sortie et son échangeur.

#### Proximité des réseaux enterrés (HTA, HTB 63kV, AEP, EU, EP, Télécoms, Fibres...)

L'entreprise s'est astreinte à demander à ses sous-traitants, avant chaque démarrage de travaux de fouilles ou de forages, d'établir une étude d'adéquation reprenant la liste des réseaux à proximité, les DICT des réseaux présents sur zone, les plans de terrassements avec superposition des réseaux existants et déviés et le matériel utilisé.

Avant démarrage des travaux, un point d'arrêt est formalisé sur site en présence du maître d'oeuvre, de l'entreprise, du chef de chantier réalisant les travaux et du conducteur d'engin.

#### Proximité des réseaux aériens (HTB 63KV)

Une partie de l'ouvrage à construire étant située sous une ligne Haute Tension de 63 KV (tablier à une distance de 11 m de la ligne), les méthodes de construction ont été adaptées pour limiter au strict minimum les mises hors tension auprès d'EDF.

Certains travaux (tels que les phases de bétonnage ou d'approvisionnement des cages de ferrailage), nécessitent d'entrer dans la zone de sécurité des 5 m par rapport à la ligne, la mise hors tension est alors inévitable.

Pour les travaux en dehors de la zone de sécurité des 5 m, les engins de levage sont équipés d'un détecteur de champ magnétique.

Cet équipement, monté en bout de télescope, coupe le mouvement de la grue et avertit le conducteur par un signal sonore et lumineux dès que le télescope se trouve à 5 m de la ligne. Pour compléter ces mesures de prévention, un registre quotidien est tenu par le grutier et des surveillants électriques ont été formés.

#### Proximités des riverains

Les emprises travaux étant réduites, les moyens de levage ont dû être étudiés au plus juste. Les coffrages de caissons ont été équipés de roues (poids du coffrage de 750 kg) pour pouvoir être translatisés sur les platelages des cintres jusqu'aux zones de couverture des grues mobiles (figure 11).

Les coffrages perdus des hourdis, initialement prévus en prédalles BA, ont été remplacés par des bacs en acier qui ont pu être manutentionnés à la main. Cela a permis de limiter les opérations de levage.

#### Climat tropical - Incidence sur les travaux de précontraintes

Le taux d'humidité ambiant, les embruns et les températures étant plus

élevés dans les départements d'Outre Mer, l'entreprise a dû être vigilante sur le stockage des bobines de torons et des gaines de précontrainte, pour éviter une oxydation de l'acier.

Les gaines et bobines ont donc été bâchées et recouvertes d'huile soluble tous les 15 jours.

Le ciment Superstressem injecté dans les gaines une fois les câbles mis en tension (figure 12) a été stocké dans un conteneur réfrigéré et la mise en œuvre s'est faite avec de l'eau à 5°C pour retarder la montée en température du coulis au moment de sa mise en œuvre (30°C maxi).

#### Milieu insulaire - Moyens humains et matériels adaptés

Au regard de la géométrie des caissons, tantôt simple, double ou triple, en courbe, déversée à 2,5% avec une pente longitudinale variable, il n'a pas été possible de recourir à des plateaux coffrants.

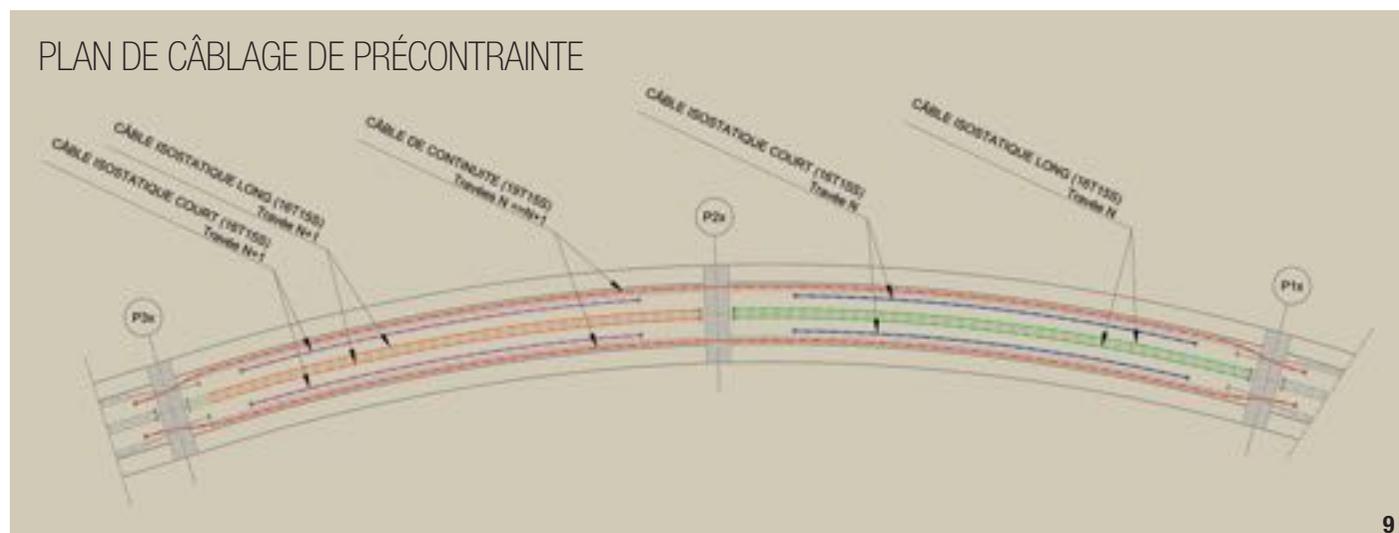
**9- Plan de câblage de précontrainte.**

**10- Vue aérienne des caissons.**

**9- Prestressing cabling drawing.**

**10- Aerial view of box sections.**

### PLAN DE CÂBLAGE DE PRÉCONTRAINTE



9

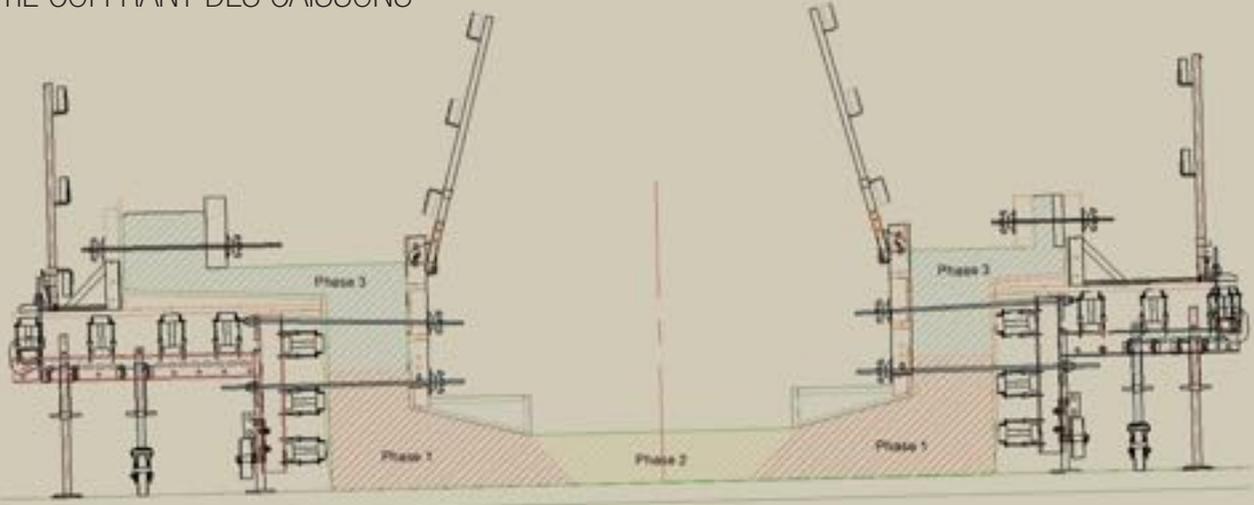
© EIFFAGE TP DMI



10

© EIFFAGE TP GRANDS TRAVAUX

## OUTIL COFFRANT DES CAISSONS



© EIFFAGE TP GRANDS TRAVAUX 11



© EIFFAGE TP GRANDS TRAVAUX 12



13

- 11- Outil coffrant des caissons.
- 12- Caisson décoffré après mise en précontrainte.
- 13- Cintre d'une travée avec platelage.
- 14- Solution N°1 Levage.

- 11- Sectional formwork for box sections.
- 12- Box section with formwork removed after prestressing.
- 13- Centre of a span with decking.
- 14- Solution 1 Lifting.

### SOLUTION N°1 - LEVAGE



© COFFRAGE&LIVAGE 14

Les cintres ont donc été simplifiés au maximum (figure 13) et sont composés de tours Mills de 1,60 m x 1,60 m, de poutrelles primaires en aluminium de type PHAL P1 et de poutrelles en bois de type H20 en secondaire tous les 20 cm. Dans un contexte insulaire, il a été préféré former des monteurs d'étalement afin d'éviter de recourir à la sous-traitance, prestation qui au regard du phasage et des conditions d'accès aurait été difficilement contractualisable sans réclamation. De plus, lors de chaque approvisionnement un comparatif financier a dû être mené entre un achat local et métropolitain. Le coût du transit et des octrois de mer et le délai d'approvisionnement (1 mois) ont dû être pris en compte. ▷

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

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

Après bétonnage des caissons sur chandelles, un des enjeux était donc de décentrer ces travées de 30 m de long pour 165 t pour les placer sur leurs appuis définitifs tout en générant le moins de désagrément possible pour les usagers routiers et les riverains. Pour ce faire, la première solution envisagée consistait à lever puis à déposer chaque travée au moyen de 2 grues mobiles placées à chaque extrémité de la travée (figure 14). Cependant, la complexité de l'environnement (peu d'espace disponible au sol et présence d'une ligne électrique haute tension de 63 kV) ainsi que les risques liés à une telle opération à proximité des

habitations, ont conduit l'entreprise à abandonner cette méthode.

La deuxième solution étudiée consistait à reprendre provisoirement le poids propre de la travée sur 4 tours d'étaie associées à une compensation sur camarteaux pour la déposer par décentrage sur ses appuis définitifs (figure 15).

Cependant, un tel calage sur 1,2 m de haut combiné à la forme complexe

**SOLUTION N°2 - CALAGE SUR CAMARTEAUX**



15

© COFFRAGE&QUIPAGE

**15- Solution N°2  
Calage sur  
camarteaux.**

**16- Solution N°3  
Descenseur.**

**15- Solution 2  
Bracing on  
stacks.**

**16- Solution 3  
Descent device.**

des travées (rayon plan de 100 m, dévers de 2,5% et pente longitudinale de 9,65%) pose des problèmes de stabilité. De plus, la manipulation de 120 camarteaux en HEB 200 de 45 kg unitaire induirait une pénibilité pour les compagnons.

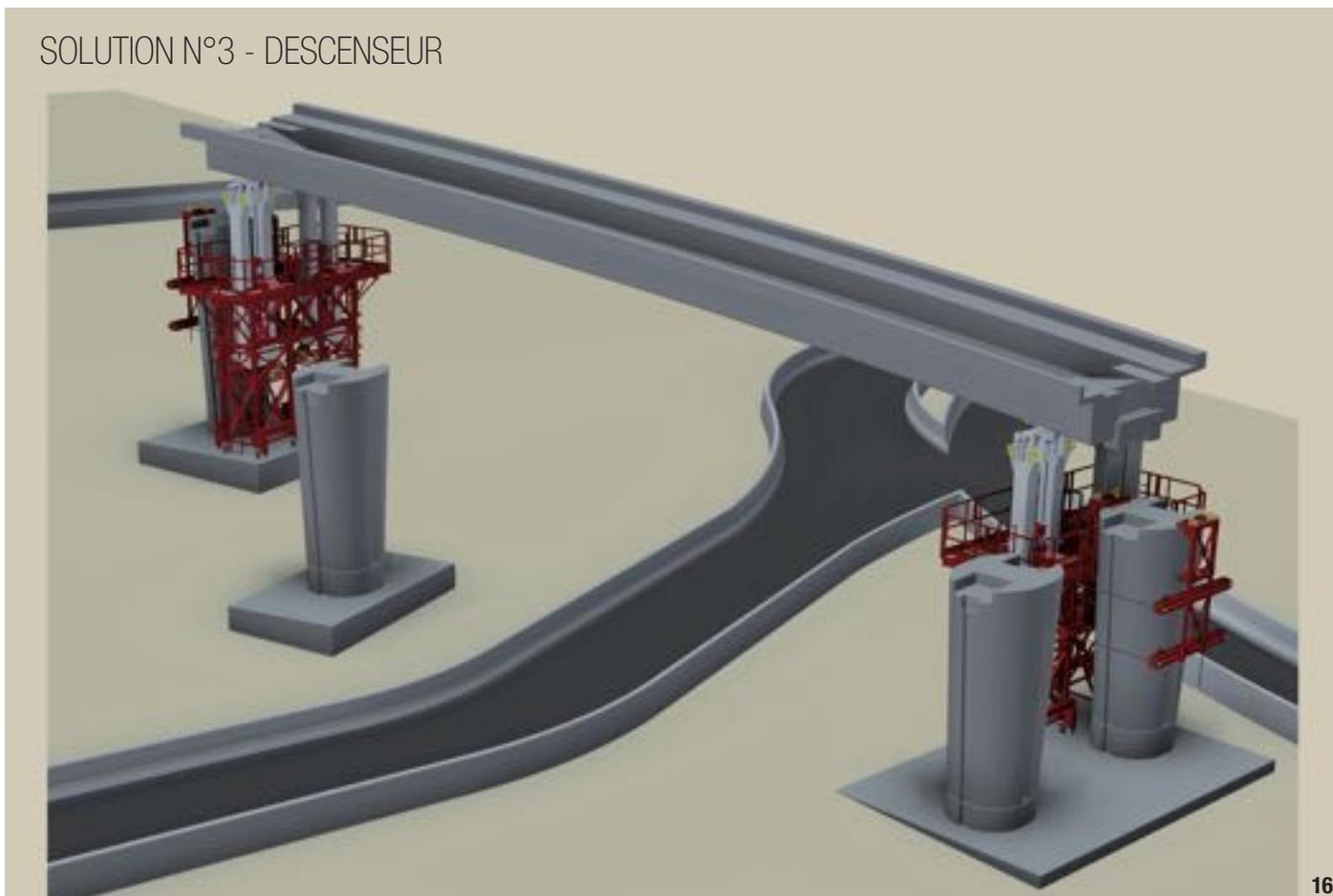
Après ces constats, il apparaissait clairement que l'enjeu était de maîtriser la stabilité de la travée lors de la descente sur appuis ainsi que la sécurité du personnel à proximité.

Aussi, l'entreprise a-t-elle confié à la société Coffrage&quipage l'étude d'une troisième solution de descente des travées au moyen de palées de stabilité. Il s'agit de 4 tours métalliques ancrées aux piles de l'ouvrage et associées à un système hydraulique (figure 16).

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

Chaque palée est équipée d'une coulisse associée à un vérin hydraulique

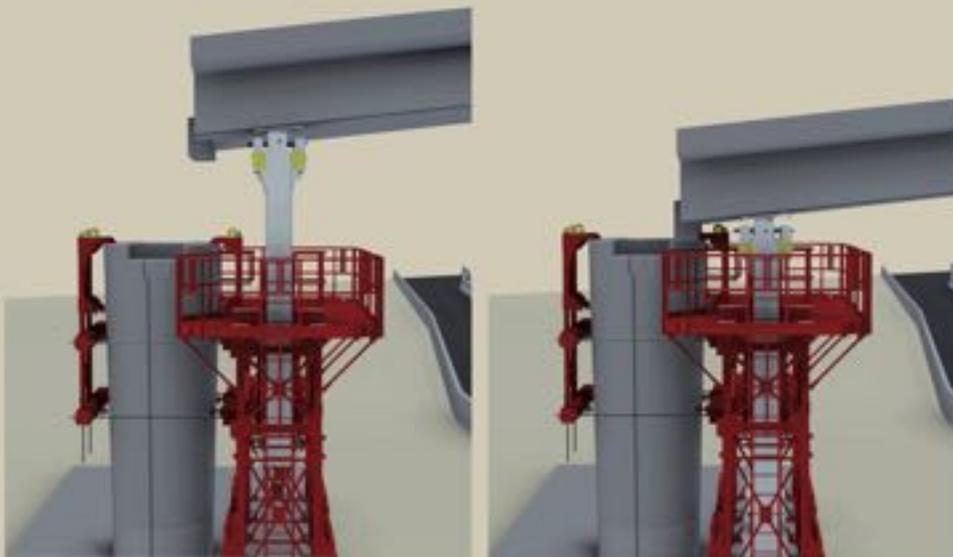
**SOLUTION N°3 - DESCENSEUR**



16

© COFFRAGE&QUIPAGE

## TRAVÉE AVANT ET APRÈS DESCENTE



© COFFRAGE&QUIPAGE

17

de capacité 100 t avec une course de 200 mm et 2 barres de brélage. Le principe est de descendre la travée par passes de 20 cm simultanément sur les 4 palées, en reprenant la descente de charges tantôt sur le vérin tantôt sur les barres de brélage (figure 18). Le transfert des charges à la fin de chaque cycle permet de libérer les vérins et de reprendre le cycle pour descendre à nouveau de 20 cm. L'opération de

**17- Travée avant et après descente.**

**18- Dispositif de descente.**

**17- Span before and after lowering.**

**18- Descent device.**

descente de la travée béton est ainsi réalisée en 6 cycles, permettant de placer la travée sur ses appuis définitifs en 1 heure (figure 17). Cet outil est classé en appareil de levage et a été conçu

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

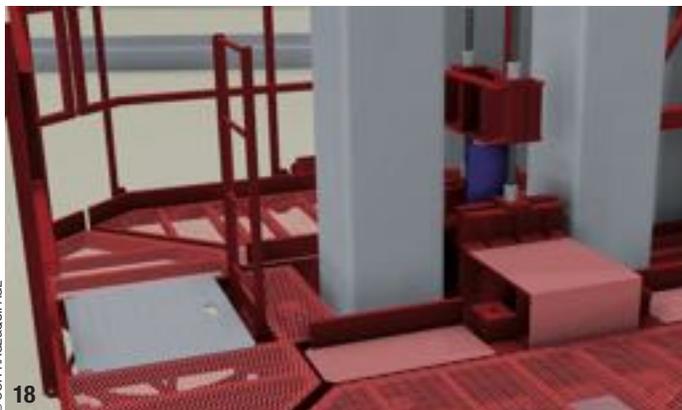
## PRINCIPALES QUANTITÉS

### TERRASSEMENTS :

- Déblai : 11 400 m<sup>3</sup>
- Remblais : 2 380 m<sup>3</sup>
- Soutènement : 1 780 m<sup>2</sup>

### GÉNIE CIVIL :

- Pieux Ø 1 200 mm : 1 200 m
- Béton : 6 900 m<sup>3</sup>
- Coffrage : 13 200 m<sup>2</sup>
- Aciers HA : 850 t
- Précontrainte : 75 t
- Étanchéité : 4 500 m<sup>2</sup>
- Barrière BN1 et corniche : 1 110 m



© COFFRAGE&QUIPAGE

18

## PRINCIPAUX INTERVENANTS

### MAÎTRE D'OUVRAGE :

- Conseil Régional de la Martinique

### MAÎTRISE D'ŒUVRE :

- Groupement Ginger / Mimram / Geode / Jnc / Dynalogic

### GROUPEMENT DE CONSTRUCTION :

- Eiffage TP Grands Travaux (mandataire - génie civil)
- Spie Fondations (pieux)

### PRINCIPAUX SOUS-TRAITANTS ET FOURNISSEURS :

- Études d'exécution génie civil : Eiffage TP - Dmi Biep
- Fourniture des bétons : France Béton
- Fourniture et pose des aciers de précontrainte : Eiffage TP - Viapontis
- Fourniture et pose des aciers HA : Ada (Armatures des Antilles)
- Fabrication des coffrages : Coffrage&quipage / Peri
- Étalement : Mills
- Étanchéité : Seo Caraïbes
- Corniches : Tcmi

## ABSTRACT

### POINTE DES SABLES INTERCHANGE IN MARTINIQUE. CONSTRUCTION OF A CAST-IN-SITU PRESTRESSED VIADUCT

MARCO NOVARIN, EIFFAGE TP/DMI BIEP - JONATHAN STAMP, EIFFAGE TP/DMI BIEP - GUILLAUME DUMONTET, EIFFAGE TP - SÉBASTIEN LEBRANCHU, COFFRAGE&QUIPAGE

The project forms part of the development, planned by the Martinique Region, of the Pointe des Sables interchange to allow passage of the future high-service-level ('BHNS') bus line which, by around 2015, will connect Fort-de-France to Lamentin airport. To increase the fluidity of traffic, the bus lane (reserved right-of-way public transport) and the two existing slip roads will be grade-separated by a viaduct 740 m long, consisting of a cast-in-situ prestressed box section deck. This article describes the viaduct construction phase in detail: the variant produced, the specific execution methods and works' performance. □

### INTERCAMBIADOR DE LA POINTE DES SABLES EN MARTINICA. CONSTRUCCIÓN DE UN VIADUCTO PRETENSADO COLADO CON CIMBRA

MARCO NOVARIN, EIFFAGE TP/DMI BIEP - JONATHAN STAMP, EIFFAGE TP/DMI BIEP - GUILLAUME DUMONTET, EIFFAGE TP - SÉBASTIEN LEBRANCHU, COFFRAGE&QUIPAGE

El proyecto se inscribe en el marco del planificación, programada por la Región Martinica, del intercambiador de la Pointe des Sables para permitir el paso de la futura línea de autobús de tránsito rápido que comunicará, en 2015, Fort-de-France con el aeropuerto de Lamentin. Para hacer más fluido el tráfico, la vía de autobús (Transporte Público en Vía Propia) y los dos ramales de enlace existentes se desnivelarán en un viaducto de 740 m de largo, formado por un tablero en cajón pretensado colado in situ. Este artículo describe en detalle la fase de ejecución del viaducto: la variante realizada, los métodos específicos de ejecución y el desarrollo de las obras. □



© EIFFAGE CONSTRUCTION MÉTALLIQUE

# REEMPLACEMENT DU PONT SAINT-NICOLAS DE REVIN

AUTEURS : THOMAS KLUMB, INGÉNIEUR D'AFFAIRE EIFFAGE CONSTRUCTION MÉTALLIQUE - ARNAUD SALMON, CHEF DE PROJET  
BUREAU D'ÉTUDE GREISCH - DANIEL BITAR, ADJOINT AU DIRECTEUR DES OPÉRATIONS, CHEF DU SERVICE ÉTUDES DU CTCM

**DERNIER PONT PROVISOIRE SUR LA MEUSE POUR FAIT DE GUERRE, LE PONT SAINT-NICOLAS DE REVIN, À VOIE UNIQUE ET À CIRCULATION ALTERNÉE, EST DEvenu OBSOLÈTE. UN NOUVEL OUVRAGE PLUS LARGE ET LIBÉRANT LE PASSAGE À LA MEUSE Y COMPRIS LORS DES CRUES LES PLUS IMPORTANTES LE REMPLACE DésORMAIS : IL S'AGIT D'UN CAISSON MÉTALLIQUE À HAUTEUR VARIABLE, D'UNE LONGUEUR DE 129 M AVEC UNE PORTÉE PRINCIPALE DE 92 M. LE PRÉSENT ARTICLE DÉCRIT PLUS EN DÉTAIL LA CONCEPTION ET LES PHASES D'EXÉCUTION DE LA STRUCTURE MÉTALLIQUE.**

## CONTEXTE ET CONCEPTION DE L'OUVRAGE

Le pont Saint-Nicolas, qui franchissait il y a peu la Meuse à Revin, avait été construit pendant la dernière guerre mondiale avec les mêmes tabliers que ceux utilisés à Arramanches pour le débarquement des Alliés en juin 1944. Il ne supportait qu'une seule voie de circulation. Devant la gêne occasionnée par cette situation, face à l'obligation de procéder à un entretien sérieux de

l'ouvrage et en vue d'améliorer la configuration hydraulique des lieux liée aux crues de la Meuse, le Conseil Général des Ardennes (08) a décidé en 2003 de remplacer l'ouvrage par un nouveau pont.

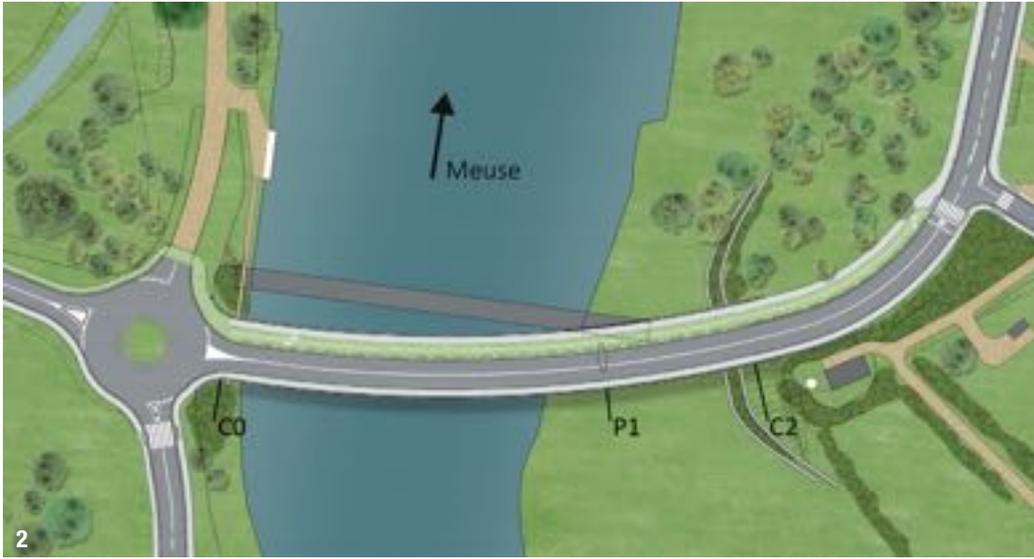
Les exigences pour le projet du nouvel ouvrage, formulées dans le cadre d'un concours de conception, sont les suivantes :

→ Franchir la Meuse sans appui dans son lit mineur ;

**1- L'ancien  
et le nouveau  
pont de Revin.**

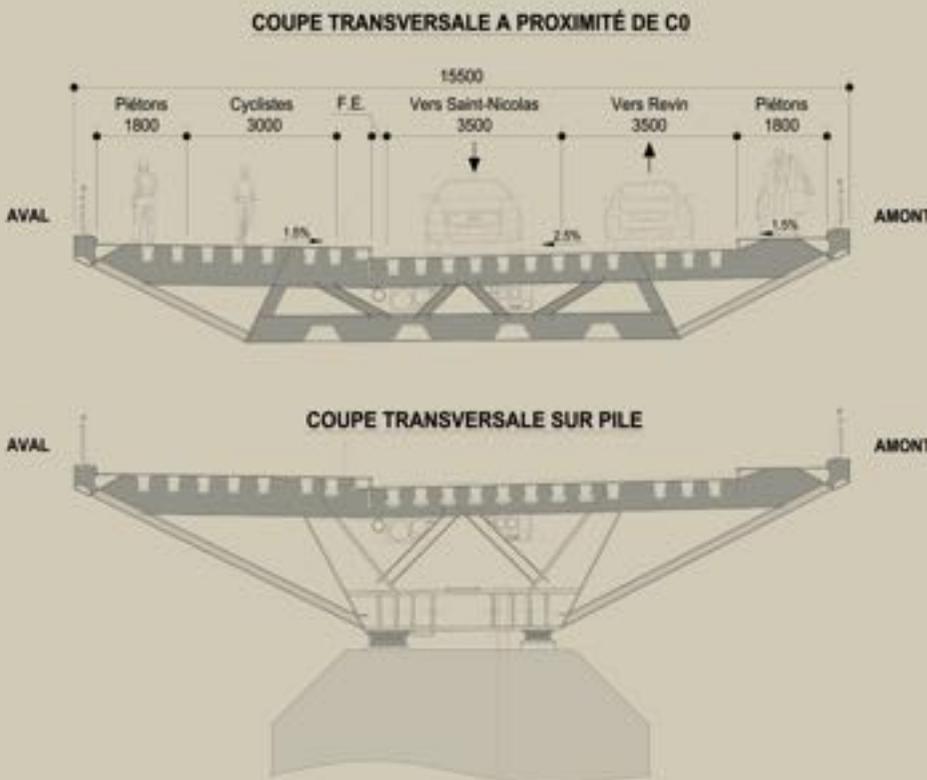
**1- The old  
and new Revin  
bridges.**

- Permettre l'écoulement de la crue centennale avec une garde de 1 m sous l'intrados ;
- Porter une chaussée bidirectionnelle de 7 m de large, deux trottoirs de 1,5 m ainsi qu'une piste cyclable de 3 m de large ;
- Aménager les carrefours de part et d'autre de l'ouvrage ;
- S'intégrer dans le site, classé en zone de protection du patrimoine architectural et urbain.



© BUREAU D'ÉTUDE GREISCH  
2

## COUPE TRANSVERSALE SUR PILE ET SUR CULÉES



© BUREAU D'ÉTUDE GREISCH  
3

Afin de maintenir la circulation pendant la plus grande partie des travaux, le nouveau pont trouve naturellement sa place à côté de l'existant. Son tracé courbe s'intègre ainsi parfaitement dans la continuité de la voirie en provenance de la ville, améliorant de facto les conditions de conduite sur l'ouvrage et à ses abords (figure 2). Comme souvent dans le cadre d'ouvrages urbains franchissant des cours d'eau, la topographie et les limitations

**2- Vue en plan.**  
**3- Coupe transversale sur pile et sur culées.**

**2- Plan view.**  
**3- Cross section on pier and abutments.**

de pente imposent un tablier mince et le pont haubané semble le mieux répondre aux exigences. Toutefois, ce sont les pylônes, mais surtout les contrepoids nécessaires, s'avèrent délicats à implanter. En effet, en rive gauche, le peu de recul disponible rend incompatible la présence de haubans d'équilibrage avec les espaces circulables, et, en rive droite, c'est le bâti qui est difficile à concilier avec les superstructures (station de pompage notamment).

Sans superstructure aidante, le besoin d'avoir le tablier le plus mince possible implique de le réaliser en acier, avec une dalle orthotrope et à hauteur variable pour optimiser son comportement. Un caisson lui confère la raideur en torsion nécessaire tout en limitant également sa hauteur (figure 3).

La dalle orthotrope se compose d'une tôle raidie par des augets. Elle est supportée par des pièces de pont disposées tous les 3,95 m, qui s'appuient elles-mêmes sur une succession de bracons tubulaires. La hauteur variable du caisson associée à l'inclinaison des bracons, constante pour des raisons esthétiques évidentes, conduit à faire varier la largeur de la semelle inférieure du caisson. Techniquement, il n'est cependant pas possible de faire varier la position des âmes à son intersection avec la dalle orthotrope, si bien qu'elles présentent une inclinaison variable et sont donc vrillées, sur la longueur du tablier (figure 4).

Comme point particulier de la conception, il reste à signaler le déséquilibre important entre la travée principale (91 m) et la travée d'équilibrage (36 m). Cette configuration induit des réactions d'appui sur le tablier au droit de la culée en rive droite (travée courte) vers le bas (soulèvement).

Les appareils d'appui sont par conséquent posés au plafond et la culée est utilisée comme contrepoids. Afin d'éviter un décollement de ces appuis, en particulier lorsque les convois sont situés sur la petite travée, on construit l'ouvrage avec une géométrie telle qu'un réglage est nécessaire au niveau de la culée C2 pour obtenir le profil en long théorique. Ce réglage permet d'augmenter la réaction d'appui à la culée C2 de telle manière que celle-ci reste vers le bas, même aux états limites ultimes (figure 5).

### ÉTUDES D'EXÉCUTION - POINTS PARTICULIERS

Les études d'exécutions se sont attachées sur 4 points spécifiques à cet ouvrage.

#### DÉFINITION DE LA CONTRE-FLECHE DE FABRICATION

En cohérence avec le concept de la culée inversée, le schéma fonctionnel de l'ouvrage impose une réaction négative en C2. Pour garantir cette conception, une contre-fleche de fabrication en forme de chistera est donnée à l'ouvrage. Un phasage de mise en place adéquate est alors adopté afin d'aboutir à la géométrie finale de l'ouvrage. ▷



4

© BUREAU D'ÉTUDE GREISCH

Pour prendre en compte les sollicitations dues à chaque étape, l'utilisation d'un modèle à barre capable de garder l'historique des différentes phases s'impose. Ce modèle a servi aussi pour obtenir la descente de charge et les sollicitations en service de l'ouvrage (figure 6).

#### JUSTIFICATION DES ÂMES GAUCHES

La forme particulièrement gauche des âmes fait en sorte que les contraintes calculées à partir des méthodes usuelles de la résistance des matériaux vont s'accroître de manière non linéaire en accentuant davantage les effets sur les panneaux (figures 7 et 8).  
Devant l'absence de méthode de justification dans les Euronormes et dans la littérature technique, un modèle Eléments Finis est réalisé pour prendre en compte les différents aspects : les contraintes dues à la fabrication, les caractéristiques géométriques de chaque panneau y compris gauche propre, les non linéarités géométriques et matérielles, les contraintes résiduelles et enfin le facteur de sécurité sur la modélisation. Les calculs montrent une réduction de la résistance au cisaillement pouvant atteindre 40 % pour les panneaux à âme gauche en comparaison avec les panneaux à âme plane.

#### CLOUAGE SUR P1

En raison de la courbure de l'ouvrage

#### 4- Âme gauche du caisson.

#### 5- Principe du réglage sur culée C2.

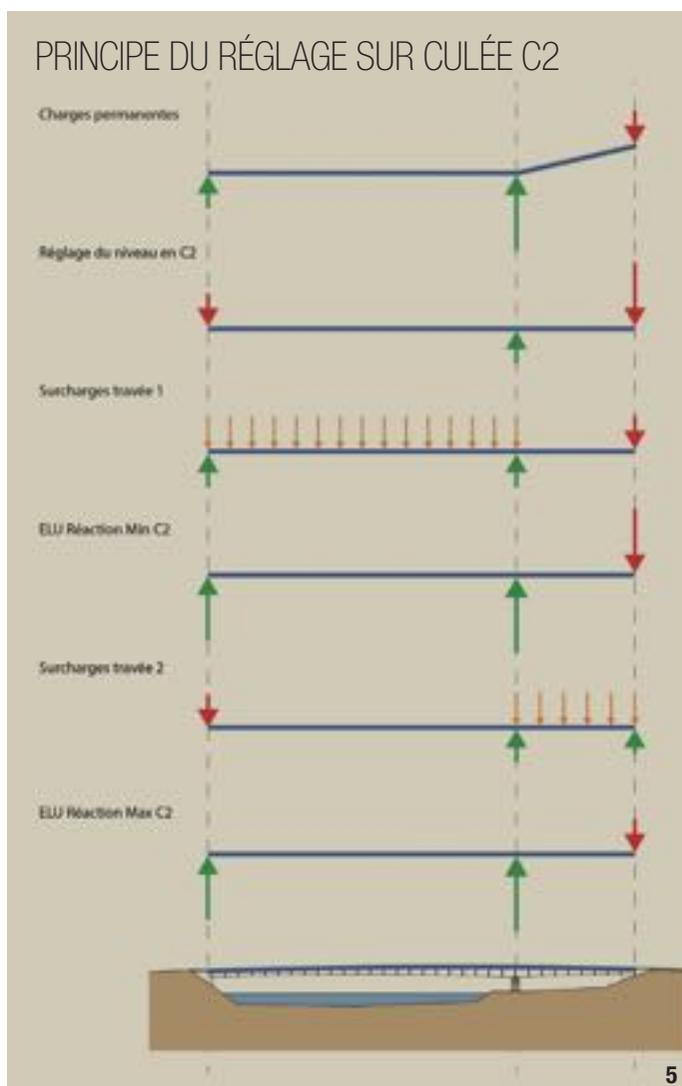
#### 4- Curved girder of the caisson.

#### 5- Technique for adjustment on abutment C2.

et de l'excentrement des charges de circulation, un soulèvement des appuis sur la pile pouvait se produire. Pour éviter le décollement à l'ELU, deux barres de diamètre 58 mm avec effort de 400 t ont été préalablement scellées dans la pile P1. Pour permettre la mise en place de l'ouvrage, ces barres ne devaient pas dépasser de la pile. Des manchons sur les barres et les fourreaux ont permis de rallonger les barres à l'intérieur de l'ouvrage après sa pose. Les fourreaux sont injectés à la cire, ce qui permet une détension ultérieure des barres pour changer les appareils d'appui.

#### ZONE D'APPUI C2

La zone d'appui C2 est très particulière. Il s'agit de prolonger l'ouvrage de près de 1 m par deux poutres caisson 800x800 mm avec des tôles de 80 mm d'épaisseur.



5

© BUREAU D'ÉTUDE GREISCH

Le passage d'un caisson à dalle orthotrope de près de 10 m de largeur à 2 petits caissons en acier a nécessité des études locales par éléments finis. L'attache de ces deux caissons d'appui est réalisée sur les deux derniers diaphragmes et les appareils d'appui sont posés au bout de ces caissons (figure 9).

## DÉROULEMENT DES TRAVAUX DE CHARPENTE MÉTALLIQUE

### LES ACIERS ET LA FABRICATION EN ATELIER

Les aciers ont été fournis en grande partie par le sidérurgiste Dillinger Hütte et dans une moindre mesure par NMLK. Les livraisons des tôles se sont faites essentiellement par voie fluviale jusqu'à l'usine Eiffage de Lauterbourg

(67), où le tablier a été intégralement fabriqué.

On peut distinguer, selon leur épaisseur et leur emplacement 2 nuances d'acier.

Les tôles de platelage et les augets ont une épaisseur comprise entre 8 mm et 20 mm. Elles sont en acier S355K2+N. L'épaisseur des âmes du caisson varie entre 20 mm et 40 mm et sont en acier S355 et en S460 M.

Les tôles de fond du caisson ont entre 20 mm et 80 mm d'épaisseur, en S355 et en S460 autour de la pile.

Les caissons centraux ont été assemblés les uns derrière les autres afin de constituer un montage à blanc partiel dans une partie de l'usine, tandis que les trottoirs étaient assemblés indépendamment les uns des autres.

À l'assemblage, les caissons ont été assemblés à l'envers. La dernière opé-

ration d'assemblage consistait à plaquer l'âme sur les tôles supérieures, inférieures et les diaphragmes et lui donner le gauchissement particulier de cet ouvrage (figure 10).

### TRANSPORT ET ASSEMBLAGE SUR SITE

Transversalement, l'ouvrage était découpé en 4 : les 2 demi-caissons et les 2 trottoirs. ▶

6- Modèle aux éléments finis.

7- Principe de modélisation des âmes gauches.

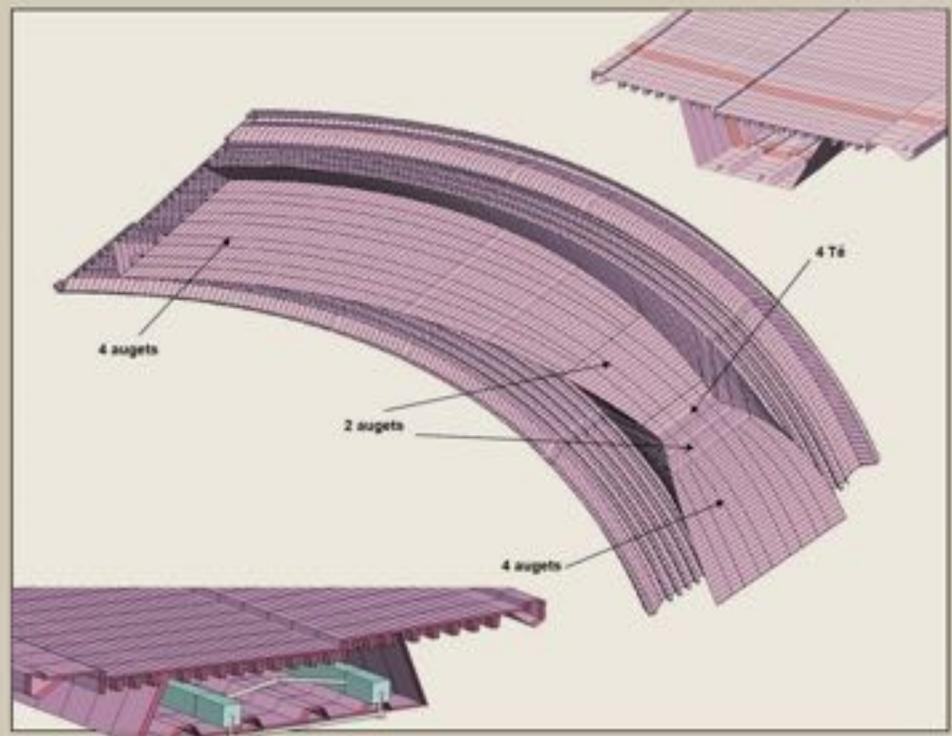
8- Détail du modèle de calcul des âmes gauches.

6- Finite element model.

7- Curved girder modelling technique.

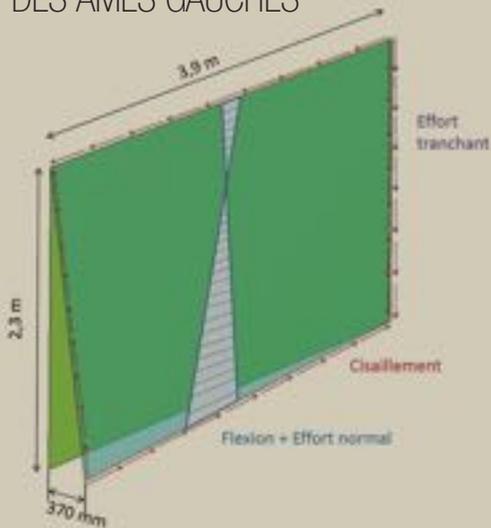
8- Detail of the curved girder calculation model.

## MODÈLE AUX ÉLÉMENTS FINIS



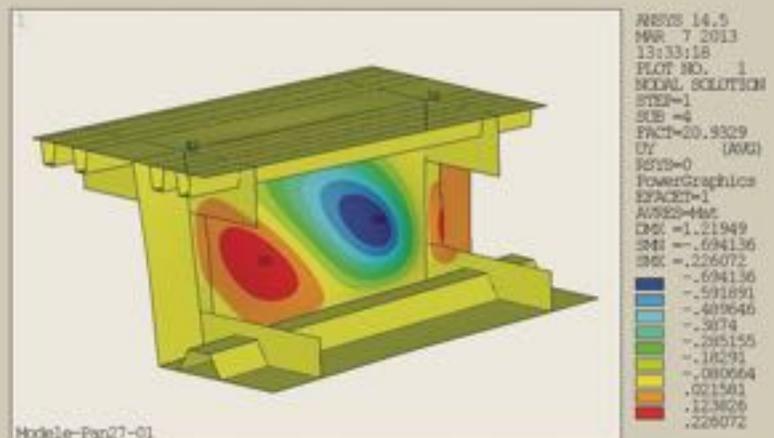
© CTICM  
6

## PRINCIPE DE MODÉLISATION DES ÂMES GAUCHES



© CTICM  
7

## DÉTAIL DU MODÈLE DE CALCUL DES ÂMES GAUCHES



8

Longitudinalement, l'ouvrage est découpé en 9 tronçons. En ajoutant le tronçon sur pile particulier, 37 éléments ont quitté l'usine de Lauterbourg.

Après un passage à l'atelier de peinture, les différents éléments ont été livrés par camion en convoi exceptionnel (figure 12).

Déchargés par grue au fur et à mesure des livraisons, le tablier a été complètement assemblé de janvier à juin 2014 sur une plateforme en rive droite de la Meuse.

