

TRAVAUX

REVUE TECHNIQUE DES ENTREPRISES DE TRAVAUX PUBLICS

OUVRAGES D'ART. EXTENSION DU TRAMWAY T3 - VILLE DE PARIS : PONT DU CANAL DE L'OURCQ. OUVRAGE DE FRANCHISSEMENT DU BONNANT A ST-GERVAIS. PASSERELLE SUR LA MOSELLE. RD 201 : REPARATION DU PONT SUR LE CANAL DE HUNINGUE. PASSERELLE SUR LE LOIRET A OLIVET. PONT SUR LA RIVIERE SAINT-ETIENNE A LA REUNION. A87 : DOUBLEMENT DU VIADUC SUR LA LOIRE - ANGERS. UN OUVRAGE SYMBOLIQUE EN INDE. LE PONT HASSAN II A RABAT.

N°888 MAI 2012



PASSERELLE SUR
LE LOIRET - ORLÉANS
© DR



SYSTÈMES HYDRAULIQUES POUR LA CONSTRUCTION ET LA MAINTENANCE



Chez Enerpac, nous sommes spécialisés dans la conception d'ensembles hydrauliques développant de très grandes forces pour contrôler le déplacement de structures lourdes et de grandes dimensions.

Partout dans le monde, des experts en construction consultent Enerpac pour la création de systèmes hydrauliques intégrés permettant de déplacer, positionner, lever et descendre des ensembles tels les ponts, les tunnels et les immeubles.

Nos ingénieurs, notre expérience de l'hydraulique, nous permettent de développer les solutions innovantes adaptées

que vous recherchez pour le déplacement contrôlé de ces charges fortes et imposantes.

- Vérins à câbles
- Système de levage synchronisé
- Système de lancement de pont « Enerlauncher »
- Equipements d'avant bec
- Lancement d'ouvrage d'art par poussage automatisé
- Positionnement sur tête de pile
- Systèmes de positionnement de précision « SynchHoist »

ENERPAC

POWERFUL SOLUTIONS. GLOBAL FORCE.

Enerpac, Une division d'ACTUANT France S.A.S.
ZA de Courtaboeuf, 32, avenue de la Baltique
91140 VILLEBON /YVETTE, France
T +33 1 60 13 68 68 • F +33 1 69 20 37 50



info@enerpac.com • www.enerpac.com

Directeur de la publication
Patrick Bernasconi

Directrice déléguée
Rédactrice en chef
Mona Mottot

3, rue de Berri - 75008 Paris
Tél. : +33 (0)1 44 13 31 03
Email : mottotm@fntp.fr

Comité de pilotage

Laurent Boutillon (Vinci Construction Grands Projets), Jean-Bernard Datry (Setec TPI), Stéphane Monleau (Solétanche Bachy), Louis Marracci (Bouygues), Jacques Robert (Arcadis ESG), Anne-Sophie Royer (Vinci Construction Grands Projets), Claude Servant (Eiffage TP), Philippe Vion (Systra), Jean-Marc Tanis (Egis), Michel Duviard (Egis), Florent Imberby (Razel), Mona Mottot (FNTP)

Ont collaboré à ce numéro**Rédaction**

Monique Trancart, Marc Montagnon

Service Abonnement et Vente**Com et Com****Service Abonnement TRAVAUX**

Bât. Copernic - 20 av. Edouard Herriot
92350 Le Plessis-Robinson
Tél. : +33 (0)1 40 94 22 22
Fax : +33 (0)1 40 94 22 32
Email : revue-travaux@cometcom.fr

France (10 numéros) : 190 € TTC
International (10 numéros) : 240 €
Enseignants (10 numéros) : 75 €
Étudiants (10 numéros) : 50 €
Prix du numéro : 25 € (+ frais de port)
Multi-abonnement : prix dégressifs
(nous consulter)

Publicité

Emmanuelle Hammaoui

9, rue de Berri
75008 Paris
Tél. : +33 (0)1 44 13 31 41
Email : ehammaoui@fntp.fr

Site internet : www.revue-travaux.com

Réalisation et impression**Com'1 évidence**

Immeuble Louis Vuitton

101, avenue des Champs-Élysées
75008 PARIS
Tél. : +33 (0)1 82 50 95 50
Email : contact@com1evidence.com

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

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

Editions Science et Industrie SAS
9, rue de Berri - 75008 Paris
Commission paritaire n°0116 T 80259
ISSN 0041-1906

S'INSCRIRE DANS LA MODERNITÉ ET RÉPONDRE AUX ENJEUX D'AUJOURD'HUI



© DR

Le numéro annuel « Ouvrages d'Art » de la revue Travaux est toujours exceptionnel par la qualité des réalisations qui sont présentées, lesquelles témoignent de la haute technicité de l'ingénierie et des entreprises françaises.

Ce numéro ne faillit pas à la tradition, mais va au-delà, car il nous montre que ces savoir-faire sont totalement inscrits dans la modernité et permettent de répondre aux enjeux d'aujourd'hui. En France, plusieurs exemples remarquables de nouveaux ponts urbains pour tramways et modes doux démontrent que la mobilité urbaine a résolument changé. Cette nouvelle mobilité exige également d'adapter les ouvrages existants, ainsi que le montre le doublement du viaduc sur La Loire de l'A87 au sud d'Angers, ou la construction de la passerelle sur le Loiret à Olivet près d'Orléans, accolée au pont existant et exclusivement réservée aux piétons et cyclistes.

Nos ouvrages d'art sont ainsi confrontés à des pressions toujours plus fortes. Ils doivent répondre à de nouvelles attentes en termes d'usage et de performances. Par ailleurs, ce patrimoine vieillit et demande des investissements importants pour être maintenu à son meilleur niveau de service. Le remplacement du pont suspendu de Verdun sur Garonne est l'illustration de cette nécessité de modernité. Mais celle-ci s'inscrit ici dans le respect de l'histoire, en reprenant sous une conception moderne le principe du pont suspendu que le nouvel ouvrage remplace.

La réparation du pont d'Illzach démontre que la recherche peut apporter des réponses très intéressantes à l'enjeu de prolonger la durée de service des ouvrages dans un contexte budgétaire contraint. Le SETRA est heureux d'avoir piloté le projet de recherche partenarial « Orthoplus » de l'ANR qui a permis de développer la solution innovante mise en œuvre sur le pont d'Illzach.

S'appuyant sur les compétences de l'ensemble du Réseau scientifique et technique du ministère du Développement durable, le SETRA a pour mission d'être un centre de connaissances et de référence technique dans le domaine des ouvrages d'art en France, au service de l'État, des maîtres d'ouvrages publics et plus généralement de la collectivité technique française dans son ensemble.

À cette fin, le SETRA s'implique activement dans la normalisation européenne et française pour la conception et l'exécution des structures, produit et diffuse des documents techniques et des logiciels de calcul et assure des missions opérationnelles de différentes natures, principalement pour le compte de l'État maître d'ouvrage.

Les actions du Sétra sont résolument réorientées vers la prise en compte des enjeux du développement durable.

Désormais implanté à Sourdun en Seine-et-Marne, à proximité du pôle scientifique et technique de Marne-La-Vallée, le SETRA a vocation à rejoindre un nouvel établissement public regroupant les 8 centres techniques de l'Équipement, (CETE), le CERTU et le CETMEF. La vocation du SETRA s'en trouvera confortée, en développant les partenariats avec tous les acteurs concernés tant au niveau national qu'international, au service de tous les maîtres d'ouvrages publics et de la communauté professionnelle.

ÉRIC LE GUERN

DIRECTEUR DU SETRA
SERVICE D'ÉTUDES SUR LES TRANSPORTS,
LES ROUTES ET LEURS AMÉNAGEMENTS

LISTE DES ANNONCEURS : ENERPAC, 2^e DE COUVERTURE - GREISCH, P.7 - RIVARD, P.8 - CNETP, P.12 - T-INGENIERIE, P.13 - SMA BTP, P.45 - WEBER, P.65 - STRRES, P.89 - SECOFAB, 3^e DE COUVERTURE - MAURER SÖHNE, 4^e DE COUVERTURE

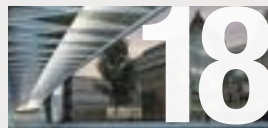
OUVRAGES D'**ART**

IMAGINER
CONCEVOIR
CONSTRUIRE



04 ACTUALITÉ

14 DIADÈS : LA SCIENCE DU DIAGNOSTIC ET L'INGÉNIERIE DE LA DURABILITÉ, AU SERVICE DES STRUCTURES ET OUVRAGES D'ART DE GÉNIE CIVIL



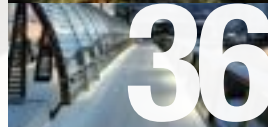
EXTENSION DU TRAMWAY T3 DE LA VILLE DE PARIS

Le pont du canal de l'Ourcq



OUVRAGE DE FRANCHISSEMENT DU BONNANT

à St-Gervais (Haute-Savoie)



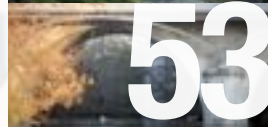
PASSERELLE SUR LA MOSELLE

à Épinal (Vosges)



RÉPARATION DU PONT DE LA RD 201 SUR LE CANAL DE HUNINGUE

à Illzach (Haut-Rhin)



LA PASSERELLE SUR LE LOIRET

à Olivet



LE PONT SUR LA RIVIÈRE SAINT-ÉTIENNE

à La Réunion



LE DOUBLEMENT DU VIADUC SUR LA LOIRE DE L'AUTOROUTE A87

au Sud d'Angers



UN OUVRAGE SYMBOLIQUE FRANCHISSANT L'AUTOROUTE URBAINE

à Mumbai - Inde



PONT HASSAN II SUR L'OUED BOUREGREG

à Rabat

PONT HASSAN II SUR L'OUED BOUREGREG À RABAT © DR

HUIT DÉTROITS EUROPÉENS FONT CAUSE COMMUNE

L'Europe des détroits qui rassemble quinze collectivités locales bordant un détroit, a reçu des fonds européens pour travailler sur la biodiversité, premier thème de partage de bonnes pratiques.