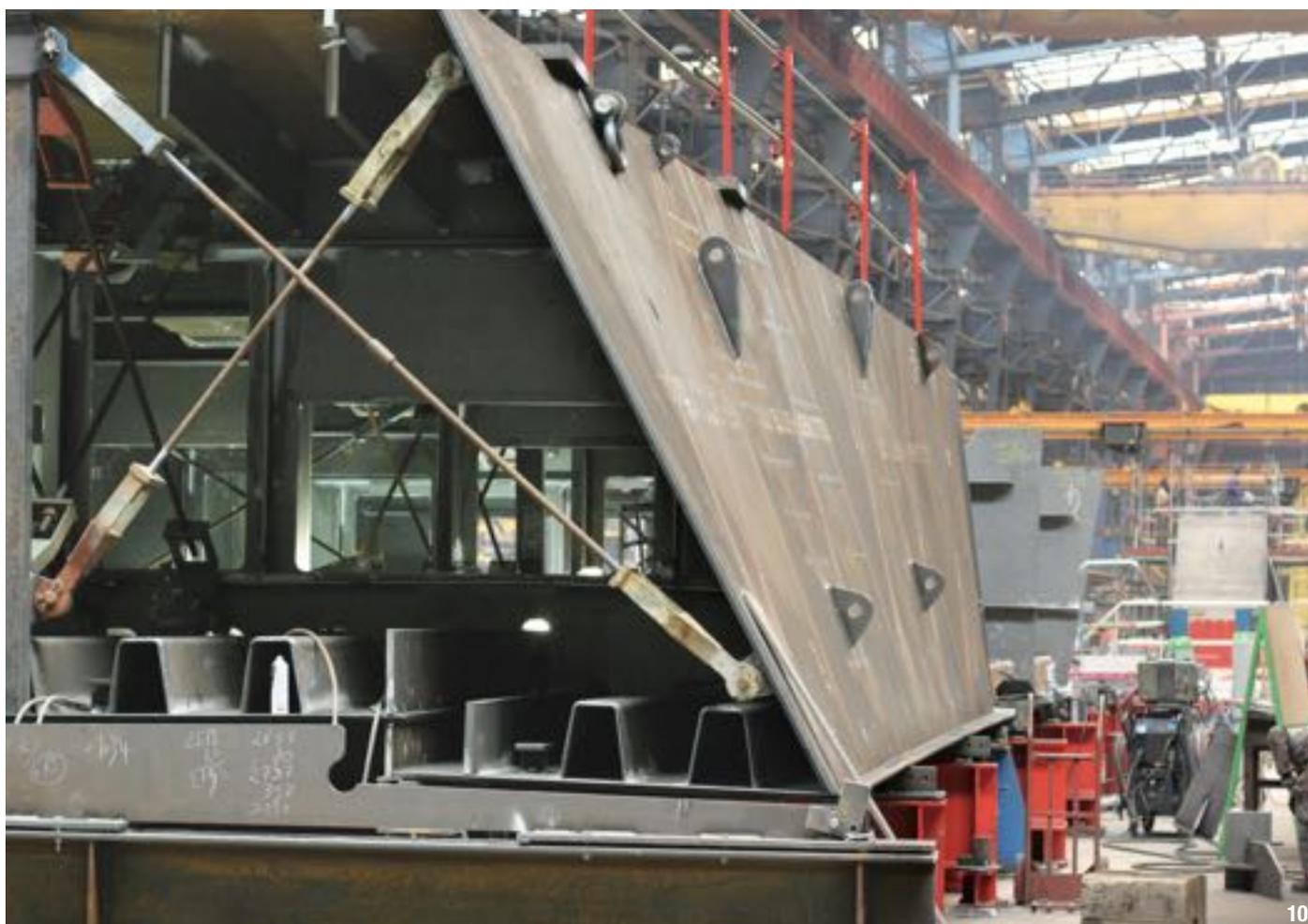
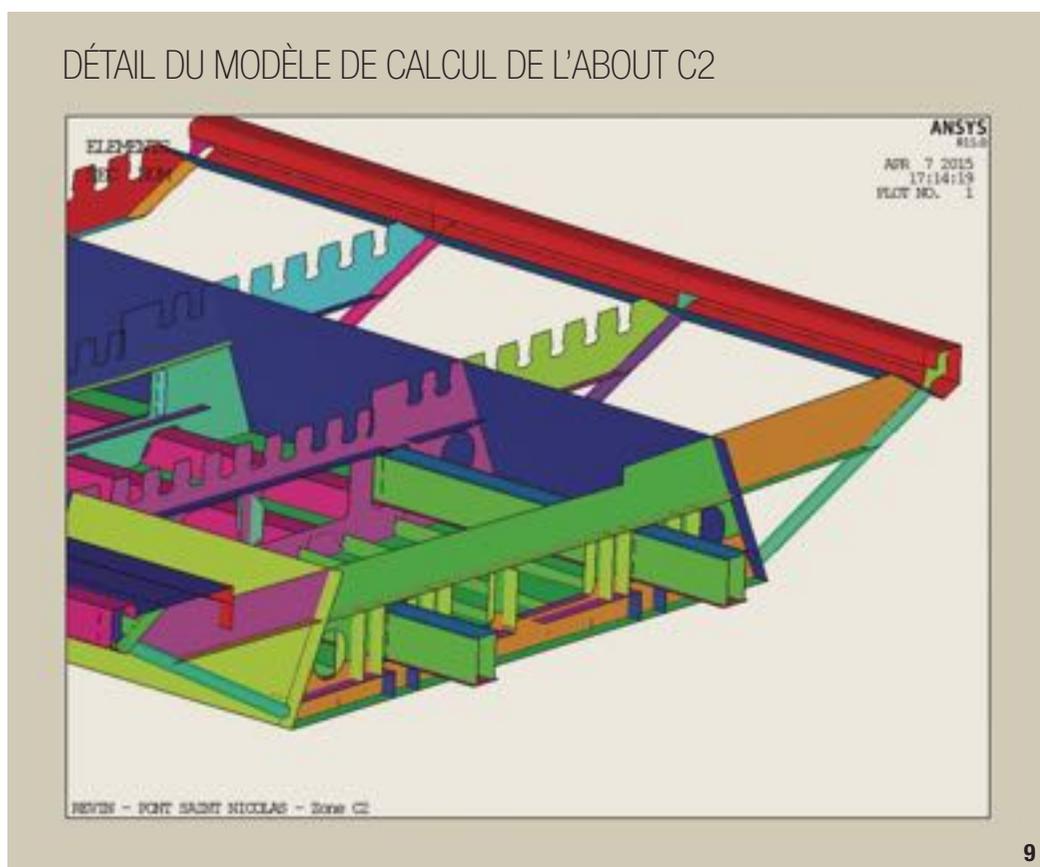
Dans un premier temps, le caisson était reconstitué, puis les trottoirs latéraux

**9- Détail du modèle de calcul de l'about C2.**

**10- Fabrication des caissons.**

**9- Detail of the calculation model for end plate C2.**

**10- Caisson manufacture.**





11

© EIFFAGE CONSTRUCTION MÉTALLIQUE

ajoutés et enfin les bracons soudés (figure 11).

En parallèle de l'assemblage, les caissons ont été revêtus d'une couche de finition.

À l'intérieur du caisson, plusieurs opérations se sont succédé :

- Soudure des éléments ;
- Mise en place des supports des différents réseaux ;
- Pose des réseaux ;
- Protection anti-corrosion.

La mise en place des réseaux dans l'ouvrage représentait une contrainte

**11- Assemblage de l'ouvrage.**

**12- Transport des caissons.**

**11- Bridge assembly.**

**12- Caisson transport.**

particulière. En effet, à l'intérieur de l'ouvrage passent :

- Du côté aval, les 2 conduites d'alimentation en eau de la ville de Revin et la conduite d'assainissement de l'ouvrage ;
- Du côté amont, une conduite de gaz (GRDF), 2 conduites Très Haute Tension (ERDF), des fourreaux pour France Télécom et l'éclairage public.

L'ensemble des réseaux a été installé dans l'ouvrage, de telle sorte qu'après la mise en place de l'ouvrage, seuls

les raccords restaient à faire (figure 13).

**PRÉPARATION À LA MISE EN PLACE DE L'OUVRAGE**

La mise en place de l'ouvrage a nécessité la réalisation de plusieurs opérations :

- Le vérinage du tablier. Pour faciliter les accès, l'ouvrage a été assemblé au plus près du sol. Avant sa mise en place, il a été levé à son niveau de pose, soit à plus de 6 m au-dessus du sol ;
- Un quai d'assemblage de la barge a été constitué ainsi que des points d'ancrage servant à son guidage ont été réalisés des 2 côtés de la Meuse, en amont et en aval ;
- En parallèle, les Kamag (remorques multi-essieux) ont été préparés et leur équipement mis en place. La barge, de 36 m de long par 14 m de large et constituée de 15 caissons métalliques, a été assemblée et équipée de treuils de guidage et de tours de vérinage afin d'ajuster le niveau de la structure ;
- En parallèle, des opérations de dragage des berges de la Meuse ont été réalisées afin d'obtenir un tirant d'eau suffisant ;
- Quelques jours avant la mise en place, l'ouvrage existant a été fermé à la circulation et la première travée a été déposée.

**MISE EN PLACE**

La mise en place de l'ouvrage s'est déroulée sur 2 jours en juin 2014. ▷



12

© EIFFAGE CONSTRUCTION MÉTALLIQUE



13

© EIFFAGE CONSTRUCTION MÉTALLIQUE

Le premier jour, 2 trains de Kamag ont pris en charge l'ouvrage et l'ont approché de la berge.

Le deuxième jour, la partie en porte-à-faux au-dessus de la Meuse a été prise en charge par la barge.

Un train de Kamag s'est retiré : l'ouvrage était alors appuyé sur la barge à l'avant et sur un train de Kamag à l'arrière.

La barge a traversé la Meuse en quelques heures, tandis que le Kamag resté

sur la plateforme imprimait le déplacement à la structure (figures 14 et 15).

#### MISE SUR APPUIS

L'ouvrage a été posé à son niveau définitif sur P1 et 2,5 m plus haut sur C0. Côté C2, les appuis au plafond ont été simplement mis au contact. L'ouvrage a dès lors été dévéréiné de 2,5 m sur C0. Fonctionnant comme un immense levier, l'ouvrage s'est progressivement appuyé sur C2 pour, à la fin de cette

**13- Fin de l'assemblage de l'ouvrage.**

**14- Traversée de la Meuse.**

**13- End of bridge assembly.**

**14- Crossing the Meuse.**

déformation imposée, trouver sa géométrie finale. C'est également à la fin de cette opération que le clouage sur P1 a été réalisé.

#### FINITION

Après la mise en place du tablier, les travaux de finition se sont déroulés durant l'été 2014.

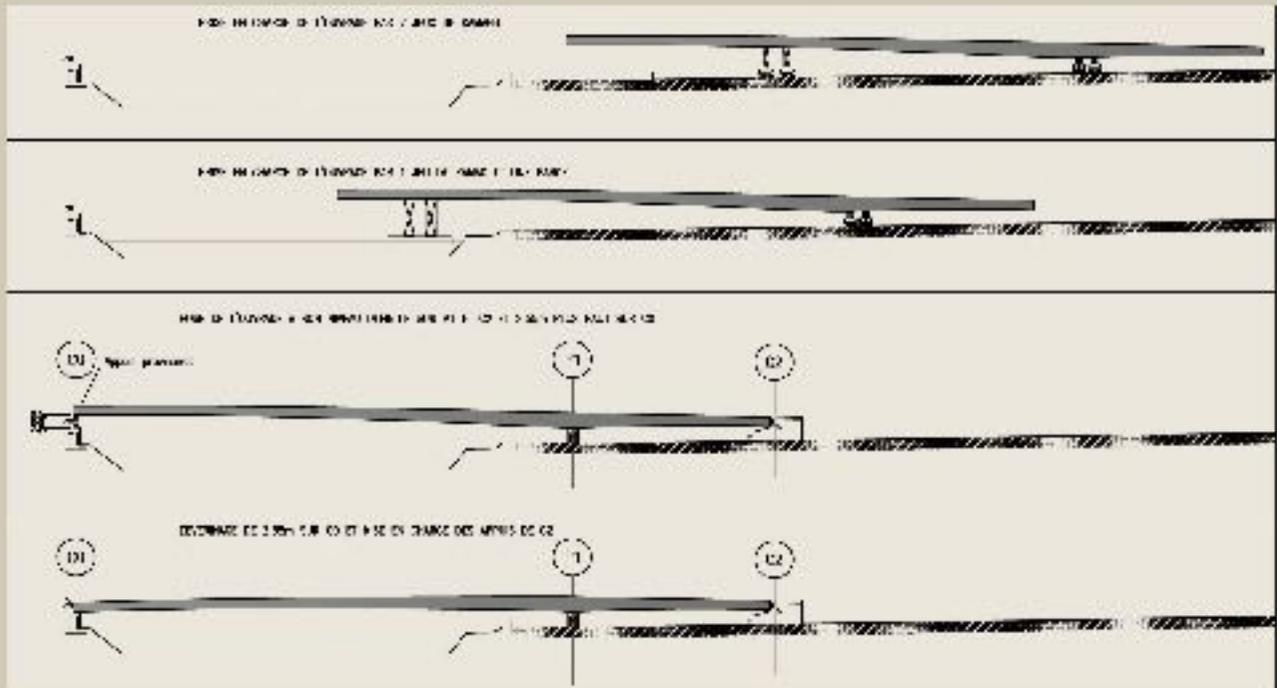
Dans un premier temps, les conduites d'eau potable ont été raccordés afin d'assurer l'alimentation de la commune.



14

© EIFFAGE CONSTRUCTION MÉTALLIQUE

## PHASAGE DE MISE EN PLACE



© EIFFAGE CONSTRUCTION MÉTALLIQUE

15

Les autres réseaux ont été raccordés par la suite.

En parallèle, l'ancien ouvrage a été démonté et, de part et d'autre de l'ouvrage, les accès ont été finalisés. Deux éléments de 24 m de long devraient repartir en Normandie pour y être exposés à proximité d'Arromanches.

Avant la pose de l'étanchéité et des revêtements, les joints de chaussée ont été installés. Il s'agit de joints métalliques équipés de bavettes en néoprène d'un seul tenant, épousant parfaitement la coupe transversale de l'ouvrage. Enfin, les garde-corps et les barrières urbaines servant à marquer la limite entre zone routière et piste cyclable ont été installés. □

15- Phasage de mise en place.

15- Installation sequencing.

### LES PRINCIPALES QUANTITÉS

#### CHARPENTE MÉTALLIQUE :

- 129 m de longueur
- 1 travée de 37 m
- 1 travée de 92 m
- 1 100 t d'aciers

## LES PRINCIPAUX INTERVENANTS

**MAÎTRE D'OUVRAGE :** Ville de Revin

**MAÎTRISE D'ŒUVRE :**

- Maîtrise d'œuvre conception et visa des études d'exécution : Bureau Greisch, avec la collaboration de Michel Virlogeux et de Laurent Barbier (†) architecte
- Maîtrise d'œuvre réalisation : Conseil Général des Ardennes

**CONTRÔLE EXTÉRIEUR DES ÉTUDES D'EXÉCUTION :**

- Bureau d'Études Greisch

**GROUPEMENT DE CONSTRUCTION :**

- Bouygues TP région France (mandataire - génie civil, terrassements)
- Eiffage Construction Métallique (tablier métallique)

**RÉALISATION DES ÉTUDES D'EXÉCUTION DE LA CHARPENTE MÉTALLIQUE :** Ctcm

**PRINCIPAUX SOUS-TRAITANTS ET FOURNISSEURS :**

- Mise en place de la charpente : Sarens
- Clouage et joint de chaussée : Etic
- Appuis : Freyssinet
- Anticorrosion : Borifer et Deniz&Deniz

### ABSTRACT

## REPLACEMENT OF SAINT-NICOLAS DE REVIN BRIDGE

THOMAS KLUMB, EIFFAGE - ARNAUD SALMON, GREISCH - DANIEL BITAR, CTICM

After many years' service, the project has been launched to replace Saint-Nicolas de Revin Bridge, which was built with components from the man-made harbour of Arromanches. Formed as a steel caisson of variable height, the new bridge's design and construction are remarkable: its girders are curved and, on one of the abutments, the bridge is extended by two small caissons: the supports are placed on the top and the abutment acts as ballast. Built in the Lauterbourg plant and fully assembled on the right bank, the bridge was first handled by two Kamag trailers and then, resting on a barge, it crossed the Meuse in a few hours to be placed on its permanent supports. □

## SUSTITUCIÓN DEL PUENTE SAINT-NICOLAS DE REVIN

THOMAS KLUMB, EIFFAGE - ARNAUD SALMON, GREISCH - DANIEL BITAR, CTICM

Después de muchos años de servicio, ha comenzado el proyecto de sustitución del puente Saint Nicolas de Revin, construido con elementos del puerto artificial de Arromanches. Constituido como un cajón metálico de altura variable, su diseño y realización hacen destacable esta nueva estructura: sus almas están retorcidas y, en uno de los estribos, la estructura se prolonga con dos pequeños cajones: los apoyos se han dispuesto en el techo y el estribo actúa como lastre. Fabricada en la planta de Lauterbourg y ensamblada en su totalidad en el margen derecho, la estructura debe sujetarse primero con dos juegos de Kamag, después cargarse en una barcaza, atravesar el Mosa en unas horas y, por último colocarse sobre sus apoyos definitivos. □



1

© P. LE DOARÉ

# LGV SEA - LES BIPOUTRES À OSSATURE MIXTE

AUTEURS : NABIL YAZBECK, CHEF DE PROJET, EGIS JMI - GILLES CAUSSE, DIRECTEUR ADJOINT, VINCI CONSTRUCTION - STEFAN BERNHARD, RESPONSABLE BUREAU D'ÉTUDES CBDI, VINCI CONSTRUCTION

LE CHANTIER DE LA LGV SUD EUROPE ATLANTIQUE SE DISTINGUE PAR SA TAILLE (340 KM DE LIGNE NOUVELLE, DONT 302 KM DE LGV ET 38 KM DE RACCORDEMENTS) ET PAR LE DÉLAI IMPARTI POUR SA RÉALISATION (6 ANS ENTRE LA SIGNATURE DU CONTRAT DE CONCESSION ET LA MISE EN SERVICE, PRÉVUE POUR LA FIN JUILLET 2017). SA MISE EN ŒUVRE AURA NOTAMMENT NÉCESSITÉ LA CONSTRUCTION DE 2 437 OUVRAGES HYDRAULIQUES (OH), 233 PASSAGES PETITE FAUNE (PPF) ET 477 OUVRAGES D'ART (OA). ON DÉNOMBRE 217 PONTS ROUTE (PRO) ET 253 OUVRAGES SUPPORTANT LES VOIES FERRÉES (PRA), DONT 23 BIPOUTRES À OSSATURE MIXTE (OM). 15 DE CES PRA-OM SONT QUALIFIÉS DE NON COURANTS (OANC) EN RAISON DE LEUR LONGUEUR OU DES PORTÉES FRANCHIES. CET ARTICLE DÉCRIT LES CHOIX DE CONCEPTION ET LES MÉTHODES D'EXÉCUTION DE 12 DE CES OANC AINSI QUE LE CAS PARTICULIER DES DEUX OM D'ACCÈS AU VIADUC SUR LA DORDOGNE, ENCADRÉ PAR DES TRAVÉES INERTES.

Les 12 OANC décrits sont marqués d'un astérisque sur le synoptique de la LGV en figure 2.

## ÉLÉMENTS GÉNÉRAUX DE CONCEPTION

Les ouvrages d'art non courants de la ligne à grande vitesse Sud Europe Atlantique sont des ponts-rails à deux voies ballastées, situés sous la ligne à grande vitesse proprement dite. Leur tablier est du type "ossature mixte bipoutre". La vitesse de référence V de la ligne est de 350 km/h au droit de ces ouvrages, sauf sur les viaducs

d'accès au pont sur la Dordogne où elle est réduite à 230 km/h. Leur conception a fait l'objet d'une recherche de standardisation, dans le respect des contraintes spécifiques à chaque site. Dans le cadre du schéma de conception-construction, les constructeurs ont été associés à la démarche de conception, ce qui a permis d'intégrer à l'avant-projet détaillé leurs choix de méthodes de construction.

**1- Le chantier  
du viaduc des  
Lorettes Sud  
(VIA 2458).**

**1- The Lorettes  
South viaduct  
project  
(VIA 2458).**

## CARACTÉRISTIQUES COMMUNES DES OUVRAGES

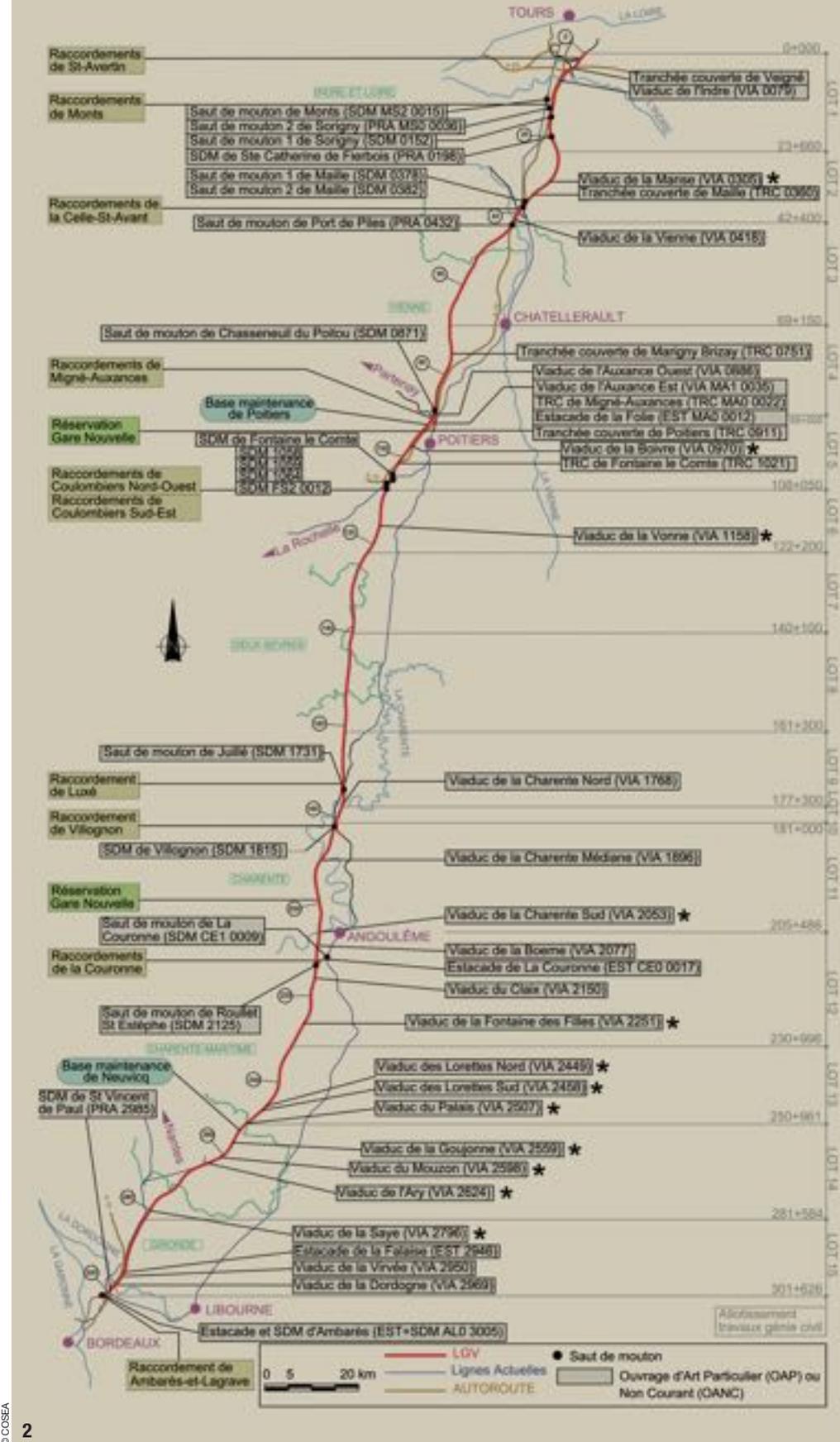
Les options générales retenues pour les PRA-OM dits non courants (dont les coupes longitudinales sont données aux figures 3, 7, 10 et 25 pour le viaduc sur la Dordogne) ont été les suivantes :

### Le tablier

Selon une conception désormais classique, l'ossature métallique des tabliers se compose de deux poutres

# SYNOPTIQUE DE LA LGV SEA

## Implantation des ouvrages d'art particuliers et non courants



© COSEA  
2

en l pratiquement identiques, de hauteur (élanement au 1/15°) et d'écartement (6,30 m) constants, entretoisées par des diaphragmes espacés de 8 à 11 m environ. La largeur des membrures, également constante, vaut 1000 mm en extrados et 1200 mm en intrados. Les aciers mis en œuvre sont de nuance S355 et de qualité conforme aux prescriptions de la norme NF EN 10025.

### 2- Synoptique de la LGV SEA - Implantation des ouvrages d'art particuliers et non courants.

### 2- Block diagram of the SEA HSL - Location of special and non-standard engineering structures.

Le hourdis supérieur en béton armé garde une section constante. Sa largeur totale est de 12,90 m pour tous les tabliers en ossature mixte pour lesquels  $V = 350$  km/h (figure 4) : à cette vitesse, l'entraxe des voies est égal à 4,50 m, et les pistes de service doivent être implantées au-delà de la zone dangereuse, dont la largeur (comptée à partir du bord du rail extérieur) vaut 2,50 m. L'épaisseur du hourdis varie

de 25 à 45 cm. Il est connecté sur la membrure supérieure des poutres par des goujons Nelson.

Afin d'augmenter la rigidité à la torsion du tablier, et ainsi de limiter sa déformation transversale sous chargement dissymétrique, les membrures inférieures des poutres sont reliées sur toute la longueur de l'ouvrage par un contreventement en treillis métallique constitué de cornières 200 x 200 x 20 mm assemblées à la charpente par des boulons HR (figures 11 et 13). Cette solution a été préférée à celle, plus généralement mise en œuvre sur les dernières LGV, consistant à assurer le contreventement au moyen de dalles préfabriquées en béton armé, liées aux membrures inférieures des poutres par des longrines de béton coulé en place enrobant des goujons de connexion. Pour les constructeurs, elle présentait plusieurs avantages :

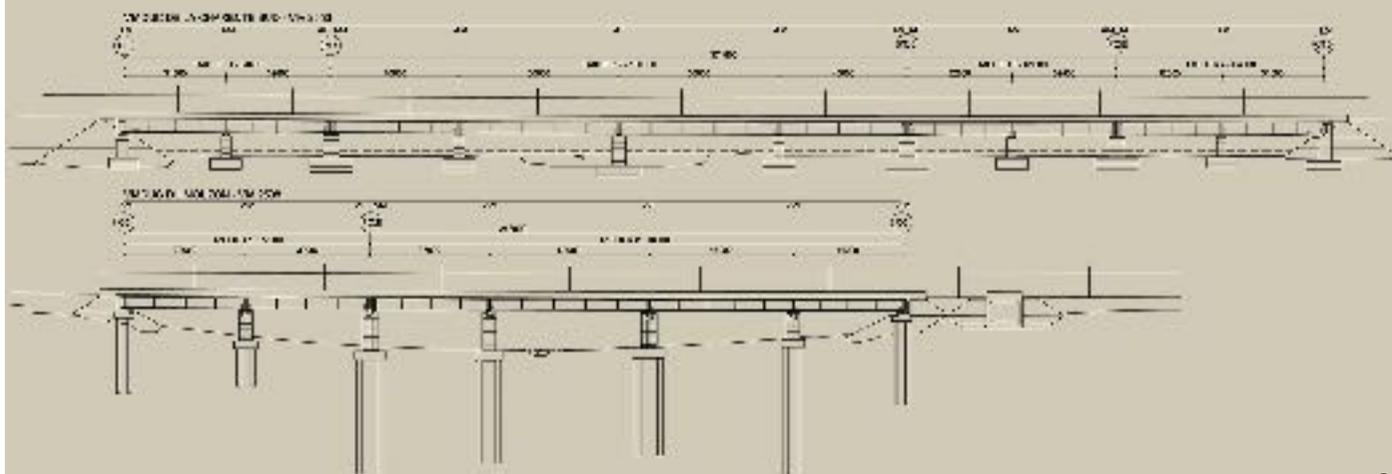
→ Sécurité : le contreventement est fixé aux poutres dès l'assemblage de la charpente, par le même intervenant, sur l'aire de lancement, c'est-à-dire dans des conditions de sécurité optimales. On s'affranchit ainsi des opérations délicates de mise en place des dalles préfabriquées après lancement de l'ossature métallique.

→ Simplicité et rapidité d'exécution : sa réalisation n'est pas critique vis-à-vis du délai global, puisqu'il est possible, en dédoublant les ateliers, de la mener de front avec les opérations de rabotage par soudure des tronçons sur site. Le contreventement est réalisé en une seule phase (il n'est plus nécessaire de venir claver les éléments préfabriqués inférieurs après bétonnage du hourdis supérieur).

Les poutres des ouvrages mixtes ferroviaires sont traditionnellement entretoisées par des diaphragmes pleine hauteur, toujours dans le souci de leur conférer une rigidité à la torsion maximale. Des prédalles sont alors employées en coffrage perdu de la partie centrale du hourdis supérieur. Sur la LGV SEA, le choix a été fait de supprimer ces prédalles ; l'équipage mobile comporte alors un plateau coffrant central coulissant entre les poutres (figure 30).

Pour faciliter son passage au droit des diaphragmes, la partie supérieure de ceux-ci a été échancrée sur une hauteur de 75 cm, de manière similaire à ce qui a été récemment réalisé sur le viaduc d'Haspelbaechel (LGV Est - 2<sup>e</sup> phase). Ainsi, les diaphragmes courants et sur piles ne sont pas reliés au hourdis supérieur.

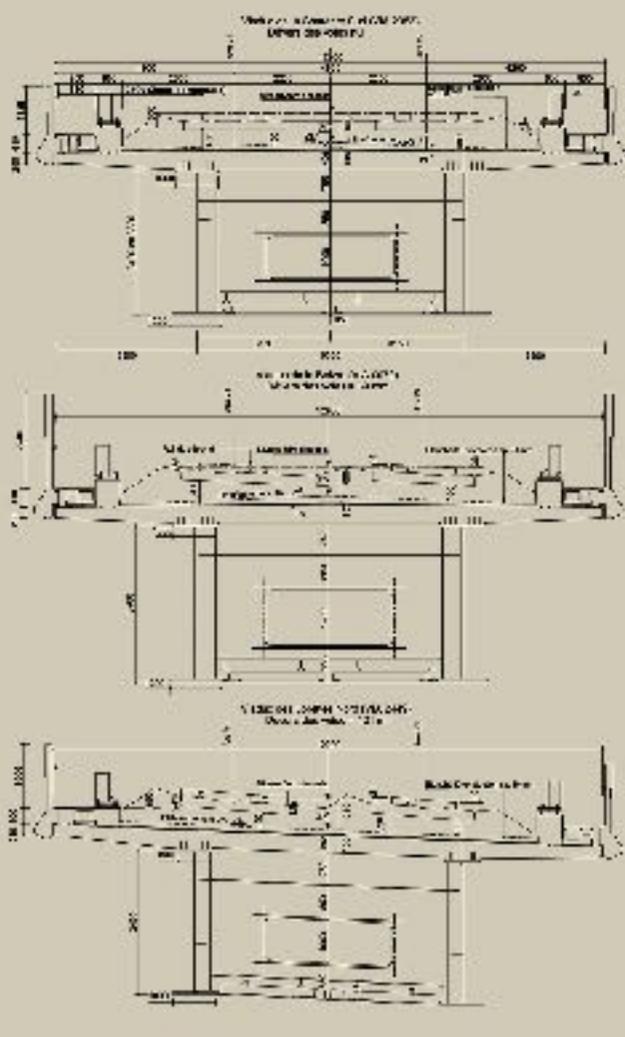
## COUPES LONGITUDINALES DES OUVRAGES DE LONGUEUR SUPÉRIEURE À 180 M



3

## PRA-OM NON COURANTS

Coupes transversales types du tablier au droit des massifs caténaire



4

Aux extrémités des tabliers, cette connexion est rétablie par une retombee en béton sur la membrure supérieure du diaphragme sur culée, afin de rigidifier les zones d'about et ainsi de se prémunir du risque de mise en

résonance localisée du tablier lors de l'entrée et de la sortie des trains (figures 8 et 18).

Des études comparatives menées au stade de l'avant-projet sur un ouvrage représentatif, au moyen d'un modèle

**3- Coupes longitudinales des ouvrages de longueur supérieure à 180 m.**

**4- PRA-OM non courants - Coupes transversales types du tablier au droit des massifs caténaire.**

**3- Longitudinal sections of structures of length exceeding 180 m.**

**4- Non-standard composite-frame railway bridges - Typical cross sections of the deck at the level of the catenary system foundations.**

aux éléments finis complet du tablier, ont montré que la diminution de rigidité en torsion induite par cette disposition constructive était négligeable (de l'ordre de 5%).

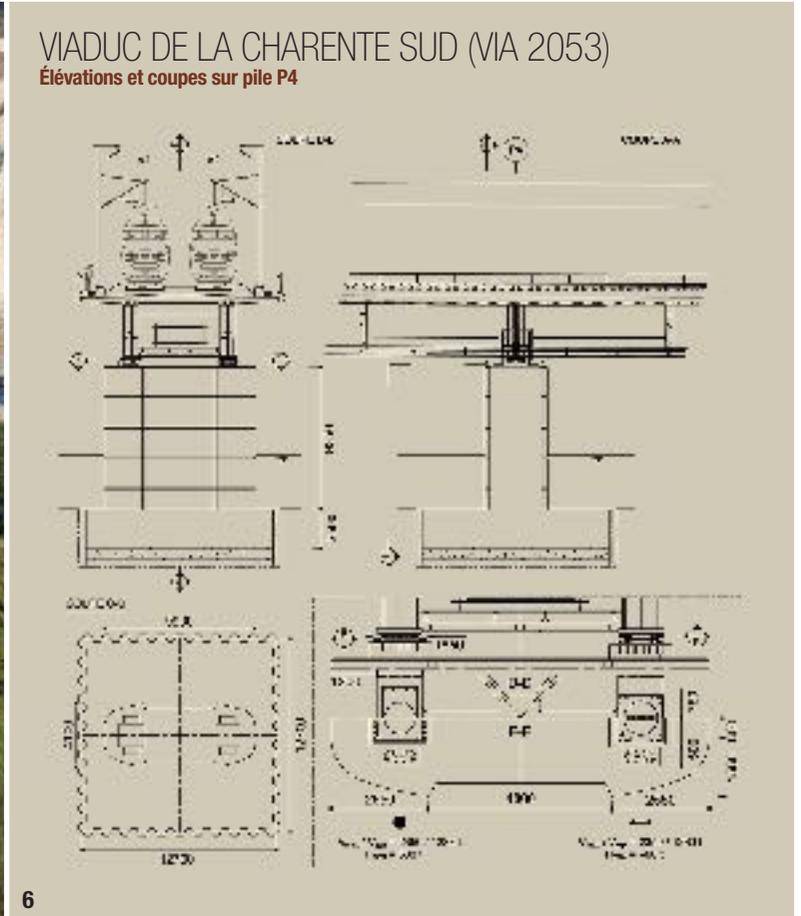
Les murs en retour des culées ont également été arasés à 80 cm sous le niveau des membrures supérieures des poutres, pour libérer le passage à l'équipage mobile.

Cet espace est ensuite refermé par un barreaudage en acier, auquel on a eu également recours pour remplacer l'habituel mur de front en béton armé (figure 18).

L'IN3278 fixe les principes de mise au dévers des voies et de définition du profil en travers de la plateforme ferroviaire. Son application conduit à retenir les règles suivantes au droit des ouvrages d'art situés sur des alignements droits et dans les courbes de rayon constant (ces règles sont illustrées par les exemples donnés en figure 4) :



© P. LE DOARE



© EGIS

→ Pour  $V > 300$  km/h, le niveau zéro des rails (qui correspond au plan de roulement), nommé  $Z_0$ , est calé à 690 mm au-dessus du niveau du point P du profil en long de la ligne (le  $Z_p$ , correspondant au niveau inférieur du ballast à l'axe de la plateforme, en section courante de terrassements hors ouvrage). Sur le viaduc sur la Dordogne, cette cote vaut 651 mm.

→ Tant que le dévers  $d$  des voies (c'est-à-dire la différence d'altitude entre les deux rails) est inférieur ou égal à 100 mm, on donne à l'extrados du hourdis supérieur un profil transversal en toit incliné à 1% vers les rives du tablier. Au-delà, et jusqu'à  $d = 180$  mm (valeur maximale admise sur les LGV), on donne à l'extrados une pente transversale en vélodrome à 4% vers l'intérieur de la courbe.

→ Si  $V > 300$  km/h et  $d < 45$  mm, le décalage altimétrique entre le point P' situé dans l'axe de l'ouvrage à l'interface entre le ballast et l'étanchéité et le point P du profil en long de la ligne, ( $Z_p - Z_{p'}$ ), vaut 145 mm. Si  $45 \leq d \leq 100$  mm, ( $Z_p - Z_{p'}$ ) vaut  $(d/3 + 130)$  mm. Si  $d > 100$  mm, ( $Z_p - Z_{p'}$ ) vaut 100 mm.

L'application de ces règles et de celles définies dans l'IN3278 pour le calage

**5- Viaduc de la Charente Sud (VIA 2053) - Préparation au lancement des tabliers 1 et 2.**

**6- Viaduc de la Charente Sud - Pile P4.**

**5- Charente South viaduct (VIA 2053) - Preparation for launching decks 1 and 2.**  
**6- Charente South viaduct - Pier P4.**

altimétrique de chacun des quatre rails par rapport au  $Z_0$  conduit, sur ouvrage, à une épaisseur de ballast :

→ Égale à 450 mm au droit du rail le plus proche de l'extrados, valeur minimale admise sur les supports rigides comme les hourdis de pont ;

→ Et n'excédant pas 550 mm au droit du rail le plus éloigné de l'extrados, valeur maximale admise en section courante (une épaisseur plus importante entraînant des risques d'instabilité de la voie sus-jacente).

### Les piles

À l'exception des viaducs de la Boivre et de la Charente Sud (VIA 0970 et 2053), les piles sont constituées de deux fûts réunis en tête par un chevêtre, de section elliptique de 2 m x 4 m lorsqu'elles n'ont pas à résister aux efforts de freinage des convois ferroviaires. Pour respecter la limite de 5 mm imposée au déplacement des piles fixes sous l'effet du freinage et du démarrage des trains, l'inertie longitudinale de celles-ci est augmentée en insérant entre les deux moitiés de la section elliptique un rectangle de largeur 2 m, et de longueur variable suivant les appuis et les ouvrages considérés (figures 8, 14 et 17). Les mêmes outils coffrants peuvent ainsi être utilisés pour toutes les piles de ce type, qu'elles servent ou non d'appui fixe, en insérant des panneaux plans entre les deux demi-cylindres (figure 34). Les piles du VIA 2053, d'une hauteur vue modeste variant entre 6 et 8 m, sont constituées d'un fût monolithique (figure 6). Leur section oblongue a été retenue en raison de ses qualités hydrodynamiques.

Le VIA 0970 (figures 10 à 13) est, parmi les bipoutres mixtes de la LGV SEA, le plus éloigné du sol ; la

hauteur de ses piles atteint 20 m. Pour leur conférer la rigidité nécessaire, leur section est obtenue à partir de celle des piles du VIA 2053 en intercalant entre les parements architecturés deux panneaux plans de 2,50 m parallèles à l'axe longitudinal du pont. Pour limiter le poids de la pile, le fût a été évidé, en conservant en tête un chevêtre plein de 4 m d'épaisseur.

### Les appareils d'appui

Les tabliers reposent sur les piles et les culées par l'intermédiaire d'une paire d'appareils d'appui à pot de caoutchouc placés sous chacune des poutres principales (figures 6, 8, 12, 14 et 17). La déformation du caoutchouc confiné entre le pot et le couvercle autorise les rotations du tablier. Dans le cas d'appareils d'appui fixes, les déplacements horizontaux du tablier sont bloqués, au jeu de fabrication près, par le contact du couvercle de l'appareil sur le pot. Dans le cas d'appuis mobiles, le pot est surmonté par un dispositif de glissement autorisant les déplacements horizontaux dans toutes les directions (appui glissant multidirectionnel), ou seulement suivant une direction privilégiée (appui glissant unidirectionnel). Les efforts horizontaux suivant la direction perpendiculaire sont alors bloqués par un taquet de guidage. ▷

Les appareils d'appui doivent pouvoir être remplacés pendant la durée de vie de l'ouvrage. Des emplacements de vérinage sont prévus à cette fin sous les poutres principales du tablier.

#### Les équipements

L'extrados des tabliers est revêtu d'une chape d'étanchéité adhérente, surmontée d'une couche de protection. Sauf prescription particulière, l'épaisseur totale du système est de 30 mm. Elle a été portée à 50 mm sur les ouvrages qui devaient être empruntés par les semi-remorques d'approvisionnement en caténaires et autres équipements. Les rives des tabliers et les murs en retour des culées sont équipés de corniches architecturales en béton armé dont la partie haute joue le rôle de garde-corps ; une main courante métallique est fixée sur leur face intérieure. Leur hauteur minimale est égale à 1,10 m par rapport au niveau de la piste de service. Elle est portée à 1,50 m lorsqu'ils doivent tenir lieu d'écrans pare-ballast protégeant des projections les infrastructures franchies, et à 2,24 m (soit 1,50 m au-dessus du rail le plus haut de la voie contiguë, dans la configuration la plus défavorable) lorsqu'ils assument également le rôle de protection phonique (figure 4). Les pistes de service courent sur les couvercles des caniveaux à câbles et à eau. Leur largeur est supérieure au minimum fixé par l'IN 168-1 (75 cm). Le TGV étant un mode de transport non polluant, les eaux pluviales recueillies sur le tablier sont rejetées directement sous l'ouvrage par des gargouilles.

Le vide entre les extrémités du tablier et le garde-grève des culées est ponté par un joint-couteau à tôles glissantes, franchi sans discontinuité par le ballast et par les voies. Les parties métalliques de l'ouvrage (ferraillage du tablier et des appuis, ossature du tablier, mains courantes...), sont mises à la terre.

#### L'accessibilité pour l'inspection détaillée et la maintenance

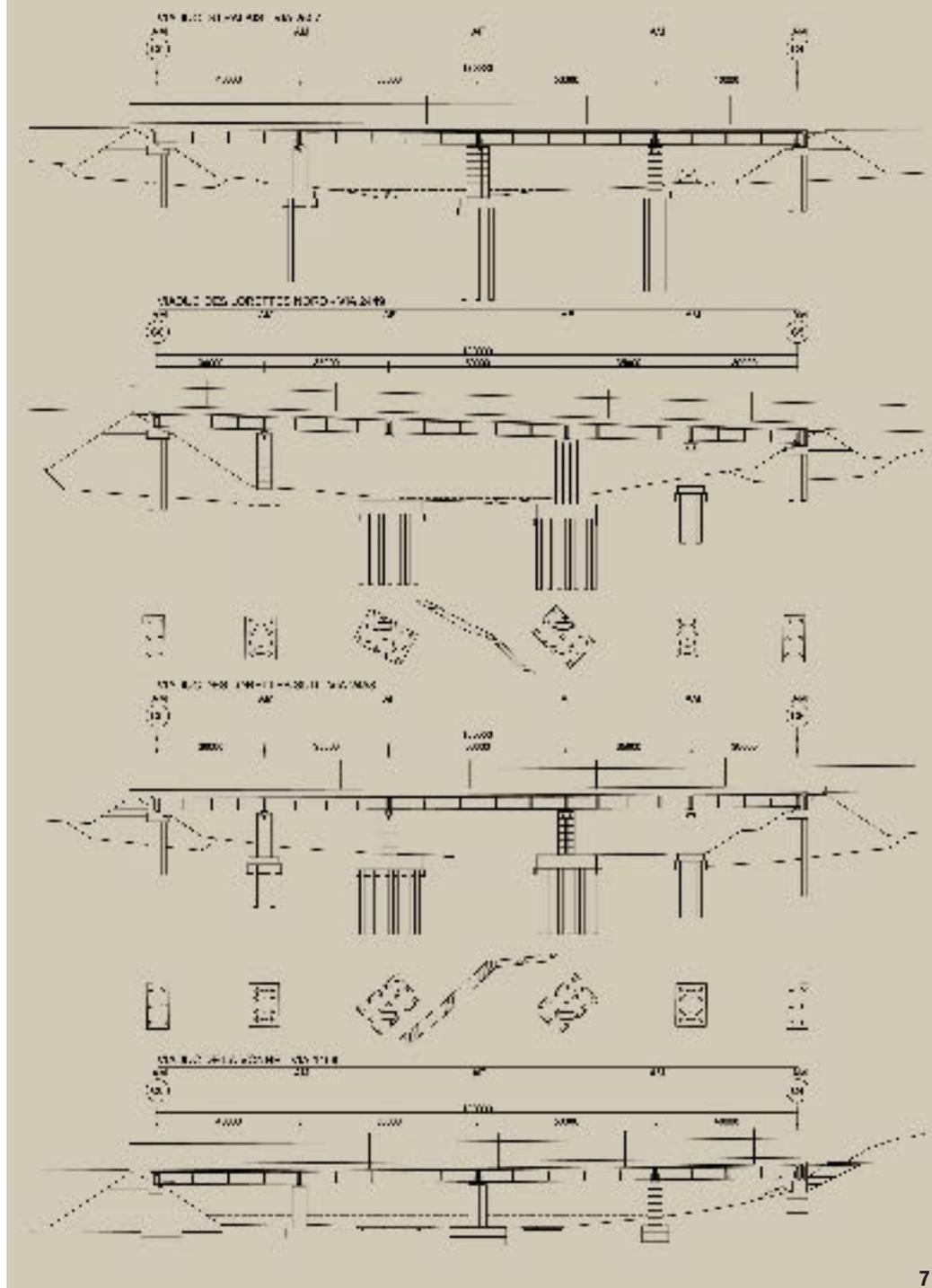
Lisea, société concessionnaire de la ligne, en a confié la conception, la construction et l'intégration au Groupement d'Intérêt Economique (GIE) Cosea. Dès sa mise en service, son exploitation et sa maintenance seront assurées par la société Mesea pour la durée de la concession (50 ans). Les dispositions relatives à l'accessibilité des ouvrages d'art pour leur inspection et leur entretien ont été définies en accord avec le futur mainteneur, durant les études d'avant-projet détaillé.

Les volumes intérieurs des culées et du tablier sont visitables : juste au-dessus

du plan de contreventement, l'espace séparant les deux poutres principales est refermé par un caillebotis reposant sur quatre profilés longitudinaux qui prennent appui sur les traverses et les diaphragmes (figures 13 et 17). Des trappes d'accès permettent de descendre dans les fosses de visite ménagées dans les chevêtres en tête des piles, pour l'inspection des appareils d'appui.

Afin de permettre l'inspection de l'intérieur des piles creuses, les dispositions suivantes ont été retenues pour tous les ouvrages concernés de la ligne :

## COUPES LONGITUDINALES DES OUVRAGES DE LONGUEUR ÉGALE À 180 M



7- Coupes longitudinales des ouvrages de longueur égale à 180 m.

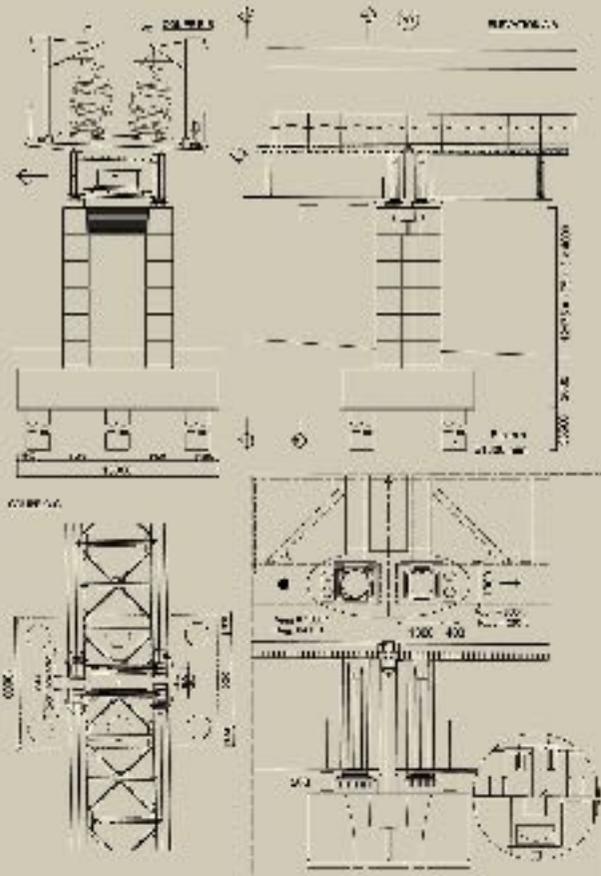
7- Longitudinal sections of structures of length equal to 180 m.

→ On prévoit une réservation  $\varnothing 100$  mm traversant le chevêtre en tête de pile. Cette réservation permet le passage d'une caméra afin de photographier les faces intérieures des piles. Elle est fermée en tête par un bouchon vissé.

→ En pied de fût, on ménage dans le coffrage un point d'accès muré, consistant en une ouverture de  $1000 \times 1000$  mm fermée par un voile d'épaisseur réduite à 150 mm (figure 12), armé uniquement par un treillis soudé anti-fissuration. Sa position est marquée par quatre repères

## VIADUC DU MOUZON (VIA 2598)

Élévations et coupes sur pile-culée PC2



de nivellement. Elle est placée au-dessus du niveau des plus hautes eaux et en dehors de la zone des attentes de la semelle.

Toutes les parois extérieures des ouvrages doivent pouvoir également être inspectées. Ils sont tous conçus pour être "moogables", c'est-à-dire capables de recevoir une passerelle de visite de type MOOG®, qui se déplace sur le tablier sans faire obstacle au passage des trains. Mais pour le montage et la mise en place de cette passerelle, il faut aménager sous l'ou-

vrage des plateformes horizontales de 30x15 m de part et d'autre du tablier, accessibles par la grue de montage et par la remorque de transport, tirée par un camion. Pour certains ouvrages, la réalisation de ces plateformes serait contraire à l'objectif de préservation du milieu naturel qui a conduit à construire un viaduc. Dans ces cas, il est prévu de recourir à des solutions alternatives : → Examen à distance, à l'aide de moyens optiques portés par des drones aériens (solution déjà mise en œuvre sur les LGV du réseau ferré national) ou par un engin téléguidé de 2 à 3 t circulant sur la piste de service et muni d'un bras articulé télescopique (ce projet est en cours de développement). Ces moyens optiques sont associés à des logiciels de traitement et d'analyse qui assemblent les images, détectent et caractérisent les désordres constatés (type, longueur, ouverture, ...) et les reportent sur les plans de l'ouvrage.

→ Examen direct, à partir d'une nacelle télescopique mobile, se déplaçant au sol dans l'emprise de l'ouvrage (les nacelles "araignée" montées sur châssis chenillé, de faible encombrement, peuvent intervenir sans autre préparation du terrain que celle qu'impose la construction de l'ouvrage), ou d'une nacelle ferroviaire négative sur train travaux ou sur engin rail-route. ▷

**8- Viaduc du Mouzon (VIA 2598) - Élévations et coupes sur pile-culée PC2.**

**9- Viaduc du Mouzon - Pose de l'étanchéité.**

**8- Mouzon viaduct (VIA 2598) - Elevation views and cross sections on abutment pier PC2.**

**9- Mouzon viaduct - Placing waterproofing.**

© EGIS  
8



© P. LE DOARÉ  
9

**10- Coupes longitudinales des ouvrages de longueur inférieure à 180 m.**

**10- Longitudinal sections of structures of length less than 180 m.**

**LE SCHÉMA STATIQUE :  
PRIORITÉ DONNÉE À  
LA CONTINUITÉ DU RAIL**

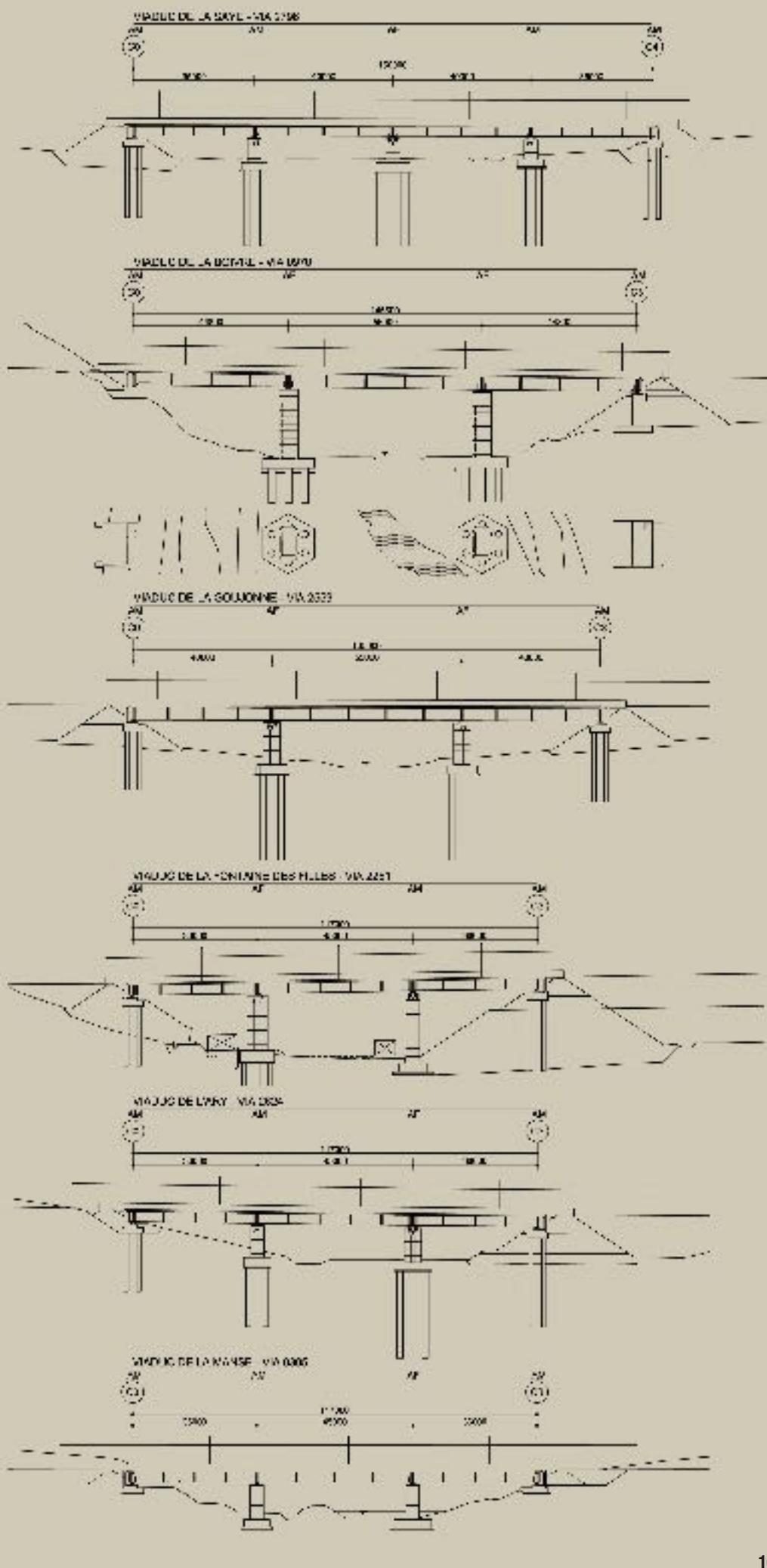
Si l'on excepte le cas particulier du viaduc sur la Dordogne qui est exposé plus loin dans cet article, il a été possible de proposer pour ces PRA-OM une conception dans laquelle "le rail ne voit pas l'ouvrage", c'est-à-dire que le schéma statique retenu permet au ballast et aux longs rails soudés (LRS) de franchir sans coupure les joints séparant le tablier de ses remblais contigus. Les ouvrages présentent tous des longueurs dilatables  $L_T$  inférieures ou égales à 90 m ; la portée de leurs travées varie entre 30 et 56 m. Ils peuvent être classés en deux groupes :

- Les viaducs de la Charente Sud (VIA 2053) et du Mouzon (VIA 2598) d'une part, d'une longueur supérieure à 180 m (respectivement 375 et 243 m, voir figure 3). Ces ouvrages sont de type "estacade", c'est-à-dire constitués d'une succession de modules de tablier indépendants reposant à leurs extrémités sur des piles-culées communes,
- Les 10 autres bipoutres d'autre part, d'une longueur égale (figure 7) ou inférieure (figure 10) à 180 m, constitués d'un tablier monolithique.

Le schéma fonctionnel est reporté sur les coupes longitudinales ("AF" signifie appui fixe, et "AM" appui mobile ou glissant). Dans le cas des tabliers en béton ou en ossature mixte, le Référentiel Technique impose de limiter à 90 m les longueurs dilatables pour pouvoir se passer d'appareils de dilatation des voies (AD). Pour six viaducs sur douze (les VIA 0305, 1158, 2251, 2458, 2598 et 2624), la géométrie de la ligne au droit des ouvrages interdisait en tout état de cause de recourir à ces appareils, suivant les critères fixés à l'IN3278.

Par ailleurs, s'affranchir de leur mise en œuvre peut présenter plusieurs avantages :

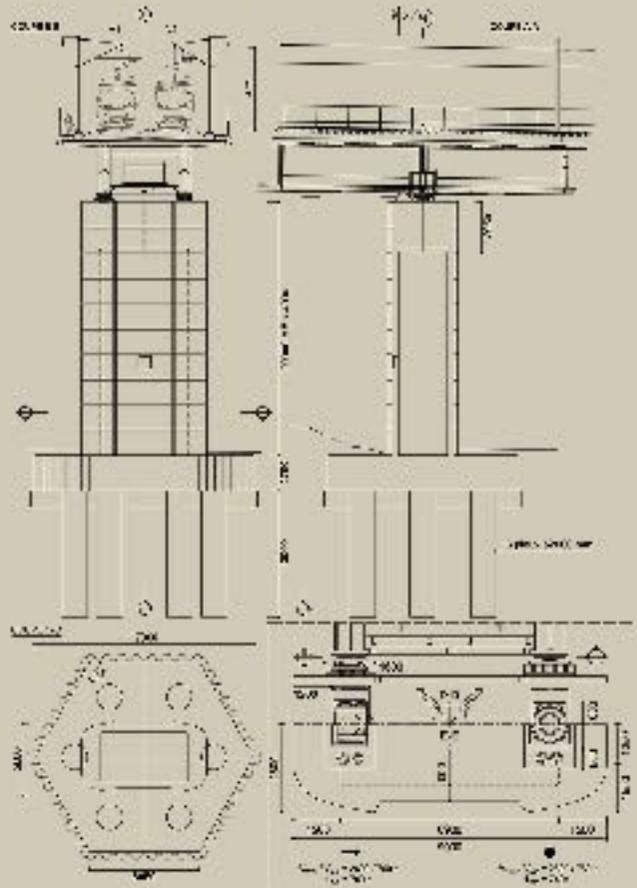
- Les AD constituent des points singuliers du schéma des installations ferroviaires, au droit desquels les opé-





11

VIADUC DE LA BOIVRE (VIA 0970)  
Élévations et coupes sur pile P1



12

11- Viaduc de la Boivre (VIA 0970) - Porte-à-faux avant accostage sur P1.  
12- Viaduc de la Boivre - Élévations et coupes sur pile P1.

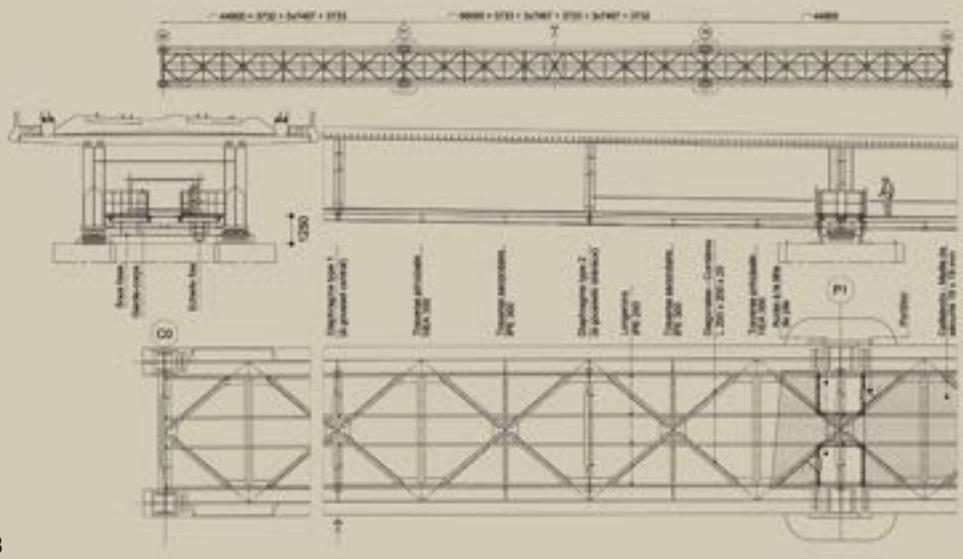
13- Tablier du viaduc de la Boivre - Contreventement inférieur, passerelle de visite et accès aux têtes de pile.

11- La Boivre viaduct (VIA 0970) - Cantilever before docking on P1.

12- La Boivre viaduct - Elevation views and cross sections on pier P1.

13- Deck of La Boivre viaduct - Lower wind bracing, inspection foot bridge and access to pier caps.

TABLIER DU VIADUC DE LA BOIVRE  
Contreventement inférieur, passerelle de visite et accès aux têtes de pile



13

rations de maintenance sont délicates. La continuité du LRS a été privilégiée à chaque fois qu'elle était techniquement possible sans contrainte rédhibitoire sur la conception des ouvrages d'art, parce qu'elle améliore les conditions d'explo-

tation (confort aux grandes vitesses) et de maintenance de la ligne.

→ Limiter la longueur des tabliers permet de limiter l'intensité des efforts horizontaux transmis aux appuis fixes et à leurs fondations, ce qui est appré-

ciable lorsque les ouvrages sont hauts et les sols de qualité médiocre. Sur les tabliers continus de grande longueur, les efforts horizontaux longitudinaux peuvent excéder la capacité de résistance des plus gros appareils d'appui ; ▷

ils doivent alors être repris en totalité par un dispositif mécanique indépendant, comme l'attelage du tablier sur la culée C6 du viaduc de la Vienne (VIA 0418), le 15<sup>e</sup> PRA-OM non courant de la LGV SEA, d'une longueur de 344,50 m, et qui a fait l'objet d'un article spécifique dans le numéro 912 de *Travaux*.

→ L'amplitude des déplacements horizontaux d'extrémité des tabliers est limitée ; on se trouve dans le domaine d'utilisation des joints-couteaux, voire des joints en Té pour les ouvrages les plus courts. Pour des tabliers longs, il est en revanche nécessaire de recourir à des joints garde-ballast (figure 28). Pour les tabliers de longueur inférieure ou égale à 180 m, on s'est limité à chaque fois que possible à un seul point fixe, disposé sur la pile la plus raide ou sur une pile centrale lorsque l'ouvrage fait 180 m. Lorsque la configuration de la brèche ne l'autorisait pas (comme pour les deux viaducs des Lorettes ou le viaduc de la Boivre), les déplacements longitudinaux ont été bloqués sur deux piles à la fois. Le système d'appui étant symétrique, et les rigidités des deux piles très voisines, le point qui reste fixe lorsque le tablier se dilate sous l'effet de la température se trouve toujours au milieu de l'ouvrage. Le schéma hyperstatique à deux points

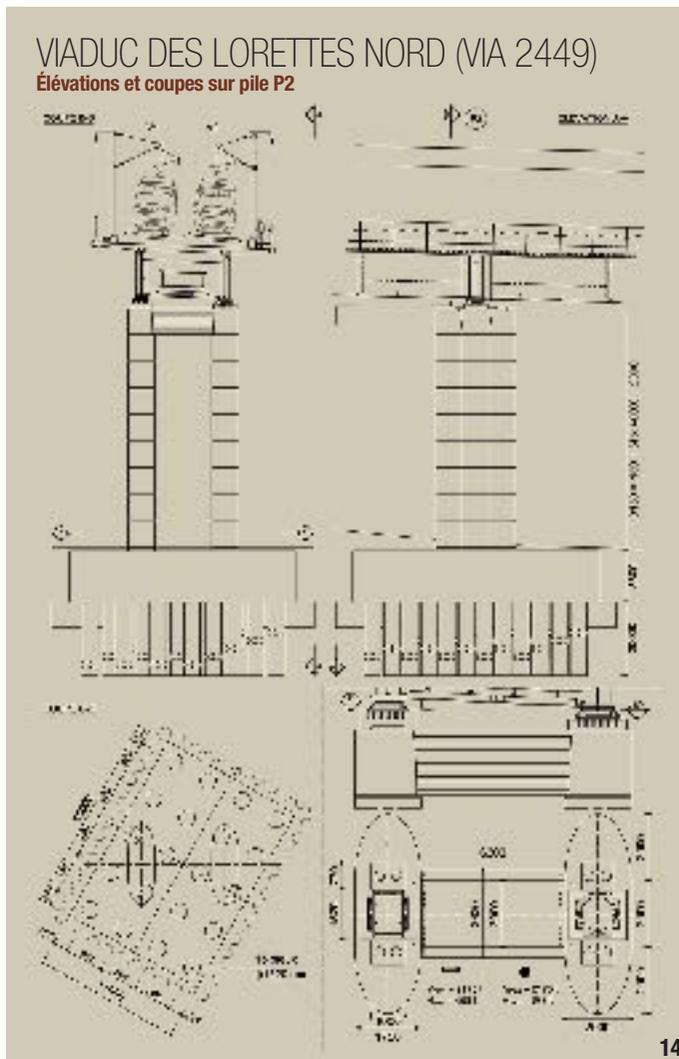
fixes induisant des efforts supplémentaires dans les appuis lorsque le tablier change de longueur sous l'effet des variations de température, il s'agissait dans ce cas de rechercher un équilibre entre deux contraintes antagonistes : les piles fixes devaient être suffisamment rigides pour limiter leur déplacement horizontal en tête aux 5 mm imposés par le référentiel sous l'effet du freinage et du démarrage des trains, mais le moins rigides possible pour limiter les effets défavorables des variations thermiques.

**14- Viaduc des Lorettes Nord (VIA 2449) - Élévations et coupes sur pile P2.**

**15- Lancement du tablier du viaduc du Palais (VIA 2507).**

**14- Lorettes North viaduct (VIA 2449) - Elevation views and cross sections on pier P2.**

**15- Launching the deck of the Palais viaduct (VIA 2507).**



14

© EGIS



15

© P. LE DOARÉ



16

© P. LE DOARE

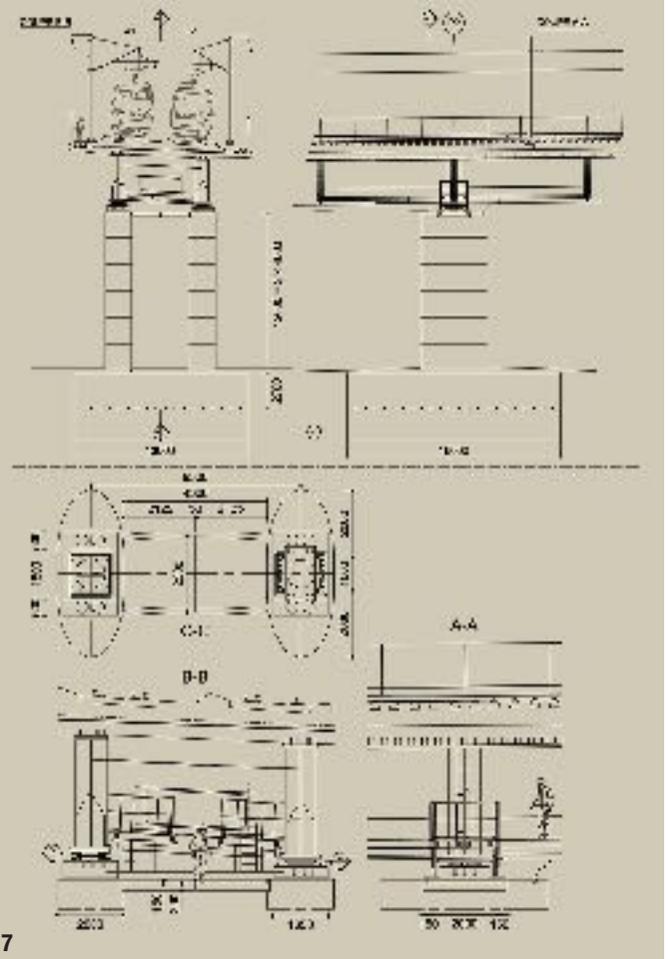
Les efforts horizontaux restent dans les limites imposées par la technologie des appareils d'appui. Dans le cas de certains ouvrages soumis à des sollicitations de service ou sismiques importantes, les forces horizontales appliquées aux appareils d'appui étaient cependant élevées en comparaison des efforts verticaux concomitants ; dans ce cas, on a eu recours à des appareils d'appui sphériques, moins encombrants que des appuis à pot.

### ÉLÉMENTS DE CONCEPTION PARTICULIERS

DE L'IMPORTANCE DE LA PRISE EN COMPTE DES EFFETS DE L'INTERACTION VOIE-OUVRAGE  
L'approche sécuritaire de l'eurocode

## VIADUC DE LA VONNE (VIA 1158)

Élévations et coupes sur pile P2



17

© EGIS

16- Le franchissement de la Vonne (VIA 1158).

17- Viaduc de la Vonne - Élévations et coupes sur pile P2.

18- Viaduc des Lorettes Nord - Élévation et coupes sur culée C0.

16- The Vonne crossing (VIA 1158).

17- La Vonne viaduct - Elevation views and cross sections on pier P2.

18- Lorettes North viaduct - Elevation view and cross sections on abutment C0.

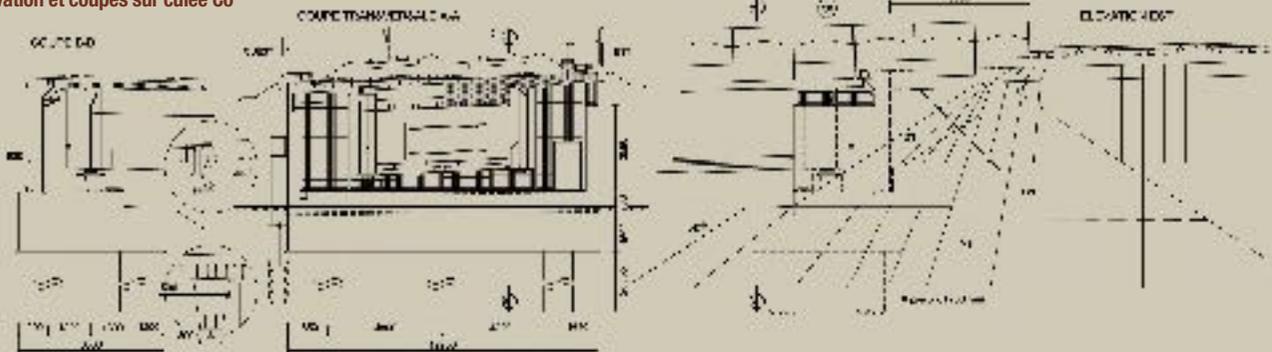
Le respect du critère des 5 mm a donc été déterminant sur les ouvrages "hauts". Une étude des effets de l'interaction voie-ouvrage (IVO), également désignée sous le terme "interaction rail-structure" (IRS), a été réalisée dès l'avant-projet détaillé pour tous les PRA-OM dits non courants ; elle a permis de dimensionner au plus juste les fûts et les fondations des points fixes. Cette étude permet de tenir compte de la participation significative de la voie à la reprise des efforts horizontaux générés par les trains : les longs rails soudés qui franchissent sans discontinuité les joints de l'ouvrage reprennent une partie de l'effort, parce qu'au-delà d'une certaine longueur sur la section courante de terrassements, les frottements entre la voie, le ballast et la plateforme

support bloquent leurs déplacements longitudinaux.

L'étude d'IVO a été classiquement réalisée au moyen d'un modèle de calcul filaire tridimensionnel de l'ouvrage et de ses fondations, dans lequel chaque voie est modélisée, sur l'ouvrage et sur 150 m de part et d'autre de celui-ci, par une file de barres horizontales (figure 21). Au droit de l'ouvrage, ces deux files de barres sont reliées au tablier par des liaisons verticales rigides, à raison d'une par mètre. Au droit des remblais, ces liaisons sont supportées par des appuis encastrés. Une rotule au comportement non linéaire est introduite en tête de chacun des bras rigides ; elle permet de simuler la loi de comportement bilinéaire caractérisant la résistance au cisaillement du ballast. ▶

## VIADUC DES LORETTES NORD

Élévation et coupes sur culée C0



18

© EGIS



© P. LE DOARÉ



© P. LE DOARÉ

Les effets de l'IVO sont donc favorables pour les points fixes du pont, mais défavorables pour la voie puisque, les rails étant continus, les déformations de l'ouvrage génèrent des contraintes dans la voie. L'EN 1991-2 permet de tenir compte de cette participation des rails à la reprise des efforts de freinage, à condition de justifier que les contraintes additionnelles  $\Delta\sigma$  qu'ils subissent sous les effets cumulés de la température et des trains ne dépassent pas les limites fixées par son article 6.5.4.5.1, soit, pour une voie ballastée, 72 MPa en compression et 92 MPa en traction.  $\Delta\sigma$  est une "surcontrainte" ; elle correspond, toutes choses étant égales par ailleurs, au surcroît de contrainte induit dans le rail par la présence de l'ouvrage, par rapport à une configuration où le rail serait porté par un remblai de grande longueur. Elle est donc obtenue en soustrayant aux contraintes données par le calcul d'IVO la contrainte dite "de plateforme", obtenue en appliquant les charges ferroviaires à un modèle où le rail repose sur un remblai continu.

Pour une longueur chargée de 180 m, on obtient un pic de contrainte de plateforme d'environ 10 MPa aux extrémités du train de charges.

En pratique, lorsque le point fixe se trouve au milieu de l'ouvrage et que celui-ci a un système d'appui symétrique, les variations de la température du tablier génèrent des contraintes dans les rails, mais les efforts en tête des piles fixes ne sont pas affectés par les effets de l'IVO. Dans cette configuration, le rail ne soulage donc l'ouvrage que pour la reprise des efforts générés par les convois ferroviaires. Cette participation est cependant importante : dans le cas du viaduc des Lorettes Nord (2 piles fixes), les calculs ont montré que 37% des efforts de freinage-démarrage passaient directement par le rail ; pour le viaduc du Palais (un point fixe central), ce pourcentage atteint 47%.

Le calcul d'IVO confirme par ailleurs que la surcontrainte dans les rails tangente les limites admissibles fixées par l'eurocode et rappelées ci-dessus,

**19- Bétonnage du hourdis du viaduc des Lorettes Nord.**

**20- Le viaduc de la Font des Filles (VIA 2251).**

**21- Viaduc des Lorettes Nord - Modèle de calcul pour l'étude des effets de l'interaction voie-ouvrage.**

**19- Concreting the top slab of Lorettes North viaduct.**

**20- Font-des-Filles viaduct (VIA 2251).**

**21- Lorettes North viaduct - Calculation model for studying the effects of track-bridge interaction.**

lorsque les longueurs dilatables valent 90 m.

À titre d'exemple, les résultats obtenus pour le viaduc des Lorettes Nord sont fournis en figure 22. Pour cet ouvrage relativement haut et dont les fondations traversent 8 m d'alluvions molles avant de rencontrer un sol consistant, une augmentation de la raideur des appuis n'a que peu d'influence sur la contrainte obtenue dans le rail ; celle-ci est pour une part importante due aux dilatations thermiques, qui dépendent de  $L_T$ .

**L'approche globale : la vérification de la stabilité du LRS**

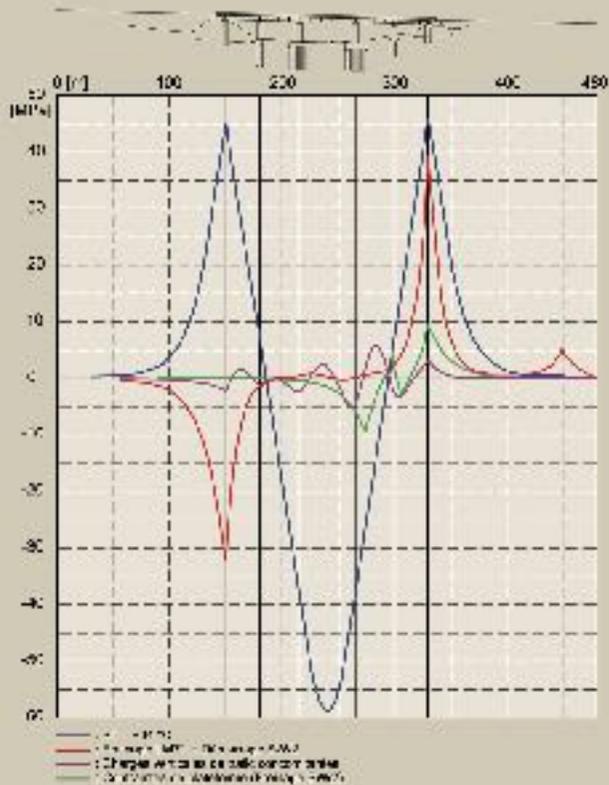
La réalisation de voies en LRS, dont le fonctionnement a été théorisé dès les années 1930, a été rendue possible par des progrès techniques relativement récents, comme la production d'aciers à très haute limite élastique, l'amélioration des techniques de soudure, et le développement d'équipements de voie fiables comme les attaches élastiques. Les rails 60E1 (ou UIC60) mis en œuvre sont de nuance R260 ; la résistance



© EGIS

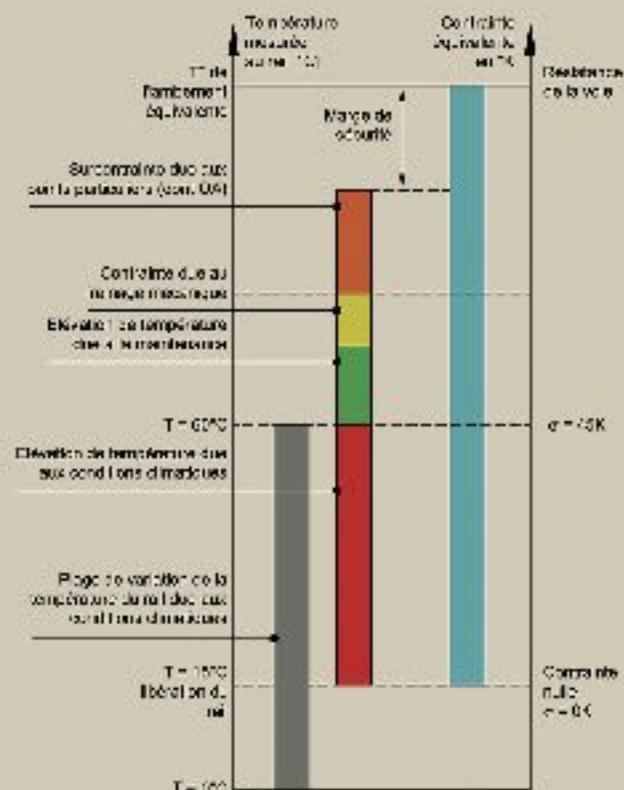
## VIADUC DES LORETTES NORD

Contraintes additionnelles dans les rails dues à la présence de l'ouvrage



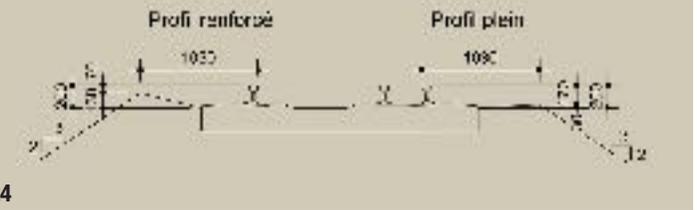
22

## PRINCIPE DE VÉRIFICATION DE LA STABILITÉ DU LRS



23

## PROFILS DE VOIE PLEIN ET RENFORCÉ



24  
© EGIS

**22- Viaduc des Lorettes Nord - Contraintes additionnelles dans les rails dues à la présence de l'ouvrage.**

**23- Principe de vérification de la stabilité du LRS.**

**24- Profils de voie plein et renforcé.**

**22- Lorettes North viaduct - Additional stresses in rails due to the presence of the structure.**

**23- Technique for verification of LRS stability.**

**24- Plain and reinforced track profiles.**

Lorsque cette méthode atteint ses limites, il est loisible de recourir à une approche plus globale d'étude de la stabilité du LRS, dans laquelle on quantifie et somme en chaque point les effets propres à la voie et ceux générés par l'ouvrage. Son principe est schématisé en figure 23. La contrainte dans le rail et la résistance latérale de la voie sont exprimées en équivalent Kelvin (°K).

On considère que, du fait des conditions climatiques, la température du rail peut monter jusqu'à 60°C. Sa température de libération est prise égale à 15°C (ce qui signifie que s'il est plus froid au moment de la pose, il est mis en traction à l'aide de vérins hydrauliques afin de compenser la différence, avant soudure). Il pourra ainsi subir une variation maximale de température due aux conditions climatiques de 45°K. À cette valeur, on cumule :

- L'élévation de température due à la maintenance ;
- L'échauffement supplémentaire des rails pouvant résulter du passage de trains utilisant les freins à courants de Foucault (FCF), ce qui est le cas de certains trains allemands. Le référentiel limite cet échauffement à 18°K ;
- Et les surcontraintes dues à la présence de l'ouvrage.

La résistance de la voie au flambement latéral est, quant à elle, fonction du schéma d'armement (caractéristiques du tracé, des rails et des traverses, du profil du ballast) et de la stratégie retenue pour l'intervention en maintenance sur les défauts de voie (nivellement, dressage, écartement moyen). Le référentiel distingue les seuils de défauts VI (ayant valeur d'intervention, qui sont ceux conventionnellement retenus sur le RFN) et VR (ayant valeur de ralentissement).

Dans le cas des viaducs des Lorettes Nord et du Palais, le diagramme des surcontraintes de compression dans les rails dues à la présence de l'ouvrage présentait des pics au droit des culées, d'intensité supérieure à 72 MPa (res-

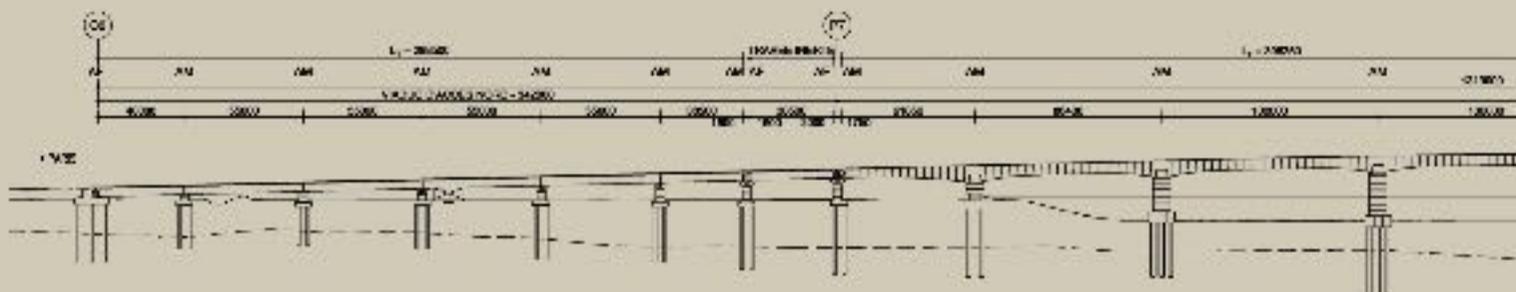
minimale garantie de l'acier est de 880 MPa.

Pour garantir la sécurité de la voie, il faut s'assurer que la contrainte totale susceptible d'apparaître dans le rail (c'est-à-dire la somme des contraintes propres au comportement de la voie en section courante, et de celles liées à la présence de l'ouvrage) reste inférieure à la contrainte critique pouvant conduire à un flambement latéral de la voie ou à un cisaillement excessif dans le ballast. Par simplification, cette limite admissible a été divisée en deux parts dans la pratique courante, l'une réservée à l'ingénierie de la voie et l'autre à celle de l'ouvrage.

Cette approche, qui est celle proposée par l'eurocode (les 72 MPa en compression et 92 MPa en traction sont la part allouée à l'ouvragiste), permet donc d'étudier séparément les effets sur l'ouvrage et en section courante. Elle est conservatrice.

## VIADUC SUR LA DORDOGNE (VIA 2969)

Coupe longitudinale



25

© EGIS

pectivement 79 et 99 MPa). Une étude de vérification de la stabilité des voies, confiée à l'ingénierie de la SNCF, a permis de s'assurer que ces deux ouvrages pouvaient être franchis sans interruption du LRS. Sur le viaduc du Palais, les résultats obtenus ont été les suivants :

- La contrainte maximale dans le rail valait 58,1°K en l'absence de trains à FCF, et 76,1°K dans le cas contraire. La part due à la présence de l'ouvrage vaut 8,1°K, soit respectivement 14 et 11 % de la contrainte totale ;
- Avec un profil de voie renforcé qui est celui retenu sur ces ouvrages (figure 24), la voie peut résister à une contrainte équivalente de 89,4°K sur la base d'un défaut de voie de type VI, et de 76,9°K pour un défaut de voie de type VR.

### LE CAS PARTICULIER DU VIADUC SUR LA DORDOGNE

Le viaduc qui franchit la Dordogne est l'un des plus longs de la LGV (figures 25 à 29). Sa conception primaire est guidée par des contraintes diverses.

La Dordogne est navigable, un gabarit de navigation de 14,50 m x 60 m doit être respecté dans la travée centrale. Les deux travées adjacentes à la travée centrale dégagent un gabarit équivalent (réduit en hauteur de 600 mm dans les coins extérieurs). Les chenaux de navigation doivent être compatibles avec ceux du viaduc de l'Autoroute A10, situé à quelques centaines de mètres en aval. La position des appuis en rivière est donc pratiquement imposée et, en conséquence, les portées fixées, égales à 100 m. La longueur totale de l'ouvrage a été déterminée en fonction

**25- Viaduc sur la Dordogne (VIA 2969) - Coupe longitudinale.**

**26- VIA 2969 - Coupe transversale sur VSP 11.**

**27- VIA 2969 - Coupes sur pile P7 (Jonction viaduc d'accès - viaduc principal).**

**25- Viaduct over the Dordogne (VIA 2969) - Longitudinal section.**

**26- VIA 2969 - Cross section on segment VSP 11.**

**27- VIA 2969 - Cross sections on pier P7 (connection of access viaduct and main viaduct).**

de la capacité des sols à porter les remblais au-delà de l'ouvrage.

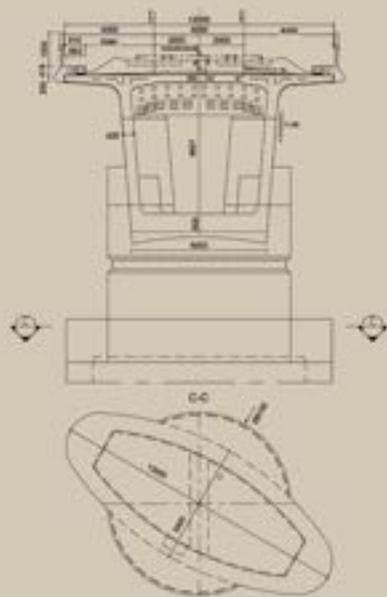
Au sud, les terrains ont des caractéristiques moyennes en surface, mais il était possible de construire les remblais sans dispositions particulièrement onéreuses.