Détroit de Messine, entre Italie et Sicile : un des huit membres de Détroits d'Europe.

Un tunnel va relier le Nord de l'Allemagne et le Sud du Danemark en 2020. Le détroit de Fehmarn Belt de 18 km pourra alors être franchi par 6 000 voitures et 3 600 passagers en train, chaque jour, soit trois fois plus que le trafic actuel en ferry. Les collectivités locales des deux côtés du détroit coopèrent depuis longtemps mais le projet de tunnel renforce cette nécessité. La Région du Zealand (Danemark) et le County d'Ostholstein (Allemagne) qui bordent le détroit de Fehmarn Belt en Mer du nord veulent promouvoir un développement durable, développer la zone en réduisant les barrières à son développement (marché unique du travail) avec une approche verte des transports et en protégeant l'environnement. Le tunnel de 20 km, les connexions ferroviaires et l'amé-

lioration du réseau routier vont avoir un impact sur les zones protégées et le patrimoine naturel. Les deux collectivités ont formé une structure binationale, le Fehmarn Belt Committee, et ont rejoint l'Europe des détroits pour s'inspirer de l'expérience d'autres pays dans ce domaine.

→ 1,8 million d'euros pour la biodiversité

Les quinze collectivités territoriales regroupées en 2010 dans Détroits d'Europe avec un institut roumain, partagent des préoccupations spécifiques aux zones transfrontalières de chaque côté d'un bras de mer étroit à haute circulation maritime. Le Pas-de-Calais allié au Kent (Angleterre) est à l'origine de ce rapprochement. Un premier budget de 1,8 million d'euros leur a été alloué en 2012 par l'Union européenne

(fonds Interreg IVC) pour travailler sur la biodiversité, prisme d'approche le plus évident entre eux. Le projet Nostra (Network of Straits) se monte à 2,36 millions d'euros (subvention incluse).

La protection des espèces et des paysages n'a rien d'anecdotique pour ces zones qui vivent en grande partie du tourisme et pourtant, elle est rarement l'objet de recherches universitaires. Dans le détroit d'Otrante entre le talon de la botte italienne et l'Albanie, le nombre de visiteurs a augmenté de 55 % de 2006 à 2010. Le détroit souffre de pollution par les bateaux. Une surveillance de ce trafic et des gazoducs est déjà en place. Rejoindre Nostra va aider les provinces des deux rives à défendre la biodiversité.

→ Le paysage, base du futur

Autre problématique dans le Golfe de Finlande : les 52 km qui séparent la Finlande de l'Estonie sont traversés par 7 millions de passagers chaque année dont des personnes qui travaillent des deux côtés. Ce flux croise celui des navires venant de Saint-Petersbourg (Russie) en direction de la Mer baltique très polluée. Les collectivités situées autour de Tallin et d'Helsinki et leurs deux millions d'habitants se sentent petits face à ces enjeux. Un projet de chemin de fer et de tunnel se profile à l'horizon.

Même besoin de sortir de l'isolement de la Corse et de la Sardie qui se font face dans le détroit de Bonifacio. Elles ont obtenu que la circulation des bateaux soit à pilotage recommandé (ZNPV). « *Le paysage est la base de notre développement futur,* » ont-elles souligné lors du lancement officiel du projet Nostra, en avril.

→ Sécurité maritime

L'accord entre détroits devrait aussi être bénéfique à celui de Kvarken entre Suède et Finlande. Ce bras de mer, d'une largeur de 25 à 80 km, comporte des zones reconnues patrimoine naturel mondial par l'Unesco. Peu profond et parsemé d'îles habitées, il souffre d'eutrophisation (algues) et d'érosion. « *Il nous faut travailler sur la diversité sociale et les aspects sociaux pour prendre en compte tous ensemble la biodiversité,* ont témoigné les représentants du Kvarken Council (structure binationale). *Les jeunes ont une moindre connaissance de l'autre bord que les plus âgés.* »

Les 16 partenaires vont se réunir huit fois d'ici 2014 tout en amorçant leurs autres thèmes de collaboration : sécurité maritime, flux migratoires, échanges économiques, culturels, etc.

Plus d'informations et carte des détroits sur : www.europeanstraits.eu. ■

L'AGENCE DE FINANCEMENT DES COLLECTIVITÉS LOCALES VUE PAR LE GOUVERNEMENT

L'Agence de financement des collectivités locales se précise. À la mi-mars, le gouvernement a remis un rapport sur les conséquences de sa création. À l'origine de cette agence, plusieurs associations d'élus, des régions, des conseils généraux, des communes et leurs groupements réunis en avril 2010 dans l'Association d'étude pour l'agence de financement des collectivités locales (AEAFCL). Leur objectif : disposer d'un outil de financement de leurs investissements moins cher, en complément de l'offre bancaire. Le projet pourrait couvrir 25 % du marché de financement des collectivités territoriales. L'AFCL serait donc un établissement de crédit qui permettrait aux petites et moyennes collectivités de diversifier

leurs sources de financement à moyen terme. L'AEAFCL a préconisé la formation d'une structure à deux niveaux. L'Agence serait constituée, d'une part, d'un établissement public industriel et commercial local qui définit les orientations et gère les membres, et d'autre part, d'une société anonyme réalisant les opérations bancaires. Les fonds propres proviendraient d'un ticket d'entrée à payer par chaque collectivité et de l'intégration des profits. La garantie serait assurée par l'Epic et par les membres. C'est l'absence d'intermédiaire bancaire de type traditionnel qui la rend meilleur marché.

→ Sans garantie de l'État ?

Nombre de questions se posent sur ce que l'Agence sera, d'où une mise en route qui n'interviendrait pas avant

une date avancée de 2013. Outre des observations d'ordre juridique, le rapport s'interroge sur l'indépendance de cette structure et voit mal comment elle pourrait fonctionner sans garantie de l'État.

L'AFCL viendra donc peut-être compléter le dispositif qui vient compenser le retrait de Dexia de ce marché en 2011. Il comprend, à court terme, la création d'une co-entreprise Banque postale-Caisse des dépôts dont les premiers prêts pourraient être accordés en juin. Puis, serait créé un établissement de crédit détenu à parts égales par l'État, la Caisse des Dépôts, Dexia Crédit Local, avec dans une moindre mesure, la Poste.

À cela s'ajoutent les deux fois 5 milliards débloqués en 2011 puis

en 2012 et financés par la Caisse des dépôts et les banques.

En attendant l'AFCL, 70 grandes collectivités locales ont demandé à des banques de mettre au point un emprunt obligatoire qui, elles l'espèrent, pourrait être effectif à l'automne 2012.

Natixis (BCPE), Cacib (Crédit agricole) et HSBC se sont mises au travail.

Ces banques doivent trouver des investisseurs et proposer un taux d'intérêt attractif aux collectivités qui se sont engagées à emprunter 5 millions d'euros chacune.

Pour en savoir plus : site internet <http://aeafcl.com> ; *Gazette des communes* 16 avril 2012 et cahier détaché du 30 avril ; *Le Monde* 18 et 26 avril 2012. ■

INFRASTRUCTURES : UN SCHÉMA NATIONAL PLUS CONFORME AU GRENELLE 1

Avant que le projet de schéma national des infrastructures de transport (Snit) ne soit débattu au Parlement (date non encore fixée), le ministère de l'Écologie qui l'a publié en octobre 2011, a sollicité l'avis du Conseil économique, social et environnemental (Cese). Le projet est un outil de concrétisation du Grenelle de l'environnement (loi 1) en matière de transport. Il fixe les orientations de développement, de modernisation et d'entretien des infrastructures relevant de l'État à vingt-trente ans et le soutien aux réseaux des collectivités territoriales. Bien que le Cese reconnaisse dans son texte de deux pages, certains traits positifs du schéma, notamment en termes de méthode, il en souligne les insuffisances sur les aspects environnementaux et financiers. Il émet des propositions pour y remédier. Tout d'abord, le projet devrait être confronté à un diagnostic de la situation actuelle du transport en France. De plus, les scénarios proposés devraient prendre en compte une hausse durable des prix du pétrole. Le schéma aurait aussi pu envisager la dissociation du développement économique et des flux de transport. La réduction des émissions de gaz à effet de serre par les projets retenus dans le Snit est insuffisante, selon le Cese. Des alternatives restent à préciser



© SNCF

L'accessibilité des territoires ne se réduit pas au seul gain de temps, souligne le Conseil économique, social et environnemental.

sans confondre accessibilité des territoires et temps gagné dans les transports. Le Conseil reproche le manque de transparence de la sélection des projets retenus dans le Snit et souligne la nécessité de privilégier leur utilité socio-économique et environnementale. Il recommande d'optimiser les infrastructures existantes avant d'en construire de nouvelles, de donner priorité aux modes de transport ayant le plus faible impact sur l'environnement, de développer les autres modes que le routier et de garantir l'équité territoriale. Sur ce dernier point, il estime que la mise en œuvre de projets retenus impliquant des collectivités territoriales ne devrait pas dépendre du degré de

participation financière de ces dernières.

→ Livret d'épargne transport

Enfin, le Cese ne voit pas comment réaliser le Snit sans financement durable et sûr. Il conseille d'utiliser les possibilités de la directive Eurovignette 3 qui autorise d'intégrer les coûts externes de la route (pollution, bouchons) dans la taxe poids lourds. Cette mesure ainsi que la création d'un livret d'épargne transport conforteraient le budget de l'Agence de financement des infrastructures de transport de France (Afitf), grandement insuffisant à l'heure actuelle, et celui des collectivités. Pour la même raison, il juge indispensable le maintien de la dotation de l'État à l'Afitf. ■

LILLE AMÉLIORE SON ASSAINISSEMENT

Lille Métropole va engager 80 millions d'euros de travaux sur son réseau d'assainissement dont une première phase de 40 millions avec l'appui de la Banque européenne d'investissement. Ce prêt aidera à financer la mise aux normes de la station d'épuration de Marquette-Lille, la construction d'un bassin de déversoir d'orage avec bassin de dépollution de 20 000 m³ et une station de pompage d'évacuation des eaux de pluie. Le projet inclut aussi la lutte contre les eaux claires parasites.