On a donc pu optimiser la longueur de l'ouvrage et le profil en long, la seule contrainte étant le franchissement de la RD 115.

Au nord, par contre, les sols du marais de la Virvée sont très compressibles. La position de la culée répond donc à la nécessité de limiter au maximum la hauteur du remblai, la pente adoptée pour le profil en long est la plus forte possible (2,5%), compatible avec le rayon de 8 500 m à l'axe de l'ouvrage. Les appareils d'appui sur culée respectent tout juste les critères de maintien hors d'eau lors des crues.

### VIA 2969

Coupe transversale sur VSP 11

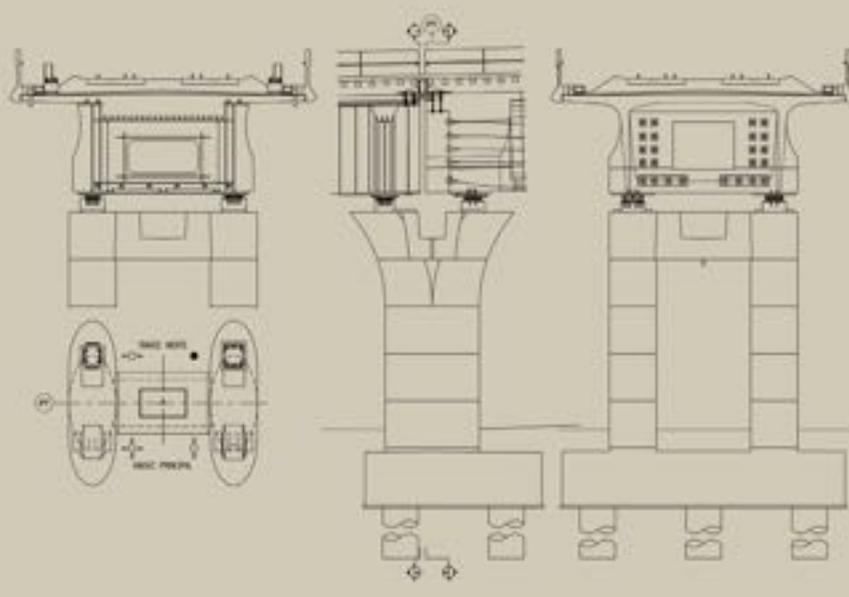


26

© EGIS

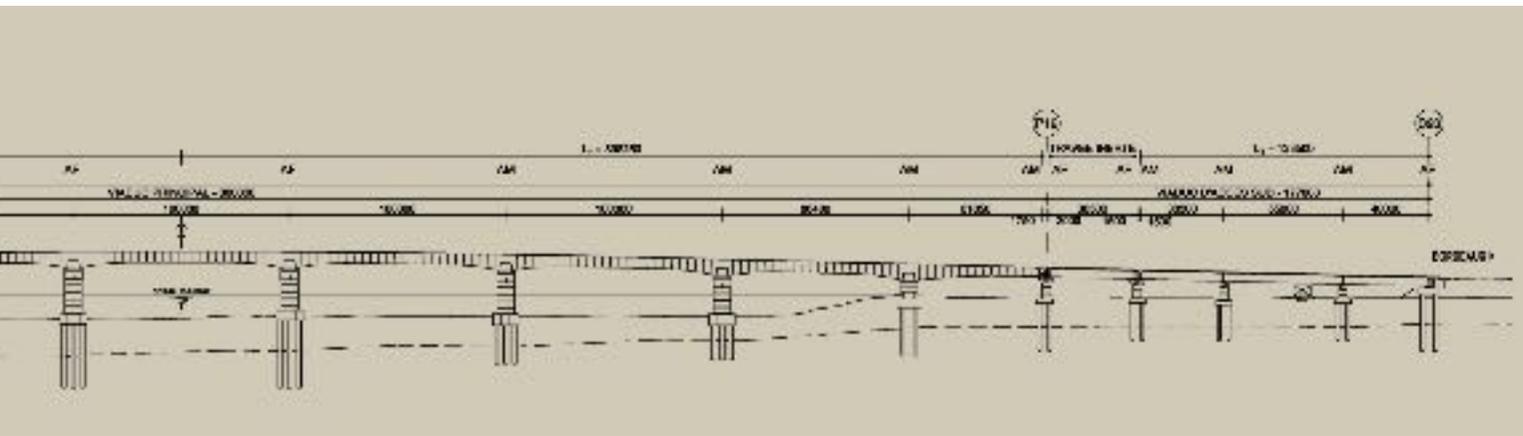
### VIA 2969

Coupes sur pile P7 (Jonction viaduc d'accès - viaduc principal)

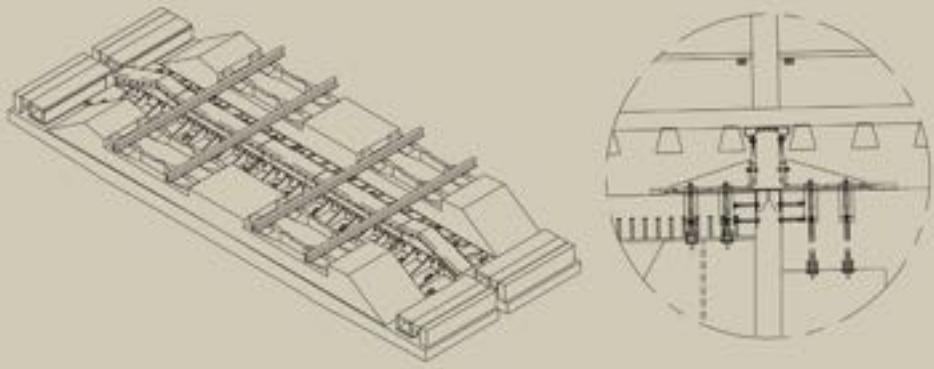


27

© EGIS



VIA 2969  
Joint garde-ballast sur P7



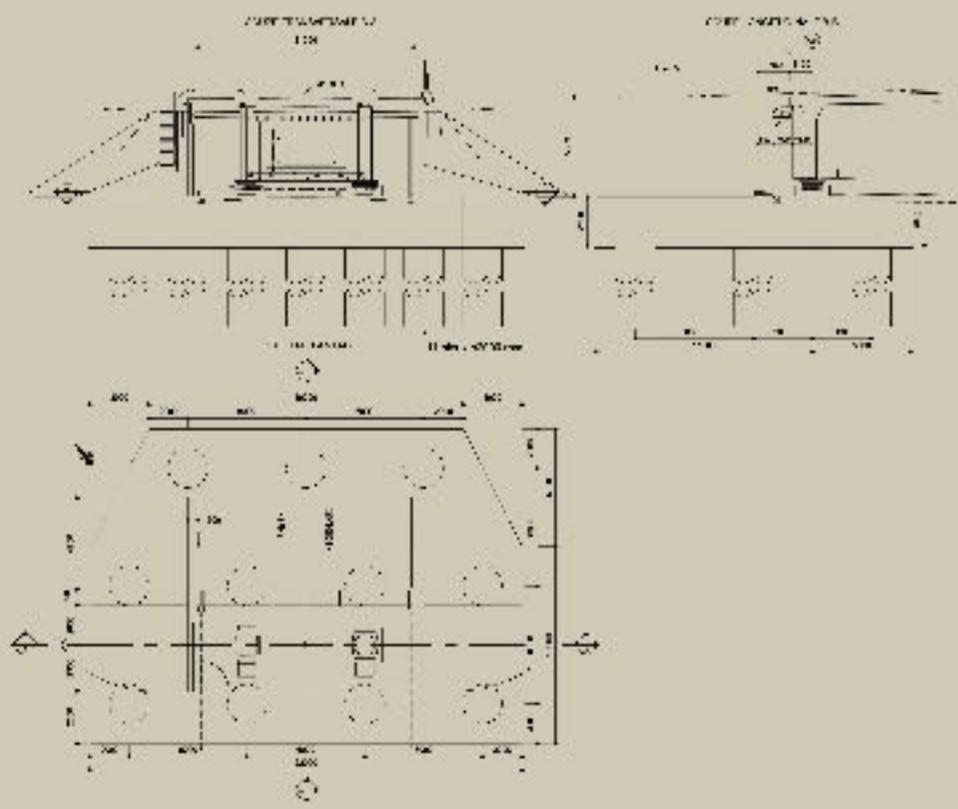
28- VIA 2969 -  
Joint garde-  
ballast sur P7.  
29- VIA 2969 -  
Coupes sur  
culée C0.

28- VIA 2969 -  
Backwall joint  
on P7.  
29- VIA 2969 -  
Cross sections  
on abutment C0.

© FREYSINET

28

VIA 2969  
Coupes sur culée C0



© EGIS

29

La longueur totale de l'ouvrage a ainsi été fixée à 1319 m, ce qui impose au moins deux paires d'appareils de dilatation de voie (AD), selon les usages ferroviaires en France. On notera, de façon incidente, que la règle qui impose une distance maximale de 450 m entre point fixe et AD n'est pas une règle adoptée dans tous les autres pays européens. Mais cette règle présente l'avantage d'éviter des dispositions particulières pour limiter la portée du rail entre les deux traverses situées de part et d'autre du joint de structure. Les portées importantes de l'ouvrage au-dessus de la Dordogne rendaient difficile l'implantation d'un joint de structure dans cette zone. On a donc préféré disposer les joints de dilatation de part et d'autre du franchissement du fleuve. Ce franchissement est assuré par un viaduc principal de 800 m de longueur à 9 travées de 61,85 m, 86,40 m, 5 x 100 m, 86,40 m et 61,85 m. Le tablier de cet ouvrage est un caisson en béton précontraint, construit par encorbellements successifs à l'aide d'équipages mobiles. Le tablier est encastré dans les deux piles centrales et simplement appuyé sur les autres piles, par l'intermédiaire d'appareils d'appui à pot glissants. Le point fixe "théorique" est l'axe de la travée centrale, il est donc situé à 400 m du joint de dilatation de la structure. ▷

Mais en cas de rigidités différentes des fondations des deux piles encastrées, la modification de position du point fixe ne conduirait pas à déroger à la règle des 450 m.

De part et d'autre du viaduc principal, on a disposé deux travées isostatiques, qui portent les paires d'appareils de dilatation de voie (AD). Ces travées ont une portée de 38,50 m. Les lignes d'appareils d'appui de la travée isostatique sont situées respectivement à 3,75 m de la ligne d'appareils d'appui du viaduc principal et à 3 m de la ligne d'appareils d'appui du viaduc d'accès. Ces travées répondent aux critères (bien français eux aussi et pas du tout partagés par nos partenaires européens) de la "travée inerte". Malgré tous nos efforts pédagogiques pour expliquer que la notion d'immobilité avait peu d'exemples absolus dans l'univers et que seuls les mouvements relatifs avaient un sens, nous avons dû adopter un système comportant des lignes d'appui fixes de part et d'autre de cette travée isostatique, ce qui génère d'importants efforts horizontaux dans les piles, pour un gain somme toute assez faible en termes de mouvements relatifs de la travée inerte par rapport aux tabliers adjacents. Nous espérons que nos efforts, restés vains cette fois, pour libérer la travée inerte, pourront porter leurs fruits lors de la construction d'un prochain ouvrage.

Les viaducs d'accès, de longueurs 298,50 m au nord et 133,50 m au sud, sont des tabliers en ossature mixte de conception semblable à celle de tous les autres ouvrages mixtes de la ligne. Ils comportent un appui fixe sur culée et se dilatent vers la travée inerte.

Les joints de structure situés de part et d'autre des travées inertes sont équipés de garde-ballast réglables.

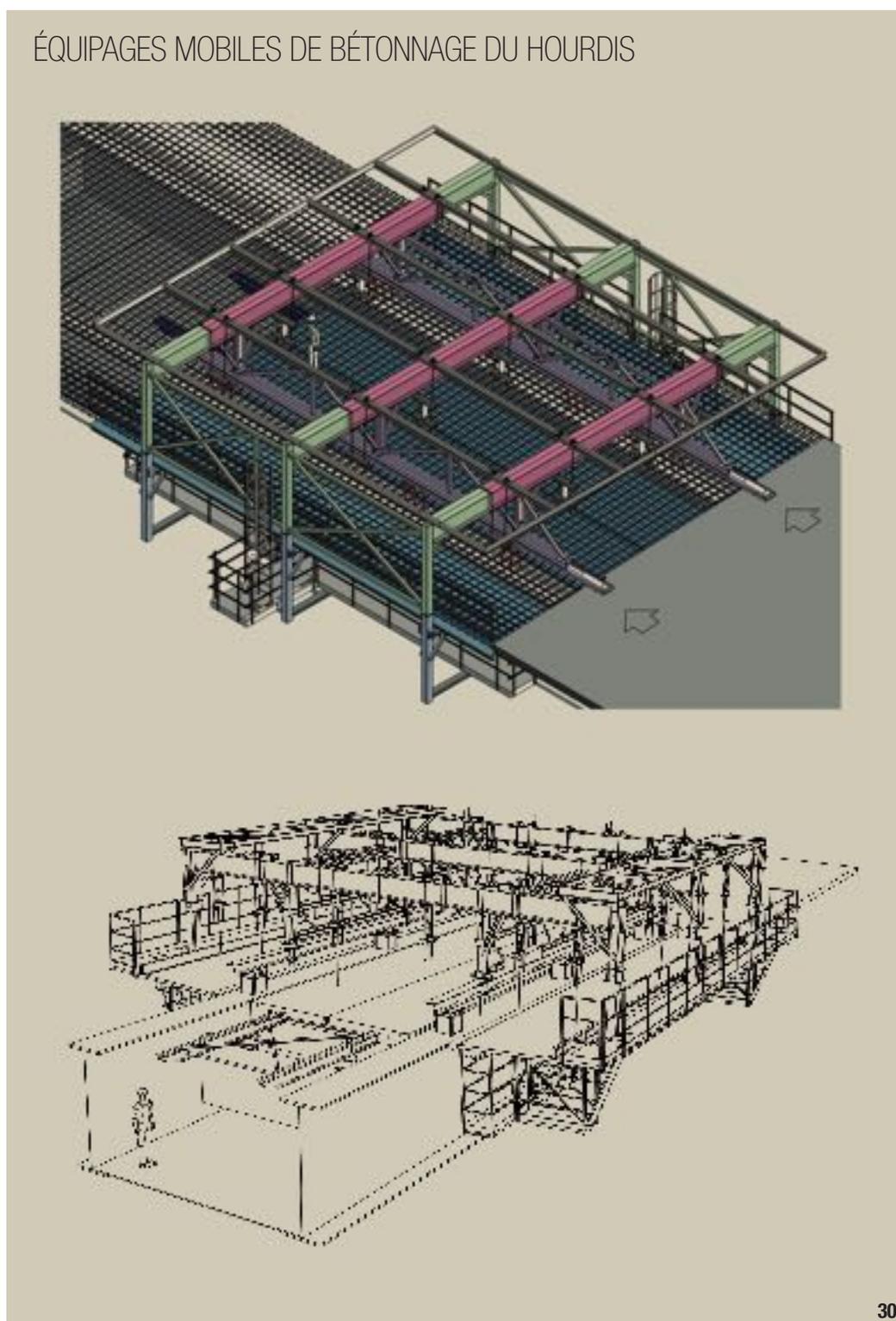
Les piles du viaduc principal ont un fût elliptique orienté parallèlement au courant du fleuve. Un chapiteau circulaire permet de disposer les appareils d'appui selon les axes du tablier.

Les piles des viaducs d'accès comportent deux fûts elliptiques reliés en tête par un chevêtre.

L'architecture originale et habilement coordonnée avec les contraintes techniques est due à Thomas Lavigne et Thomas Poulard de l'agence Architecture et Ouvrages d'Art.

### LES CONTRAINTES PROPRES AUX SITES TRAVERSÉS

Dans le cas des viaducs de la Charente Sud et du Mouzon, ce sont les contraintes géotechniques qui ont



ÉQUIPAGES MOBILES DE BÉTONNAGE DU HOURDIS

déterminé la longueur des ouvrages. Les 374,80 m du viaduc de la Charente Sud (figures 3 et 31) se décomposent en 4 tronçons de 64,60 m, 180 m, 65,60 m et 64,60 m. Le module n°2, centré sur le lit mineur de la Charente, est un tablier à quatre travées de portées égales à 40 m, 50 m, 50 m et 40 m. La Charente n'est pas classée comme voie navigable, mais elle est fréquentée par des embarcations de

**30- Équipements mobiles de bétonnage du hourdis.**

**30- Mobile rigs for top slab concreting.**

plaisance, pour lesquelles l'ouvrage libère un gabarit de 3,50 m au-dessus de la cote des plus hautes eaux navigables, le long des berges. Les modules latéraux ou viaducs d'accès, au nombre de trois (un au nord et deux au sud), sont des tabliers à deux travées de portées égales à 31,80 m. Les inondations sont fréquentes : la Charente commence à déborder pour des crues de fréquence biennale.



Pour les viaducs jumeaux 2449 et 2458 (figures 1, 7, 14 et 19), dits "viaducs des Lorettes Nord et Sud", les enjeux déterminants étaient écologiques. Situés à 45 km au sud d'Angoulême, dans une zone profondément rurale, ils sont éloignés de 750 m seulement, et enjambent le ruisseau des Lorettes puis son confluent, la Poussonne.

Les cours de ces ruisseaux présentent une grande richesse écologique, qui justifie des mesures de protection particulières. C'est principalement pour ne pas détériorer la qualité de cet habitat que l'on a décidé de les franchir par des viaducs, en s'appliquant à garder intacte une bande de 25 m de largeur autour de leur lit mineur. Les biais des franchissements et la hauteur des remblais (de 18 à 22 m au-dessus du cours d'eau) auraient fait d'un rétablissement par simple dalot en béton armé un boyau obscur de plus d'une centaine de mètres de long, en pratique infranchissable par la faune.

Ces contraintes conduisent à des ouvrages d'une longueur importante. Celle-ci a néanmoins pu être limitée à 180 m ; la travée centrale de 50 m permet de dégager suffisamment le fond de vallon, et les pieds de talus des remblais contigus à l'ouvrage, raidis à 3H/2V, n'engagent pas le couloir écologique. Le remblai subsiste avec une épaisseur notable sur 100 à 150 m de part et d'autre des viaducs, mais



### VIADUC DE LA VONNE

Outil coffrant des fûts à section elliptique - Configuration "5 m"

34

© ERSEM

34- Viaduc de la Vonne - Outil coffrant des fûts à section elliptique - Configuration "5 m".

35- Viaduc de la Charente Sud - Matériel de lancement : Avant-bec, point fixe et queue de traction.

34- La Vonne viaduct - Sectional formwork for elliptical-section shafts - "5 m" configuration.

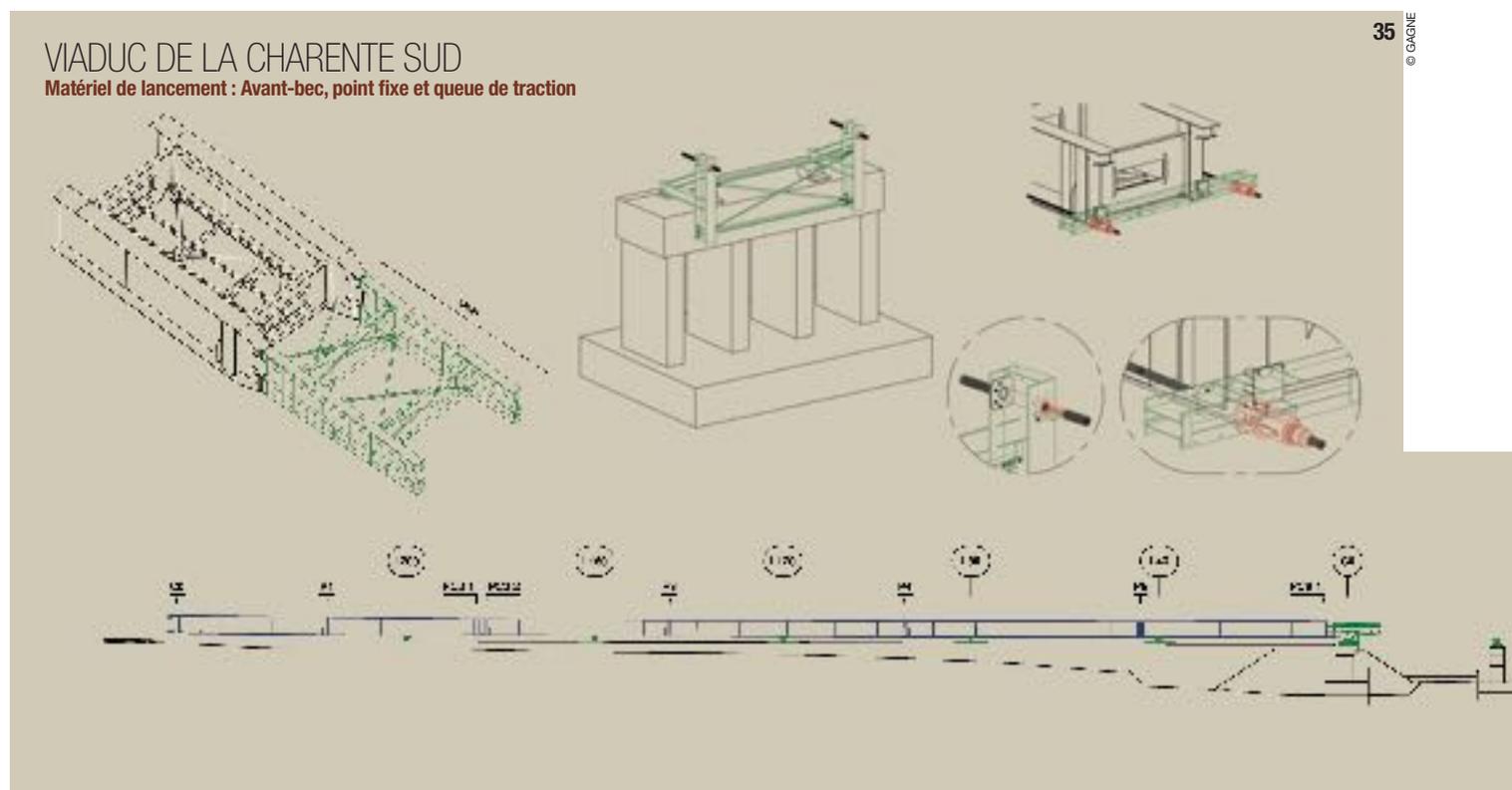
35- Charente South viaduct - Launching equipment: launching nose, fixed point and tractor tail.

son édification ne pose pas de difficulté majeure ; les matériaux de déblai disponibles sur la section pouvaient être réutilisés pour les blocs techniques, et les colluvions tapissant les pentes du thalweg, d'une compacité non négligeable et de faible épaisseur (de 1 à 3 m), pouvaient être purgées sous ces blocs.

### LE COMPORTEMENT DYNAMIQUE DES OUVRAGES SOUS CIRCULATIONS FERROVIAIRES

Toute tentative de généralisation semble hasardeuse s'agissant de la réponse dynamique des ouvrages sous circulations ferroviaires, compte tenu du nombre de paramètres pouvant influencer sur le résultat et de leur sensi-

bilité. Les critères dynamiques (accélération verticale, flèche, gauche) sont pourtant souvent dimensionnants aux grandes vitesses. C'est pourquoi tous les ouvrages d'art dits non courants de la LGV SEA ont fait l'objet d'une double étude de la réponse dynamique de la structure au passage des dix trains du modèle de charge HSLM-A (train



### VIADUC DE LA CHARENTE SUD

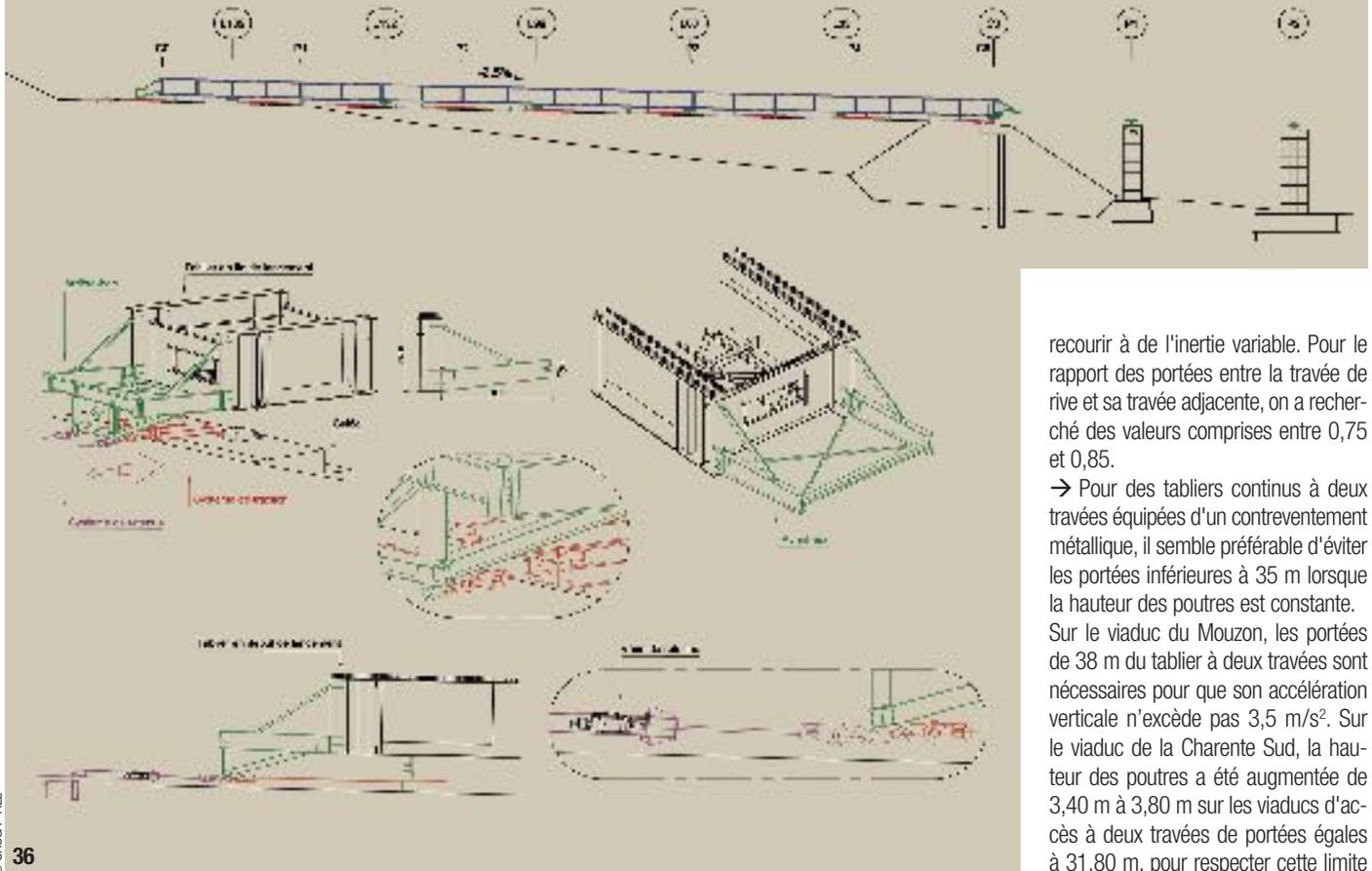
Matériel de lancement : Avant-bec, point fixe et queue de traction

35

© GAGNE

## VIADUC DES LORETTES NORD

Matériel de lancement : Avant et arrière-becs, systèmes de traction et de retenue



© UFRSSA - ALE

36

dynamique universel) jusqu'à  $1,2 \times V = 420 \text{ km/h}$ , à l'avant-projet détaillé puis à l'exécution. Malgré leur relative légèreté, liée au choix du contreventement inférieur métallique, la conception des PRA-OM reste classique et elle a été éprouvée sur les précédentes LGV. Le retour d'expérience permet cependant de dégager quelques recettes simples s'agissant du choix de la travure et des élancements pour des tabliers de PRA-OM de conception semblable à ceux présentés ici, supportant deux voies ballastées circulées à  $350 \text{ km/h}$  :

**36- Viaduc des Lorettes Nord - Matériel de lancement : Avant et arrière-becs, systèmes de traction et de retenue.**

**36- Lorettes North viaduct - Launching equipment: launching tail and nose, traction and restraining systems.**

→ Le comportement dynamique des ouvrages sous circulation à grande vitesse s'améliore lorsque l'hypers-taticité de la structure augmente. Les travées courtes (portées inférieures à  $30 \text{ m}$ ) sont les plus sensibles du point de vue dynamique. Les travées de rive sont souvent les plus sollicitées.

→ Pour des tabliers continus à trois travées ou plus, non encastrés sur leurs appuis, et pour des élancements au  $1/15^\circ$ , la gamme de portées  $30 \text{ m} - 55 \text{ m}$  est accessible aux poutres à hauteur constante ; au-delà des  $60 \text{ m}$ , il peut être rapidement nécessaire de

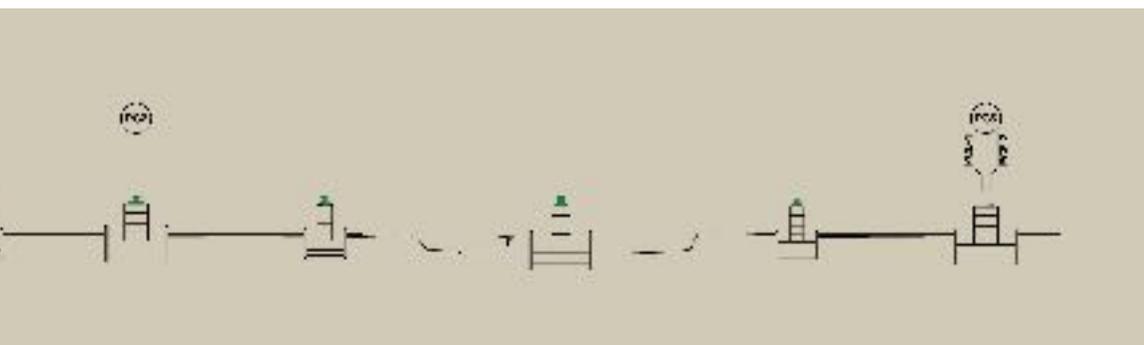
recourir à de l'inertie variable. Pour le rapport des portées entre la travée de rive et sa travée adjacente, on a recherché des valeurs comprises entre  $0,75$  et  $0,85$ .

→ Pour des tabliers continus à deux travées équipées d'un contreventement métallique, il semble préférable d'éviter les portées inférieures à  $35 \text{ m}$  lorsque la hauteur des poutres est constante. Sur le viaduc du Mouzon, les portées de  $38 \text{ m}$  du tablier à deux travées sont nécessaires pour que son accélération verticale n'excède pas  $3,5 \text{ m/s}^2$ . Sur le viaduc de la Charente Sud, la hauteur des poutres a été augmentée de  $3,40 \text{ m}$  à  $3,80 \text{ m}$  sur les viaducs d'accès à deux travées de portées égales à  $31,80 \text{ m}$ , pour respecter cette limite (par variation linéaire de hauteur dans les travées P1-PC2 et PC6-P7).

Pour le franchissement de la Vienne (VIA 0418), on a eu recours à un tablier de  $344,50 \text{ m}$  de longueur à 6 travées de portées égales à  $56,50 \text{ m} - 62,50 \text{ m} - 60,50 \text{ m} - 58,50 \text{ m} - 56,50 \text{ m} - 50 \text{ m}$ . La hauteur des poutres vaut  $3,95 \text{ m}$  sur C0,  $4,20 \text{ m}$  sur P1 et  $3,50 \text{ m}$  sur C6, la variation entre ces trois valeurs étant linéaire ; la largeur des membrures supérieure et inférieure est respectivement de  $1100$  et  $1200 \text{ mm}$ .

→ Pour des tabliers continus à trois travées ou plus, dont les portées sont inférieures à  $30 \text{ m}$ , le recours à un contreventement inférieur par dalles préfabriquées en béton armé semble préférable, car le surcroît de masse qu'il procure améliore le comportement dynamique. C'est cette solution qui a été retenue pour 6 des 8 PRA-OM courants de la LGV SEA, qui se situent dans cette gamme de portées (figure 32). Leurs diaphragmes, de pleine hauteur, sont connectés au hourdis supérieur.

Les résultats des calculs dynamiques effectués à l'avant-projet pour le viaduc du Mouzon sont présentés en figure 33. ▷



Les courbes données sur le premier graphe sont des enveloppes triples : elles indiquent, pour chaque section de l'ouvrage, les valeurs maximale et minimale dans le temps de l'accélération verticale relevée lors du passage des dix convois de calcul, aux 277 vitesses retenues (la plage 144 - 420 km/h est balayée au pas de 1 km/h), soit les valeurs extrêmes des 2770 histogrammes obtenus dans cette section. Les courbes du second graphe donnent, pour chacun des dix convois de calcul, la variation de l'accélération maximale obtenue sur l'ensemble du tablier PC2-C6, en fonction de la vitesse de passage ; les pics correspondent aux vitesses critiques.

L'analyse dynamique temporelle (intégration directe par la méthode de Newmark) a été réalisée à l'aide du programme Mixte ST1 EC développé par les ingénieurs d'Egis Jmi pour l'étude statique et dynamique des ponts mixtes.

### LES ADAPTATIONS APPORTÉES À L'EXÉCUTION

Les principales adaptations apportées au projet par les constructeurs ont été les suivantes :

→ Sur 9 PRA-OM parmi les 17 équipés d'un contreventement inférieur métallique, certains assemblages boulonnés des diagonales et traverses sur l'ossature ont été remplacés par des assemblages soudés. Dans ces cas, la solution retenue par les constructeurs est la plupart du temps mixte.

→ Sur les viaducs de la Manse et de la Vonne, les calculs ont montré que, du point de vue structurel, on pouvait se passer des chevêtres reliant les deux fûts en tête des piles. Les constructeurs ont choisi de les supprimer sur

ces deux ouvrages, afin de simplifier leur réalisation. Ils ont été remplacés par deux demi-dalles en console (figure 17), afin de maintenir un accès direct du tablier aux têtes de pile pour l'inspection des appareils d'appui. De la même manière, les fosses prévues en tête des piles monolithiques des viaducs de la Boivre et de la Charente Sud ont été supprimées, toutes les dispositions ayant été prises pour garantir, en leur absence, un accès sécurisé (figure 13).

→ Les largeurs des membrures des poutres principales (1000 mm en extrados et 1200 mm en intrados) ont été réduites sur certains ouvrages, et leurs épaisseurs adaptées en conséquence, pour disposer de la matière nécessaire.

→ Les semelles de fondation des piles du viaduc de la Boivre, initialement rectangulaires, ont été transformées en hexagones (figures 10 et 12), ce qui a permis de faire l'économie, par appui, de 2 pieux sur les 9 prévus à l'avant-projet, et de 30 m<sup>3</sup> de béton de semelle (-20%).

→ Sur les viaducs jumeaux des Lorettes, le chantier a proposé de remplacer, à raideur équivalente du système de fondation, les 8 pieux Ø2000 mm prévus à l'avant-projet sous les piles fixes par 20 pieux Ø1220 mm (figure 14). De même, les 6 pieux Ø1500 mm sous les autres piles ont été remplacés par 8 unités Ø1220 mm. Ces pieux ont été réalisés en ayant recours au procédé Starsol®. Sur le viaduc nord, les chevêtres en tête des piles fixes étaient fortement sollicités par le séisme ; les fosses de visite ont été supprimées sur ces appuis, pour garantir une bonne mise en œuvre des armatures et du béton.

### LES MÉTHODES DE CONSTRUCTION

Pour la mise en place des tabliers, on a essentiellement eu recours aux techniques classiques de lancement, à partir des remblais d'accès.

Les figures 35 et 36 illustrent les méthodes et matériels utilisés sur les viaducs de la Charente Sud et des Lorettes.

Pour certains ouvrages bas, lorsque la configuration du site l'autorisait, les tronçons de charpente métallique ont été mis en place à la grue.

Ce fut notamment le cas pour les tabliers 3 et 4 du viaduc sur la Charente Sud (les tabliers 1 et 2 ayant été lancés puis désaccouplés une fois en

position), et pour les tabliers du viaduc du Mouzon.

Dans le premier cas, les tronçons constituant les poutres porteuses principales ont été raboutés au sol puis posés par travées entières sur leurs piles, avant assemblage des diaphragmes et du contreventement. Dans le second, les éléments transversaux ont été assemblés au sol avant levage des tronçons ; ces derniers, qui correspondaient à des portions de travée, prenaient appui sur les piles, sur des palées provisoires ou (par clamage) sur le tronçon adjacent. Dans la travée principale P3-P4 qui franchit le Mouzon, les éléments transversaux ont été assemblés après pose des poutres. □

### LES QUANTITÉS MISES EN ŒUVRE

**Pour les 23 ponts-rails à ossature mixte de la LGV SEA (17 à contreventement inférieur métallique et 6 à contreventement en béton), les principales quantités mises en œuvre ont été les suivantes : 15 000 t d'aciers de charpente métallique, 63 400 m<sup>3</sup> de bétons de structure, 11 750 t d'armatures passives. Au total, 10 500 m de pieux auront été nécessaires à leur fondation. Dans la décomposition de ces quantités par ouvrage, on relève les tendances générales suivantes :**

- Pour les ponts à contreventement inférieur métallique, le poids moyen de la charpente est d'environ 330 kg/m<sup>2</sup> de tablier ; la part des aciers constituant le contreventement inférieur et la passerelle de visite est d'environ 10%. Pour les ouvrages à contreventement en dalle béton, ce poids moyen est d'environ 240 kg/m<sup>2</sup>.
- Lorsque le hourdis supérieur est coulé en place en pleine épaisseur, il est armé à environ 240-250 kg/m<sup>3</sup>. Ce ratio grimpe à 300-310 kg/m<sup>3</sup> lorsqu'il est réalisé au moyen de prédalles non participantes (cette valeur incluant les armatures des prédalles).
- Pour les tabliers continus à trois travées ou plus, le poids moyen au mètre linéaire d'une poutre porteuse de hauteur constante (égal à son poids total divisé par sa longueur) augmente de manière quasi linéaire en fonction de la portée principale. Les valeurs relevées varient entre 1,10 t/m et 1,70 t/m pour la gamme de portées [30 - 55 m].

### ABSTRACT

#### SOUTH EUROPE ATLANTIC (SEA) HSL - COMPOSITE-FRAME DOUBLE GIRDERS

NABIL YAZBECK, EGIS JMI - GILLES CAUSSE, VINCI - STEFAN BERNHARD, VINCI

**The distinctive features of the South Europe Atlantic HSL project** are its size (340 km of new line, including 302 km of HSL and 38 km of connections) and the deadline assigned for its execution (six years between signature of the concession agreement and commissioning of the line, scheduled for the end of July 2017). Project execution required, in particular, the construction of 2437 culverts, 233 overpasses/underpasses for small animals and 477 tunnels and bridges. There are 217 road bridges and 253 railway bridges, including 23 composite-frame double girders. Fifteen of these composite-frame railway bridges are classified as non-standard due to their length or the spans crossed. The article describes the design options and execution methods for twelve of these non-standard bridges and the specific case of the two composite-frame access structures to the viaduct over the Dordogne, delimited by inert spans. □

#### LAV SEA (LÍNEA DE ALTA VELOCIDAD SUR EUROPA ATLÁNTICO) - LOS PUENTES DE DOBLE VIGAS DE ESTRUCTURA MIXTA

NABIL YAZBECK, EGIS JMI - GILLES CAUSSE, VINCI - STEFAN BERNHARD, VINCI

**La obra de la Línea de alta velocidad Sur Europa Atlántico** destaca por su tamaño (340 km de nueva línea, de los cuales 302 km de Línea de alta velocidad y 38 km de conexiones) y por el plazo concedido para su realización (6 años entre la firma del contrato de concesión y la puesta en servicio de la línea, prevista para finales de julio de 2017). Su ejecución requerirá, en particular, la construcción de 2.437 obras hidráulicas, 233 pasos para pequeña fauna y 477 obras de ingeniería. Se cuentan 217 puentes de carretera y 253 estructuras que soportan las vías férreas, de las cuales 23 de doble vigas de estructura mixta. Quince de estas estructuras que soportan las vías férreas-estructura mixta han sido calificadas como no corrientes debido a su longitud o a las distancias franqueadas. Se describen las opciones de diseño y los métodos de ejecución de doce de estas estructuras no corrientes, así como el caso particular de las dos estructuras mixtas de acceso al viaducto sobre el río Dordoña, enmarcado por tramos inertes. □

# LA DÉCONSTRUCTION DU VIEUX PONT DE TÉRÉNEZ - UNE PREMIÈRE DE CETTE ENVERGURE EN BRETAGNE

AUTEURS : GOYER THIERRY, CHEF DU SERVICE GÉNIE-CIVIL & OUVRAGES D'ART, INGÉROP CONSEIL ET INGÉNIERIE - BOUDOT NICOLAS, RESPONSABLE CELLULE OUVRAGE D'ART DU STRP, CONSEIL GÉNÉRAL DU FINISTÈRE

TROIS ANS ET DEMI SEULEMENT APRÈS LA CONSTRUCTION DU NOUVEL OUVRAGE, LA DÉCONSTRUCTION DU PONT SUSPENDU DE TÉRÉNEZ EST EN COURS D'ACHÈVEMENT. CHRONIQUE D'UNE OPÉRATION DYNAMIQUE ET RESPECTUEUSE DE CE SITE REMARQUABLE EN BRETAGNE. PLACE À DEUX BELVÉDÈRES QUI PERMETTRONT DE CONTEMPLER LA VALLÉE DE L'AULNE ET L'EMBLÉMATIQUE PONT HAUBANÉ COURBE INAUGURÉ EN AVRIL 2011.



© CG 28  
1

## LE CONTEXTE DU PROJET & RÉTROSPECTIVE

Situé dans le département du Finistère, le vieux pont de Térénez a longtemps été considéré comme un élément essentiel dans le désenclavement entre la presqu'île de Crozon et le nord du département.

Il assure un lien stratégique pour l'équilibre territorial du département, avec de forts enjeux économiques, militaires et de sécurité civile.

Inauguré en 1925, l'ancien pont de Térénez est à l'époque le plus grand

pont suspendu d'Europe. Il permet de franchir l'Aulne suivant une brèche de 400 m de longueur, reliant ainsi les communes de Rosnoën et d'Argol.

Détruit en 1944 lors de la seconde guerre mondiale, le vieux pont a été reconstruit en 1952 en conservant les anciennes piles et les travées d'accès restées intactes. Les travaux ont été confiés aux entreprises Fives-Lille, pour les parties métalliques, et à l'entreprise Limousin pour les travées d'accès en béton armé et les pylônes. Des signes pathologiques, constatés

**1- Vue aérienne avant travaux du vieux pont suspendu et du nouveau pont haubané.**

**1- Aerial view of the old suspension bridge and the new cable-stayed bridge, before the works.**

quelques dizaines d'années plus tard, permettent de diagnostiquer en 1992 un phénomène d'alcali-réaction.

Le sable et le ciment employés s'avèrent incompatibles : le « cancer du béton » ronge le pont.

Mise en évidence pour la première fois en France vers la fin des années 70, l'alcali-réaction est une réaction chimique qui provoque l'attaque des granulats, entraînant la formation d'un gel de réaction dont l'expansion engendre des gonflements : le béton gonfle et fissure. ▶

Un programme de confortement de l'ouvrage est mis en place. Les travaux sont coûteux (1,4 million d'euros en 10 ans) et entraînent la fermeture occasionnelle du pont à la circulation. Après plusieurs années d'études, le Conseil Général décide en 1998 d'ériger un nouveau pont à proximité de l'ancien. La conception est confiée au Setra et aux architectes Charles Lavigne et Michel Virlogeux, ingénieurs consultants. Les travaux du premier pont courbe à haubans de France démarrent en 2007 (figure 1). Inauguré en 2011, cet ouvrage singulier détient le record du monde de portée pour ce type de travée, avec ses 515 m de long et ses pylônes en lambda. Le Conseil Général du Finistère décide enfin l'effacement de l'ancien pont fermé depuis à la circulation.

### L'OPÉRATION DE DÉCONSTRUCTION DE L'ANCIEN PONT

Le Conseil Général du Finistère assure à la fois la maîtrise d'ouvrage et la maîtrise d'œuvre de l'opération. Les travaux concernent :

- La déconstruction de l'ancien pont de Térénez, comprenant la travée centrale métallique suspendue et les travées d'accès en béton, les pylônes et piles en maçonnerie ;
- L'aménagement en belvédère des arches d'extrémités conservées.

Il s'agit de conserver les arches en pierre en rive gauche ainsi que la culée en rive droite, pour servir de belvédères.

Ils procureront une vision exceptionnelle sur la vallée de l'Aulne et le nouveau pont haubané.

### LES CONTRAINTES DU PROJET

Ce chantier se veut exemplaire. Il s'inscrit dans la préservation de l'environnement et le développement de l'insertion professionnelle. Dans cet environnement d'exception, l'opération prend en compte les enjeux et précautions inhérents de notre époque.

Enjeu environnemental tout d'abord, le site de Térénez est sensible et protégé. Le marché de travaux prend en compte :

- Les contraintes liées à l'environnement induites par les réglementations suivantes : Loi Littoral, Loi sur l'Eau, Contrat de baie de la rade de Brest, Natura 2000 « rade de Brest - Estuaire de l'Aulne », parc naturel régional d'Armorique, zones Naturelles d'Intérêts Écologique Faunistique et Floristique (ZNIEFF), zone Importante pour la Conservation des Oiseaux (ZICO) et Zone de Protection Spéciale (ZPS), Schéma d'aménagement de gestion des Eaux (SAGE), Réserve de chasse du domaine public maritime.

→ Le volet environnemental applicable aux marchés du Conseil Général du Finistère, véritable acte de foi qui impose les exigences minimales de la collectivité. La valorisation et le traitement de chaque déchet sont prévus.

→ La présence d'amiante et de plomb dans les matériaux du vieux pont à déconstruire.

→ Les contraintes de servitude pour cette zone jouxtant un site militaire.

→ Les conditions physiques propres à l'emplacement des travaux, notamment à proximité de l'Aulne, des réseaux existants, des activités et constructions avoisinantes, des riverains et usagers de la RD791 avec maintien de la circulation routière et de la navigation, des sentiers de Grandes Randonnées (GR).

Enjeu social ensuite, des clauses d'insertion favorisant le retour à l'emploi des chômeurs de longue durée, bénéficiaires des minima sociaux, travailleurs handicapés, jeunes sans qualification, ont été intégrées au marché.

Enjeu technique enfin, Ingerop a été chargé des études de faisabilité de déconstruction, de l'élaboration du dossier travaux pour la consultation des entreprises, de l'assistance de la maîtrise d'œuvre dans l'analyse des offres et lors des travaux (contrôle des procédures de déconstruction et notes de calculs afférentes, assistance ponctuelle lors de certaines phases).

2- Étape 1 à étape 7 du phasage de déconstruction du groupement.

3- Étape 8 à étape 12 du phasage de déconstruction du groupement.

2- Stages 1 to 7 of the consortium's deconstruction work sequence.

3- Stages 8 to 12 of the consortium's deconstruction work sequence.

#### ÉTAPE 1 À ÉTAPE 7

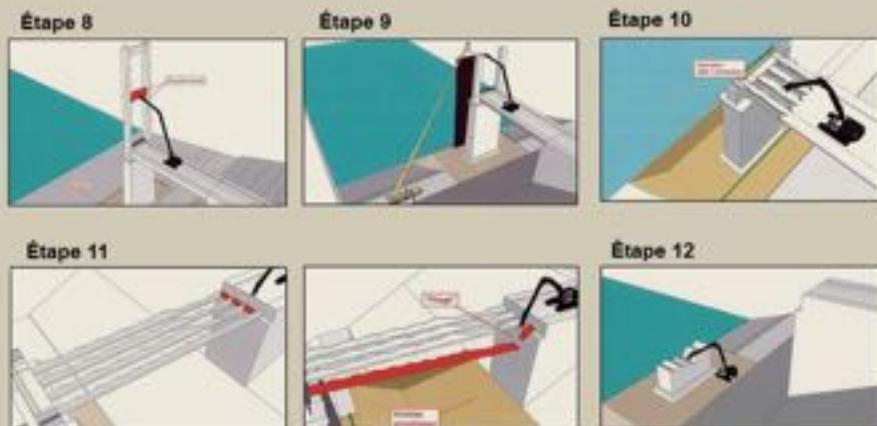
du phasage de déconstruction du groupement



2

#### ÉTAPE 8 À ÉTAPE 12

du phasage de déconstruction du groupement



3

© THIERRY GOYER



4

© INGÉROP-T. GOYER

## LES ÉTUDES DE FAISABILITÉ

Engagées courant 2012, ces études ont permis d'apporter une première réponse à la maîtrise d'ouvrage sur la faisabilité de l'opération au regard des différentes contraintes du site et de proposer les reconnaissances complémentaires nécessaires.

## FIGER LES HYPOTHÈSES ET CONTRAINTES IMPOSÉES PAR L'OUVRAGE POUR LA DÉCONSTRUCTION

Si la construction d'un pont suspendu nécessite des études spécifiques, la déconstruction n'en est pas moins complexe. Au regard de l'histoire de l'ouvrage et de son état pathologique, il est nécessaire d'apprécier la résistance résiduelle de la structure afin de définir les hypothèses et les contraintes limites acceptables.

La connaissance de l'ouvrage tout d'abord ; elle est appréhendée à partir de l'examen des plans et des notes d'archives conservés méticuleusement par le département du Finistère, des dernières inspections détaillées et des surveillances réalisées avant sa fermeture, des essais sur les bétons permettant de vérifier la résistance des parties de l'ouvrage et enfin l'établissement d'un diagnostic plomb et amiante. Des prélèvements et analyses de laboratoire ont permis d'identifier la présence de fibres d'amiante de type chrysotile sur certaines parties d'ouvrage et de qualifier l'état apparent de conservation. Les matériaux contenant de l'amiante ont été identifiés sur l'enduit bitumineux de protection des câbles porteurs et des suspentes, sur l'intérieur des chambres

**4- Vue rive droite - Déconstruction menée simultanément et symétriquement du centre de l'ouvrage vers les rives.**

**5- Vue aérienne rive gauche - Déconstruction menée simultanément et symétriquement du centre de l'ouvrage vers les rives.**

**4- Right bank view - Deconstruction carried out simultaneously and symmetrically from the centre of the bridge towards the banks.**

**5- Left bank aerial view - Deconstruction carried out simultaneously and symmetrically from the centre of the bridge towards the banks.**

d'ancrage des câbles de retenue, sur l'enduit/résine de couleur blanche au sommet des deux piles principales.

Tous les éléments du pont recouverts de peinture et de revêtement ont fait l'objet d'un prélèvement, afin de mesurer la concentration en plomb total. Toutes les parties métalliques du pont mises en place dans les années 50 présentent une concentration en plomb nécessitant de prendre des mesures de prévention et de sécurité adéquates lors de la déconstruction de l'ouvrage. La recherche, puis l'étude, d'un scénario de déconstruction a révélé la difficulté qui réside dans le maintien de l'équilibre des pylônes, obligeant à détendre les câbles de retenue au fur et à mesure de la déconstruction de la travée centrale, pour qu'ils ne s'effondrent pas.

## UNE APPROCHE CALCULATOIRE

La faisabilité de la déconstruction a été appréhendée au regard d'un phasage permettant d'assurer la sécurité des

personnels de chantier et des parties d'ouvrage pendant toute l'opération de déconstruction. Il a été recherché un phasage de déconstruction logique, apprécié au regard de la cinématique de construction de l'ouvrage et des données connues. L'objectif est d'apprécier, avec un degré suffisant, l'impact des opérations élémentaires de déconstruction au regard du comportement structurel de l'ouvrage et d'identifier les contraintes afférentes. Les études ont permis de montrer que les sollicitations dans le tablier, durant les phases de déconstruction, restaient admissibles.

Les calculs ont été menés à partir d'un modèle plan pour les éléments de type câbles avec un calcul non linéaire au second ordre et prise en compte des grands déplacements.

Il a été considéré, à ce stade, que les sollicitations dans le tablier étaient admissibles si elles restaient inférieures aux sollicitations maximales calculées pour cet ouvrage à l'époque de construction.

De plus, les déplacements en tête de pylône ont été limités aux déplacements maximaux pour lesquels l'ouvrage avait été conçu, avec une sécurité de 50 % compte tenu de l'état pathologique des pylônes, soit un déplacement maximum limité à 50 mm.

La faisabilité structurelle de la déconstruction a été validée sur la base du scénario suivant :

→ Allègement de l'ouvrage (rabotage de la chaussée et de la chape, retrait des glissières BA, dépose des bordures de trottoir en granite, retrait des garde-corps).



5

© FLY HD



FIGURES 6, 7 & 9 © CG 29-P. SICARD / FIGURE 8 © CG 29

- Démontage de la dalle de l'ouvrage 1<sup>re</sup> phase, par sciage de 0 à 1/4 de la travée depuis la rive gauche vers la rive droite et évacuation vers la rive droite puis stockage.
- Première phase de détention des câbles porteurs.
- Démontage de la dalle de l'ouvrage par sciage (2<sup>e</sup> phase), de 1/4 à 3/4 de la travée depuis la rive gauche vers la rive droite et évacuation vers la rive droite puis stockage.
- Deuxième phase de détention des câbles porteurs.
- Démontage du reste de la dalle de l'ouvrage principal (3<sup>e</sup> phase) et évacuation vers la rive droite, puis stockage et traitement des matériaux.
- Retrait successif et par tronçon, de la charpente (pièces de pont, longérons, poutres de rigidité) et des suspentes. La charpente et les poutres de rigidité peuvent être découpées et les suspentes démontées. Les tronçons sont des multiples de 9 m et sont calibrés au regard des capacités de treuillage pour une évacuation par barge.
- Retrait des câbles porteurs.
- Les câbles sont déposés toron par toron. Les torons sont décollés (préparation et démaquillage) et déplacés sur des rouleaux positionnés sur les pylônes. Ils sont tirés depuis l'une des rives à l'aide d'un treuil et retenus depuis l'autre rive à l'aide d'un deuxième treuil et d'un câble « messenger ».
- Les câbles sont enroulés sur des bobines et évacués pour traitement, ou découpés par éléments trans-

portables avec des opérations de découpes à réaliser sous protection confinée.

- Déconstruction des pylônes, découpés par tronçons à partir de plateformes ancrées sur leur base. Les tronçons sont déposés à l'aide d'un engin de levage et évacués pour traitement.
- Déconstruction des travées BA des rives droites et gauches : découpe des poutres en béton armé et dépose sur les berges.
- Déconstruction des piles en maçonnerie jusqu'au-dessus du massif en béton armé qui seront laissés en place.

#### IDENTIFIER LES DÉCHETS ET LES MÉTHODES DE VALORISATION

Au regard de la présence d'amiante et de plomb, on a analysé chacune des opérations élémentaires nécessaires à l'accomplissement du phasage étudié afin de vérifier l'acceptabilité réglementaire et les moyens nécessaires aux travaux. La consultation de l'Inspection du Travail a permis de valider ce point. Un diagnostic des déchets avant démolition, réalisé par la société Acs, a permis de déterminer la nature et le volume de chaque déchet à valoriser, l'inventaire et l'analyse des filières de valorisation et/ou d'élimination. Enfin, les méthodes de valorisation et les coûts afférents ont été appréhendés. La difficulté réside en l'absence de données ou de statistiques permettant de chiffrer avec exactitude les coûts directs induits par la transformation

**6 & 7- Vue rive gauche - Déconstruction menée simultanément et symétriquement du centre de l'ouvrage vers les rives.**

**8- Vue depuis le tablier RD - Retrait d'une pièce de pont après découpe.**

**9- Déconstruction menée simultanément et symétriquement du centre de l'ouvrage vers les rives.**

**6 & 7- Left bank aerial view - Deconstruction carried out simultaneously and symmetrically from the centre of the bridge towards the banks.**

**8- View from RD deck - Removal of a crosspiece after cutting out.**

**9- Deconstruction carried out simultaneously and symmetrically from the centre of the bridge towards the banks.**

La consultation des filières existantes a été nécessaire afin de dégager une évaluation financière fiable de l'opération.

#### DÉFINIR LES INVESTIGATIONS COMPLÉMENTAIRES

Celles-ci ont essentiellement été des repérages complémentaires dans les chambres d'ancrages des câbles de retenue (présence d'amiante).

#### CONSULTATION DES ENTREPRISES

Une fois la faisabilité levée et le coût estimé, les études se poursuivent par des études de projet avec la production du dossier de consultation des entreprises. Le cahier des charges imposait un taux minimum de valorisation pour chaque matériau présent, le prélèvement d'échantillons permettant au milieu scientifique la poursuite du suivi du phénomène pathologique et la collecte de données permettant l'établissement d'un écobilan.

La méthodologie de réalisation des travaux et le phasage de déconstruction ont laissé à l'initiative des entreprises dans la limite du respect des contraintes imposées au marché.

La clause d'insertion sociale prévoyant une durée de 3 730 heures de chantier sera appliquée pour l'emploi de personnes en insertion professionnelle.

#### LA VALORISATION ET LE TRI DES DÉCHETS

Les déchets ont été identifiés et classés en catégories distinctes selon les filières de traitement des déchets.

des matériaux « reconditionnement » et les prix de reventes de ces derniers permettant ainsi leur valorisation.



10

© CG 29

Les déchets des travaux publics comptent trois grandes catégories :

- Les déchets inertes (bétons, pierres...) qui ne se décomposent pas et ne sont nocifs ni pour l'environnement ni pour la santé ;
- Les déchets industriels banals, valorisables ou non (métaux, acier) ;
- Les déchets dangereux (amiante, plomb...), contenant des substances dangereuses pour l'environnement ou pour la santé, qui font l'objet d'un suivi rigoureux.

Au regard des matériaux présents et des méthodes de déconstruction envisagées, un taux de valorisation a été fixé au marché entre 70 % et 90 % selon le type de matériau :

- 600 t d'acier de la charpente métallique sont valorisées à 90 % et 400 t d'acier des câbles et suspentes sont valorisées à 70 % après désamiantage.
- 15 000 t de béton sont concassées sur place, avant l'envoi en filière de recyclage, pour être valorisées à 70 %.
- 832 t de pierre de maçonnerie sont concassées sur place, avant l'envoi en filière de recyclage pour une valorisation à 90 %.
- 190 m<sup>3</sup> d'enrobés sont rabotés sur place, avant l'envoi en filière de recyclage pour être valorisés à 70 %.

#### LA POURSUITE DU SUIVI DU PHÉNOMÈNE D'ALCALI-RÉACTION

La déconstruction de l'ouvrage offre une opportunité unique pour la com-

**10 & 11- Déconstruction menée simultanément et symétriquement du centre de l'ouvrage vers les rives.**

**10 & 11- Deconstruction carried out simultaneously and symmetrically from the centre of the bridge towards the banks.**

munauté scientifique et technique de poursuivre le suivi de l'ouvrage engagé depuis 1990 et de progresser dans la compréhension du phénomène d'alcali-réaction. C'est pourquoi, le marché prévoit le prélèvement d'un échantillon du béton de 2 m de hauteur sur le pylône rive gauche. Les faces supérieure et

inférieure de ce bloc de 15 tonnes seront protégées, après découpage, des intempéries et de la dessiccation. Il sera ensuite confié au laboratoire du Cerema-Ouest à Saint-Brieuc afin de poursuivre l'étude de l'évolution du phénomène.

De même, des tronçons spécifiques de câble en torons élémentaires et des culots d'ancrage seront transmis, après retrait de l'amiante, au laboratoire du Cerema-Sud-Ouest à Bordeaux, pour l'étude sur la préservation des câbles de ponts suspendus.

#### LA RÉALISATION D'UN ÉCOBILAN

À l'échelle de toute l'opération, le marché prévoit la réalisation d'un écobilan. Afin d'évaluer les impacts environnementaux de la déconstruction de l'ouvrage, il est prévu un inventaire quantifié de l'ensemble des flux relatifs aux matériaux et processus associés à cette opération.

Pour chaque action, chaque poste de travail ou déplacement, les entreprises devront collecter les données permettant le calcul des gaz à effet de serre (GES) et le rejet de CO<sup>2</sup>. Ces données permettent de quantifier précisément l'impact d'un chantier sur l'environnement et donnent des mesures-tests pour les prochains chantiers. Cet écobilan est réalisé dans le cadre d'une étude sur le cycle de vie des ouvrages de génie civil par le Cerema-Ouest basé à Nantes.

#### UN CHANTIER ATYPIQUE ET AUDACIEUX

Après une procédure de consultation de 7 mois, dont 4 mois de négociation, le marché de déconstruction du vieux pont est attribué en juillet 2013 à un groupement d'entreprises de Marseille : Dsd-Démolition, la société 4D et Ginger-Ceftp-Démolition.

À l'issue d'une période de préparation d'une durée de 3 mois, les travaux ont démarré début janvier 2014.

#### LE PHASAGE DES TRAVAUX DU GROUPEMENT D'ENTREPRISES (figures 2 & 3)

Proposés par le groupement dans son offre, la méthodologie et le phasage sont très audacieux.

Radicalement opposé aux études de faisabilité, le phasage de travaux a fait l'objet de justifications détaillées.

Le tablier a été démolit en gardant dans la structure une part plus importante des sollicitations internes par rapport à un scénario classique de déconstruction. ▷



11

© CG 29



12

© INGÉROP-T. GOYER

Dans ces conditions, les effets dynamiques sont nettement plus importants ce qui a nécessité d'être d'autant plus vigilant sur les conditions météorologiques et sur les mesures de sécurité.

**L'allègement de l'ouvrage :**

**Étape 1 :** Après avoir raboté l'enrobé de la chaussée et des trottoirs, la dalle béton de la travée centrale est sciée au centre de l'ouvrage et évacuée par les deux rives ; les longerons, entretoises et poutres de rives de la charpente métallique sont conservés.

**La déconstruction de la travée centrale suspendue :**

**Étape 2 :** Ensuite les longerons et entretoises de la charpente métallique sont également sciés au centre de l'ouvrage ; les poutres de rives dites « croix de Saint-André » ou « poutres de rigidité » sont conservées.

**Étape 3 :** La travée centrale est complètement ouverte séparant les deux demi-tabliers.

Les poutres de rive qui assurent la rigidité de la charpente métallique sont découpées par les chalumistes et enlevées par des grues de 35 t.

**Étape 4 :** La déconstruction est menée simultanément et symétriquement du centre de l'ouvrage vers les deux rives. Pour cela, deux plateformes sont disposées sous le pont, dédiées aux chalumistes pour la découpe de la structure et la récupération des eaux de sciage. Les longerons et entretoises de la charpente métallique sont déposés par la grue dans un berceau de manutention

**12- Découpe et retrait d'une partie de la poutre de rigidité au droit de l'avant dernière suspente.**

**13- Découpe en tête de pylône d'un toron « câble de retenue ».**

**12- Cutting out and removal of part of the stiffener beam at the level of the second-to-last suspender.**

**13- Cutting out a "restraining cable" strand on a pylon head.**

pour être transportés ensuite sur la rive (figures 4 à 11).

**Étape 5 :** La dalle béton de la travée centrale est sciée en blocs de 5 t maximum. Les longerons, entretoises et poutres de rives sont déposés par longueur de 4,50 m selon l'implantation des suspentes reliées aux câbles porteurs.

**Étape 6 :** Les suspentes sont coupées en parties haute et basse au chalumeau et déposées à la grue à l'aide de sangles (figure 12).

**Le démontage des câbles porteurs :**

**Étape 7 :** Les câbles porteurs sont déposés à l'aide d'un câble tracteur avec poulie installé entre les 2 pylônes, depuis les rives, puis découpés soit au chalumeau soit à la cisaille hydraulique

selon le niveau d'empoussièrement provoqué (figure 13).

**Le démontage des pylônes :**

**Étape 8 :** Les traverses inférieures et supérieures des pylônes sont broyées ; un batardeau est installé en pied de pile pour récupérer les gravats (figure 14).

**Étape 9 :** À l'exception du bloc de 15 t qui sera extrait par sciage, les pylônes sont démolis par une pelle mécanique à long bras de 127 t. Le tapis de caoutchouc installé sur la grue permet de limiter la projection de gravats, les faisant glisser en pied de pile.

**Le démontage**

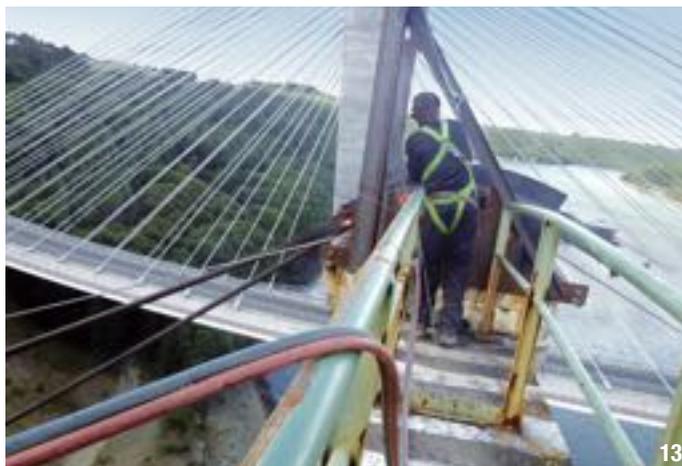
**des travées d'accès :**

**Étape 10 :** Le hourdis des travées d'accès (dalle en béton armé) est démolé par grignotage séparant ainsi les poutres ; les dernières entretoises sont conservées pour les stabiliser.

**Étape 11 :** Un matelas amortisseur est installé sur le talus, puis les dernières entretoises sont découpées. Enfin, l'extrémité de chacune des poutres est grignotée provoquant ainsi leur chute.

**Les piles en maçonnerie :**

**Étape 12 :** Les piles de fondation sont grignotées jusqu'au niveau d'arase en tête du massif de fondation.



13

© CG 29

**Deuxième trimestre 2014 :** Fin du démontage de la travée centrale métallique et des suspentes.

**Troisième trimestre 2014 :** Le démontage des câbles porteurs, la déconstruction des pylônes rive gauche et droite.

**Quatrième trimestre 2014 :** La déconstruction des travées d'accès sur les deux rives.

La déconstruction des piles sur les deux rives, le réaménagement du site et des belvédères.

### LA VALORISATION ET LE TRI DES DÉCHETS

Deux types de déchets dangereux ont été isolés sur l'ancien pont de Térénez : l'amiante et le plomb.

L'activité de désamiantage est encadrée et réglementée.

Elle ne peut être réalisée que par des professionnels formés et agréés pour cela.

L'entreprise 4D-Démolition du groupe ment réalise cette opération délicate. Une unité mobile de traitement des câbles amiantés, le confinement, des tenues de travail adaptées, un sas de

décontamination permettent de respecter les règles de sécurité.

Deux zones de chantier sont isolées pour disposer d'un sas de traitement des déchets amiantés et d'un sas de décontamination.

Les déchets friables sont transportés en centre d'enfouissement technique de classe 1, en dehors du Finistère.

La gestion des déchets dangereux inclut le conditionnement, le stockage, le transport et le traitement des déchets ainsi que la rédaction du bordereau de suivi des déchets. □

**14- Démolition du pylône rive gauche avec une pelle à grand bras.**

**14- Demolition of the left-bank pylon with a long-arm excavator.**



## PRINCIPALES DIMENSIONS ET QUANTITÉS

### DIMENSIONS DE L'OUVRAGE :

- Longueur totale du pont : 430 m
- Travée centrale suspendue : 272 m
- Largeur utile : 8 m
- Surface tablier : 3 360 m<sup>2</sup>
- Hauteur du pylône + pile : 65 m
- Marnage : 8 m environ
- Hauteur pile : 28 m
- Longueur développée des câbles porteurs : 900 m
- Câbles porteurs : 2 câbles constitués de 19 torons élémentaires
- Section d'un câble porteur : 43 500 mm<sup>2</sup>
- Torons élémentaires : chaque toron est composé de 132 fils de 4,7 mm de diamètre
- Nombre de suspentes : 58 u ; barres d'acier « rond » de 72 mm de diamètre

### MATÉRIAUX DE L'OUVRAGE - DÉCHETS À VALORISER :

- Béton Armé : 15 000 t
- Acier de charpente : 600 t
- Câbles porteurs et suspentes : 400 t
- Pierre de maçonnerie : 832 t
- Pierre de granit - bordures : 113 t
- Revêtement routier : 190 m<sup>3</sup>

**BUDGET DE L'OPÉRATION :** 4,5 millions d'euros TTC

**MONTANT DU MARCHÉ DE TRAVAUX :** 3,9 millions d'euros TTC, dont 800 000 € consacrés à la gestion des déchets

**DURÉE DES TRAVAUX :** 12 mois, avec l'achèvement prévisionnelle pour fin en 2014

## INTERVENANTS

**MAÎTRISE D'OUVRAGE :** Conseil général du Finistère - direction des déplacements

**MAÎTRISE D'ŒUVRE :** Conseil général du Finistère - DATD / service politiques techniques routières et portuaires

**ASSISTANT À MAITRISE D'ŒUVRE :** Ingerop Conseil et Ingénierie

**COORDONNATEUR CSPPS :** Qualiconsult Sécurité

**CONTRÔLE EXTÉRIEUR AMIANTE :** Acs

**MARCHÉ DE TRAVAUX - GROUPEMENT :** Dsd-Démolition, 4D-Démolition, Ginger-Cebtp-Démolition

**BUREAU D'ÉTUDE D'EXÉCUTION :** Ginger-Cebtp-Démolition

**ÉCOBILAN DE LA DÉCONSTRUCTION :** Cerema Ouest

### ABSTRACT

## DECONSTRUCTION OF THE OLD TÉRÉNEZ BRIDGE - A FIRST ON THIS SCALE IN BRITTANY

GOYER THIERRY, INGÉROP - BOUDOT NICOLAS, STRP

**Erected between 1913 and 1925, dynamited in 1944 during the Second World War and rebuilt in 1952, after about sixty years' service the old Térénez suspension bridge is undergoing deconstruction. It makes way for the emblematic curved cable-stayed bridge commissioned in 2011. In a remarkable natural beauty spot, the project for deconstruction of the old bridge takes into account environmental, social and technical issues. Despite the presence of asbestos and lead on the bridge, this bold project combines the themes of waste sorting and recovery, the establishment of a deconstruction ecobalance, social inclusion by promoting the return of long-term unemployed to the workplace and, finally, enhancement of the scientific community's understanding of the phenomenon of alkali-aggregate reaction. This large-scale deconstruction project is being carried out under high surveillance. □**

## EL DERRIBO DEL VIEJO PUENTE DE TÉRÉNEZ - PRIMERA OPERACIÓN DE ESTA ENVERGADURA EN BRETAÑA

GOYER THIERRY, INGÉROP - BOUDOT NICOLAS, STRP

**Construido entre 1913 y 1925, dinamitado en 1944 durante la Segunda Guerra Mundial y reconstruido en 1952, después, de sesenta años de explotación, el antiguo puente colgante de Térénez está en proceso de derribo. Cederá su lugar al emblemático puente atirantado curvo puesto en servicio en 2011. En un paraje natural singular, la operación de derribo del antiguo puente tiene en cuenta los retos ambientales, sociales y técnicos. A pesar de la presencia de amianto y plomo en la estructura, esta audaz obra combina las temáticas relativas a la clasificación y la valorización de residuos, la elaboración de un ecobalance de derribo, la inserción que favorece la reincorporación de los desempleados de larga duración y, finalmente, la prosecución por la comunidad científica de los estudios del fenómeno de reacción alcalina. Este derribo de envergadura se realiza con una alta vigilancia. □**



© P. LE DOZÈRE

# LGV SEA - DES OUVRAGES POUR FRANCHIR LE RÉSEAU EXISTANT ET S'Y RACCORDER

AUTEURS : NABIL YAZBECK, CHEF DE PROJET, EGIS JMI - GILLES CAUSSE, DIRECTEUR ADJOINT, VINCI CONSTRUCTION - BENJAMIN LUSK, INGENIEUR, EGIS JMI

LA LGV SEA FRANCHIT À 18 REPRISSES UNE OU PLUSIEURS VOIES À GRAND TRAFIC, AU MOYEN D'OUVRAGES DE TYPE SAUT DE MOUTON. 11 SONT CONSTRUITS AU-DESSUS DE VOIES EN EXPLOITATION (PARIS-BORDEAUX ET POITIERS-LA ROCHELLE, AUTOROUTE A10 ET RD910), ET 7 EN SITE VIERGE (POUR FRANCHIR LES EMBRANCHEMENTS RACCORDANT LA LGV AU RÉSEAU FERRÉ NATIONAL). 10 RACCORDEMENTS ASSURENT LA JONCTION DES 302 KM DE LIGNE NOUVELLE AU RÉSEAU EXISTANT. SUR 4 D'ENTRE EUX, IL S'AGIT D'OUVRAGES LONGS DE TYPE "ESTACADE PRAD", ADAPTÉS À CES PORTIONS DE LIGNE À VITESSE RÉDUITE, AU TRACÉ PARFOIS SINUEUX OU PROCHE DU SOL. CES OUVRAGES SONT CONSTITUÉS D'UNE SUCCESSION DE TABLIERS INDÉPENDANTS À POUTRES PRÉFABRIQUÉES PRÉCONTRAINTEES PAR ADHÉRENCE.



© P. LE DOARÉ



© P. LE DOARÉ

l'implantation le long du tracé des 22 ouvrages objets du présent article apparaît sur le synoptique de la ligne, donné dans l'article « LGV SEA - Les bipoutres à ossature mixte » en page 57 de ce numéro de *Travaux*.

## LES SAUTS DE MOUTON - CARACTÉRISTIQUES COMMUNES DES OUVRAGES ÉLÉMENTS GÉNÉRAUX DE CONCEPTION

Les 18 sauts de mouton se répartissent en deux groupes : 11 ouvrages construits au-dessus d'une ou plusieurs voies à grand trafic déjà en service et 7 ouvrages construits en site vierge. Les méthodes d'exécution, ainsi que la conception qu'elles déterminent, diffèrent d'un groupe à l'autre ; pour le premier on s'applique à minimiser l'impact des contraintes imposées par l'exploitation des voies franchies.

**1- L'estacade de La Folie et, en arrière-plan, les viaducs d'Auxances.**

**2- L'estacade et (en arrière-plan) le saut de mouton de La Couronne.**

**3- Le saut de mouton de Port de Piles (SDM 0432) sur l'A10.**

**1- La Folie viaduct and, in the background, the viaducts of Auxances.**

**2- The viaduct and (in the background) La Couronne flyover.**

**3- Port-de-Piles flyover (SDM 0432) on the A10.**

Les sauts de mouton sont des portiques ou des cadres simples ou doubles en béton armé. Ils ont été fondés superficiellement à chaque fois que les caractéristiques géotechniques le permettaient, soit directement sur le sol en place, soit sur un matelas de matériaux de substitution.

Dans la conception initiale, les murs de soutènement en béton armé qui encadrent l'ouvrage lui-même ont la forme d'un L. Ils sont fondés comme l'ouvrage et, dans la majorité des cas, au même niveau. Au stade de l'exécution, ils ont été remplacés par des murs en terre armée pour 8 ouvrages sur 17, sur avis favorable du concédant Réseau Ferré de France (devenu SNCF Réseau) comme l'exige le Référentiel Technique (IN 3278).

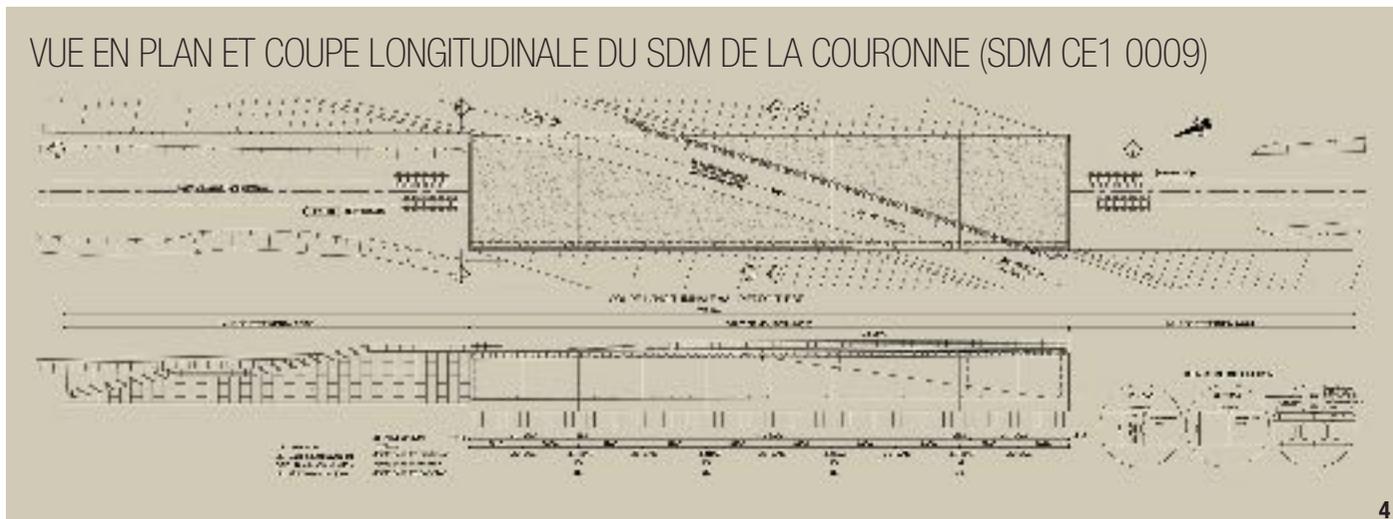
Les longs rails soudés des voies (LRS) et le ballast qui les supportent franchissent les sauts de mouton sans discontinuité.

En site vierge, le portique ou le cadre est coulé en place. Ses dimensions sont fixées de manière à envelopper le gabarit de la future voie franchie avec une marge de quelques centimètres. Le biais du franchissement est redressé de telle sorte que les angles aigus de la traverse supérieure soient au moins égaux à 70 degrés.

Sur une voie en exploitation, les dimensions de l'ouvrage et les méthodes d'exécution ont été choisies de manière à minimiser la gêne causée à l'exploitation par les travaux, d'une part, et les frais supplémentaires entraînés par les précautions à prendre pour assurer la sécurité du trafic, d'autre part. Les options retenues ont été les suivantes :

→ Piedroits coulés en place derrière un écran de protection isolant le chantier du trafic (figure 7). Dans le cas de voies ferrées, la position et la résistance de l'écran sont fixées par l'IN 033.

## VUE EN PLAN ET COUPE LONGITUDINALE DU SDM DE LA COURONNE (SDM CE1 0009)



4

→ Traverse supérieure composite, constituée d'un hourdis en béton armé coulé en place sur des poutres préfabriquées précontraintes à section en T inversé, disposées transversalement les unes à côté des autres de manière à faire office de platelage de protection provisoire au-dessus des voies (figure 5), perpendiculairement à l'axe de la voie franchie (l'ouvrage est donc droit, quel que soit le biais du franchissement).

En outre, lorsque les ouvrages franchissent une voie ferrée, le niveau d'appui des fondations superficielles est remonté le plus haut possible, afin de limiter le coût des mesures de protection en phase de travaux : signalisation et dispositifs de sécurité, blindages, etc. Toutes les dispositions propres à maintenir la circulation des trains sans ralentissements ont été recherchées. Les dispositions constructives suivantes ont été prévues pour limiter la fissuration due au retrait du béton (figure 4) :

- Les portiques sont fractionnés suivant leur longueur en modules d'une vingtaine de mètres au maximum par des joints de dilatation verticaux traversant les semelles de fondation, les piédroits et la traverse.
- Dans les piédroits, des emboîtements éliminent le risque de pianotage entre modules voisins. Les mêmes dispositions sont prises aux joints de la traverse supérieure des portiques et cadres entièrement coulés en place.
- Pour les ouvrages dont la traverse incorpore des poutres préfabriquées, la faible épaisseur du hourdis coulé en place sur la table supérieure des poutres ne permet pas de ménager des

embrèvements. Pour se prémunir du risque de pianotage au passage des charges ferroviaires, on a prévu un système de goujons en acier inoxydable d'un diamètre de 30 mm, scellés d'un côté du joint et coulissants de l'autre, dans une douille. Le jeu maximal entre le goujon et sa douille de glissement est de 1,5 mm ; cette valeur reste inférieure à la déformation relative  $\delta_v$  admissible entre deux structures adjacentes supportant des voies ferrées continues (fixée par l'Eurocode à 3 mm). Les calculs dynamiques ayant montré que les déplacements verticaux maximaux susceptibles de se produire au droit des joints étaient du même ordre de grandeur que ce jeu (de 1 à 2 mm), on s'est assuré, au stade des études d'exécution, que, même si ces goujons n'étaient pas actifs, les ouvrages respectaient encore tous les critères réglementaires en statique et en dynamique.

- Dans chaque module, les piédroits (et eux seuls), sont à nouveau fractionnés en deux parties à peu près égales par un joint sec, sans emboîtement.

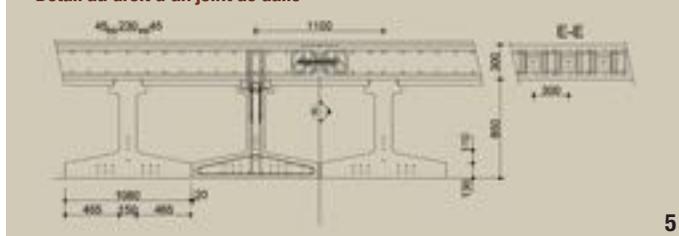
### CONTRAINTES IMPOSÉES PAR LES VOIES FRANCHIES

Les voies routières en exploitation franchies par des sauts de mouton sont l'autoroute A10 (à trois reprises, figure 3), et la RD910. La hauteur libre minimale exigée sur l'A10 est égale à 4,85 m. Elle a été portée à 5,30 m, pour tenir compte de l'encombrement des dispositifs d'éclairage fixés sous la traverse.

Les voies ferrées en exploitation franchies en saut de mouton sont celles

## TRAVERSE EN POUTRES PRÉFABRIQUÉES

### Détail au droit d'un joint de dalle



5

**4- Vue en plan et coupe longitudinale du SDM de La Couronne (SDM CE1 0009).**

**5- Traverse en poutres préfabriquées - Détail au droit d'un joint de dalle.**

**4- Plan view and longitudinal section of La Couronne flyover (SDM CE1 0009).**

**5- Prefabricated girder crosspiece - Detail at the level of a slab joint.**

→ Le tirant d'air minimal est fixé à 6,40 m. Il s'agit d'une valeur légèrement enveloppe, qui minimise les modifications à apporter au système d'alimentation électrique existant.

→ L'ouverture est fixée à 15,60 m, afin de réaliser les piédroits et leurs fondations à l'abri d'écrans de protection implantés à 3,50 m au moins de l'axe de la voie la plus proche.

→ Le niveau d'appui des semelles superficielles est calé à chaque fois que possible au-dessus du plan P1 (figures 6 et 7), afin d'éviter les dépenses liées au blindage des fouilles et aux ralentissements des trains. Lorsque les caractéristiques du sol ne le permettent pas, on a recours à des fondations profondes sur pieux.

de la ligne Paris-Bordeaux (à cinq reprises) et de la ligne Poitiers-La Rochelle (à deux reprises). Au droit des franchissements, ces lignes comportent deux voies électrifiées. La vitesse des trains sous ces ouvrages varie de 160 à 220 km/h. Les gabarits minimaux, définis par les IN 0162, 0166 et 0168, dépendent des conditions locales d'alimentation électrique des trains.

En pratique, les options retenues pour les sauts de mouton sur voies ferrées en exploitation ont été les suivantes :

Les SDM 0152, 0871 et 2125 franchissent les deux voies de la ligne nouvelle dans des zones où la vitesse de référence est égale à 350 km/h. L'application de l'IN 0168 conduirait à considérer un tirant d'air minimal égal à 6,22 m, et une ouverture minimale entre piédroits égale à 12,80 m. En pratique, les options retenues pour les sauts de mouton sur voies circulées à grande vitesse ont été les suivantes :

→ Le tirant d'air minimal est fixé à 6,40 m. Cette cote est une donnée

fondamentale de l'étude dynamique de l'interaction caténaire-pantographe aux grandes vitesses, qui impose une hauteur minimale égale à 6,35 m pour les ouvrages de longueur supérieure à 22,5 m.

→ L'ouverture est fixée à respectivement 14,40 m, 14,95 m et 13,40 m. Elle résulte des contraintes de confort tympanique : en l'absence d'ouvertures percées dans les piédroits ou la traverse, les sauts de mouton sont assim-

lables à un tunnel dès que leur longueur dépasse 40 m. Dans ce cas, une section d'air minimale de 100 m<sup>2</sup> est requise pour s'affranchir d'une étude aéroulque. Pour le SDM 2125, dont le gabarit vertical est fortement contraint par le tracé des voies portée et franchie, la section d'air minimale dégagée valait 92 m<sup>2</sup> ; une étude aéroulque a permis de s'assurer que les critères de confort des usagers étaient néanmoins respectés.

### LES ESTACADES À TABLIERS PRAD - CARACTÉRISTIQUES COMMUNES DES OUVRAGES ÉLÉMENTS GÉNÉRAUX DE CONCEPTION

Les quatre ouvrages de type "Estacade à tabliers PRAD" supportant les voies de la LGV SEA sont de conception similaire. Ils ont été mis en œuvre sur des portions de ligne circulées à vitesse réduite, au tracé relativement sinueux ou proche du sol et sur lesquelles le recours à des ouvrages d'une lon-

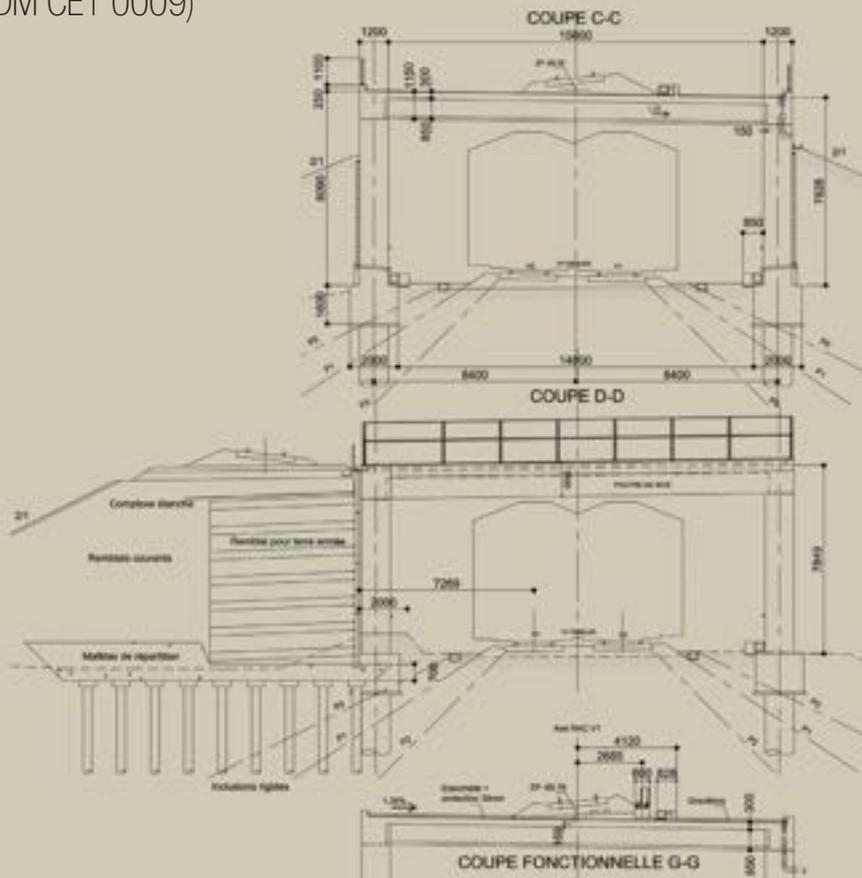
gueur parfois relativement importante était nécessaire. Autant de conditions dans lesquelles ce type de structure apparaissait comme techniquement et économiquement adapté.