RECHARGE D'UN VÉHICULE ÉLECTRIQUE

L'arrêté du 20 février 2012 (Journal officiel du 23 février) précise les exigences applicables aux points de recharge des véhicules électriques et hybrides dans les parkings d'immeubles d'habitation ou de bureaux. Une recharge s'effectue à une puissance de 4 kW au maximum par point.

LE BUS PLUS RATIONNEL QUE LE TRAMWAY



© SMTIC TERRITOIRE DE BELFORT

Un bus toutes les dix minutes et bientôt toutes les cinq minutes dans le Territoire de Belfort.

Comment développer les transports en commun tout en diminuant la dépense publique ? « Passer de la logique de la propriété à celle de l'usage permet de réduire drastiquement le coût de la mobilité en répartissant le coût fixe sur l'ensemble des utilisateurs, plaide Christian Proust, président du Syndicat mixte des transports en commun du Territoire de Belfort, chiffres à l'appui⁽¹⁾. Il faut passer d'une approche réseau de transport en commun à une approche fournisseur d'une solution globale de mobilité. (...) Ce qui emporte la décision du client, c'est l'avantage économique calculé sur l'ensemble de ses besoins. » Sa solution pour réduire l'usage de la voiture particulière ? Augmenter la fréquence des autobus, proposer

des vélos en libre-service et de l'auto-partage plutôt que des tramways chers à implanter (24 millions d'euros/km) et que l'entretien rend déficitaires sauf à y sacrifier du kilométrage de bus. Haute fréquence, lignes interconnectées (changement facile) et maillées en toile d'araignée plutôt qu'en étoile, sont les conditions d'un réseau de bus intéressant pour les usagers. Parmi les mesures prises par le Syndicat à travers son système Optymo, citons un bus toutes les dix minutes et bientôt toutes les cinq minutes sur deux lignes importantes. ■

⁽¹⁾ Cf. Transports publics : la révolution douce et table ronde du 15 mars à Paris, « Halte au tout tramway » (www.smtic90.fr).

INSTITUT LIRGEC À NANTES

Le Groupe d'intérêt scientifique baptisé Institut ligérien de recherche en génie civil et construction (Lirgéc), a été créé en mars à Nantes. La région Pays-de-la-Loire l'a doté d'un budget de près d'1 million d'euros sur quatre ans. Le Gis associe plusieurs équipes régionales qui vont travailler sur cinq axes : les risques naturels, la durabilité des matériaux et des ouvrages, l'éco-construction, les infrastructures de transport et l'énergie en génie civil. Le Lirgéc est dirigé par Pierre-Yves Hicher de l'École centrale de Nantes.

MOINS D'ACCIDENTS DU TRAVAIL

L'Union des syndicats de l'industrie routière française (Usirf) a souligné la division par deux des accidents du travail en dix ans dans le secteur, lors de son assemblée générale. Le comité de pilotage national sur la prévention des risques professionnels dans les travaux routiers auquel elle participe, poursuit son travail sur la protection des salariés contre les ultra-violets et les problèmes de santé liés au recyclage, action qui alimente les études de l'Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail sur les liants hydrocarbonés.

PROGRAMME DE RECHERCHE SUR LE BÉTON RECYCLÉ

Le béton réutilisé après une déconstruction fait l'objet d'un programme national de recherche de quatre ans coordonné par l'Institut pour la recherche et l'expérimentation en génie civil (Irex). Recybéton dont l'assemblée constitutive s'est tenue en janvier 2012, vient de lancer l'appel d'offres pour la première tranche du programme. Jusqu'à présent, les déchets contenant du ciment, du mortier ou du béton étaient réemployés, quand ils l'étaient, en travaux routiers. Aujourd'hui, les économies d'énergie, de matière première noble et l'envahissement par les déchets issus du bâtiment et du génie civil rendent plus attractif le recyclage du béton. Une fois ce constat fait, il reste de nombreux points à résoudre. Parmi eux, l'étude

préalable à ce programme a décelé la nécessité de trier ces matériaux, de les séparer du reste et des différents composants du béton lui-même. Par exemple, il est intéressant d'en extraire les fines pour les réutiliser dans la fabrication de nouveaux ciments ou bétons. Recybéton étudiera aussi comment réemployer ces produits en mélange avec d'autres et quelles performances en attendre. Les granulats recyclés devront être correctement caractérisés pour les incorporer dans des bétons de structure. Il faudra également connaître l'impact du recyclé sur le béton frais, puis sur celui une fois durci. La tenue au feu du produit résultant de sa réutilisation est-elle satisfaisante ? Le projet de recherche approfondira



Après tri et séparation, le béton pourra être réutilisé, à condition notamment d'en connaître le comportement.

© CLAMENS

également les aspects socio-économiques, environnementaux, sanitaires, réglementaires et normatifs. ■

LES QUATRE PLATES-FORMES DU CANAL SEINE-NORD SE PRÉCISENT

Voies navigables de France (VNF) a présenté les quatre plates-formes multimodales qui verront le jour en 2017 sur le parcours du Canal Seine-Nord Europe. Leur programmation-planification se termine en 2013, année où débutera leur commercialisation. En 2016-2017, commenceront les premiers travaux. La plate-forme de Cambrai-Marquion

(Nord) dispose d'un quai d'1 km. Elle couvre 156 ha dont 100 dédiés à la logistique, 36 à l'industrie et 20 au port. Celle de Péronne Haute-Picardie (Somme) est plus modeste avec 60 ha dont 40 en logistique et 10 en industriel. Un quai de 400 m dessert la zone portuaire de 10 ha. Dans le même département, Nesle accueille sur 78 ha, un parc logistique de 20 ha, des terrains

industriels sur 43 ha, une zone portuaire de 15 ha avec deux quais, un public et un réservé à l'industrie. Enfin, la plate-forme la plus au sud, celle du Noyonnais (Oise), ressemble à celle de Péronne hormis son quai de 700 m. Le transport de marchandises sur le Canal Seine Nord Europe devrait atteindre 17 millions de tonnes vers 2020. ■

EMPLOI, SANTÉ ET PAIEMENTS : LA FNTP S'IMPLIQUE

La Fédération nationale des travaux publics (FNTP) s'est engagée récemment à plusieurs titres. À la mi-mars, elle a signé, aux côtés d'autres organisations dont le Syndicat professionnel des Terrassiers de France, et avec le ministère du Travail, de l'emploi et de la Santé, un accord-cadre national de coopération relatif aux recrutements et à la formation de demandeurs d'emploi qui travailleraient sur les grands chantiers de TP de 2012 à 2016. Par exemple, les entreprises qui construisent la ligne à grande

vitesse Sud-Europe Atlantique vont recruter et former 1 430 chômeurs sur la période 2012-2015. Par ailleurs, la FNTP promet d'atteindre de nouveaux objectifs en matière de santé au travail à travers la signature de la convention nationale de partenariat de cinq ans avec le ministère et les organismes de prévention, fin mars. Huit domaines sont prioritaires. Parmi eux, les risques chimiques ou liés à l'exposition à des substances cancérigènes, mutagènes et toxiques, les troubles musculo-squelettiques, les risques psycho-sociaux et

routiers. Enfin, une charte de bonnes pratiques devrait améliorer le paiement des travaux ferrés. Réseau Ferré de France, le Syndicat des entrepreneurs de travaux de voies ferrées et la FNTP se sont mis d'accord sur un document, fin février. Ce texte traite notamment la bonne coordination entre les acteurs et RFF pour l'encadrement des délais de paiement, les modalités de versement d'avances aux entreprises ou le traitement des avenants (travaux supplémentaires). Des points trimestriels seront planifiés. ■



Les troubles musculo-squelettiques sont l'un des domaines de prévention étudiés pour une meilleure santé au travail.

© JCB

GARES PARISIENNES EN CHANTIER



La rénovation de la Gare Saint-Lazare est l'un des plus grands projets de rénovation des gares parisiennes.

La rénovation de la Gare Saint-Lazare touche à sa fin. Restera en 2013 à remanier ses deux parvis afin de restituer l'espace aux piétons et aux transports en commun. Les passants pourront aussi découvrir l'intérieur de l'édifice à travers de grandes baies vitrées. S'achèvera ainsi le chantier d'agrandissement d'une gare dont la première implantation remonte à 1837. De 2009 à 2012, 10 000 m² dédiés au commerce ont été créés sous la salle des Pas Perdus. S'y ajoutent deux niveaux de parkings voitures. Le bâtiment étant inscrit à l'inventaire des monuments historiques, l'esprit XIX^e siècle a été conservé. Les verrières zénithales

éclairaient jusqu'aux coursives bordant les magasins en sous-sol. L'opération a été réalisée grâce à un partenariat avec le privé. La partie immobilière commerciale a été confiée à la société Soaval créée pour le projet, maître d'ouvrage et filiale de Klépierre et de Spie batignolles immobilier (promoteur). L'espace est aujourd'hui divisé en deux entités juridiques. La SNCF conserve les zones d'accès aux trains (quai transversal), de transit et les circulations vers le métro et la ville. Klépierre exploite et valorise les trois niveaux commerciaux avec des sous-concessions. La transformation de Saint-Lazare initiée en 2003 aura coûté 250 millions d'euros dont 90 millions

investis par la Société nationale et 160 millions, par Klépierre. Le réaménagement de la gare qui voit passer 450 000 voyageurs/jour n'a pas nécessité la construction de nouveaux halls. Il a trouvé sa place à l'intérieur des 213 m de long du bâtiment. La SNCF mène parallèlement la modernisation des autres gares parisiennes avec, parfois, des extensions. La Gare de Lyon doit s'agrandir. Un nouveau hall vitré a été construit côté Est. Il vise à fluidifier la circulation des voyageurs qui devrait atteindre 45 millions par an en 2020, soit 10 millions de plus qu'aujourd'hui, et à accueillir des commerces. À Montparnasse, un appel d'offres a été lancé pour sélectionner un opérateur qui restructurera le site avec la branche Gares & Connexions de la SNCF. Quant à Auzerlitz, sa rénovation à laquelle la Ville de Paris prend part, s'accompagne de la création d'un quartier vers le Sud dont 100 000 m² dédiés à des logements, des équipements collectifs et des commerces. ■

UNITÉ DE MÉTHANISATION DE 526 KW

L'usine de méthanisation de lisier de porc conçue par Spie Sud-Ouest à Saint-Nicolas-du-Tertre (Morbihan) va contribuer à réduire la vulnérabilité de la Bretagne en matière de fourniture d'énergie. L'installation d'une puissance de 526 kW fournira au réseau, à partir d'octobre, l'équivalent de l'électricité consommée par 1 100 foyers. Les déchets émettent du méthane qui alimente un moteur de cogénération (production d'électricité et de chaleur). Le département énergies nouvelles de Spie Sud-Ouest collabore sur ce projet avec Weltec (méthanisation), Avry Le Corvaisier (génie civil) et Scolari (séchage des boues).