Trois de ces ouvrages se trouvent sur des raccordements qui relient la ligne nouvelle à la ligne classique Paris-Bordeaux, au voisinage des gares existantes :

→ L'estacade de La Folie (EST MAO 0012), située sur le raccordement de Migné-Auxances, par lequel les trains empruntant la ligne nouvelle pourront rejoindre la gare de Poitiers (figure 1). La longueur totale de ses tabliers est de 1 800 m.

→ L'estacade de La Couronne (EST CE0 0017), située sur le raccordement avec Angoulême (figures 2 et 8). La longueur totale de ses tabliers est de 967 m. ▶

### COUPES TRANSVERSALES SUR LE SDM DE LA COURONNE (SDM CE1 0009)

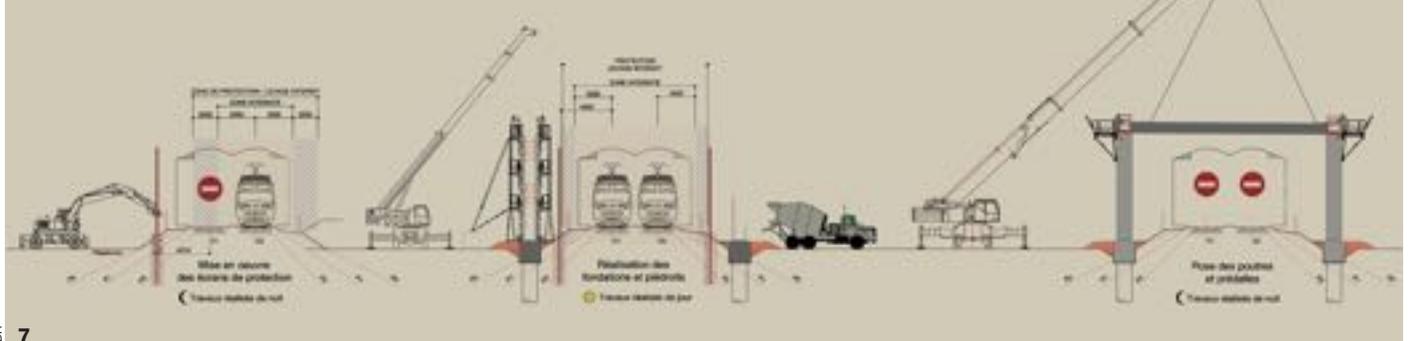


6- Coupes transversales sur le SDM de La Couronne (SDM CE1 0009).  
7- Cinématique de construction des sauts de mouton sur voies ferrées en exploitation.

6- Cross sections on La Couronne flyover (SDM CE1 0009).

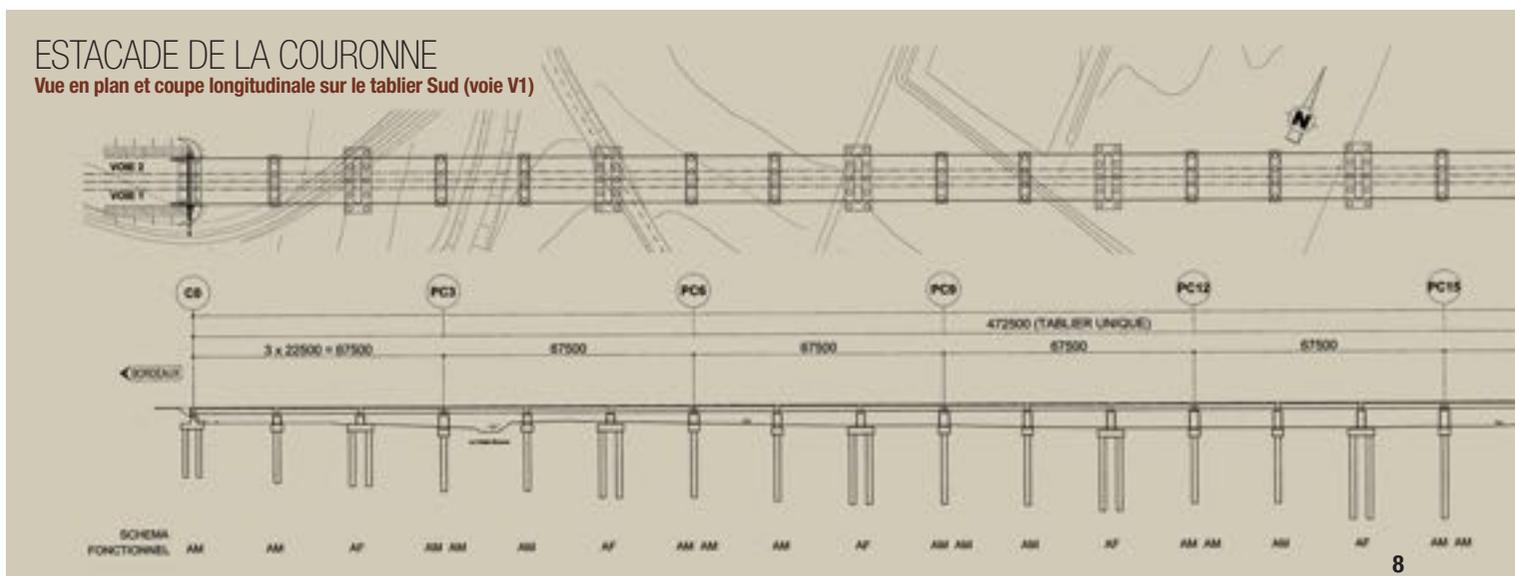
7- Kinematic drawing of the construction of flyovers on railway lines in service.

### CINÉMATIQUE DE CONSTRUCTION DES SAUTS DE MOUTON SUR VOIES FERRÉES EN EXPLOITATION



## ESTACADE DE LA COURONNE

Vue en plan et coupe longitudinale sur le tablier Sud (voie V1)



8

© DR

→ L'estacade d'Ambarès (EST ALO 3005), d'une longueur totale de 452 m, située à une quinzaine de kilomètres au nord de la gare de Bordeaux-Saint-Jean (figures 21, 22, 27 et 29).

Sur ces trois ouvrages, la vitesse des trains est limitée respectivement à 170, 200 et 180 km/h.

Le quatrième ouvrage de conception similaire, l'estacade de La Falaise (EST 2946), est implanté à 6 km au nord du raccordement d'Ambarès, sur le versant nord de la vallée de la Dordogne. D'une longueur totale de 337,50 m, il se trouve sur une portion circulée à 230 km/h.

Les tabliers retenus sont des PRAD (tabliers à poutres préfabriquées, précontraintes par adhérence) : les poutres en béton précontraint de dimensions modestes, préfabriquées en usine, sont posées à la grue les unes à côté des autres sur des calages provisoire et solidarisées par des entretoises coulées en place aux extrémités des travées. Un hourdis supérieur couvre toute la largeur de l'ouvrage. Sous les entretoises sont disposés les appareils d'appui définitifs du tablier.

Les estacades sont constituées d'une succession de modules à trois travées de 22,50 m indépendants, séparés par des joints de structure. La longueur dilatable vaut donc au maximum 67,50 m, valeur inférieure à la limite de 90 m fixée par le référentiel ; le ballast et les rails peuvent alors franchir l'ouvrage sans coupure à ses extrémités ou au droit des joints. On s'affranchit ainsi de la mise en œuvre d'appareils de dilatation des voies, incompatibles avec la géométrie de la ligne au droit des ouvrages concernés.

Les tabliers conservent, malgré leur faible masse et leur déformabilité, un

**8- Estacade de La Couronne - Vue en plan et coupe longitudinale sur le tablier Sud (voie V1).**

**9- Estacade de La Couronne - Coupes sur pile fixe et pile-culée.**

**10- Estacades - Détail sur poutres préfabriquées.**

**8- La Couronne viaduct - Plan view and longitudinal section on the South deck (track V1).**

**9- La Couronne viaduct - Cross sections on fixed pier and abutment pier.**

**10- Viaducts - Detail on prefabricated girders.**

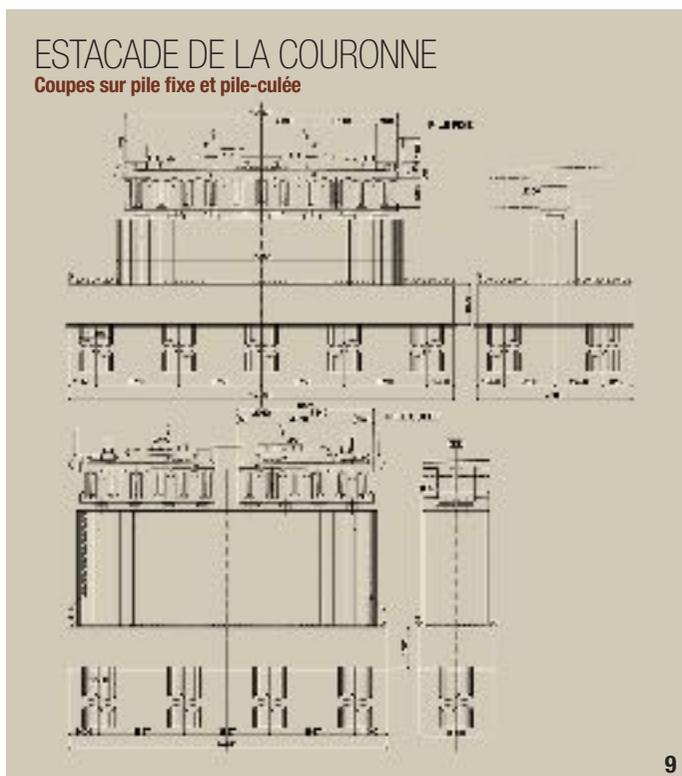
comportement satisfaisant sous les charges dynamiques, tant que la vitesse des trains reste moyenne : les analyses dynamiques effectuées au début des études de conception ont montré que les critères de sécurité des circulations fixés par le référentiel de la ligne étaient respectés tant que la vitesse de référence V n'excédait pas 275 km/h.

Par rapport aux solutions alternatives (bipoutres en ossature mixte, bipoutres en béton armé coulé en place), les tabliers PRAD présentent, lorsqu'ils peuvent être mis en œuvre, plusieurs avantages :

→ Faible épaisseur, donc transparence accrue (alors que le profil en long est proche du sol).

## ESTACADE DE LA COURONNE

Coupes sur pile fixe et pile-culée

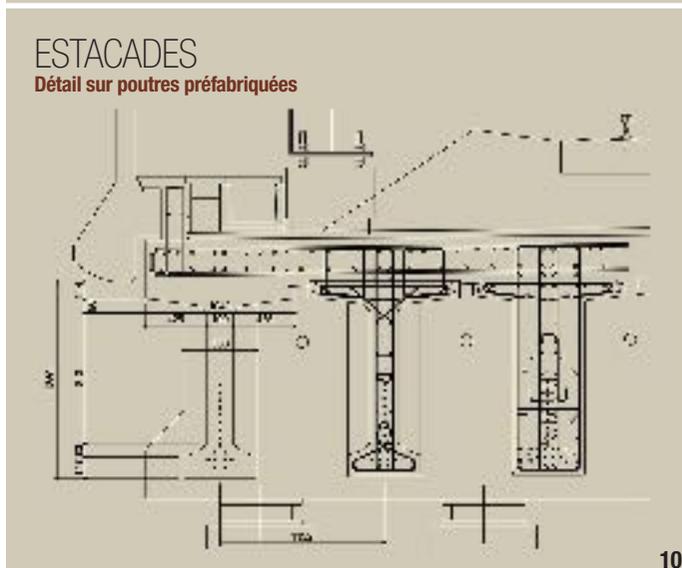


9

© DR

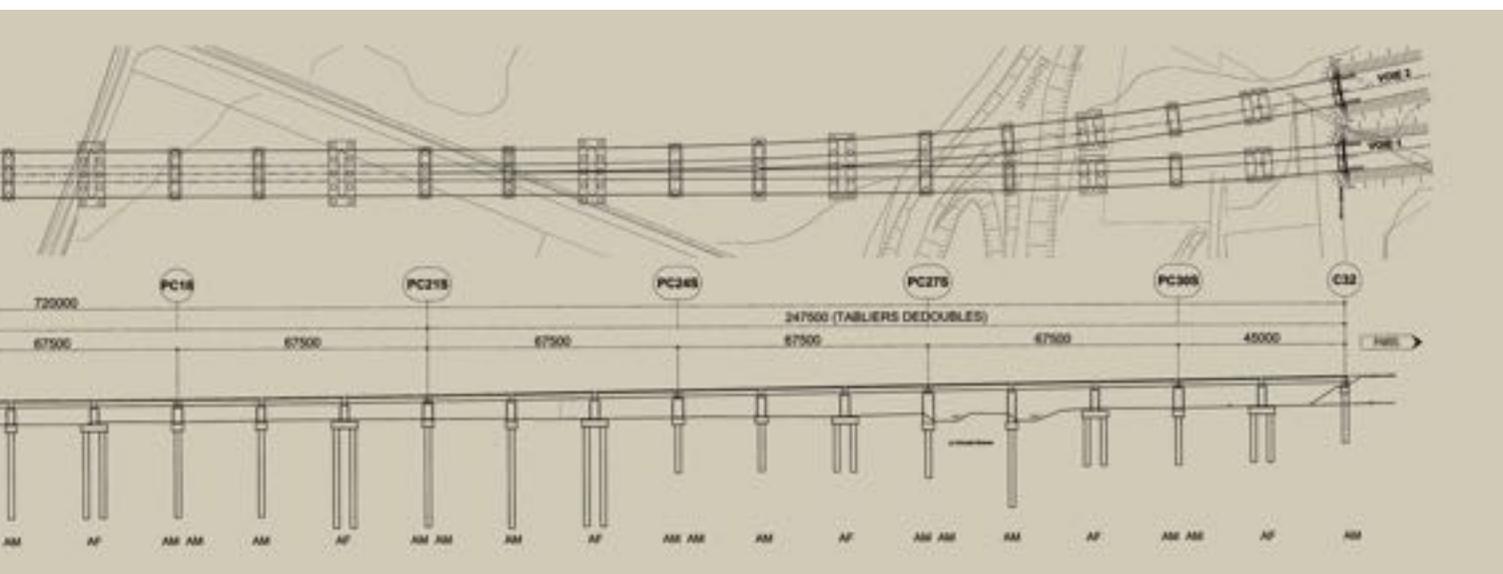
## ESTACADES

Détail sur poutres préfabriquées



10

© DR



**11- Estacades - Schéma statique d'un module de tablier à deux voies.**

**12- Estacades - Précontrainte additionnelle.**

**11- Viaducts - Static diagram of a two-track deck module.**

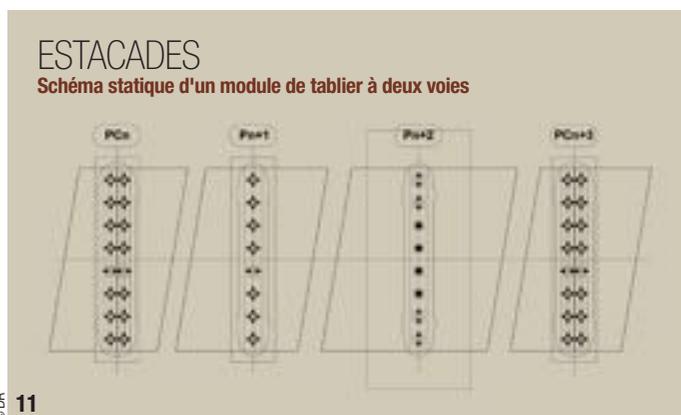
**12- Viaducts - Additional prestressing.**

→ Modularité : les mêmes poutres peuvent être employées sur les tabliers à une ou à deux voies, et leur espacement peut être adapté aux variations de largeur de la plateforme ferroviaire.

→ Industrialisation, simplicité et rapidité d'exécution : les poutres préfabriquées sont produites et stockées hors du site. Leur fabrication à haute cadence n'est pas critique vis-à-vis du délai d'achèvement de

l'estacade. Légères et peu encombrantes, il est relativement facile de les acheminer par la route jusqu'au site des travaux et de les poser à l'aide d'une grue automotrice.

Les poutres préfabriquées de section en T ont une hauteur de 1,35 m (figure 10). Les tabliers supportant deux voies en comportent 11, et les tabliers à une voie, 6.

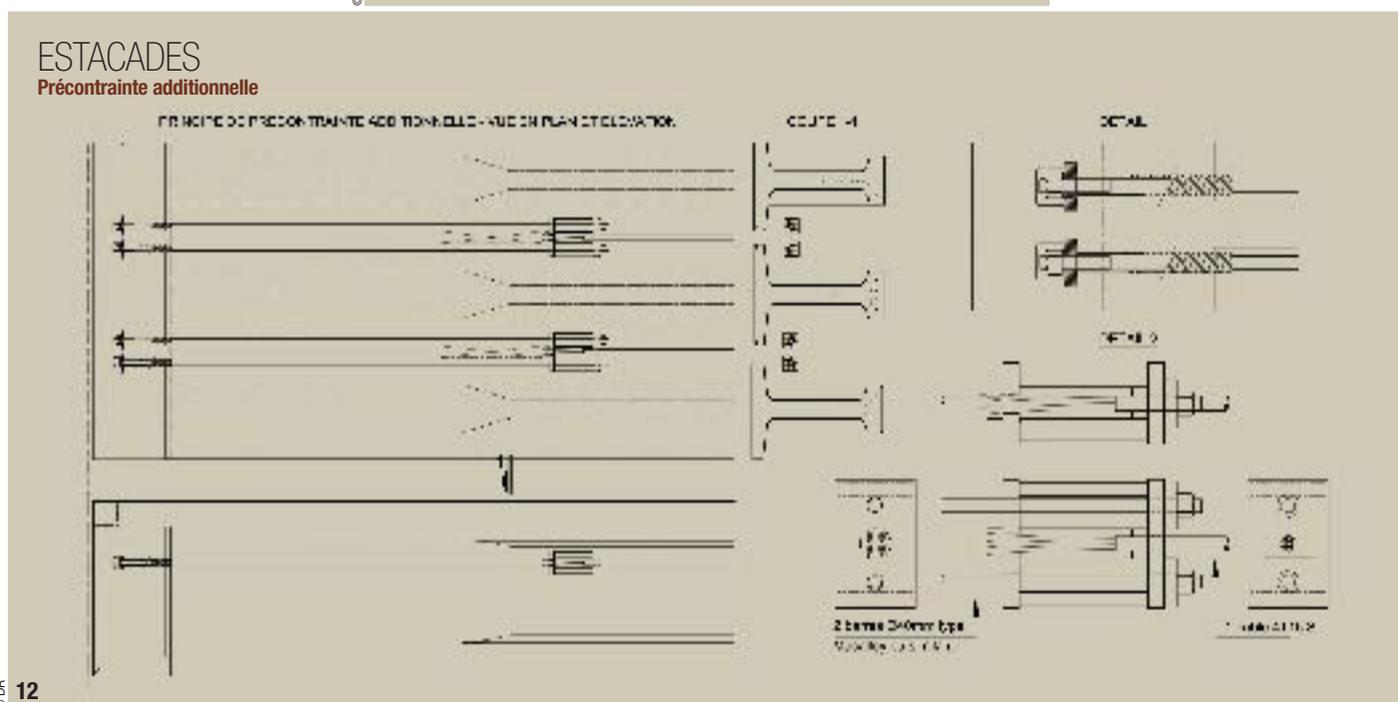


© DR 11

**SCHEMA STATIQUE**

Dans le plan horizontal, les déplacements des modules de tablier sont bloqués :

→ Transversalement, sur toutes les lignes d'appui. Dans cette direction, ce sont les sollicitations sismiques qui dimensionnent les organes de blocage.



© DR 12

→ Longitudinalement, sur une des quatre lignes d'appui, soit une pile intermédiaire (pour les estacades de La Couronne et de La Falaise), soit une pile-culée (pour l'estacade d'Ambarès). L'appui concerné joue le rôle de point fixe. Les éléments le constituant (et en particulier les

fondations) sont dimensionnés pour être capables de reprendre les efforts horizontaux de freinage et démarrage des trains, sans que le déplacement en tête de pile ne soit supérieur à la valeur de 5 mm fixée par le référentiel. Le respect de ce critère a été déterminant sur

les tabliers à 2 voies, compte tenu des caractéristiques médiocres des sols. Une étude complète des effets de l'interaction voie-ouvrage a permis de dimensionner au plus juste les fondations des points fixes.

Compte tenu de l'encombrement des dispositifs de blocage et de l'intensité

des efforts à reprendre, on a pris le parti suivant :

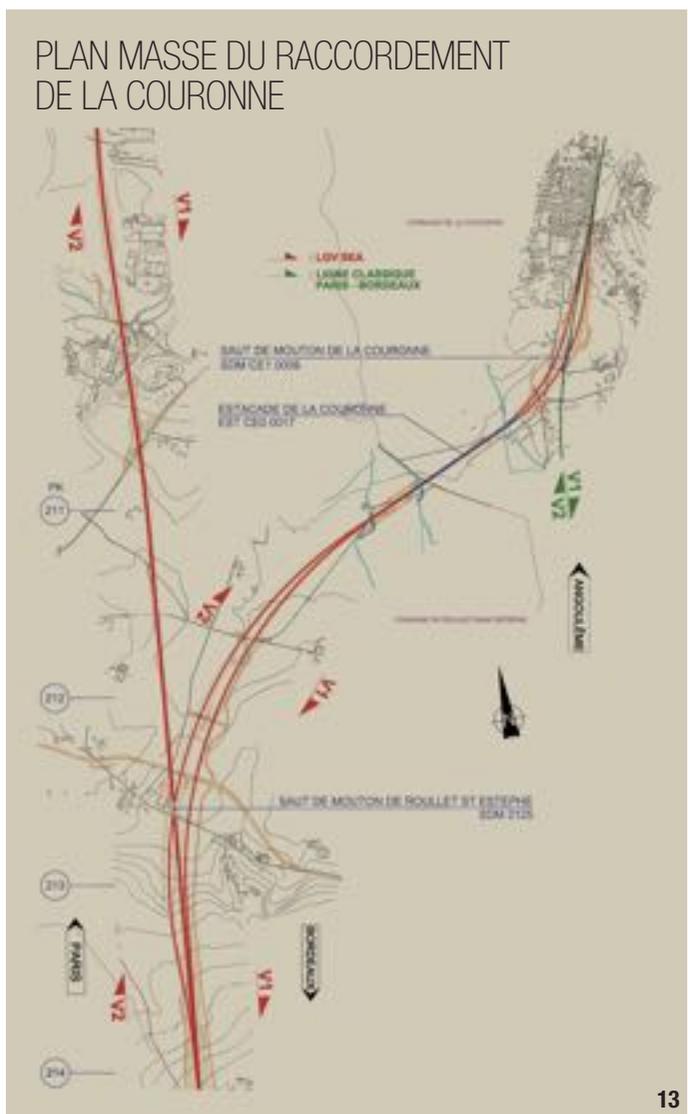
→ Chaque ligne d'appui comporte quatre appareils d'appui à pot sous les tabliers à voie unique et huit appareils sous les tabliers à deux voies.

→ Le blocage des déplacements longitudinaux du tablier est assuré sur tous les appareils de la ligne d'appui considérée.

→ Le blocage des déplacements transversaux du tablier est assuré sur un appareil d'appui sur deux sur la pile fixe et sur un seul appareil sur les autres appuis. Ces appareils sont positionnés suivant la disposition donnée sur le schéma de la figure 11, pour les tabliers à deux voies.

Il convenait de s'assurer que, en présence d'un effort horizontal important, les dispositifs de blocage des différents appareils d'appui d'une même file

## PLAN MASSE DU RACCORDEMENT DE LA COURONNE



13

### 13- Plan masse du raccordement de La Couronne.

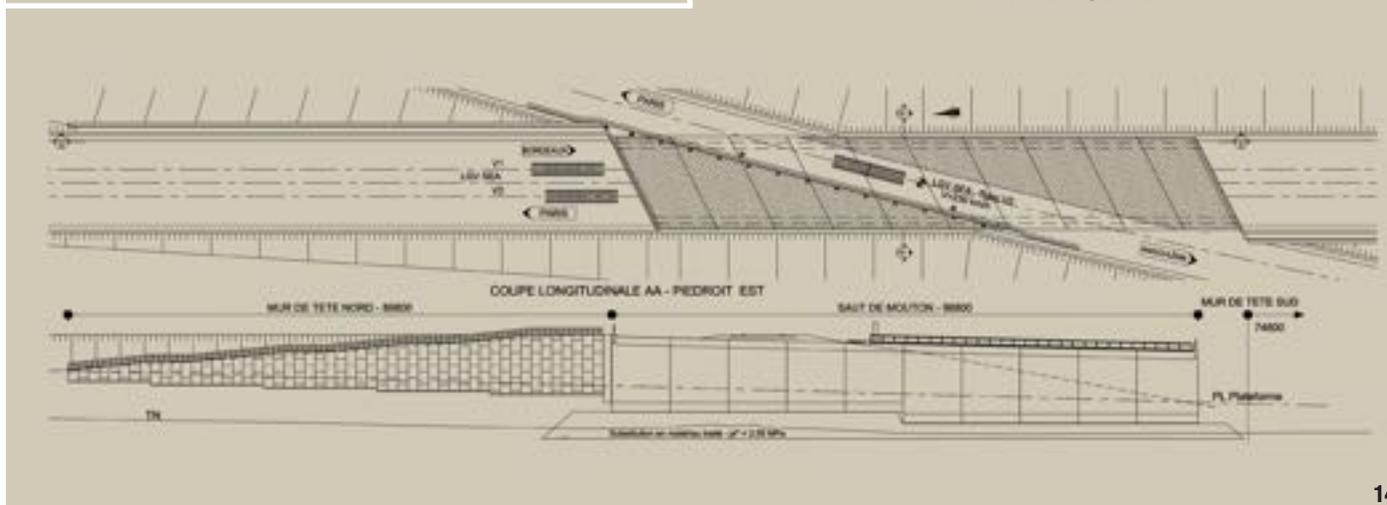
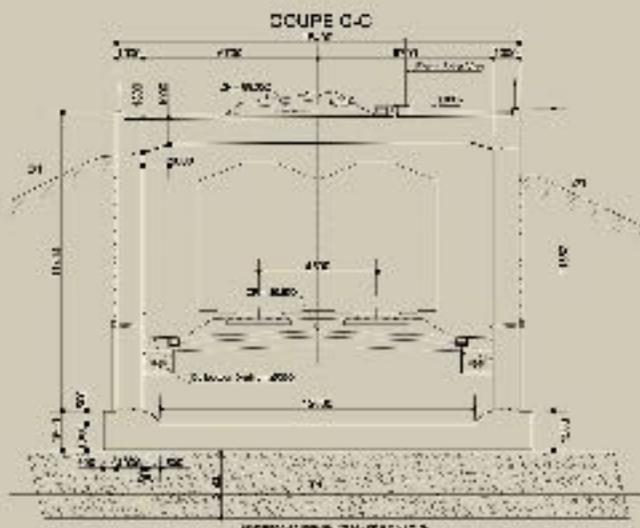
### 14- SDM de Roulet-Saint-Estèphe (SDM 2125) - Vue en plan et coupes.

### 13- La Couronne connection layout plan.

### 14- Roulet-Saint-Estèphe flyover (SDM 2125) - Plan view and cross sections.

## SDM DE ROULLET-SAINT-ESTÈPHE (SDM 2125)

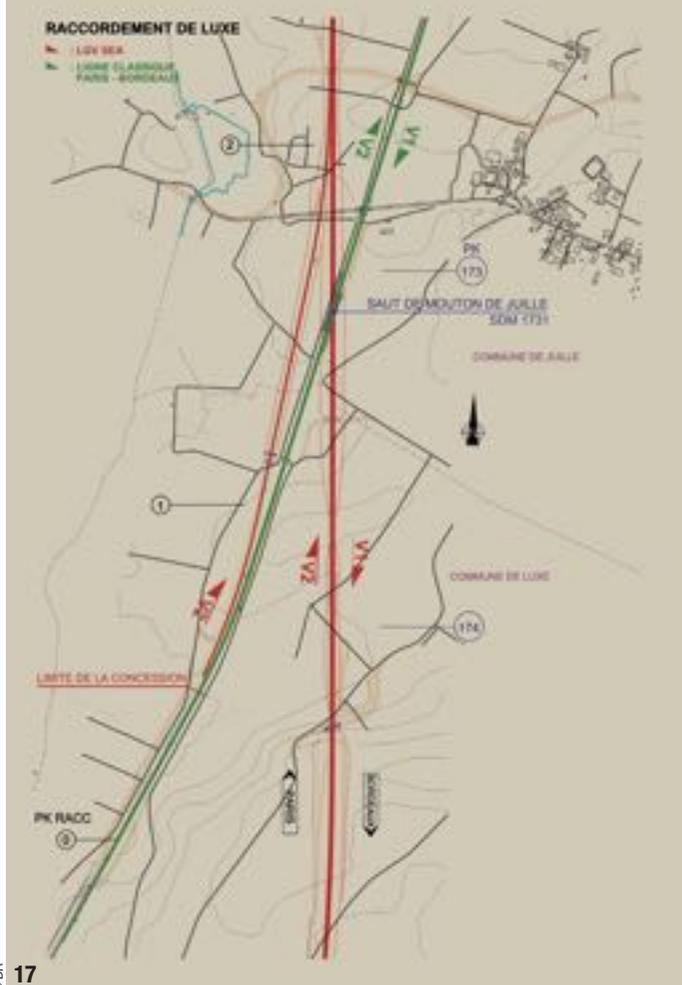
Vue en plan et coupes



14



## PLAN MASSE DU RACCORDEMENT DE LUXÉ



**15- Le SDM de La Couronne (CE1 0009) avant pose de la voie.**  
**16- Extrémité est de l'estacade de La Couronne.**  
**17- Plan masse du raccordement de Luxé.**

**15- La Couronne flyover (CE1 0009) before laying the track.**  
**16- East end of La Couronne viaduct.**  
**17- Luxé connection layout plan.**

### CHIFFRES-CLÉS

**18 sauts-de-mouton**  
**et 4 estacades**  
**60 750 m<sup>2</sup> de tablier : 31 800**  
**pour les sauts-de-mouton**  
**et 28 950 pour les estacades**

sont bien tous mobilisés, de manière à répartir correctement la charge, et ainsi se prémunir du risque de rupture en chaîne. La mobilisation simultanée des points d'appui est assurée par le respect des conditions suivantes :

→ L'élément le plus faible est la connexion par goujons des platines métalliques inférieures dans la tête de pile, de façon à ce qu'elle se plastifie en premier (plastification atteinte pour un déplacement de 1,3 mm).

→ Les jeux entre les différents appareils à mobiliser sont significativement inférieurs à 1,3 mm.

Les tolérances habituelles d'usage des appareils à pot conduisent à un jeu de fonctionnement garanti d'environ 0,85 mm.

Cette valeur a été ramenée à 0,40 mm, et tous les appareils d'une file ont été réglés transversalement et maintenus en position au moment de la pose. Suivant ces hypothèses, un calcul non linéaire a été réalisé lors des études

d'exécution, en considérant tous les scénarii possibles sur la répartition du jeu entre les différents appareils. Il a permis de déterminer l'effort supplémentaire repris par le premier à se mettre en butée et de vérifier que sa capacité restait suffisante.

### PRÉCONTRAÎTE ADDITIONNELLE

Afin d'anticiper une évolution imprévue du comportement mécanique du tablier, des réservations ont été prévues

autorisant la mise en œuvre ultérieure d'une précontrainte additionnelle extérieure rectiligne, à raison d'un câble 4T15 dans chaque espace séparant deux poutres adjacentes, ancré dans les entretoises d'extrémité de chaque module à 3 travées (figure 12).

Ce complément correspond à environ 20% de la précontrainte initiale (constituée de 17 à 21 torons par poutre). Cette précontrainte additionnelle est disposée au voisinage de l'axe neutre de la section. L'état correspondant à sa mise en tension a été prévu dans les calculs d'exécution.

De part et d'autre de chaque câble 4T15 on a logé deux ancrages pour barres à haute limite élastique de diamètre 40 mm, noyés dans les entretoises d'extrémité. Des fourreaux traversants dans les entretoises intermédiaires complètent le dispositif.

La liaison entre le câble et ses barres d'ancrage sera assurée par une selle métallique au droit de laquelle s'opèrera la mise en tension.

Dans ce qui suit, les principes généraux de conception précédemment exposés sont illustrés au travers de la description de quelques ouvrages représentatifs.

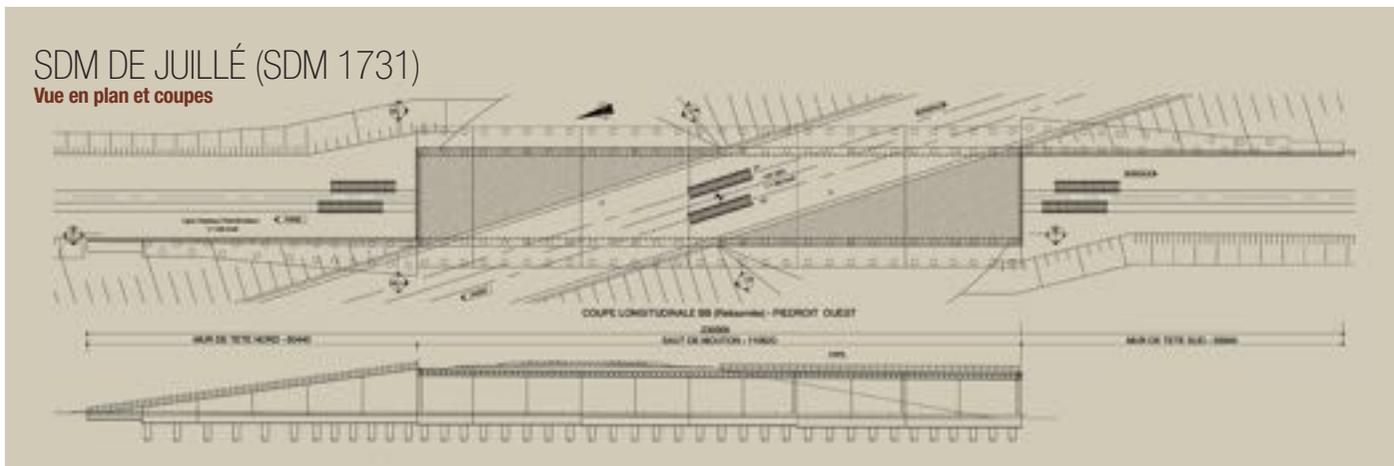
### LE RACCORDEMENT DE LA COURONNE

Deux sauts de mouton et une estacade permettent de raccorder la nouvelle ligne au RFN au droit d'Angoulême (figure 13).

Le SDM 2125, situé à l'embranchement, supporte la voie V2 du raccordement (circulée à 230 km/h) et franchit les deux voies de la ligne à grande vitesse (figure 14). L'ouvrage est un cadre en béton armé de 96,80 m prolongé par des murs de tête en terre armée et reposant sur le substratum marno-calcaire par l'intermédiaire d'un matelas de matériaux de substitution mis en œuvre après purge de la couverture limoneuse.

## SDM DE JUILLÉ (SDM 1731)

Vue en plan et coupes



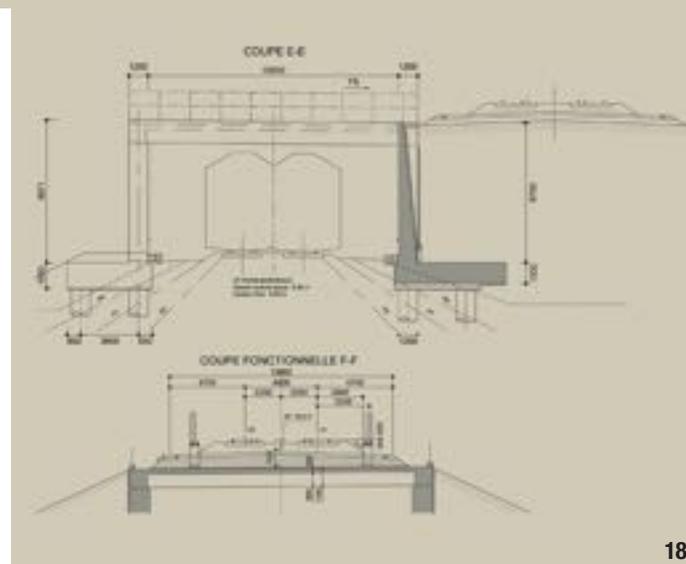
L'écart entre les profils en long de la voie portée et des voies franchies ne permet pas de conserver la structure courante de la plateforme au passage de l'ouvrage ; le ballast doit reposer directement sur la traverse supérieure du portique et son épaisseur est majorée en conséquence.

L'estacade CEO 0017 franchit à faible hauteur la plaine alluviale qui constitue le lit majeur des différents cours d'eau qui, au nord, donnent naissance à la Boème, affluent de la Charente. Elle supporte les deux voies du raccordement, circulées à 160 km/h au droit de l'ouvrage. Elle assume une triple fonction : éliminer les aléas liés aux travaux de consolidation des sols compressibles qu'aurait exigés la traversée de la plaine par un remblai, préserver la capacité de stockage du lit majeur lors des crues exceptionnelles et maintenir la continuité écologique de la vallée. En dehors des lits mineurs de la Vieille Boème, à l'ouest, et de la Grande Boème, à l'est, les appuis pouvaient être implantés pratiquement sans contrainte.

Les deux voies du raccordement de La Couronne ont des définitions géométriques distinctes. Elles restent couplées sur près des deux tiers de la longueur de la brèche, avant de s'écarter pro-

gressivement l'une de l'autre. Ce tracé en Y, ainsi que la faible hauteur des voies au-dessus du sol, ont conduit à retenir des travées courtes dont la modularité s'adapte aux variations de largeur de la plateforme.

Ainsi, l'ouvrage retenu est une estacade de 720 m de long, composée de 32 travées de 22,50 m de portée (figure 8). De l'ouest vers l'est, il est découpé en onze tronçons successifs de tablier, uniques à deux voies puis jumeaux à une voie. Sous l'ouvrage,



**18- SDM de Juillé (SDM 1731) - Vue en plan et coupes.**

**19- Plan masse du raccordement d'Ambarès et La Grave.**

**18- Juillé flyover (SDM 1731) - Plan view and cross sections.**

**19- Ambarès and La Grave connection layout plan.**

18

© D.F.

l'érosion fluviale a creusé dans le substratum marno-calcaire compact une profonde cuvette, comblée par des alluvions récentes de très faible compacité. Leur épaisseur atteint 17 m au milieu de la brèche, ce qui impose de considérer une classe de sol D pour les études sismiques. La nappe phréatique est très proche de la surface.

Le SDM CE1 0009 supporte la voie V1 du raccordement et franchit les deux voies de la ligne classique (figures 4, 6, et 15). L'ouvrage est un portique de

93 m prolongé par des murs de tête en terre armée. Chaque piedroit est fondé sur une file de pieux de 1 200 mm de diamètre, couronnés par une semelle de répartition coulée sur un béton de propreté juste au-dessus du plan P1. Comme exposé précédemment, la traverse supérieure est constituée d'un hourdis en béton armé de 30 cm d'épaisseur coulé sur des poutres préfabriquées précontraintes.

Afin de limiter les tassements des alluvions sous les blocs techniques situés

## PLAN MASSE DU RACCORDEMENT D'AMBARÈS ET LA GRAVE



19

© D.F.



FIGURES 20 & 21 © P. LE DOARÉ

20



21

20- Le SDM de Juillé (SDM 1731) avant pose de la voie.

21- L'estacade d'Ambarès.

22- Estacade d'Ambarès - Vue en plan et coupe longitudinale.

23- SDM d'Ambarès - Vues en plan.

20- Juillé flyover (SDM 1731) before laying the track.

21- Ambarès viaduct.

22- Ambarès viaduct - Plan view and longitudinal section.

23- Ambarès flyover - Plan views.

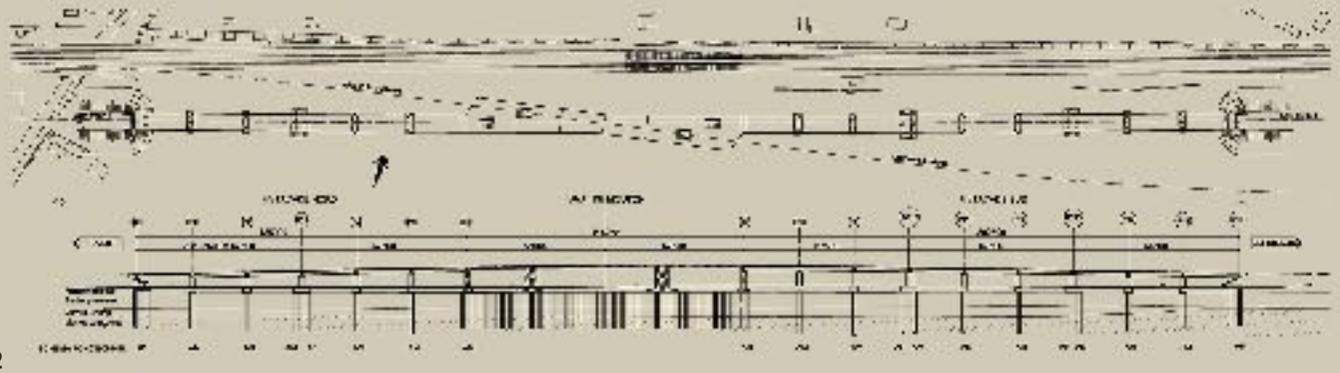
à proximité immédiate de la ligne classique, ces derniers ont été édifiés sur des inclusions rigides qui permettent également de s'affranchir des efforts de frottement négatif sur les pieux.