▲ Fondation Louis Vuitton pour la Création - Études d'exécution des verrières
 ▼ Grand stade de Lille Métropole - Méthode de construction et études d'exécution des charpentes

**Créativité
 Innovation
 Audace
 Rigueur
 Expertise**

Stabilité en bâtiment
 Techniques spéciales
 Rénovation
 Architecture
 Aménagement paysager
 Ouvrages d'art
 Études d'exécution
 Génie civil
 Environnement
 Industrie
 Rayonnages
 Structures spéciales
 Coordination sécurité
 Études spéciales



Allée des Noisetiers 25 à 4031 Liège (Belgique)
 +32 (0)4 366 16 16 - www.greisch.com

HYDRODEMOLITION DES BÉTONS

> Technologie du jet d'eau à Haute-Pression pour la reprise ou l'élimination sélective des bétons.

- Ouvrages d'art
- Tunnels, Réseaux
- Cale sèche, appontements
- Joints de chaussée
- Dalles...



Générateurs de Pression
Conjet & Robots d'Hydrodémolition

RIVARD
20 du Grand Clos - F-47640 Doumezy
M : +33 241 336 846 - Fax : +33 241 325 170
contact@rivard.fr - www.rivard.fr

Par Nature, nous composons avec les Éléments : l'Eau, l'Air et la Terre
We compose naturally with the elements : Water, Air and Earth

PONT À HAUBANS À 400 M DE HAUT

VSL a installé les haubans d'un pont qui culmine à 403 m au-dessus d'un canyon à Baluarte (Mexique). La travée centrale mesure 520 m de long. La filiale de Bouygues Construction a également conçu, fourni et monté les lanceurs de la travée centrale et réalisé la pré-contrainte des piliers et du tablier. Elle fait partie d'un groupement auquel participent les sociétés Tradeco Infraestructura, Idinsa et Aceros Corey. Le pont s'insère sur l'autoroute qui reliera la côte Pacifique et le Golfe du Mexique au nord du pays.

MONT SAINT-MICHEL : LE PONT-PASSERELLE SE CONCRÉTISE



© IMAGENCE MG DESIGN

Le pont-passerelle se fera aussi discret que possible.

La réalisation des pieux de fondation du pont-passerelle reliant le Mont Saint-Michel à la terre ferme a commencé en mars 2012. L'ouvrage devrait être terminé à la mi-2014. Afin de concevoir au mieux l'ouvrage, un prototype a été testé sur le site à partir de la mi-septembre 2011 et a subi les marées fortes de novembre. Ont ainsi pu être mis au point la structure, le bois, la couleur et les garde-corps.

Les architectes du cabinet Dietmar Feichtinger ont voulu un pont qui « ne perturbe pas le génie du lieu, où le regard des visiteurs continuera de se perdre, et qui fera de la promenade sur cette jetée une immersion dans une immensité. » L'ouvrage est donc aussi fin et horizontal que possible. Il comporte deux parties : une digue - levée de terre empierrée - et la jetée ou pont-passerelle.

La jetée comporte deux passages piétons en platelage de chêne posés sur des consoles métalliques en porte-à-faux de la chaussée centrale réservée aux navettes, portée par des pilotis. Cette lame repose sur une double rangée de piliers de 30 cm de diamètre, écartés de 6,60 m, et constitués d'un noyau d'acier plein enrobé d'un béton anticorrosion. Les portées mesurent 12 m. La sous-face est légèrement biaisée pour répondre aux charges des cheminements piétons. Le plateau a une épaisseur totale de 75 cm dont 20 pour le revêtement et le décaissé de la chaussée. Le rétablissement du caractère maritime du fameux Mont s'avérait indispensable. Le Couesnon, envahi par les sédiments et la végétation, ne jouait plus son rôle de bassin de stockage de la marée. Le curage de la rivière en amont et en aval du barrage a commencé cet hiver et devrait continuer jusqu'en 2015. ■

PALAIS DE JUSTICE DE PARIS PAR RENZO PIANO



La salle des pas perdus est largement éclairée par la lumière naturelle comme une grande partie du futur tribunal.

Bouygues Bâtiment Île-de-France va réaliser le futur Palais de justice de Paris, situé dans la Zac Batignolles à Paris XVII^e. Le 15 février, l'Établissement public du palais de justice de Paris (EPPJP) et la société de projet Arélia dont Bouygues est actionnaire, ont signé un contrat de partenariat public privé. Les travaux devraient démarrer à la

mi-2013 et durer trois ans et demi. L'EPPJP est un établissement à caractère administratif sous tutelle du ministère de la Justice, chargé de la réalisation du futur palais pour le compte de l'État. Arélia réunit Bouygues Bâtiment Île-de-France et Exprimm (filiales de Bouygues construction) et des investisseurs financiers.

Elle est maître d'ouvrage. Elle conçoit, réalise et entretient le bâtiment pendant vingt-sept ans au terme desquels celui-ci revient à l'État en parfait état pour un montant de 575 millions d'euros TTC payés en redevance.

Renzo Piano, architecte du projet, propose une construction de 160 m de haut composée d'un socle surmonté de trois immeubles dont la taille diminue avec la hauteur. De prime abord, l'empilement ne ressemble pas à un geste architectural. Pourtant, sa transparence et les terrasses intermédiaires plantées devraient lui donner du sens : « Si notre bâtiment doit permettre au citoyen d'appréhender la justice avec une certaine sérénité, ce sera certainement parce qu'il est clair, léger, transparent, lumineux et ouvert sur la ville », précise Renzo Piano. Il sera l'antithèse du palais intimidant, hermétique et sombre du passé. Un palais de justice est comme une petite ville qui peut être verticale (...). Verticale ne veut pas dire tour. » Les 61 500 m² construits sur le terrain de 1,75 ha pourront accueillir 9 000 personnes par jour (90 salles d'audience).

Le futur palais de justice regroupe tous les services du tribunal de grande instance de Paris ainsi que les tribunaux d'instance des 20 arrondissements et le tribunal de police. Il devrait consommer moins de 75 kWh/m²/an, conformément aux exigences du Plan climat de la capitale (80 kWh/m²/an). ■

SYSTRA AU CHILI

Metro, exploitant du métro de Santiago (Chili), a confié à Systra la mission d'assistance technique de deux nouvelles lignes de métro, automatique. Associée à Systracade, sa filiale sur place, la société d'ingénierie remporte un contrat en deux phases, une d'un an de conception et l'autre de cinq ans d'assistance à la passation des marchés, revue des études, supervision des travaux, essais et mise en service. La ligne 3 mesure plus de 22 km desservis par 18 stations. La ligne 6 court sur plus de 15 km avec 10 stations.

SETEC S'IMPLANTE AU BRÉSIL

Avec le rachat de l'entreprise MWH Brésil aux Américains, le groupe Setec se positionne sur le programme d'infrastructures de 380 milliards d'euros planifié par le gouvernement brésilien de 2011 à 2015. Setec Hidrobrasileira, présente sur tout le territoire, emploie 120 personnes.

REFONTE DE LA STATION D'ÉPURATION D'ACHÈRES

Le Syndicat interdépartemental pour l'assainissement de l'agglomération parisienne (Siaap) poursuit la rénovation de sa station d'épuration d'Achères (Yvelines). Après sa mise aux normes en 2009, l'usine qui traite 1,5 million de mètres cubes d'eaux usées par jour fait l'objet d'une refonte afin de répondre aux exigences de la directive cadre européenne sur l'eau à échéance 2015 et 2020 (non rejet de substances dangereuses). Pour y parvenir, le Siaap fait appel à une filière biologique. Il a regroupé les équipements sur 151 ha dans une zone de transition paysagère de 393 ha. Il libère ainsi 295 ha rendus à Paris, propriétaire des terrains. Les ouvrages sont conçus pour écono-

miser l'énergie, la chaleur et l'eau. Les travaux du nouveau prétraitement - capacité 5-70 m³/seconde - ont commencé en 2012 et devraient s'achever en 2016. Les bassins de dessablement actuels seront couverts. L'air vicié transitera par une unité de désodorisation (375 000 m³/h). Les eaux usées ainsi « filtrées » seront ensuite réparties dans des files parallèles de traitement biologique des pollutions azotées, carbonées et phosphatées. La filière biofiltration - 150 biofiltres - viendra compléter les unités existantes de dénitrification et traitera 67 % des volumes entrants dans l'usine. Les autres 33 % seront pris en charge par la file membranaire



Grâce à la biofiltration et à l'ultrafiltration membranaire, l'usine d'Achères (Yvelines) entend répondre à la directive cadre sur l'eau.

avec 462 000 m² d'ultrafiltration. Les études de ces files ont commencé en 2012 et les travaux s'étageront de

2013 à 2017. Le prétraitement coûte 230 millions d'euros HT et la file eau, 777 millions. ■

MORTIER POUR PAVÉS

La mise en service du tramway de Brest est prévue pour la mi-2012.