## LE RACCORDEMENT DE LUXÉ

Le SDM 1731 de Juillé est de conception similaire à celui de La Couronne. Il est situé à proximité du raccordement de Luxé, par lequel la voie V2 de la ligne nouvelle rejoint son homologue de la ligne existante Paris-Bordeaux, à 25 km au nord d'Angoulême (figures 17, 18 et 20). Il supporte les deux voies de la LGV et franchit les deux voies de la ligne classique. Dans le cas du SDM 1731, l'écart entre les profils en long des voies portées et franchies permet de conserver au passage de l'ouvrage la structure courante de la plate-forme (sous couche de 20 cm sur couche de forme de 35 cm d'épaisseur minimale). ▷

## ESTACADE D'AMBARÈS

Vue en plan et coupe longitudinale

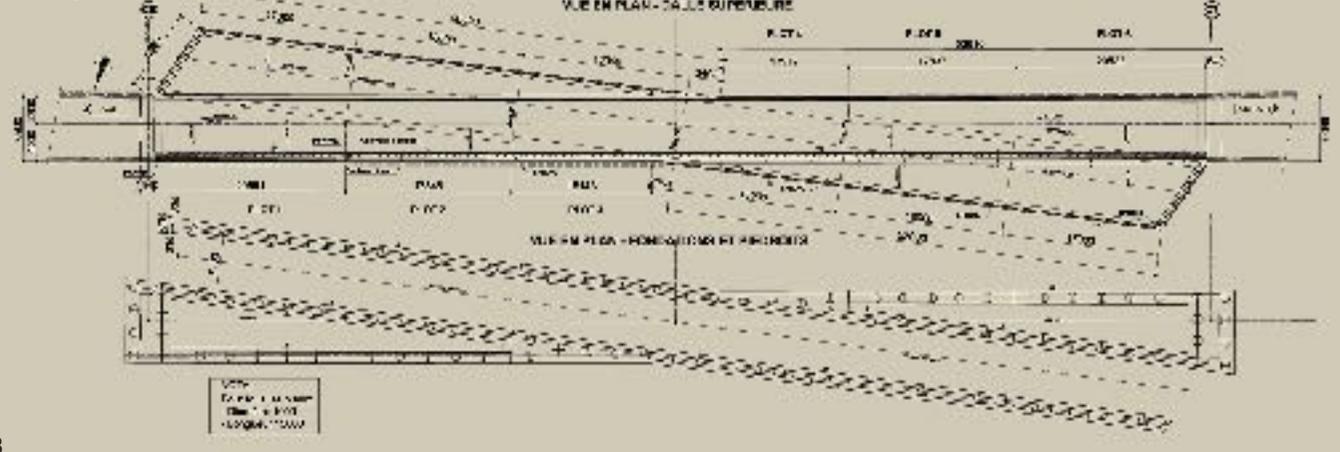


© DR

22

## SDM D'AMBARÈS

Vues en plan

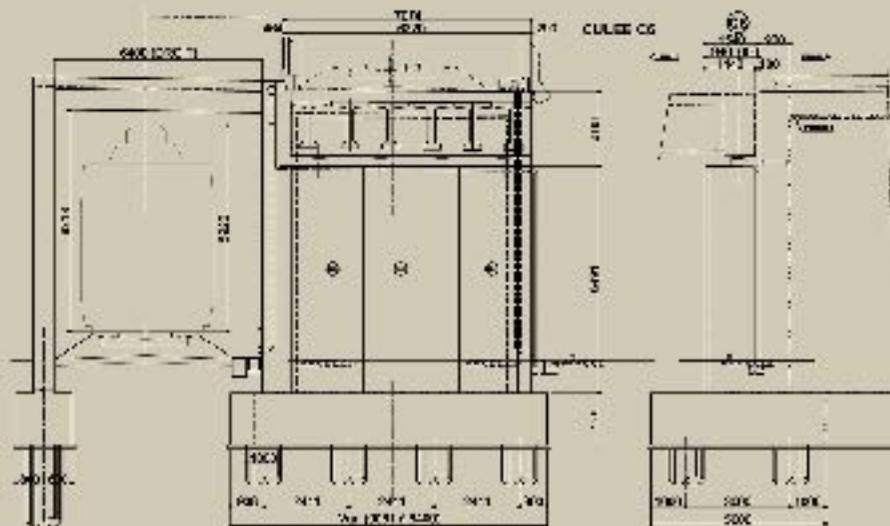


© DR

23

## SDM D'AMBARÈS

Coupe transversale sur le portail Nord (culée C6)



24 © DR

24- SDM d'Ambarès - Coupe transversale sur le portail Nord (culée C6).

25- Estacade d'Ambarès - Coupes transversales sur piles.

26- Estacade d'Ambarès - Schéma statique.

27- Le saut de mouton d'Ambarès.

24- Ambarès flyover - Cross section on the North portal (abutment C6).

25- Ambarès viaduct - Cross sections on piers.

26- Ambarès viaduct - Static diagram.

27- The Ambarès flyover.

Il n'y a pas d'interruption des bandes SES, ni de déviation en plan des pistes latérales de service. Au passage de l'ouvrage, la LGV est circulée à 350 km/h.

L'ouvrage est un portique de 110,60 m prolongé par des murs de tête en béton armé à section en L. Pour que les fouilles restent au-dessus du plan P1, les semelles sont dénuées de patin avant. Chaque piédroit est fondé sur deux files de pieux Ø 1200 mm.

### LE RACCORDEMENT D'AMBARÈS ET LA GRAVE

Les ouvrages regroupés sous le nom d'estacade d'Ambarès sont situés à

l'extrémité sud de la ligne. Dans une zone déjà fortement urbanisée, la jonction à la ligne existante doit s'insérer dans une emprise très exigüe. L'occupation du sol au sud-est de la ligne était si dense qu'il a fallu donner au raccordement une géométrie inhabituelle : les voies de la ligne nouvelle ne rejoignent pas la ligne classique par l'extérieur de sa plateforme, mais d'un seul côté, ce qui impose de dévier l'une des voies existantes pour pouvoir loger l'aiguillage (figure 19).

L'ouvrage regroupe trois structures successives (deux estacades encadrant un saut de mouton) supportant la voie V1 de la ligne nouvelle. On a

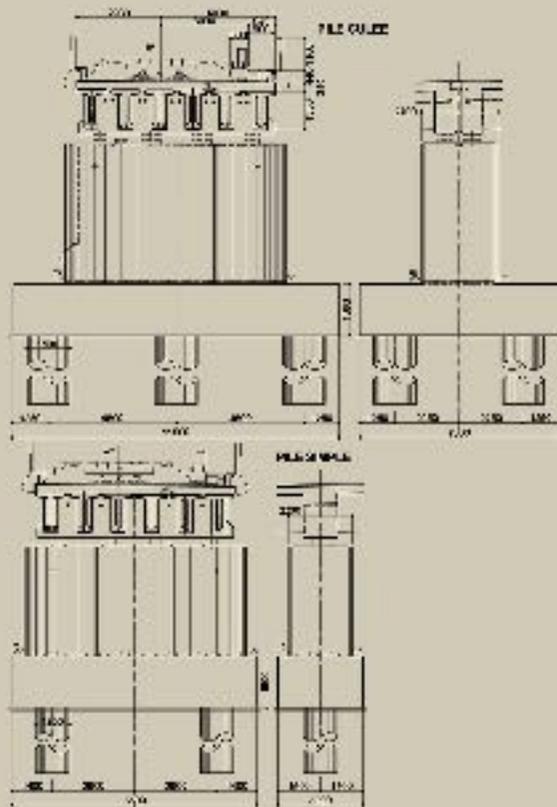
préférez ces estacades à de simples remblais qui, en raison de la compressibilité du sol, auraient été susceptibles de provoquer des tassements nuisibles à la sécurité des circulations sous la ligne existante.

Le saut de mouton est fondé sur pieux Ø 1000 mm ancrés dans le substratum marneux sain. Il est découpé dans le sens longitudinal en six tronçons.

La traverse supérieure est d'épaisseur constante, égale à 67 cm. L'épaisseur courante des piédroits est de 70 cm. Compte tenu de la complexité de la géométrie du raccordement, le saut de mouton a été conçu en trois dimensions à l'avant-projet détaillé.

## ESTACADE D'AMBARÈS

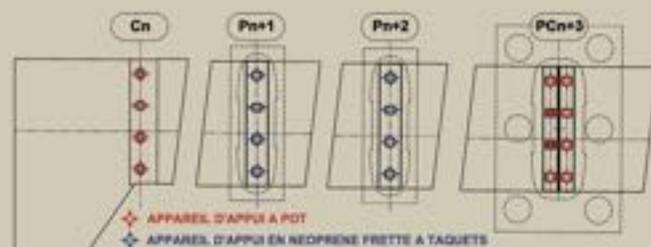
Coupes transversales sur piles



25

## ESTACADE D'AMBARÈS

Schéma statique



26



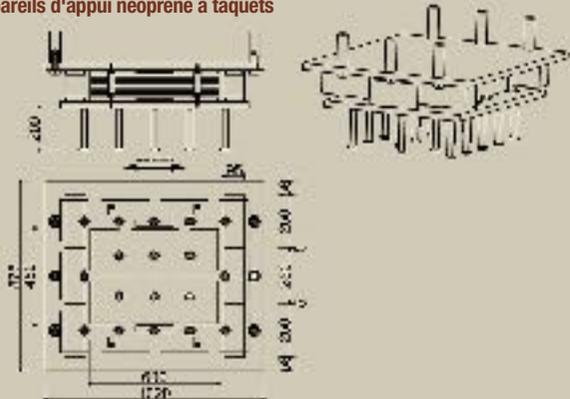
27

FIGURES 25 & 26 © DR

© P. LE DOARÉ

## ESTACADE D'AMBARÈS

Appareils d'appui néoprène à taquets



© DR 28

Les piles et les tabliers des estacades sont d'une conception similaire à celle des modules à une voie de l'estacade de La Couronne. Le schéma statique est celui représenté en figure 26. Sur les piles intermédiaires, fondées sur une unique file de pieux, on a eu recours à des appareils d'appui en néoprène fretté pour s'affranchir des efforts horizontaux longitudinaux qui auraient été générés par le frottement des appareils à pot. Le blocage des déplacements transversaux sous séisme est assuré par un appareil équipé d'un jeu de taquets de butée. □

**28- Estacade d'Ambarès - Appareils d'appui néoprène à taquets.**

**29- L'estacade d'Ambarès depuis un point de vue en enfilade côté ouest.**

**28- Ambarès viaduct - Neoprene support systems with pins.**

**29- Ambarès viaduct, enfilade view on West side.**



© P. LE DOARÉ 29

## QUANTITÉS PRINCIPALES

### POUR LES SAUTS-DE-MOUTON :

- 1 237 poutres PRAD, de section unique et de longueur variant entre 15,15 m et 16,10 m pour un poids unitaire de 11,6 à 12,3 t, et armées en moyenne par 55 à 62 kg/m<sup>3</sup> de précontrainte et 200 à 270 kg/m<sup>3</sup> d'aciers passifs
- 31 800 m<sup>2</sup> de hourdis, armés en moyenne à 180 à 210 kg/m<sup>3</sup> pour les hourdis à traverse composite et à 100-140 kg/m<sup>3</sup> pour les traverses constituées d'une dalle entièrement coulée en place
- 11 170 m de pieux

### POUR LES ESTACADES :

- 1 083 poutres PRAD, de section unique et de longueur comprise entre 21 m et 21,60 m, pour un poids unitaire de 29 à 30 t et armées en moyenne par 40 kg/m<sup>3</sup> de précontrainte et 170 à 200 kg/m<sup>3</sup> d'aciers passifs
- 28 950 m<sup>2</sup> de hourdis armés à 250 kg/m<sup>3</sup>
- 9 250 m de pieux (de diamètres 1 200, 1 500, 1 800 et 2 000 mm)

### AU GLOBAL :

- 19 7330 m<sup>3</sup> de bétons de structure
- 28 330 t d'armatures passives, 868 t d'armatures de précontrainte pour poutres
- 8 330 m<sup>2</sup> de murs de tête en terre armée, 4 150 m<sup>2</sup> de murs BA
- 2 320 poutres préfabriquées PRAD
- 20 420 m de forage pour pieux (ø 1 000, 1 200, 1 500, 1 800 et 2 000 mm)

## PRINCIPAUX INTERVENANTS

**MAÎTRISE D'OUVRAGE :** Lisea

**CONCEPTION :** Cosea SGC - Egis, Systra (Inexia)

**CONSTRUCTION :** Cosea SGI - Vinci Construction, Razel-Bec, Nge, Demathieu & Bard

**BUREAUX D'ÉTUDE D'EXÉCUTION :**

- Pour les estacades : Vinci (Cbdi, Gtm)
- Pour les sauts-de-mouton : Vinci (Isc, Cbdi), Cogeci, Artcad, Ingerop, Nge

**PRINCIPAUX SOUS-TRAITANTS :**

- Génie civil : Etpo, Sendin
- Poutres préfabriquées : Bonna Sabla, LB7 Ligérienne Bétons, Tierra Armada
- Murs TA : Terre Armée France
- Pieux : Soletanche Bachy, Botte Fondations, ProFond, Atlas Fondations, Dacquin-Infraco, Sefi
- Armatures : Sas, Amsa, Samt, Cepaba
- Garde-corps, écrans de protection : Metalset, Sler, Pont Equipement
- Appareils d'appui : Freyssinet, Etic
- Joints de structure : RCA
- Étanchéité : Eurovia, Smac, Colas, Sacan

## ABSTRACT

### SEA HSL - ENGINEERING STRUCTURES TO CROSS AND CONNECT TO THE EXISTING NETWORK

NABIL YAZBECK, EGIS JMI - GILLES CAUSSE, VINCI - BENJAMIN LUSK, EGIS JMI

For the creation of a new railway line, connecting structures are very special structures requiring a specific design. These flyovers/flyunders or viaducts are very long structures with winding alignments, which are also subjected to strong interfaces with the existing lines in service. Their design is therefore focused on a search for modularity, industrialisation, simplicity and speed of execution. □

### LAV SEA (LÍNEA DE ALTA VELOCIDAD SUR EUROPA ATLÁNTICO) - ESTRUCTURAS PARA FRANQUEAR LA RED EXISTENTE Y CONECTARSE A ELLA

NABIL YAZBECK, EGIS JMI - GILLES CAUSSE, VINCI - BENJAMIN LUSK, EGIS JMI

Durante la creación de una nueva línea ferroviaria, las obras de conexión son estructuras muy especiales que deben ser objeto de un diseño específico. Los saltos de carnero o estacadas, son estructuras muy largas con trazados sinuosos, que, además, están sometidas a importantes conexiones con las líneas existentes en explotación. Por tanto, su diseño está orientado a la búsqueda de modularidad, industrialización, sencillez y rapidez de ejecución. □



© MICHEL DENANCE

# PONT SCHUMAN À LYON - DE LA CONCEPTION À LA CONSTRUCTION

AUTEURS : PAUL SANDERS, DIRECTEUR, FLINT & NEILL - OLIVER STROSS, INGÉNIEUR CHEF DE PROJET, FLINT & NEILL - OLIVIER CANAT, INGÉNIEUR CHEF DE PROJET, AIA INGÉNIEURIE - ALEXIS PRIGENT, CHEF DE PROJET, EXPLORATIONS ARCHITECTURE - CLOTILDE ROBIN, INGÉNIEUR, FLINT & NEILL

LA STRUCTURE PONT SCHUMAN, À LYON SUR LA SAÔNE, EN DOUBLES ARCHES SURBAISSÉES ET ÉLANCÉES, EST VRILLÉE TOUT LE LONG, FAISANT VARIER SON INERTIE. LE TABLIER, SUSPENDU AUX ARCHES, PRÉSENTE UNE CONCEPTION MIXTE ACIER-BÉTON INNOVANTE. DE LA CONCEPTION À LA RÉALISATION, UN PROCESSUS TRÈS CONTRÔLÉ S'EST DÉROULÉ EN PASSANT PAR LA FABRICATION DE TÔLES GAUCHES, LEUR ASSEMBLAGE, LE TRANSPORT DES ARCHES ET DES POUTRES PORTEUSES, LEUR MISE EN PLACE ET LE COULAGE DU TABLIER DIRECTEMENT SUR LA TÔLE DE SOUS-FACE QUI A SERVI DE COFFRAGE.

## INTRODUCTION : UNE FORME COMPLEXE MAIS ÉVIDENTE

En 2009, le Grand Lyon lance un concours international pour un nouveau pont sur la Saône, accueillant circulation routière et piétonne.

L'objectif est de décongestionner les franchissements avoisinants tout en faisant partie d'un vaste plan d'aménagement des berges. La Communauté

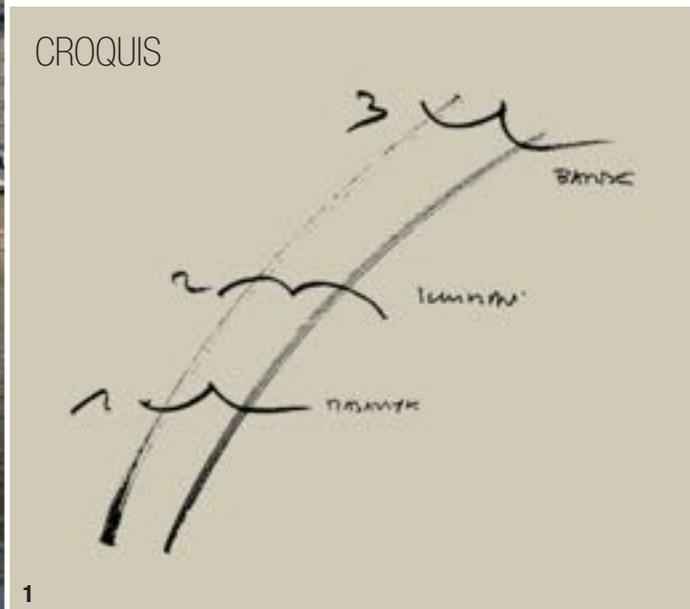
urbaine souhaite vivement améliorer l'espace public le long du fleuve et étendre la promenade depuis le centre-ville. Le nouveau pont doit traiter de manière égale les voitures, les vélos et les piétons, constituer un emblème pour Lyon et offrir aux usagers un lieu public agréable.

Très proche du pont Masaryk, le pont Schuman lui répond. Il suit son rythme avec deux travées courtes de 84 m.

À l'ancienne et imposante pile centrale, il oppose un appui dégagé avec la vue sur l'axe du fleuve.

La courbure des arcs dialogue avec celle des câbles de suspension du pont existant. La structure se pose sur le fleuve telle des ailes de mouettes stylisées. Ainsi est née la forme du pont avec ses doubles arches extrêmement élancées, sa pile centrale et son tablier ultra fin (figures 1 et 2).

L'ouvrage est aujourd'hui réalisé et en service. Il est le résultat d'un travail d'équipe, sous la houlette du Maître d'Ouvrage, entre architectes et ingénieurs, du croquis jusqu'aux détails dans un processus continu allant des études à la construction sur site en passant par la fabrication en usine et le transport sur barge pour chacune des parties du pont : les appuis, les arches, le tablier et les suspentes.



© EXPLORATIONS ARCHITECTURE

## DISPOSITIONS GÉNÉRALES TRACÉ ET PROFIL EN LONG

L'ouvrage a un tracé rectiligne entre les deux culées. La longueur totale reliant les points A et B est de 190 m. La longueur totale de l'ouvrage d'art est de 179 m.

Le profil en long du pont Schuman provient de la prise en compte des altimétries de raccordement sur les quais existants de part et d'autre de la Saône, des gabarits de navigation à franchir ainsi que des pentes réglementaires de circulation piétonne et routière, contraintes données au concours.

Le tracé, résultat d'un travail fin, est composé de plusieurs rayons et droites ajustés entre trottoir et chaussée.

Leur déclivité respecte les gabarits fluviaux en incluant les flèches à venir. Les pentes de l'ouvrage sont identiques sur trottoir comme sur chaussée sauf sur un tronçon d'une quarantaine de mètres au droit de la rive gauche où elles varient légèrement. Celle des trottoirs est toujours inférieure à 4% afin de respecter les règles d'accessibilité pour tous. Le profil en long a été contrôlé tout au long de la construction afin de préserver les gabarits qui avaient été calculés au plus juste. Toutes ces contraintes ont imposé la finesse du tablier (figure 3).

## PROFIL EN TRAVERS

Le profil en travers montre trois espaces distincts :

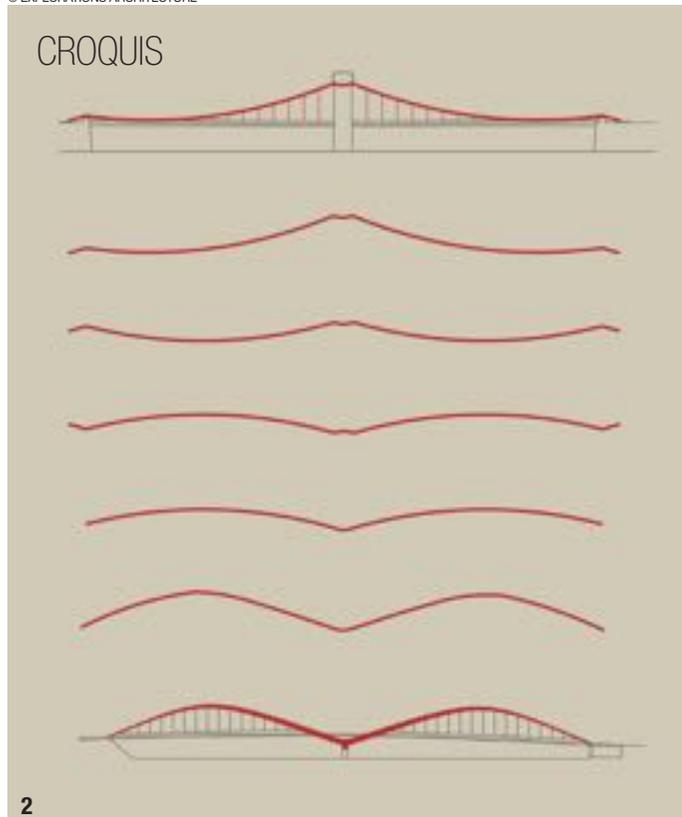
**1 & 2-  
Les premiers  
croquis.**

**1 & 2-  
The first  
sketches.**

- La chaussée centrale d'une largeur de 12 m avec quatre voies de circulation et des passages de service de 0,9 m de chaque côté ;
- Les trottoirs pour les vélos et les piétons avec une largeur minimale de 4,5 m et maximale de 6 m.

La structure principale - les caissons longitudinaux et les arches - sépare la chaussée des circulations douces, ce qui confère un sentiment de sécurité renforcé. Les trottoirs s'élargissent au centre du pont pour former des belvédères sur les rives de la Saône et les Monts d'Or. La largeur totale du tablier varie de 26 m à 30 m (figure 4).

© EXPLORATIONS ARCHITECTURE



## DESCRIPTION GÉNÉRALE ET STATIQUE

L'ouvrage est constitué de trois travées continues reposant sur quatre appuis :

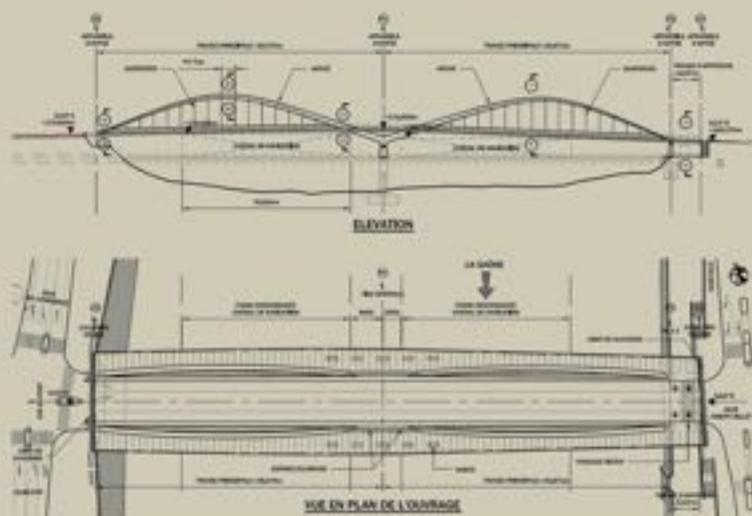
- La culée rive droite : C0,
- La pile en rivière : P1,
- La pile en berge rive gauche : P2,
- La culée rive gauche : C3.

Les deux travées principales sont des bowstrings dont les arcs se prolongent sous le tablier au droit de la pile en rivière de telle manière que la superstructure décrit une sorte de sinusoïde. Le tablier est régulier dans sa constitution longitudinale et sa géométrie en plan. Les modes doux, piétons, cycles et PMR sont portés par des caissons métalliques en console.

La structure des bowstrings est composée par des arches inclinées de 10° par rapport à la verticale, fonctionnant en arc auto-ancré.

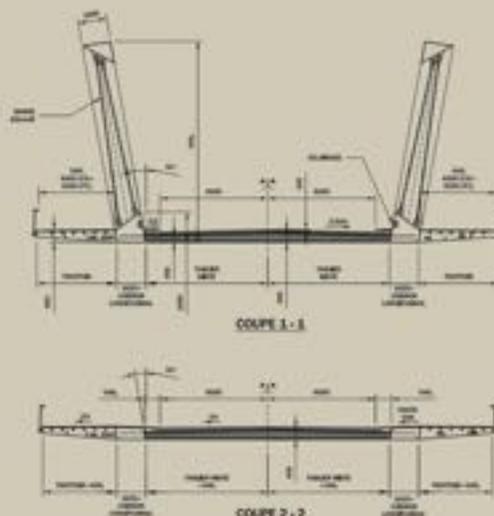
Les arches sont constituées de caissons métalliques de forme triangulaire variable. Les sections varient et tournent sur elles-mêmes afin de créer un mouvement hélicoïdal élégant. ▷

## ÉLÉVATION ET VUE EN PLAN



3

## COUPES TYPES



4

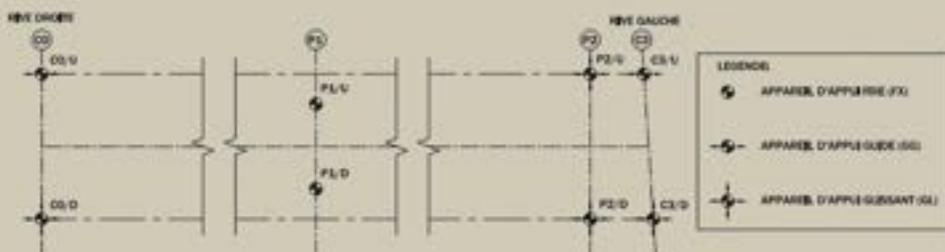
Le tirant des arcs est un caisson métallique longitudinal de forme trapézoïdale dont les parois verticales sont également inclinées de 10°. Il reçoit les charges transmises par le tablier supportant la chaussée et celles des consoles destinées aux modes doux. Ce tirant est relié à l'arche par l'intermédiaire de doubles suspentes permettant ainsi le transfert d'une partie des efforts à celui-ci.

Pour la partie de l'ouvrage où l'arche se prolonge sous le tablier et en rive d'ouvrage entre P2 et C3, le caisson trapézoïdal devient rectangulaire et assure à lui-seul le franchissement des portées. Le schéma statique de l'ouvrage est visible sur la figure 5. Le point fixe est situé sur la pile centrale en rivière. Alors que la conception préconisait qu'un seul des deux appuis soit bloqué longitudinalement et transversalement, l'entrepreneur a proposé de bloquer les deux appuis afin de mieux contrôler les contre-flèches des arches. Toutefois, cela conduit à une réaction transversale sous poids propre. Un vérinage provisoire est donc nécessaire lors du remplacement d'appuis. Sur les culées, un des deux appuis est guidé longitudinalement et l'autre est libre. Sur la pile intermédiaire, les deux appuis sont libres (figure 5).

### PILES ET FONDATIONS

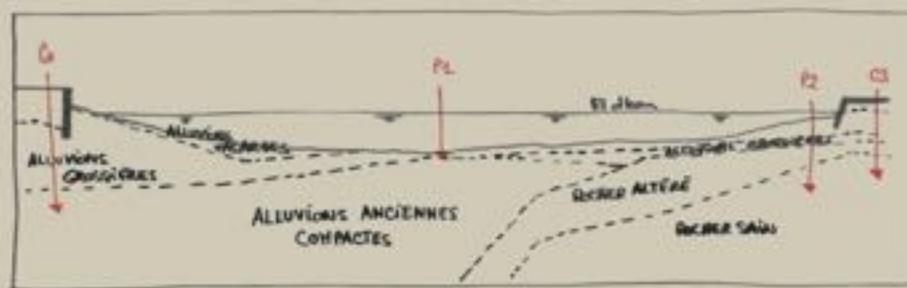
La coupe géologique est très hétérogène. Alors que le rocher remonte en rive gauche, les alluvions représentent une couche profonde en rive droite. Cela explique les différents niveaux de fondations des appuis. Tous les pieux sont forés avec tubage provisoire (figure 6).

## SCHÉMA STATIQUE



5

## COUPE GÉOLOGIQUE



6

Les culées sont creuses. Les pieux de C0 ont un diamètre de 1,40 m et une longueur de 30 m ; ils sont ancrés dans les alluvions anciennes compactes. Ceux de C3 ont un diamètre de 1,20 m de diamètre et une longueur de 15 m environ ; ils sont ancrés dans le rocher.

La pile P2 est située en rive gauche. Elle est constituée de deux parties indépendantes et identiques par rapport à l'axe de l'ouvrage. Ces deux fûts sont reliés par une semelle commune fondée sur pieux de diamètre 1,20 m, d'une longueur de 15 m environ et ancrés dans le rocher.

3- Élévation et vue en plan.

4- Coupes types.

5- Schéma statique.

6- Coupe géologique.

3- Elevation and plan views.

4- Typical cross sections.

5- Static diagram.

6- Geological cross section.

La pile P1 est la seule pile en rivière. Seule la partie supérieure du fût, en forme de V dans le prolongement des arcs de l'ouvrage est visible (figure 7). Contrairement aux autres, sa fondation est superficielle. Il s'agit d'une épaisse semelle sur gros béton et tapis drainant reposant sur les alluvions anciennes compactes. L'impact de la pile P1 en phase provisoire et définitive a été évalué par une étude hydraulique. Après réalisation du batardeau, un enrochement a été réalisé sur une distance de 10 m tout autour du batardeau afin de limiter l'affouillement en phase définitive (figure 8).

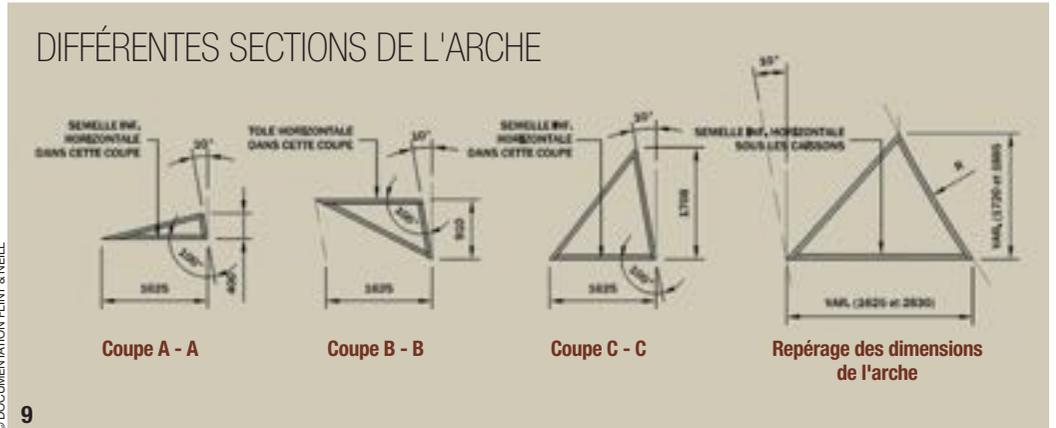
- 7- Vue 3D de la pile P1.
- 8- Batardeau autour de P1.
- 9- Différentes sections de l'arche.
- 10- Fabrication de l'arche.
- 11- Marques du chauffage lors du gauchissement.
- 12- Montage à blanc.

- 7- 3D view of pier P1.
- 8- Cofferdam around P1.
- 9- Various sections of the arch.
- 10- Arch manufacturing.
- 11- Marks from heating during warping.
- 12- Test assembly.



© DOCUMENTATION FLINT & NEILL

© DOCUMENTATION FLINT & NEILL



## LES ARCHES

Les arches sont constituées de caissons métalliques triangulaires dont les dimensions varient. Cette forme accentue l'impression d'élanement des arches en introduisant une dynamique et une accroche de la lumière évolutive le long de l'ouvrage.

### CONCEPTION ET RÉALISATION D'UNE SECTION VRILLÉE

La géométrie des arches a été complètement définie par les architectes. À partir des nombreuses coupes four-

nies, l'entreprise a créé son propre modèle 3D avec le logiciel bocad. Ce modèle a directement été utilisé pour la fabrication des tôles. Une particularité de la section triangulaire est que deux de ses trois faces sont gauches. Cela est une première pour un ouvrage d'une telle dimension. Afin de réduire les contraintes résiduelles dues au façonnage des pièces, toutes les déformations ont été effectuées à chaud. Il avait été calculé qu'un assemblage à froid pouvait entraîner des contraintes de cisaillement allant

jusqu'à 100 MPa pour le gauchissement de 1 degré par mètre, ce qui correspond à la valeur appliquée. En outre, les pièces écrites préconisaient une épaisseur suffisante pour toutes les tôles afin qu'elles restent en classe 3 selon l'Eurocode. Il s'agissait de s'assurer que les sections transversales pouvaient atteindre leur résistance élastique en fibre extrême sans risque de voilement local (figure 9). Afin de valider les méthodes de fabrication, l'entreprise de charpente, Cordioli, a réalisé des essais sur un

segment témoin de 4 m de longueur. Comme cela avait été prévu lors de la conception, à la fois un vérinage et un chauffage contrôlé des tôles ont été nécessaires pour réaliser la forme finale. Un soin particulier a été apporté par l'entreprise à la connexion entre deux segments consécutifs d'arches, afin de préserver une courbe continue (figures 10, 11 et 12). Sous le tablier, les arches forment un Y, support central. La géométrie du nœud et les épaisseurs engagées (jusqu'à 70 mm) ont nécessité des études



© DOCUMENTATION FLINT & NEILL

- 13- Détail de la pièce d'appui en Y.
- 14- Photo de la pièce d'appui en Y.
- 15- Mode de flambement.
- 16- Étude non linéaire.

- 13- Detail of Y-shaped support part.
- 14- Photo of Y-shaped support part.
- 15- Buckling mode.
- 16- Nonlinear study.

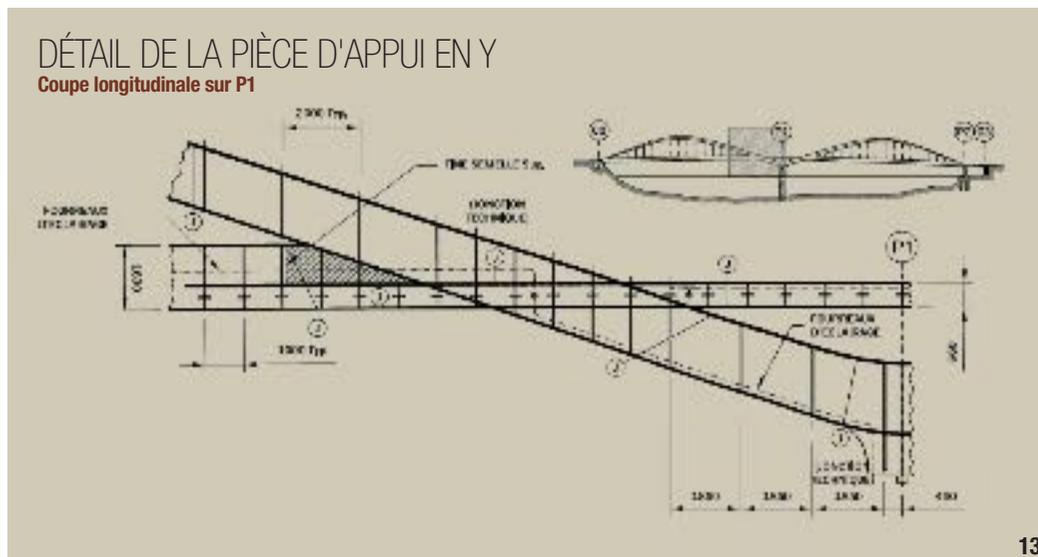
poussées lors de la conception afin de s'assurer de la faisabilité de mise en œuvre. L'entreprise a pris le relais en phase chantier en adaptant la position des raidisseurs afin de simplifier le montage (figures 13 et 14).

#### STABILITÉ ET MONTAGE

L'important élanement des arches a conduit à de nombreuses études de stabilité.

Un modèle d'études local en coques a été fait afin de valider l'hypothèse de la classe 3 pour la section gauche. En effet, les formules classiques de l'Eurocode ne prennent pas en compte le gauchissement. À partir des résultats obtenus, il n'a pas été jugé nécessaire de réaliser un modèle complet de l'arche en coques.

Une analyse modale a permis de connaître les déformées des modes de flambement (figure 15). Une analyse non linéaire, en grand déplacement, a ensuite été conduite à partir de la position déformée initiée par une imperfection calculée selon l'Eurocode. L'étude des contraintes en 3 points de la section montre quelques plastifications alors que le comportement global reste linéaire. Puis, la réponse devient non linéaire avant l'arrivée de l'instabilité à un coefficient élevé (figure 16). L'application de l'imperfection a peu d'effet sur le flambement des arches. En effet, pour un tel élanement, les déplacements élastiques au début du flambement sont bien plus importants que le défaut règlementaire introduit. Un autre modèle, fait de barres représentant les arêtes et reliées entre elles par des éléments très raides à la posi-



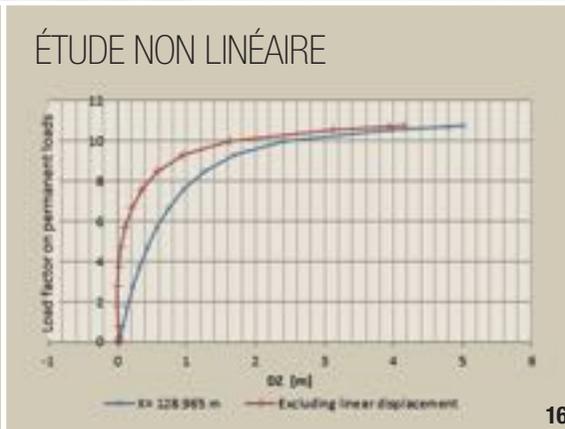
13



14



15



16

tion des diaphragmes, a été utilisé afin d'étudier la résistance au flambement en torsion. Cela a permis de valider l'hypothèse de représentation de la section par son centre de gravité alors même que les arêtes tournent autour. La stabilité des arches a également été soigneusement étudiée pour les phases provisoires du montage de la structure. À cause des limites de gabarit sous les ponts de la Saône, il est inenvisageable de transporter les arches en position verticale. Ainsi, l'entreprise de char-

pente, Cordioli, a élaboré une procédure audacieuse.

Sur l'aire d'assemblage située à une dizaine de kilomètres du chantier, les arches sont assemblées en position verticale (= position finale) afin de s'assurer de la bonne géométrie de l'ensemble. Chaque arche est soutenue par deux pivots provisoires près des extrémités. Ces pivots, composés d'une sorte de portique soudé aux poutres longitudinales du tablier et d'un bras articulé attaché à l'arche, fonction-

nent à l'aide d'un piston hydraulique permettant la rotation de l'arche. Ainsi, après assemblage, les arches ont été couchées sur la barge auprès du tablier. À l'arrivée sur site, elles ont été remises à la verticale par une opération similaire.

L'érection de chaque arche pesant 150 t a été possible sans l'intervention de grue. En outre, les contrôles géométriques ont pu être faits sur l'aire d'assemblage et non sur site où l'accessibilité était limitée (figures 17 et 18).



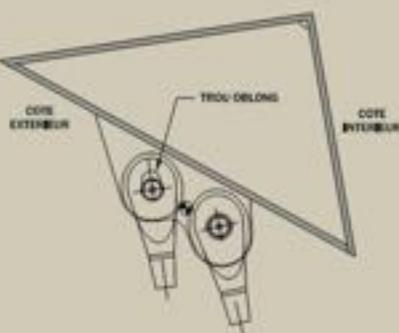
© DOCUMENTATION FLINT & NEILL  
17



18

### ANCRAGE DES SUSPENTES

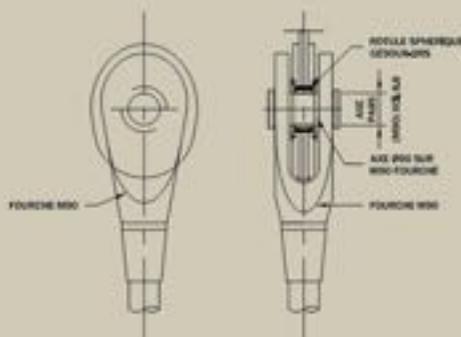
Détail chape avec trou oblong



19

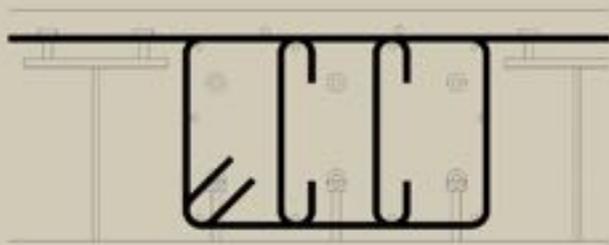
### ROTULE SPHERIQUE

Détail du dispositif d'ancrage des suspentes

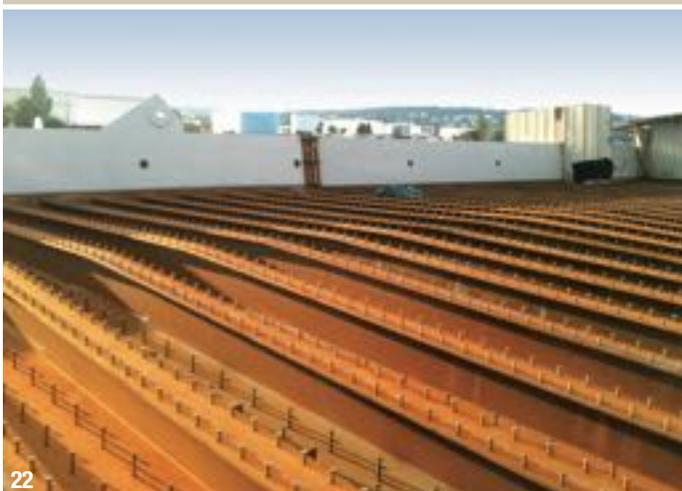


20

### PRINCIPE DE FERRAILLAGE DU TABLIER



21



© DOCUMENTATION FLINT & NEILL  
22

## LES SUSPENTES

Le tablier est suspendu aux arches par des barres de 82 mm de diamètre, réparties tous les 4 m. Les suspentes fonctionnent par paire. Cela permet de réduire les diamètres, d'opposer une force de rappel latérale aux arches et d'améliorer la redondance structurelle. Toutefois, cela augmente également l'hyperstaticité de la structure et complexifie le réglage des suspentes.

La rotation différentielle entre le tablier et l'arche charge davantage la suspente interne. Un réglage dissymétrique en faveur de la suspente externe sous charges permanentes permet qu'à l'ELU, avec les charges d'exploitation, les tensions soient similaires.

Les plus petites suspentes pourraient se détendre sous certains cas de charge. Afin d'éviter leur flambement si elles entrent en compression, un trou oblong a été prévu à une extrémité. Un recouvrement en téflon de l'axe a été ajouté afin d'améliorer la durabilité du jeu.

Une autre problématique du dimensionnement des suspentes a été la prise en compte des rotations hors plan des attaches. Les plaques d'ancrages sont orientées perpendiculairement aux poutres longitudinales. Ce choix conduit à un détail plus élégant et permet l'utilisation d'une seule plaque par paire de suspentes. Un blocage longitudinal a été exclu par le calcul car les rotations engendrées par les tolérances de construction et/ou les mouvements différentiels entre le tablier et l'arche sont trop importants pour être résistés en flexion dans la plaque d'ancrage. Ainsi, des rotules sphériques ont été mises en œuvre à chaque extrémité (figures 19 et 20).

## LE TABLIER

### LA DALLE MIXTE : FINESSE ET SÉCURITÉ DE MISE EN ŒUVRE

Les gabarits de navigation, conjugués avec la pente maximale autorisée pour les déplacements des personnes à mobilité réduite, ont imposé la finesse du tablier.

La solution adoptée est innovante grâce à son fonctionnement mixte. Deux caissons longitudinaux sont placés de chaque côté de la chaussée. Ces poutres ont une section trapézoïdale. Elles constituent à la fois les tirants des arches et la structure porteuse du tablier fait de poutrelles métalliques enrobées dans du béton.

Ainsi, la hauteur maximale de la dalle est de 600 mm au maximum (+ 100 mm de revêtement).

- 17- Pivot provisoire et vérin.
- 18- Rotation de l'arche.
- 19- Ancrage des suspentes.
- 20- Rotule sphérique.
- 21- Principe de ferrailage du tablier.
- 22- Connecteurs.

- 17- Temporary pivot and jack.
- 18- Arch rotation.
- 19- Suspenders anchoring.
- 20- Spherical ball joint.
- 21- Deck reinforcement technique.
- 22- Connectors.



23

© DOCUMENTATION FLINT & NEILL

L'aile inférieure des poutrelles est une tôle continue qui fait office de coffrage durant la construction et qui renforce le comportement mixte de la dalle en réduisant le besoin de ferrailage passif. Le champ d'efforts dans le tablier est complexe.