Une partie des zones autour de la ligne est recouverte de pavés en granit.

Ce type de revêtement doit être parfaitement mis en œuvre afin d'éviter des désordres ultérieurs.

La planéité du support variant selon les endroits, la pose des pavés nécessite un mortier permettant de travailler sur différentes épaisseurs et résistant au trafic.

Sika a fourni différents mortiers aux entreprises qui posent les revêtements : Marc SA, Eurovia et Jardin Service.

Le jointolement entre pavés est réalisé avec du Fastfix 133 TP. Les zones pavées sont reliées à celles en béton désactivé par un joint de fractionnement en Sikaflex 35 St, un mastic coulable mono-composant et élastique pour joints de sols, ou en Sikaflex Pro 3WF, un mastic polyuréthane pour joints souples haute performance.



Utilisation de différents mortiers de jointolement sur le chantier du tramway de Brest.

© SIKA

ÉCLAIRAGE ROUTIER À LED

Les lampes led n'ont guère été utilisées en éclairage routier jusqu'à présent. Que donnent-elles et engendrent-elles des économies d'énergie, s'est demandé le Syndicat intercommunal d'énergies de Côte-d'Or (664 communes).

Depuis début 2012, 16 lampadaires, à 88 led chacun, fonctionnent à Talant sur une route de transit d'un peu moins d'un kilomètre. Elle dessert principalement des équipements sportifs et est peu empruntée par des piétons. C'est dans les missions du Siceco d'essayer de nouvelles technologies pour ses communes-membres, ici Talant, et de les diffuser si elles s'avèrent probantes. Chaque luminaire a une puissance de 125 W contre 90 W pour une lampe à sodium à décharge de dernière génération, courante en éclairage public. À pleine puissance, les lampes led consomment donc plus d'électricité.

Les économies proviennent en réalité de leur utilisation possible à 20 % de leur puissance là où les autres lampes ne supportent pas de descendre en dessous de 50 %.

À Talant, l'installation est soumise à deux régimes. Quand il fait nuit avant 21 heures, le soir, et après 6 heures du matin, les lampes led éclairent à 100 %. Entre 21 heures et 6 heures, l'éclairage baisse à 20 % jusqu'au moment où un véhicule ou même un vélo, détecté par radar à une des deux entrées de la voie, redéclenche les 100 %. Il n'existe pas de système standard pour enchaîner ces opérations. « Il a fallu créer la communication entre les points lumineux, le coffret de commandes et les radars, » précise Bruno Kablitz, responsable des services techniques du Siceco.

L'expérimentation a aussi pour but de savoir si l'éclairage d'un tel tronçon vaut

la peine, vu le trafic, ou s'il faut éclairer à la demande ou encore baisser automatiquement la puissance à partir d'une certaine heure. Ont donc également été posés une armoire de contrôle associée à un logiciel afin d'enregistrer le nombre d'allumages, à quelle heure ils ont lieu, ainsi qu'un compteur d'électricité. Un premier bilan devait être présenté début mai. D'ores et déjà, il apparaît que l'installation n'est pas rentabilisée par les économies d'énergie car les luminaires à led valent au moins deux fois plus cher que les traditionnels. À Talant, les équipements de détection, de commande et de contrôle coûtent 10 000 euros, sans les luminaires.

« Le système n'est pas généralisable pour le moment mais il faut s'y préparer car les fabricants investissent davantage dans cette technologie que dans les lampes à décharge, » constate M. Kablitz. ■



L'expérimentation des lampadaires à led prend place sur une route de transit à Talant (Côte-d'Or).

© CITEOS

FABRIQUER UNE CANALISATION SOUS TERRE

La réhabilitation d'un collecteur d'eaux pluviales au Pecq (Yvelines) a permis au fournisseur de la nouvelle canalisation d'atteindre un record de diamètre.

Sekisui SPR Europe a fourni le procédé de tubage sans tranchée Ribline, à travers sa filiale KMG-Linertec. Safège a choisi cette technologie mise en œuvre par l'entreprise HP-BTP.

L'ancienne canalisation en tôle ondulée de 3,25 m de diamètre ne suffisait plus pour évacuer les eaux pluviales,

l'ondulation freinant leur bon écoulement.

Le Syndicat intercommunal d'assainissement de la région de Saint-Germain-en-Laye opte alors pour une réfection qui lisse l'intérieur de la paroi.

L'environnement étant très contraint, le sans-tranchée s'impose.

Un puits de 3 m par 4 et de 5 m de profondeur donne accès au réseau. Une machine transforme une bande en polyéthylène renforcée d'acier en un tube puis le pousse dans la canalisation

à doubler. Tous les cinquante mètres, la machine arrête sa « fabrication » et commence un autre tronçon, ce qui suppose d'intervenir pour raccorder les deux morceaux.

L'espace entre l'ancienne canalisation et la nouvelle de 2,75 m de diamètre est comblé par un mortier.

Le processus s'est poursuivi jusqu'à atteindre les 280 m à refaire au Pecq. L'opération s'est déroulée, fin 2011, en deux étapes, sur 211 m puis sur 70 m après un changement de direction. ■

ANODES SACRIFICIELLES DE FORTE PUISSANCE

Les anodes DAS de la gamme Galva-shield sont plus puissantes que les modèles CC et XP. D'une longueur entre 1 m et 2,30 m, elles contiennent plus de zinc, entre 0,37 kg et 1,8 kg.



Les anodes DAS contiennent de 0,37 à 1,8 kg de zinc par mètre linéaire.

Ces anodes ralentissent la corrosion active des armures métalliques du béton dans les ouvrages, infrastructures et bâtiments. La version Marine - avec 3 kg de zinc par mètre linéaire - est plus particulièrement destinée aux ouvrages d'art maritimes soumis à une forte pollution, aux structures de pont et à la réhabilitation d'installations industrielles.

La protection par anodes est plus efficace que la purge du béton éclaté suivi d'un nettoyage de l'armature, de la passivation des aciers et de la pose d'un mortier. Une fois le point touché réparé, elle empêche la corrosion de migrer. Ces barres de section carrée,

rectangulaire ou ronde, sont placées à proximité des armatures à traiter. Leur noyau en zinc va se corroder à la place de l'acier et ainsi s'opposer à la corrosion, d'où leur nom d'anodes galvaniques sacrificielles. La densité du courant peut atteindre entre 5 et 15 mA/m². Elles sont équipées de fils électriques de sortie pour être reliées à l'armature. Elles se fixent à la zone à traiter par ligaturage, peuvent être ensuite enrobées dans du béton, insérées dans des panneaux de doublage en béton ou dans des enveloppes en béton armé. Parexlanko qui les fabrique, situe leur durée de vie entre dix et vingt-cinq ans. ■

FAÇADE SOLAIRE

Smac, du groupe Colas, commercialise et installe une façade solaire conçue par Opaly. La technologie de parement Activeskin comprend un polycarbonate compact devant une couche sombre captant le rayonnement solaire, le tout positionné devant un isolant protégé d'un bardage à l'arrière. Le complexe abrite des gaines aérauliques où l'air se réchauffe au soleil et circule. L'air chaud ainsi produit est récupéré et peut fournir jusqu'à 30 % des besoins en chauffage, selon Smac. La façade peut recevoir un textile imprimable où faire figurer des informations. Elle est adaptée aux équipements publics, aux centres commerciaux, aux bâtiments industriels et aux entrepôts.

BLOC DÉTENSIONNEUR ET PODIUM DE PALIER

Sateco a présenté deux dispositifs facilitant le travail sur les chantiers, au salon Intermat (16-21 avril, Paris-Villepinte). Le bloc entretoise détensionneur simplifie le décoffrage. Il maintient chaque côté du coffrage par une tige traversante afin que les banches restent parallèles et à l'écartement voulu correspondant à l'épaisseur du mur. La tige passe par le bloc de la première banche pour aller se visser dans l'écrou de la seconde banche. Après coulage et séchage du béton, la tige prise dans le béton est normalement difficile à enlever. Ici, un écrou latéral supplémentaire joue le rôle de soupape. Sa manœuvre déplace le bloc détensionneur et libère la pression sur l'écrou

principal qui serre la tige. La vis peut alors être dévissée. Seconde innovation de Sateco : le podium PCA qui accroît la sécurité aux abords des ascenseurs de chantier. Il obture les accès aux cages d'ascenseur, optimise les espaces de travail et de stockage des matériaux, et ceci au fur et à mesure de l'élévation des voiles de béton. Ce podium se règle en hauteur de 2,70 m à 4 m, et en surface de travail grâce à ses pieds réglables et à l'indication des dimensions tous les 10 cm sur les tubes. Le plateau de travail en bois s'agrandit par des traverses coulissantes, sans vis ni clou, et peut passer d'une forme carrée de 1,60 m de côté à une rectangulaire

de 2,50 m par 2,60 m. D'une ossature monobloc, il est entièrement repliable et colisable. Il est doté d'une échelle repliable à crinoline et d'un balancier intégré au sabot d'appui. ■



Un écrou latéral vient libérer les efforts sur la tige reliant les banches.

RÉSINES DE PROTECTION INDUSTRIELLE



Ces revêtements en résines protègent le béton en environnement agressif.

Une gamme de revêtements Masterseal, à base de résines polyuréthanes, acryliques ou époxydiques, protège le béton de la pénétration de l'eau, des agressions chimiques, des chocs, de l'abrasion et des ultraviolets. Elle est conforme à la partie 2 de la norme NF EN 1504. BASF qui la fournit l'accompagne d'un cahier des clauses techniques validé par un bureau de contrôle et d'un guide du prescripteur. En protection industrielle, la Masterseal se décline en trois produits. Le 136, en résine époxy et polyuré-

thane, assure le pontage de fissures et protège réservoirs, bacs de rétention et station d'épuration, des agents agressifs. Le 138, bi-composant époxy en phase aqueuse, convient également aux canaux d'irrigation, tuyaux, murs de soutènement, piliers de ponts, tunnels, et accepte une humidité relative du support jusqu'à 8 %. Le 190 est un revêtement époxy sans solvant en extrait sec et ne présente pas de danger pour les stockages de produits alimentaires ou d'eau potable, selon BASF. ■



Membre du Mieux Congés Intermédiaires RTP

CAISSE NATIONALE DES ENTREPRENEURS DE TRAVAUX PUBLICS

Association agréée par arrêté ministériel du 6 avril 1937 - Déclarée en Préfecture sous le n° 174 662

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 **7 200 entreprises** de Travaux Publics et assure le calcul et le versement de prestations dues à plus de **277 000 salariés**.

Nos coordonnées :

· Par courrier :

31 rue le Peletier - 75453 PARIS CEDEX 09

· Par Internet : www.cnetp.fr

· Par fax : 01.70.38.08.00

· 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



L'ÉCOLOGIE APPLIQUÉE À L'ARCHITECTURE

L'ouvrage de Grégoire Bignier traite de l'application de l'écologie scientifique aux réalisations architecturales destinées aux collectivités.

La conscience actuelle de l'écologie remet sur le devant de la scène l'harmonie et l'équilibre entre les êtres humains et leur environnement, question au fondement de l'architec-

ture. L'auteur propose ici une synthèse de ses cours à l'École nationale supérieure d'architecture (Versailles) et à l'École spéciale d'architecture (Paris). Dans une première partie théorique, il développe l'analyse du cycle de vie d'un bâtiment et sa durabilité et redéfinit les liens entre architecture et aménagement du territoire.

La seconde partie de l'ouvrage, illustrée, est consacrée à trois projets d'ouvrages d'art sur lesquels l'agence de l'auteur a travaillé : une passerelle piétonne, un pont tramway-piétons-cycles et un viaduc aérien.

www.editions-eyrolles.com ■



CONCOURS DE MAÎTRISE D'ŒUVRE

La Mission interministérielle pour la qualité des constructions publiques propose des recommandations sur l'organisation d'un concours de maîtrise d'œuvre sous l'angle des dispositions réglementaires et des modalités pratiques. Elle les a élaborées grâce à ses échanges avec

la maîtrise d'ouvrage et les professionnels de la maîtrise d'œuvre. Le maître d'ouvrage public a tout intérêt à faire appel à un maître d'œuvre en particulier pour des projets d'ouvrages d'art, d'aménagement d'espaces publics et de réhabilitation de bâtiment.

Rappelons que ce concours permet de choisir simultanément le projet et son auteur, à la suite de la consultation de plusieurs équipes sélectionnées pour faire des propositions.

www.miqcp.gouv.fr ■



AGENDA

ÉVÉNEMENTS

• 29 MAI AU 1^{er} JUIN

Stratégies de modélisation des structures béton

Lieu : Aix-en-Provence
www.sscs2012.com

• 5 AU 7 JUIN

Transports publics, salon européen de la mobilité

Lieu : Paris (Porte de Versailles)
www.transportspublics-expo.com

• 6 AU 8 JUIN

Salon de la prescription

Lieu : Lyon (Cité internationale)
www.salondelaprescription.com

• 8 JUIN

BTP et sécurité au travail

Lieu : Paris (Palais du Luxembourg)
www.synamap.fr

• 13 ET 14 JUIN

Recherche sites pollués, bio-indicateurs et phytoremédiation

Lieu : Paris
www.ademe.fr

• 26 AU 28 JUIN

Journées scientifiques et techniques du Cetmef

Lieu : Compiègne (UTC)
www.cetmef.developpement-durable.gouv.fr

• 10 AU 12 JUILLET

Analyse du cycle de vie en génie civil et construction

Lieu : Nantes
www.rilem.net

FORMATIONS

• 30 MAI

Géosynthétiques, bases

Lieu : Villers-lès-Nancy
www.cfg.asso.fr

• 4 ET 5 JUIN

Enrobés tièdes : de la formulation à la mise en œuvre

Lieu : Paris
http://pfe.enpc.fr

• 5 JUIN

Analyse du cycle de vie appliquée à l'eau potable et à l'assainissement

Lieu : Limoges
www.oieau.org/cnfmme

• 6 ET 7 JUIN

Sols et séismes

Lieu : Paris
http://pfe.enpc.fr

• 12 AU 14 JUIN

Concept BHNS : solutions, conditions du choix et de mise en œuvre

Lieu : Paris
http://pfe.enpc.fr

• 19 JUIN

Nouvelles exigences hygiène et sécurité en assainissement : intervention en espaces confinés

Lieu : Paris
www.oieau.org/cnfmme

• 26 AU 28 JUIN

Connaissance du système nucléaire

Lieu : Paris
http://pfe.enpc.fr

• 13 JUILLET

Rénovation énergétique : intervenir en milieu occupé (tertiaire et logement)

Lieu : Paris
http://formations.lemoniteur.fr

• 10 ET 11 SEPTEMBRE

Construire en bois selon la RT 2012

Lieu : Paris
http://formations.lemoniteur.fr

NOMINATIONS

AÉROPORTS DE PARIS :

Cédric Laurier devient directeur de la maîtrise d'ouvrage déléguée pour les travaux d'infrastructures. Il succède à Guillaume Sauvé qui dirige ADPI, filiale ingénierie et architecture d'ADP.

AGENCE DE L'EAU RHIN-MEUSE :

Guy Fradin préside désormais le conseil d'administration à la suite de Jacques Sicherman.

DLR :

Sonia Dubès remplace Bernard Pointet à la présidence de la Fédération des distributeurs, loueurs et réparateurs de matériel destiné au BTP et à l'industrie.

ENTPE :

Le conseil d'administration de l'École nationale des travaux publics de l'État est désormais présidé par Hélène Jacquot-Guimbal. Elle succède à Patrice Raulin.

MEDDTL :

Régine Bréhier dirige les affaires maritimes à la direction générale des infrastructures de transport et de la mer (ministère de l'Écologie). Elle succède à Philippe Paolantoni.

OPPBTP :

Patrick Loup est président depuis la dernière réunion du Conseil du comité national, structure paritaire.

PORT DU HAVRE :

Hervé Martel, directeur général du port autonome de Paris, prend la présidence du directoire du Grand port maritime du Havre.

RFF :

Mathieu Chabanel a été nommé directeur général adjoint chargé de la commercialisation et de la planification de Réseau ferré de France, et Christian Cochet, directeur général adjoint Opérations.

SNCF :

Sophie Boissard, directrice générale de Gares & Connexions, devient directrice générale déléguée chargée de la stratégie et du développement.


SYNDUEX :

Philippe Capello a été élu président du Syndicat national des entrepreneurs de travaux publics spécialisés dans l'utilisation de l'explosif. Il prend la succession de Jean-Pierre Marchal.

Passion et Créativité au service de Vos Projets


ingénierie

T






Ravins Fontaine - La Réunion

ECCS Award 2010: Prix Européen de la construction métallique



Remplacement de la piste d'aéroport de Genève par rigoir

fib Award for outstanding structures 2010: Special mention

T Ingénierie SA
 quai de saclay 18
 91128 ingénieurs civils
 epf 91128
 ch 12111 genève 11

T + 41 22 716 08 00
 F + 41 22 716 08 09
 www.t-ingenierie.com
 ppe@t-ingenierie.com

1- Diadès a réalisé l'inspection détaillée périodique du pont de Tarascon Beaucaire.

© DR



DIADÈS

LA SCIENCE DU DIAGNOSTIC ET L'INGÉNIERIE DE LA DURABILITÉ, AU SERVICE DES STRUCTURES ET OUVRAGES D'ART DE GÉNIE CIVIL

REPORTAGE DE MARC MONTAGNON

DIAGNOSTIC DES STRUCTURES ET DES OUVRAGES DE GÉNIE CIVIL, AVEC PRÉCONISATIONS DE RÉPARATIONS ET ÉTUDE PROSPECTIVE SUR LEUR DURABILITÉ, TELS SONT LES PRINCIPAUX DOMAINES D'INTERVENTION DE DIADÈS, UNE PME FILIALE DU GROUPE SETEC, QUI COMPTE AUJOURD'HUI PRÈS DE 20 PERSONNES ET RÉALISE PLUS DE 1,5 M€ DE CHIFFRE D'AFFAIRES. TOUTES CES ÉTUDES SONT MENÉES AVEC LES MOYENS D'INVESTIGATIONS ET D'INGÉNIERIE LES PLUS SOPHISTIQUÉS. UN DRONE A RÉCEMMENT ÉTÉ SPÉCIALEMENT MIS AU POINT PAR L'ENTREPRISE POUR L'INSPECTION DES STRUCTURES DE GRANDE HAUTEUR, DONT LES INFORMATIONS SONT TRAITÉES PAR UN LOGICIEL SPÉCIFIQUE DIA-MAP®, DÉVELOPPÉ EN INTERNE, POUVANT AINSI LES ANALYSER ET LES POSITIONNER SUR UN MODÈLE 3D DE LA STRUCTURE.

« Tout a commencé en 2009, indique Christophe Raulet, Directeur général de Diadès, à l'initiative d'ingénieurs et de directeurs du groupe Setec, auquel est intégrée l'entreprise. Notre but était de créer une ingénierie neutre et indépendante, afin de pallier le devenir de

l'ingénierie publique dans ce domaine de la maintenance de notre patrimoine, où très peu de référentiels existent, et où la complémentarité Structures et Matériaux est indispensable ». Les cinq collaborateurs du départ sont aujourd'hui une vingtaine basés à Aix-en-Provence et à Lyon, et le chiffre

d'affaires de la société est passé de 530 000 euros en 2009 à plus de 1 400 000 euros en 2011.