Ce dernier est soumis, bien évidemment, à une flexion générale sous trafic ainsi qu'à un poinçonnement sous la charge des roues. En outre, il participe également au rôle de tirant par sa liaison avec les poutres longitudinales. Cette traction s'accompagne d'un cisaillement en plan, effet du traînage de cisaillement.

Les efforts provenant du tirant métallique sont transférés au béton par les connecteurs soudés aux caissons longitudinaux. La traction et le cisaillement en plan sont alors partagés entre la sous-face métallique de la dalle et le ferrailage supérieur.

Les connecteurs soudés à la tôle en sous-face permettent le comportement mixte de la dalle, transversalement et longitudinalement.

Les cadres d'armatures d'effort tranchant liaisonnent la nappe inférieure constituée de la tôle de sous-face à la nappe supérieure de ferrailage (figures 21 et 22).

Toute la partie métallique du tablier (poutres longitudinales, tôle de sous-face et connecteurs) a été transportée sur site après assemblage. Ainsi, le coulage du béton a pu se faire en toute sécurité, une fois les arches mises en place (figures 23 et 24).

#### LES TROTTOIRS : UN LONG CAISSON PLAT EN CONSOLE

Chaque espace piéton, de part et d'autre de la chaussée, est porté par un long caisson plat en console sur les poutres longitudinales. De hauteur variable, de 660 mm à 350 mm, l'intérieur des caissons est inaccessible. Après discussion avec le client, il a été décidé de considérer 0,5 mm d'épaisseur sacrificielle pour autoriser une corrosion interne jusqu'à épuisement de l'oxygène interne. Des diaphragmes transversaux, tous les 2 m, coïncident avec ceux de la poutre longitudinale.

#### 23 & 24- Transport fluvial de la charpente.

#### 23 & 24- River transport of frame.

La sous-face est raidie par des raidisseurs simples soudés également aux diaphragmes. À l'inverse, les raidisseurs de la tôle supérieure, qui est celle de fermeture du caisson, sont discontinus. Ils ont donc été conçus

sous forme d'augets afin de leur donner une résistance au déversement.

Toute la structure des trottoirs a été dimensionnée pour permettre le passage des camions en charge de l'entretien et également pour les nacelles négatives d'inspection.

#### CONCLUSION

Le résultat final est un ouvrage très proche de l'image du concours (figures 25 et 26). Les problématiques de constructibilité et de mise en œuvre ont été prises en compte dès la conception. Le respect de l'ar-



24

© DOCUMENTATION FLINT & NEILL



25



26

chitecture et le souci de la qualité ont été primordiaux pour les entreprises. Chacun a apporté son savoir-faire. Et même si le projet n'a pas été un long fleuve tranquille, la Saône n'est tout de même pas aussi agitée que le Rhône et l'inauguration a eu lieu avec peu de retard le 5 novembre 2014. □

**25 & 26- Perspective concours et vue de l'ouvrage achevé.**

**25 & 26- Design contest perspective and view of finished structure.**

## CHIFFRES CLÉS

**DURÉE DES ÉTUDES :** septembre 2010 à janvier 2012

**DURÉE DES TRAVAUX (PARTIE PONT) :** août 2012 à octobre 2014 (26 mois)

**DATE D'INAUGURATION :** 5 novembre 2014

**TONNAGE DE CHARPENTE :** 2 800 t

**VOLUME DE BÉTON :** 4 000 m<sup>3</sup>

**CHAUSSÉE :** 2 250 m<sup>2</sup>

**ASPHALTE SUR MODE DOUX :** 2 000 m<sup>2</sup>

**COÛT GLOBAL DES TRAVAUX DE L'OUVRAGE**

**(Y COMPRIS TRAVAUX FLUVIAUX PRÉALABLES) :** 28 M€ HT

## PRINCIPAUX INTERVENANTS

### MAÎTRISE D'OUVRAGE :

- Grand Lyon : Direction de la Voirie - Service Grands Projets

### MAÎTRISE D'ŒUVRE :

- Bureau d'Études Conception Charpente, Mandataire : Flint and Neill
- Bureau d'Études Génie Civil et travaux fluviaux, Direction des travaux : AIA-Ingénierie
- Architecte : Explorations Architecture
- Éclairagiste : Les Eclairagistes Associés

### ENTREPRISES :

- Génie Civil, Mandataire : Gtm TP Lyon
- Charpente : Cordioli & C
- Travaux fluviaux et ouvrages en pierre : Tournaud
- Citéos

### BUREAUX D'ÉTUDES D'EXÉCUTION :

- Charpente : Seteco
- Génie Civil : Vcf
- Méthodes : R&D Systems

### CONTRÔLE EXTÉRIEUR :

- Charpente : Ioa
- Génie Civil : Egis

## ABSTRACT

### SCHUMAN BRIDGE IN LYON - FROM DESIGN TO CONSTRUCTION

P. SANDERS, FLINT & NEILL - O. STROSS, FLINT & NEILL - O. CANAT, AIA INGÉNIERIE - A. PRIGENT, EXPLORATIONS ARCHITECTURE - C. ROBIN, FLINT & NEILL

**Schuman Bridge communicates with the Masaryk foot bridge.** *The two main spans are bowstrings whose arches extend under the deck at the level of the pier in the river in such a way that the superstructure describes a sort of sinusoid. The arches are twisted and their execution required the use of special methods for panel warping. Their stability was engineered in the final phase and during construction at the time of their rotation. The deck under the pavement is a composite slab while the footpaths are cantilevered steel box girders. Execution of each part of the structure forms part of a continuous process, from design engineering through manufacture in the factory and complex transport by barge through the city centre, to construction on site.* □

### PUENTE SCHUMAN EN LYON - DEL DISEÑO A LA CONSTRUCCIÓN

P. SANDERS, FLINT & NEILL - O. STROSS, FLINT & NEILL - O. CANAT, AIA INGÉNIERIE - A. PRIGENT, EXPLORATIONS ARCHITECTURE - C. ROBIN, FLINT & NEILL

**El puente Schuman se complementa con la pasarela Masaryk.** *Los dos tramos principales son bowstrings cuyos arcos se prolongan bajo el tablero a la derecha del pilar en el río de manera que la superestructura describe una especie de forma sinusoidal. Los arcos están retorcidos y su realización requirió métodos especiales durante el alabeo de las chapas. Se ha estudiado su estabilidad en fase definitiva y en construcción durante su rotación. El tablero bajo la calzada es una losa mixta mientras que las aceras son cajones metálicos en voladizo. La realización de cada tramo de la obra forma parte de un proceso continuo de estudios, desde la construcción in situ, pasando por la fabricación en planta y un transporte complejo en barcaza a través del centro ciudad.* □



1

© DRAGAGES - CHINA HARBOUR - VSL JOINT VENTURE

# LE PONT DE HONG-KONG MACAO

AUTEURS : YVES RIALLAND, DIRECTEUR TECHNIQUE, BOUYGUES-TP - CHENTHURAN VILVARAJAH, CHEF DE GROUPE TRAVAUX, BOUYGUES-TP - VALÉRY PREMAUD, CHEF DE GROUPE ÉTUDES, BOUYGUES-TP

**LE CONTRAT HONG KONG LINK ROAD 09 FAIT PARTIE DU PROJET DE LIAISON ENTRE HONG KONG ET ZHUHAI, SOIT 9,4 KM DE TABLIER SUR UNE LONGUEUR TOTALE DU PROJET DE 42 KM. CONSTITUÉ DE DEUX CAISSONS RELIÉS AU NIVEAU DU SÉPARATEUR CENTRAL TYPE DBA, LE PONT ROUTIER PORTE DEUX FOIS TROIS VOIES POUR UNE VITESSE LIMITÉE À 100 KM/H. LES LIMITES DU PROJET SONT : COTÉ PILE P00, LA FRONTIÈRE DE LA RÉGION ADMINISTRATIVE DE HONG KONG HKSAR, ET LA CULÉE C115, QUI CONSTITUE L'ENTRÉE EN TERRE DU TUNNEL DU CONTRAT HKLR03. L'OUVRAGE DÉGAGE DEUX PASSES NAVIGABLES EN MER DE 100 M DE LARGE POUR 42,50 M DE HAUT ET UNE PASSE NAVIGABLE DE 46 M DE LARGE POUR 15,50 M DE HAUT DANS LE CHENAL QUI LONGE L'AÉROPORT (figure 2).**

## LE PROJET DU PONT DE HONG-KONG MACAO

Constitués de 5 697 voussoirs préfabriqués en béton précontraint, les 19 viaducs séparés par des piles culées portent :

- Des travées égales de l'ordre de 75 m en mer ;
- Des travées de l'ordre 65 m pour les parties à terre le long de l'aéroport ;

→ Des travées de 150 m autour des passes navigables en mer ;

→ Des travées de 165 m ou 180 m pour franchir le chenal.

Les piles, en grande partie préfabriquées, sont en béton armé ou précontraint. Les semelles affleurent en mer, et ne laissent pas paraître les pieux sous les plus grandes marées. Elles sont pour la plupart inexistantes sur les parties à terre, la colonne se prolongeant par un pieu unique.

### 1- La logistique.

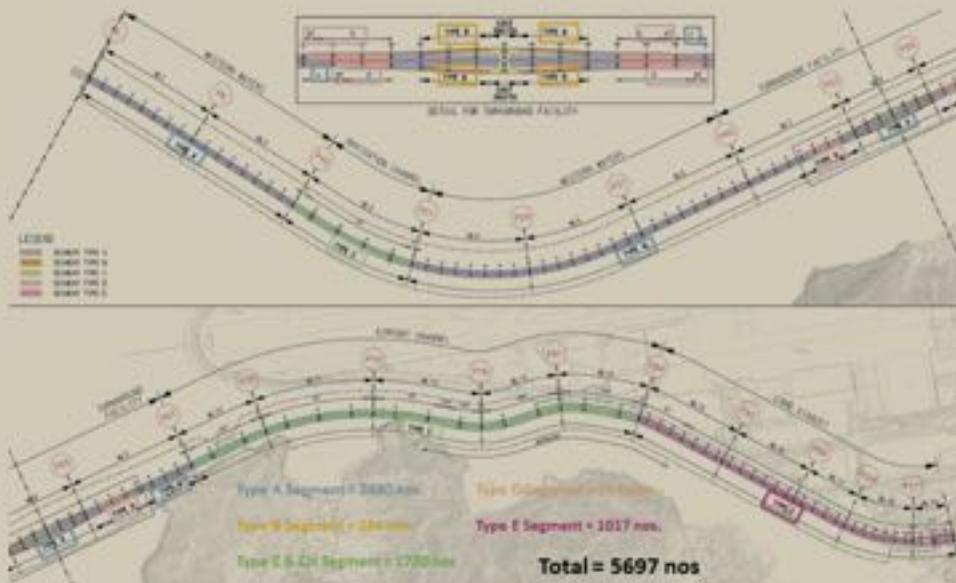
#### 1- Logistics.

Enfin, dans le chenal, elles sont noyées. Les pieux au nombre de 725 ont, suivant les cas, un diamètre de 2,30 m, 2,50 m, ou 2,80 m

et s'ancrent dans le rocher. Les plus longs peuvent atteindre 100 m.

Le contrat de Conception/Construction a été signé le 31 mai 2012 entre le client Hong Kong Highways Department et le groupement d'entreprises Dragages-Hong-Kong, filiale du groupe Bouygues, China Harbour et Vsl, pour un montant de 12,86 milliards de dollars de Hong Kong (soit au cours de l'époque 1,3 milliards d'euros).

## RÉPARTITION DES TYPES DE VOUSOIR LE LONG DU PROJET



La préfabrication apporte de ce point de vue un avantage indéniable, limitant les besoins en personnel, sachant que les ressources en main d'œuvre sont très limitées dans la région de Hong Kong, en particulier en raison du nombre important des chantiers qui sont en cours (figure 1).

### TROIS CHANTIERS EN UN LES OUVRAGES EN MER

Les viaducs courants en mer sont constitués de huit travées sensiblement égales de 75 m. La chaussée a une largeur de 14,80 m pour chacune des deux directions de circulation et comprend un séparateur central.

Le tablier, constitué des deux caissons de 4 m de hauteur, est porté par deux colonnes séparées reposant sur deux semelles de forme sensiblement triangulaire, qui reprennent chacune trois pieux de 2,30 m de diamètre.

Les semelles, de 3,95 m d'épaisseur, sont systématiquement bétonnées en place à l'intérieur d'une coque préfabriquée.

#### Les fondations

Le profil géologique présente en partie supérieure des couches compressibles (dépôts marins, alluvions) qui peuvent produire du frottement négatif, plus profondément du granite altéré et enfin par du granite sain.

L'application des règlements pour les fondations à Hong Kong impose systématiquement d'aller au rocher, ce qui dans certains cas aurait produit des pieux de plus de 100 m de profondeur, donc au-delà de la limite de faisabilité technique. Sur ces cas spécifiques, l'utilisation de pieux frottants a été autorisée, avec des paramètres de calcul qui ont été validés par des essais sur des pieux équipés de cellules d'Osterberg.

2

### LES CONTRAINTES ENVIRONNEMENTALES

Hormis le respect de spécifications rigoureuses en termes de bruit, en particulier la nuit, ou encore en termes de pollution avec l'interdiction de toute forme de rejet, la partie maritime est une zone d'habitat pour une espèce endémique de dauphins blancs ce qui rend impossible les travaux de forage de pieux pendant toute la période de leur reproduction, à savoir de mai à juin.

### LES CONTRAINTES CLIMATIQUES

Hong Kong est sujet aux cyclones tropicaux, et les typhons sont fréquents sur sensiblement la moitié de l'année, soit de mai à octobre. Le niveau T3 impose la mise en sécurité des moyens mari-

2- Répartition des types de voussoir le long du projet.

3- Coque préfabriquée triangulaire.

4- Éléments de pile à la préfabrication.

2- Distribution of types of voussoir along the project.

3- Prefabricated triangular shell.

4- Pier elements undergoing prefabrication.

times et de manutention et entraîne la suspension des travaux.

### LES CONTRAINTES LIÉES À LA PROXIMITÉ DE L'AÉROPORT DE HONG KONG

La zone de l'aéroport est contrainte à des restrictions de hauteur et de gabarit aérien, ce qui rend impossible l'utilisation de moyens de manutention tels que les grues ou poutres de lancement d'une taille non conforme.

### LES CONTRAINTES LOGISTIQUES

Les ouvrages en mer imposent des moyens maritimes importants, en particulier pour la réalisation des appuis et des fondations, ou encore avec la fabrication des bétons sur barge en mer.



3

4



5

© DRAGAGES - CHINA HARBOUR - VSL JOINT VENTURE

Les coques préfabriquées sont réalisées dans la région de Canton et acheminées sur leur lieu de pose par bateau. Elles ont un poids de 230 t pour les semelles courantes à trois pieux (figure 3) et jusqu'à 450 t pour les semelles à six pieux.

#### Description des piles

Les dimensions extérieures des piles sont de 5 m dans la direction transversale et de 3,2 m dans la direction longitudinale.

Elles sont pleines et coulées en place sur P00 ainsi que de P45 à P68, préfabriquées et creuses pour les autres colonnes des viaducs courants en mer (figure 4).

Les voussoirs des colonnes sont à joints conjugués et sont justifiés suivant les mêmes critères que les voussoirs préfabriqués du tablier.

Les colonnes nécessitent donc des clouages permanents qui s'ancrent soit dans la semelle, soit dans la première levée de pile qui est coulée en place. Le nombre maximum de boucles qui viennent s'ancre dans la semelle est de 6, et 6 également pour la première levée coulée en place. Les unités sont des 22T15.

En tête, ces câbles s'ancrent d'une façon générale dans la tête de pile préfabriquée, et les ancrages en phase de service sont noyés dans le béton de deuxième phase coulé en place.

#### Description des tabliers

Les fléaux des travées en mer sont constitués de 2x10 voussoirs, plus deux demi-voussoirs sur piles.

Le câblage intérieur est composé de câbles 19T15.

La précontrainte extérieure est constituée de 2 paires plus une paire additionnelle de câbles 31T15, déviée sur les voussoirs sur piles et sur les voussoirs déviateurs.

La pose se fait par encorbellements successifs, soit avec la poutre de lancement LG2 (800 t) (figure 5) soit avec une chèvre de levage « LF3 » (100 t).

#### LES GRANDES TRAVÉES, INCLUANT ML3 ET L'AIRPORT CHANNEL

Les grandes travées correspondent aux viaducs ML3 et ML10 à ML14.

#### Standardisation des coffrages des tabliers

Les portées principales de ces viaducs sont de 150 m, 165 m et 180 m.

5- Lanceur LG2.

6- Doublet de piles.

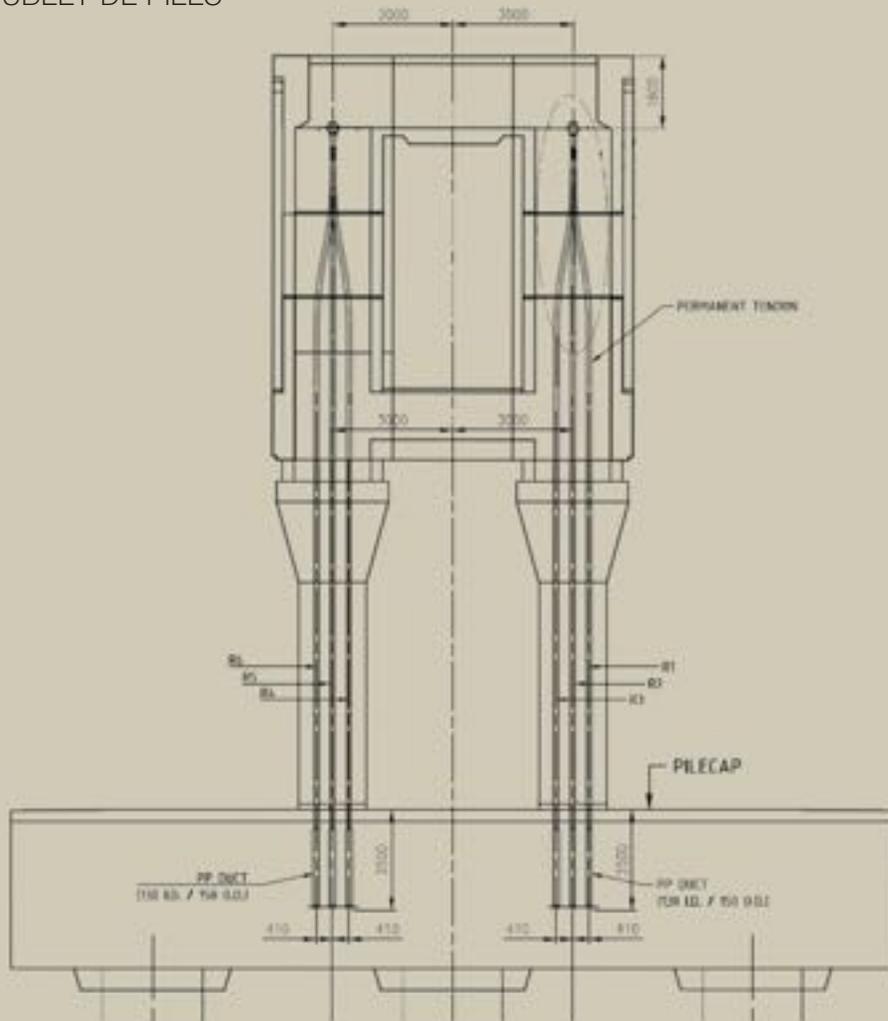
5- LG2 launcher.

6- Doublet on piers.

À titre d'exemple le viaduc ML10 possède 3 travées = 115 m + 180 m + 115 m = 410 m. Il est composé de 2x112 voussoirs courants, de 2x2 voussoirs sur culée de 2,5 m de long et de 2x2 voussoirs sur piles de 9 m de long.

Les câbles de fléau nécessaires à l'assemblage des voussoirs successifs sont

#### DOUBLET DE PILES



6

© DRAGAGES - CHINA HARBOUR - VSL JOINT VENTURE



© DRAGAGES - CHINA HARBOUR - VSL JOINT VENTURE  
7

constitués d'unités 19T15 et 27T15. Les câbles-éclisses qui solidarissent entre eux les fléaux sont également constitués d'unités 27T15. Les câbles extérieurs qui règnent sur une ou deux travées, sont ancrés sur les voussoirs sur pile et sont déviés au niveau des voussoirs déviateurs (2 par travée). Ils sont constitués d'unités 31T15. Ces câbles sont démontables et remplaçables.

#### Description des piles

Les piles culées des grandes travées sont des piles rectangulaires pleines coulées en place excepté P16 et P21 sur ML3 qui sont des piles préfabriquées creuses et précontraintes verticalement.

Le tablier est encastré sur les piles principales qui sont des doublets de piles (figure 6). Ces piles sont précontraintes verticalement et coulées en place. Elles possèdent 3 types de sections (6,4 m x 1,7 m / 6,4 m x 2,2 m / 7 m x 2,8 m), les piles les plus courtes (celles de ML10) ont la plus petite section, afin de donner autant de souplesse que possible à la structure en portique longitudinal.

Ces piles sont fondées sur pieux de diamètres 2,5 m et 2,8 m. Les longueurs de pieux sont variables de 10 m à 45 m en fonction du contexte géotechnique. Les variations linéaires (contraction/dilatation thermique et surtout retrait + fluage) qui induisent un raccourcissement du tablier, génèrent des

#### 7- Chèvre de levage LF1.

#### 8- Coffrage de portique au niveau de P98.

#### 7- LF1 derrick.

#### 8- Portal structure formwork at the level of P98.

efforts élevés en tête et en pied des piles. La solution retenue consiste à vériner avant le clavage pour équilibrer les moments locaux en tête et en pied de pile.

#### Méthodes de réalisation

La pose des voussoirs du tablier se fait à la chèvre de levage. Il y a 2 types de chèvres, la LF1 (figure 7) pesant 275 t et qui peut soulever des voussoirs de 220 t et la LF3 de 100 t d'une capacité de 130 t.

#### LES OUVRAGES À TERRE, OU ENCORE « LAND SECTION »

Les ouvrages à terre correspondent à la partie du projet longeant l'île artificielle de l'aéroport de Hong Kong, entre P84 (interface avec l'Airport Channel) et P115. Les contraintes sont les suivantes dans cette zone : proximité avec l'aéroport nécessitant un ouvrage bas, présence de nombreux réseaux (en particulier un réseau de kérosène), proximité et passage au-dessus de routes et fondations/appuis dans une digue en rocher.

L'ouvrage est constitué de 5 viaducs successifs, de ML15 à ML19, d'une longueur totale de 1,7 km. Le nombre de travées varie de 4 à 8, en fonction des contraintes au sol telles que les routes et les réseaux. Les travées principales ne sont pas régulières et varient entre 55 m et 65 m. Le tablier est constitué d'un bi-caisson entre P84 et P111 et d'un tri-caisson de P111 vers P115. Les voussoirs ont une hauteur courante de 3,20 m et une largeur de 16,97.

Les appuis de la superstructure sont des portiques en béton armé (figure 8), i.e. une poutre transversale reposant sur deux piles et reliant les deux tabliers. Les piles se prolongent sur des pieux de 3 m de diamètre fichés au rocher. Cette solution technique permet d'éviter la semelle en béton armé difficile à réaliser sous le niveau de la mer et dans la digue.

© DRAGAGES - CHINA HARBOUR - VSL JOINT VENTURE



8

Les voussoirs amenés par barges sont déchargés via une installation dédiée qui est un lanceur fixe sur deux tours en acier (figure 9).

La pose du tablier s'effectue par encorbellements successifs avec un lanceur (Launching Girder 1) de 165 m de long et représentant 1 000 t d'acier.

## LES PARTICULARITÉS DU DESIGN

### LE SÉISME

La conception parasismique de ce projet est une première à Hong Kong. Jusqu'alors, le séisme était en effet pris en compte en suivant les préconisations du HKSDM qui consistent à prendre 5% du poids en horizontal. Dans notre cas, il a été demandé d'appliquer l'EC8 avec 3 niveaux de séisme. Le niveau le plus élevé est un séisme de période de retour de 2 475 ans avec une accélération  $a_g = 2,1 \text{ m/s}^2$ .

### LE VENT

Les typhons sont une réalité à Hong Kong et des phases de construction critiques peuvent avoir lieu en période cyclonique. Il a donc été décidé d'analyser les phénomènes aérodynamiques sur les viaducs à grandes travées en phase de service et de construction. La vitesse de référence du vent prise en compte est de 38,7 m/s à 10 m au dessus du niveau de la mer pour une période de retour de 50 ans. Une simulation en soufflerie 2D faite par le CSTB a permis de déterminer les coefficients aérodynamiques du pont et de calculer les déplacements sous détachement tourbillonnaire.

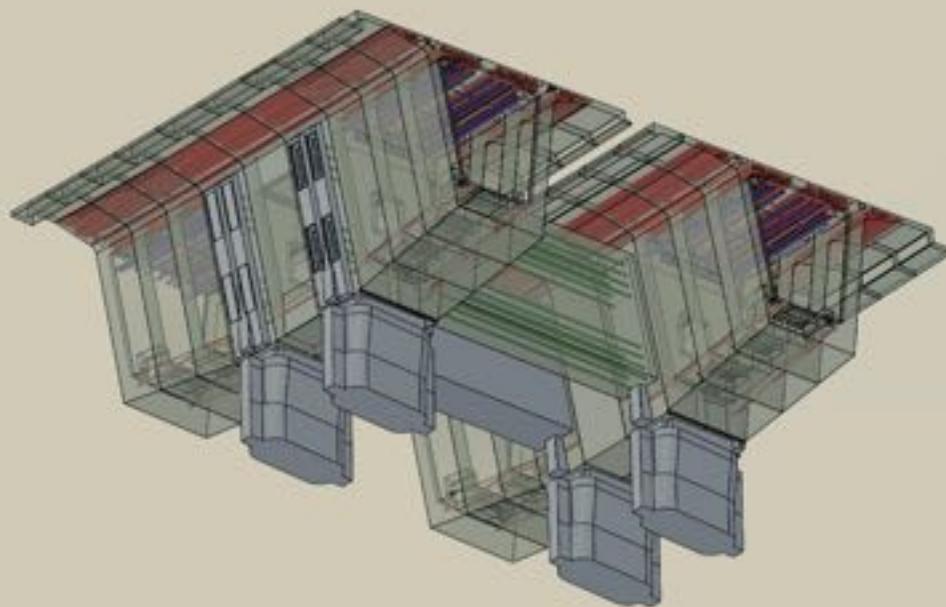
### LA DURABILITÉ

Du fait du contexte marin agressif, la durabilité est une contrainte forte du projet dont la durée de vie est de 120 ans. La solution retenue pour éviter les problèmes de corrosion est l'utilisation d'acier inox sur le premier lit d'armatures horizontales et verticales ainsi que les épingles. Ce principe est systématiquement utilisé pour le ferrailage des pieux/semelles et piles dans les zones de marnage et d'éclaboussures.



9 © DRAGAGES - CHINA HARBOUR - VSL JOINT VENTURE

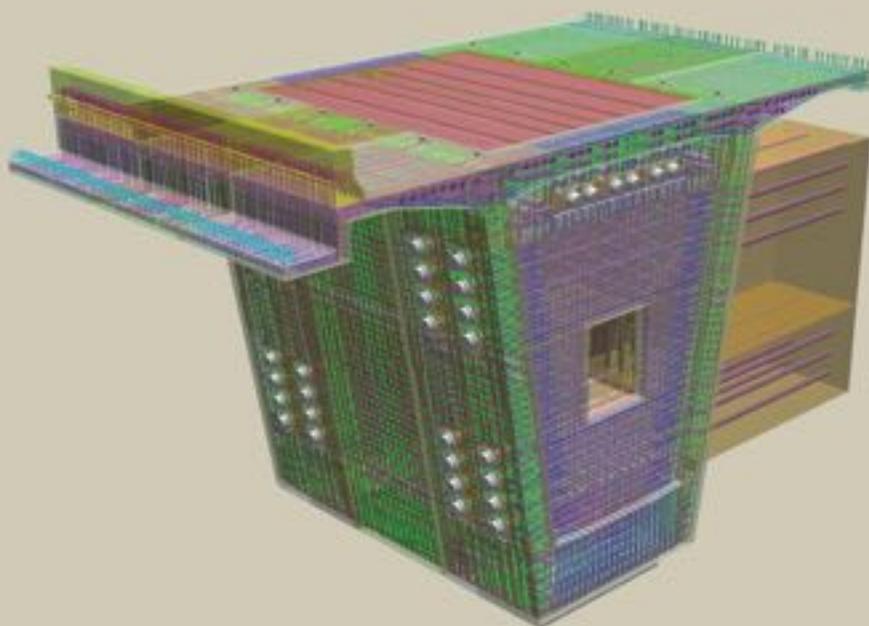
## VOUSSOIR SUR PILE DES GRANDES TRAVÉES



10

© DRAGAGES - CHINA HARBOUR - VSL JOINT VENTURE

## FERRAILLAGE 3D DU VOUSSOIR SUR PILE SOUS ALLPLAN



11

© DRAGAGES - CHINA HARBOUR - VSL JOINT VENTURE

9- Déchargement des voussoirs.

10- Voussoir Sur Pile des grandes travées.

11- Ferrailage 3D du Voussoir Sur Pile sous Allplan.

9- Unloading segments.

10- Segment on pier for large spans.

11- 3D reinforcement of segment on pier under Allplan.



12

© DRAGAGES - CHINA HARBOUR - VSL JOINT VENTURE

## LES CHALLENGES LES GRANDES TRAVÉES PRÉFABRIQUÉES

La portée de 180 m constitue un record du monde pour les ponts à voussoirs préfabriqués. La hauteur est de 10 m sur appui et de 4 m en travée.

L'élancement de 1/18 sur appui et 1/45 en travée correspond à la limite basse des valeurs usuelles, ce qui se justifie du fait des conditions d'appui (encastrement qui soulage la section à mi travée).

Un béton C50/60 a été adopté pour les tabliers et les piles des viaducs à grandes travées.

## LES GRANDS VOUSOIRS SUR PILES

Le Voussoir Sur Pile (VSP) est l'un des éléments les plus complexes du projet (figure 10).

Le VSP de 10 m de hauteur est constitué par trois voussoirs préfabriqués de 3 m de long chacun. Les trois voussoirs préfabriqués assemblés constituent le coffrage extérieur pour la réalisation de la partie coulée en place du VSP.

12- Vue aérienne de l'usine de préfabrication des voussoirs.

12- Aerial view of the voussoirs prefabrication plant.

## Connexion partie préfabriquée/ partie coulée en place

La solution retenue a été de créer des surfaces rugueuses au moyen de clés de cisaillement béton analogues à celles utilisées entre voussoirs à l'interface éléments préfabriqués/éléments coulés en place.

Les efforts de cisaillement résultant des calculs étant élevés, il a été nécessaire de mettre en place une précontrainte transversale (16\*31T15S) au niveau des deux entretoises, qui comprime l'interface partie préfabriquée/partie coulée en place.

## Les modèles de calculs

Les VSP ont fait l'objet de modélisation 2D et 3D aux éléments finis sous Sofistik et Ansys, permettant de s'assurer de l'intégration correcte de l'ensemble des phénomènes agissant sur ces éléments fortement sollicités ; les résultats ont été comparés à des mécanismes de bielles-tirants permettant d'isoler les phénomènes en présence.

## Ferraillage des VSP

Les plans de ferraillage des VSP ont été réalisés en 2D avec le logiciel Adfer. Les nombreuses interférences tridimensionnelles (câblage de tablier, de pile, d'entretoises, intersections de ces différents éléments, ouvertures, précontraintes temporaires) ont conduit à vérifier la faisabilité du ferraillage en 3D avec le logiciel Allplan (figure 11).

## LA PRÉFABRICATION DES VOUSOIRS

Au vu du caractère maritime de l'ouvrage, de sa longueur exceptionnelle et des contraintes environnementales, la préfabrication est apparue comme la solution la plus adaptée, aussi bien

pour les travées courantes que pour les grandes travées. La préfabrication a été entièrement confiée à l'entreprise chinoise China Construction Communication Company 2, représentant un total de 289 000 m<sup>3</sup> de béton et 59 000 t d'acier. Un atelier de préfabrication a été spécifiquement installé pour ce projet en Chine continentale, à Zhongshan, à environ 100 km du chantier. La difficulté principale de la préfabrication réside dans le grand nombre de types de voussoir à fabriquer, qui sont au nombre de cinq, types A à E. Certains types ont été élargis afin de satisfaire les critères de visibilité entre P77 et P85, donnant les types CV/CHV et EV. Les principales caractéristiques des voussoirs sont résumées dans le tableau A.

L'installation de préfabrication (figure 12) est installée sur un terrain de 15 ha comprenant :

- 3 lignes de production, dont 2 dédiées spécialement aux voussoirs à hauteur variable ;
- 32 coffrages, dont 18 pour les voussoirs à hauteur constante et 14 pour les voussoirs à hauteur variable ;
- 18 ponts roulants, d'une capacité allant de 16 t à 250 t permettant de manutentionner les cages d'armatures et les éléments de coffrages pour les petits, les voussoirs les plus lourds pour les grands ;
- Une capacité de stockage de 1 000 voussoirs ;
- 2 jetées de déchargement des voussoirs sur les barges de transport vers le site sur Hong Kong ;
- 3 centrales à béton d'une capacité nominale de 40 m<sup>3</sup>/h et un laboratoire pour les contrôles sur le béton. ▷

TABLEAU A : PRINCIPALES CARACTÉRISTIQUES DES VOUSOIRS

Type	Description	Hauteur	Largeur	Poids	Nombre
A	Bicaisson entre P0 et P67	4 m	16,97 m	100 t à 150 t	2 480
B	Monocaisson entre P52 et P60 pour le turnaround facilities	4 m	8,37 m	65 t à 75 t	282
C	Bicaisson à hauteur variable sur ML3, 10 à 14	4 m à 10 m	16,82 m / 19,17 m pour les voussoirs élargis	90 t à 220 t	1 700
D	Bicaisson à trois âmes, entre P49 et P63	4 m	20,67 m, variable pour les voussoirs de transition	120 t à 230 t	216
E	Bicaisson entre P84 et P115	3,2 m / 4,0 m pour les voussoirs élargis	16,97 m / 19,17 m pour les voussoirs élargis	90 t à 130 t	1 017

La cellule de préfabrication (figure 13) est typique avec deux joues métalliques pour assurer la stabilité latérale.

La stabilité longitudinale est assurée par un masque métallique côté clef et par le voussoir n-1 côté pile. Un noyau intérieur porté sur une structure en porte-à-faux permet de coffrer l'intérieur du caisson. Le fond de moule repose sur un chariot, qui permet de déplacer le voussoir en position dans le contremoule. Les cages d'armatures sont entièrement préfabriquées dans des gabarits, à proximité des coffrages.

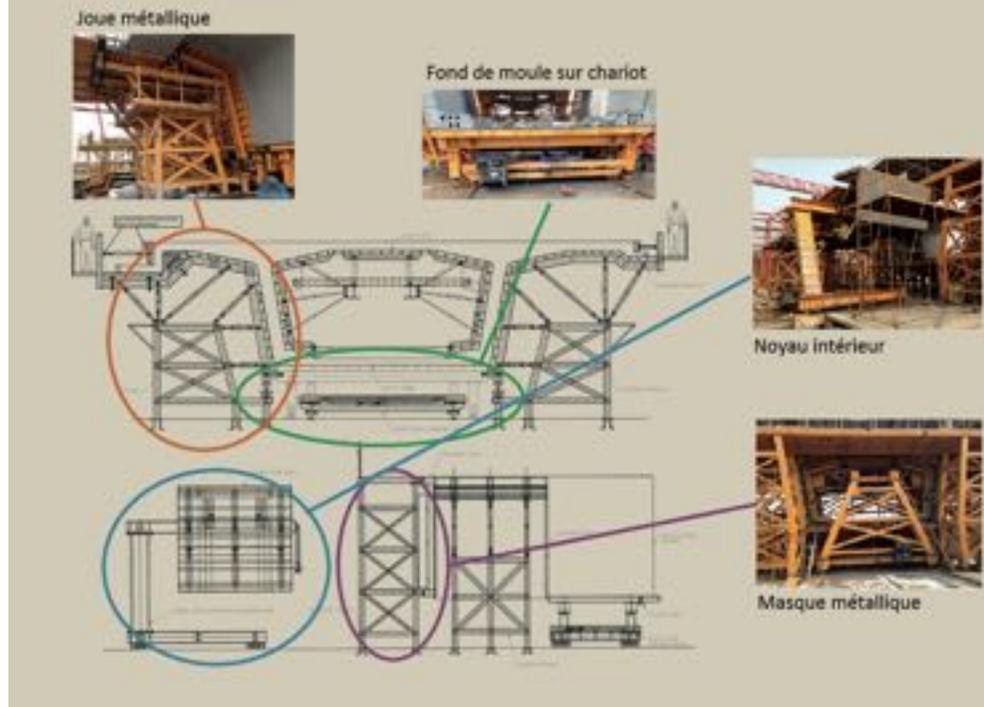
Les cycles pour les voussoirs de hauteur constante sont de 2 jours pour les voussoirs courants, 5 jours les VSP. Il faut compter une journée de plus pour les voussoirs déviateurs.

Le stockage des voussoirs s'effectue sur 2 niveaux pour les voussoirs à hauteur constante, 1 niveau pour les voussoirs de hauteur supérieure à 5,25 m. Deux jetées constituées de portiques métalliques surmontés d'un pont roulant de 250 t permettent d'amener les voussoirs au chantier sur des barges autopropulsées. Les barges peuvent contenir entre 4 et 6 voussoirs, assurant une livraison selon un cycle de 4-5 jours par barge.

### LE CONTRÔLE GÉOMÉTRIQUE PAR DATUMS

À la préfabrication comme à la pose, le logiciel interne de Bouygues-TP

## ÉLÉMENTS DE COFFRAGE TYPE



Datums pilote par l'utilisation d'une base de données unique, les différentes étapes du projet :

- L'implantation ;
- Le calepinage en voussoirs ;
- La génération des sections transversales basée sur des lois de variation des coffrages ;
- La détermination des volumes et des poids ;
- Le réglage et le suivi, que cela soit à la préfabrication ou à la pose.

Une des spécificités de Datums tient à l'utilisation de critères de rejet sur des bases statistiques.

### 13- Éléments de coffrage type.

### 13- Standard formwork elements.

À la pose, la géométrie attendue est réajustée en fonction du réglage des premiers voussoirs d'une unité de préfabrication et elle est éventuellement corrigée pour réduire toute marche au clavage à mi travée.

### CONCLUSION

Ces différentes méthodes de construction permettent de réaliser plus de 9 km de viaducs avec de fortes contraintes environnementales, climatiques et logistiques.

L'utilisation de la préfabrication pour l'ensemble des parties des ouvrages, piles, semelles, voussoirs sur piles et tablier rend le projet à la fois innovant et très technique avec un record du monde pour les travées de 180 m en voussoirs préfabriqués.

La date de livraison est prévue début 2017. □

## PRINCIPAUX INTERVENANTS

**MAÎTRE D'OUVRAGE :** Hong Kong Highways Department

**MAÎTRE D'ŒUVRE :** Ove Arup & Partners

**ENTREPRISE PRINCIPALE :** Joint Venture entre Dragages Hong Kong (filiale du groupe Bouygues), China Harbour et Vsl

**ARCHITECTE :** Alain Spielmann

## PRINCIPAUX SOUS-TRAITANTS

**FONDACTIONS PROFONDES :** Bauer, Sambo et Bachy Soletanche Ltd

**PRÉFABRICATION DES PILES :** Mbec

**PRÉFABRICATION DES VOUSOIRS :** China Construction Communication Company 2 (CCCC2)

**BUREAUX D'ÉTUDES :** YWL Engineering, Mott MacDonald, BE Bouygues TP

### ABSTRACT

#### THE HONG-KONG MACAU BRIDGE

BOUYGUES-TP: YVES RIALLAND, CHENTHURAN VILVARAJAH, VALÉRY PREMAUD

The viaducts for the Hong Kong Link Road 09 project ensuring part of the link between Hong Kong and Macau represent a total length of 9.4 km of deck in precast concrete segments. The road bridge consists of two box girders connected at the level of the central separator (a prestressed concrete safety barrier). It carries a three-lane dual-carriageway at a speed limited to 100 kph, with right-hand driving. These viaducts are built by balanced cantilever method, using either lifting gantry cranes or launchers. Given the design and the construction methods used, prefabrication was used almost systematically for the various bridge components such as piers, foundation slabs, segments on piers and the deck, to overcome environmental and logistic constraints. □

#### EL PUENTE DE HONG-KONG MACAO

BOUYGUES-TP: YVES RIALLAND, CHENTHURAN VILVARAJAH, VALÉRY PREMAUD

Los viaductos del proyecto del Hong Kong 09, que permiten una parte del enlace entre Hong Kong y Macao, tienen una longitud total de 9,4 km de tablero con dovelas de hormigón prefabricadas. Constituido por dos cajones unidos a nivel del separador central de tipo DBA, el puente de carretera cuenta con 3 vías en cada sentido, la velocidad está limitada a 100 km/h y la circulación se realiza por la derecha. Estos viaductos están contruidos por voladizos sucesivos ya sea por pórticos de elevación o por lanzadores. El diseño y los métodos de construcción utilizados llevaron a prefabricar, casi de forma sistemática, los diferentes elementos del puente: pilares, pedestales, dovelas sobre pilares y tablero para paliar las restricciones ambientales y logísticas. □

Chez PRO BTP,  
j'ai trouvé toutes  
les solutions santé  
pour mes salariés

Éric, 53 ans

patron d'une PME du BTP



LA COMPLÉMENTAIRE  
**SANTÉ**  
POUR TOUS LES SALARIÉS

*J'adhère maintenant!*

[www.probtp.com](http://www.probtp.com)

**PRO BTP**  
GROUPE

# LES REMBLAIS RENFORCÉS PAR **MACCAFERRI**



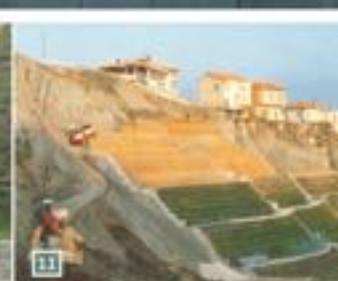
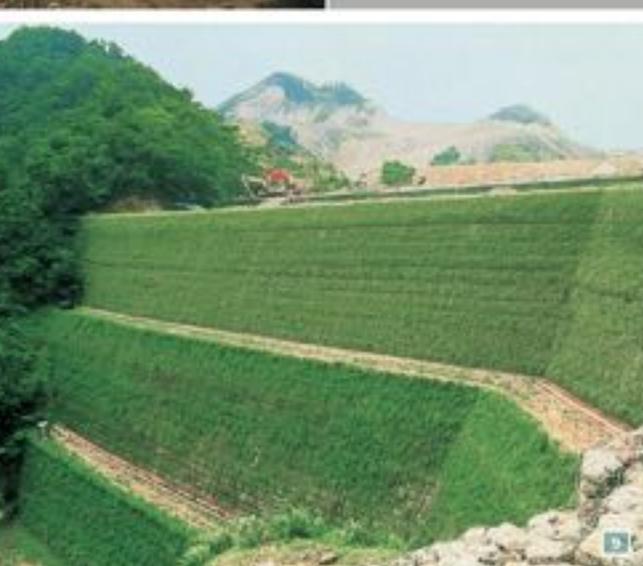
## TERRAMESH® SYSTEM Parement minéral

- 1-Chine, H. 40m
- 2-Portugal, H. 28m
- 3-Inde, H. 68m
- 4-Bésil, H. 18m



## MACRES® Parement béton

- 5-Allemagne, H. 7m
- 6-Afrique du Sud, H. 20m
- 7-France, H. 9m
- 8-Italie, H. 7m



## TERRAMESH® VERT Parement végétal

- 9-Taiwan, H. 30m
- 10-Portugal, H. 28m
- 11-Italie, H. 28m
- 12-France, H. 7m



commercial@maccaferri.fr - www.maccaferri.fr

E n g i n e e r i n g   a   B e t t e r   S o l u t i o n