Autour du diagnostic de structures de génie civil, Diadès met en œuvre plusieurs types de missions.

La première concerne son métier de base : l'ingénierie du diagnostic, de la

maintenance, des études de réparation et de durabilité des ouvrages d'art - piles, tabliers, tunnels et barrages... - mais aussi des ouvrages de génie civil industriels tels qu'usines, silos et cheminées ainsi que des ouvrages maritimes, notamment les quais et digues. À ceci s'ajoute le conseil et l'assistance



2



3



4

auprès de maîtres d'ouvrage publics et privés dans la gestion de leur patrimoine, en incluant la maintenance, l'entretien, la pathologie, le diagnostic et les interventions préconisées pour assurer leur durabilité.

Le troisième volet d'activité de Diadès concerne la recherche en partenariat avec des organismes habilités toujours dans des domaines similaires, c'est-à-dire la maintenance, le comportement et la durabilité des structures.

DES ÉQUIPES COMPLÉMENTAIRES ET DYNAMIQUES

L'ensemble du personnel de la société est composé d'hommes et de femmes spécialisés dans l'expertise, le diagnostic et les études de réparation des ouvrages de génie civil.

Il s'agit d'experts issus du réseau technique du Ministère de l'Équipement, de chefs de projet provenant des grandes ingénieries françaises, d'ingénieurs et de techniciens formés dans les meilleures écoles spécialisées ou ayant suivi une formation et un compagnonnage interne. La complémentarité de ces équipes dynamiques permet à Diadès de réaliser des missions couvrant l'ensemble des phases d'une opération relevant de ses domaines d'intervention, depuis la gestion du patrimoine jusqu'à la maîtrise d'œuvre et d'interventions en phase « travaux ».

DES ÉQUIPEMENTS ET MATÉRIELS SPÉCIFIQUES

Les deux agences de la société sont dotées d'un matériel spécifique répondant à l'ensemble de leurs besoins. Outre les logiciels de calculs performants tels que Pythagore, ST1, Ansys, CDS, Robot Millenium..., Diadès dispose également des moyens d'accès de tous types permettant une lecture directe des pathologies au contact des structures, et notamment un drone qui

2- La visite du tunnel des Grands Goulets dans la Drôme, a été réalisée à l'aide d'une nacelle négative de 22 m mobile.

3- Inspection détaillée des ouvrages d'art de l'autoroute A65 Langon/Pau sur le réseau A'Liéonor (Autoroute de Gascogne).

4- Contrôle des investigations à l'arbalète sur les 35 VIPP du réseau ASF construits entre 1963 et 1970.

5 & 6- Diagnostic complet de la structure de la passerelle du PL1 du pipeline Sud-Européen à la traversée de la Durance.

a été récemment mis en œuvre lors de l'inspection des piles du viaduc de Millau.

En effet, si Diadès utilise pour ses inspections des logiciels et moyens performants mais « classiques » que nous venons d'évoquer, elle a aussi développé, en partenariat avec Novadem, un drone permettant un diagnostic précis de l'état des ouvrages d'accès difficile. Par exemple, pour inspecter les 84 000 m² de surface extérieure des piles du viaduc de Millau, dont la plus haute culmine à 245 m de hauteur, Diadès a mis en œuvre un drone quadripale de moins de 2,5 kg, entièrement démontable et donc facilement transportable, équipé d'un appareil photographique numérique couvrant des focales de 35 à 100 mm.

PRÉSERVER L'AVENIR DU PATRIMOINE

L'activité de Diadès s'inscrit dans un contexte de développement durable, afin de transmettre aux générations futures un patrimoine existant dans le meilleur état possible.

Quelques exemples d'interventions récentes illustrent cette volonté de participer à sa conservation.

PIPELINE SUD-EUROPÉEN : LA NOUVELLE VIE D'UN OLÉODUC DES ANNÉES 60

La Société du Pipeline Sud-Européen (SPSE) exploite un oléoduc, veine énergétique de l'Europe, qui assure l'approvisionnement des raffineries et d'une plate-forme pétrochimique sur l'axe Fos-Lyon-Karlsruhe (769 km).

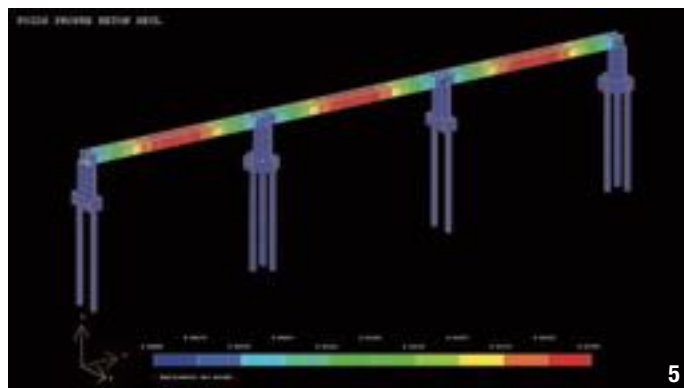
L'oléoduc a été construit en 1962, et exploité jusqu'au milieu des années 80. Au Sud d'Avignon, dans sa partie aérienne, il est soutenu par un ouvrage en béton précontraint traversant le lit majeur de la Durance.

Dans le cadre de sa remise en état, la question du passage aérien de la Durance s'est posée très rapidement. En effet, par application de l'article 9.1 de l'arrêté du 4 août 2006 réglementant la sécurité des pipelines, l'accord de l'Administration est nécessaire au maintien de l'ouvrage aérien.

Afin de permettre la ré-exploitation de cette conduite, SPSE a souhaité que l'ouvrage respecte notamment la nouvelle réglementation sismique.

Elle a donc missionné Diadès afin d'effectuer d'une part, un diagnostic complet de la structure avec le LERM (Laboratoire d'Études et de Recherche sur les Matériaux) et d'autre part, un renforcement structurel pour pérenniser l'ouvrage et permettre la reprise de sollicitations sismiques.

La conception envisagée par Diadès a ainsi pu répondre à deux problématiques :



5



6



→ Renforcer le tablier et les piles pour permettre la reprise des sollicitations sismiques sans renforcer les fondations.

→ Concevoir un renforcement particulier pour augmenter la durabilité de l'ouvrage en optimisant la géométrie de la précontrainte extérieure additionnelle palliant ainsi à d'éventuels défauts ultérieurs de la précontrainte interne au béton.

De ce fait, l'ouvrage fait actuellement l'objet d'un renforcement statique et dynamique original avec une précontrainte additionnelle servant à la fois à l'attelage des travées mais également au renforcement dynamique sous séisme vertical et au renforcement statique suivant la durabilité de la précontrainte intérieure. Cette précontrainte additionnelle pourra en l'occurrence être retendue si nécessaire, mais elle peut par ailleurs être démontée en cas de maintenance lourde nécessaire sur l'ouvrage au niveau du pipe.

RÉSEAU ASF : 35 VIPP DIAGNOSTIQUÉS EN DÉTAIL

À l'issue d'une étude LCPC/CETE réalisée pour le compte de l'ASFA et dans le cadre de la surveillance de ses ouvrages à risques, ASF a réalisé une campagne très importante d'investigations à l'échelle nationale sur ses VIPP (viaducs à travées indépendantes à poutres précontraintes) construits entre 1963 et 1970.

DES DÉVELOPPEMENTS D'AIDE À L'INSPECTION

Le poste de pilotage du drone permet non seulement une aide au pilotage mais offre des développements spécifiques d'aide à l'inspection :

- **Programmation de vols géo-référencés,**
- **Retour en direct de l'image avec la possibilité d'appliquer des filtres rehausseurs de défauts rendant les fissures plus visibles,**
- **Programmation d'une prise de photo automatique paramétrable pour assurer une image photographique continue de la structure.**



CHRISTOPHE RAULET, DIRECTEUR GÉNÉRAL DE DIADÈS

En tant qu'assistant à maîtrise d'ouvrage, Diadès a établi les DCE des investigations des 35 VIPP concernés, ainsi que les procédures et le contrôle du bon déroulement de toutes les investigations (fenêtres, essais à l'arbàlète, endoscope, prélèvements et essais physico-chimiques, radar...).

Les missions de Diadès ont consisté à définir, suivre, connaître et contrôler *in situ* toutes les investigations spécifiques propres aux VIPP qui sont à considérer comme des ouvrages sensibles. Le bon déroulement de ces opérations a conduit, notamment, à la nécessité de traiter certains ouvrages après la découverte de problèmes de natures diverses et a permis de préconiser les actions de maintenance ad hoc afin de sécuriser le réseau.

PLAN RAIL AUVERGNE : 4 VIADUCS HISTORIQUES

Dans le cadre de la maîtrise d'œuvre du Plan Rail Auvergne réalisée par Setec pour le compte de RFF, la société Diadès a en charge le diagnostic des quatre viaducs métalliques du XIX^e siècle situés sur la ligne Lavaur-franche/Saint-Germain-des-Fossés et dont deux sont inscrits au titre du patrimoine des monuments historiques. La mission a consisté, après le recueil et l'analyse des archives des viaducs, à réaliser un programme d'investigations et de diagnostic complet comprenant

les relevés dimensionnels et les inspections de l'ensemble des structures métalliques à partir de techniques acrobatiques, à réaliser le diagnostic anticorrosion et les contrôles par magnétoscopie, à prélever des échantillons et les analyser en laboratoire, à mettre au point un modèle de calcul par ouvrage sous le logiciel Pythagore avec la collaboration de Setec TPI, à définir un programme d'essais de chargement et à réaliser des épreuves statiques. Les modèles ainsi calibrés, et correspondant à la réalité du fonctionnement des ouvrages, ont permis d'étudier au mieux les réparations dans les délais de fermeture impartis de la ligne.

VIADUC DE MILLAU : UNE INSPECTION AÉRIENNE INÉDITE

La surveillance et le contrôle des infrastructures d'une autoroute font partie des obligations de son exploitant. Pour le viaduc de Millau, exploité par la CEVM (Compagnie Eiffage du Viaduc de Millau), ce programme imposé se déroule sur des cycles de 6 ans.

L'ouvrage ayant été inauguré en décembre 2004, le premier cycle a démarré en 2005 par une première grande visite d'inspection détaillée initiale dont l'objectif était de réaliser une photo instantanée du viaduc immédiatement après sa mise en service.

2011 marquait 6 ans plus tard l'année d'une deuxième grande visite afin d'établir un nouveau « cliché général » et de contrôler les évolutions de la structure par rapport à l'état initial du viaduc. Cette prestation a été confiée à Diadès. Elle a duré deux mois et a mobilisé jusqu'à neuf équipes d'inspecteurs pour un total de 3 000 heures de travail.

Du fait des dimensions exceptionnelles de l'ouvrage - la pile P2 a une hauteur de 245 m - l'intervention de Diadès a



LE DRONE DIADÈS : CHIFFRES-CLÉS

POIDS : 2,5 kg

DIMENSIONS : 1,30 m x 1,30 m

VITESSE DE MONTÉE : 4 m/s

VENT ADMISSIBLE : 12 m/s

AUTONOMIE : 20 à 30 minutes suivant les conditions, soit un balayage de 100 m²

HAUTEUR D'INSPECTION RECORD : 245 m

7- Le drone à l'approche du viaduc de Millau.

8- Le drone développé spécialement par Diadès en partenariat avec Novadem.

9- Visite du tablier du pont de Beaucaire Tarascon à l'aide d'une nacelle négative de 15 m.

10- Une équipe de Diadès en intervention pour le diagnostic des ouvrages métalliques de 1870.

fait appel à des techniques classiques telles que des cordistes pour l'inspection de l'extérieur des pylônes et de l'intérieur des piles ainsi qu'une passerelle à déport négatif pour accéder, depuis la chaussée, à la sous-face du tablier. Mais elle a également permis à Diadès de mettre en œuvre une technique singulière pour inspecter les quelque 84 000 m² de la surface développée par les sept piles : un drone quadripale entièrement radiocommandé par ordinateur. « Cette machine en carbone a été réalisée spécialement par Novadem selon notre cahier des charges pour la campagne d'inspection du viaduc de Millau. L'un de ses avantages est qu'il rend inutile l'utilisation de caméras lourdes équipées de zooms puissants

ou à des cordistes, qui ne disposent pas toujours des compétences requises en matière d'inspection et de diagnostic des structures ».

Ce drone est guidé depuis le sol par deux opérateurs intervenant chacun sur un ordinateur : un pilote de l'engin et un inspecteur dirigeant les investigations en fonction des images que restituent les écrans de contrôle et dans lesquels sont intégrées des méthodes de mesures et d'évaluation des défauts. À partir des informations de chaque photo, le logiciel va pouvoir ensuite les traiter et les positionner sur un modèle 3D de la structure. Le logiciel traite les images pour corriger les déformations dues aux variations des conditions de prise de vue.

Le logiciel permet ensuite de relever les défauts directement sur les photos et de reproduire la cartographie précise des pathologies.

À noter que le drone assure le traitement autant des désordres isolés que de ceux qui relèvent d'une pathologie globale de la structure. Capable d'atteindre une hauteur de 245 m en deux minutes, il dispose d'une autonomie de 20 à 30 minutes. Il est équipé d'un système de visée télémétrique laser et d'un dispositif de compensation lui permettant de demeurer stable, même avec des bourrasques atteignant 12 m/sec.

Dans la pratique, pour les piles du viaduc de Millau, par exemple, l'inspection a commencé par un balayage général de la structure comprenant de l'ordre de 4 000 clichés. Puis les photos ont été positionnées sur un modèle 3D. Ensuite, pour contrôler d'éventuelles pathologies, une seconde phase d'investigations peut être programmée. Dans ce cas, le drone se pose immédiatement sur la zone suspecte grâce à un dispositif de géolocalisation des photos. □



© DR 9

10



EXTENSION DU TRAMWAY T3 DE LA VILLE DE PARIS : LE PONT DU CANAL DE L'OURCQ

AUTEURS : MATHIEU GURTNER, INGÉNIEUR RESPONSABLE DE LA MAÎTRISE D'ŒUVRE TRAVAUX SETEC TPI - LÉONIE AGNESE, INGÉNIEUR D'ÉTUDE SETEC TPI - WILFRIED GBONGBON, INGÉNIEUR VISA SETEC TPI - MARC ZANZUCCHI, ARCHITECTE REICHEN ET ROBERT & ASSOCIÉS - JOSEPH CHANLIAUD, RESPONSABLE DES TRAVAUX ET MANDATAIRE DU GROUPEMENT EIFFAGE TP, EIFFAGE CONSTRUCTION MÉTALLIQUE - ALEXANDRE VIADUC, INGÉNIEUR TRAVAUX EIFFAGE TP - MARC WEBER, RESPONSABLE D'AFFAIRES EIFFAGE CONSTRUCTION MÉTALLIQUE

LE NOUVEL OUVRAGE D'ART DE FRANCHISSEMENT DU CANAL DE L'OURCQ, QUI PORTE LES DEUX VOIES DU TRAMWAY T3 DE PARIS, EST UN PONT MÉTALLIQUE DE 120 M DE LONGUEUR ET 14 M DE LARGEUR REPOSANT SUR DEUX PILES CONSTRUITES AU DROIT DES BERGES. DEUX RAMPES DE 120 M ET 80 M, RÉALISÉES SUIVANT LE PROCÉDÉ TERRE ARMÉE, PERMETTENT D'ACCÉDER À L'OUVRAGE. L'ENVIRONNEMENT TRÈS URBAIN LAISSE LA PART BELLE AUX CIRCULATIONS PIÉTONNES AVEC UN TROTTOIR DE 3,5 M DE LARGEUR ET UN CHOIX SOIGNÉ DES MATÉRIAUX. DEUX MOIS DE PRÉPARATION ET SEIZE MOIS DE TRAVAUX ONT ÉTÉ NÉCESSAIRES POUR LA CONSTRUCTION DE CE NOUVEL OUVRAGE D'ART PARISIEN.

UN OUVRAGE DESTINÉ AUX MODES DOUX

La Ville de Paris a retenu en 2006 le groupement Setec TPI/Reichen et Robert & Associés/Concepto/Pena & Pena pour réaliser la conception et la maîtrise d'œuvre travaux du 3^e secteur de l'ambitieux projet d'extension de la ligne tramway T3, qui s'étend de la Porte des Lilas à la Porte de la

Chapelle. Ce tronçon de 6 km présente une densification importante d'ouvrages d'art, au nombre de 18, allant du simple mur de soutènement au franchissement du Canal de l'Ourcq. Se situant en limite du 19^e arrondissement de Paris, cet ouvrage constitue un trait d'union entre Paris et la ville limitrophe de Pantin en plein essor. Les berges du canal de l'Ourcq relient

à pied ou à vélo le Parc de la Villette et la ville de Pantin. Leur fréquentation qui peut dépasser les 2 000 piétons par jour a incité le maître d'œuvre à concevoir cet ouvrage comme une passerelle piétonne (figure 2).

La structure du tablier s'organise autour d'un caisson central émergeant de l'extrados qui porte côté Paris, une première voie de Tramway et côté Pantin la

seconde bordée d'un large trottoir piéton en platelage bois. Le travail soigné des matériaux comme le bois et acier inoxydable assure un confort maximal pour les usagers ainsi qu'une grande pérennité. La recherche d'une structure fine aux lignes simples et épurées a été le fil conducteur des études de conception. Ainsi la section transversale du tablier a subi une évolution depuis



1
© SETEC TPI

l'origine inspirée du pont à poutres latérales ferroviaire classique et dont l'aboutissement s'est tourné vers une structure en caisson originale. En disposant les piles sur les berges du canal et les culées de manière à équilibrer la travure de l'ouvrage, le maître d'œuvre a réussi à préserver la perspective du site. Ce critère a fortement joué en faveur du choix d'un tablier métallique.

UN VECTEUR DE DÉVELOPPEMENT DU TERRITOIRE

L'ouvrage a vocation de franchir le canal de l'Ourcq par le tramway, les piétons et les cycles. Après une analyse du site, le diagnostic urbain localise le pont au cœur d'un paysage et

d'un patrimoine industriel lié au canal. Ce secteur est en complète mutation, notamment avec l'arrivée du tramway parisien. L'implantation du pont crée un vecteur de développement de ce site, il accompagne et structure les activités

1- Perspective du pont achevé.

2- Image de synthèse de l'architecte.

1- Perspective view of the completed bridge.

2- Architect's synthesis image.

futures. Cet ouvrage symbolise aussi une frontière entre Paris et Pantin, le long du canal de l'Ourcq. Il permet la traversée du canal dans un périmètre réservé aux circulations douces.

La mutation est déjà bien avancée le long du canal et donc à proximité immédiate du pont. L'usine de béton Lafarge (Port Sérurier) et le siège d'un pôle de BNP Paribas dans les anciens grands moulins de Pantin sont les premiers projets dernièrement réceptionnés. Ils sont entourés d'autres terrains mutables comme la halle aux cuirs ou bien les terrains Renault.

L'itinéraire du tramway se libère ici des boulevards des Maréchaux. Il traverse le périphérique à la porte de Pantin pour venir longer la route des Petits Ponts

en limite de la commune de Pantin. Il permet de desservir le secteur compris entre le parc de La Villette et la Gare RER E Pantin, territoire d'intercommunalité dont le tramway est le vecteur d'unification.

UNE STRUCTURE LÉGÈRE ET DISCRÈTE

L'ouvrage se veut discret dans le paysage urbain. Il respecte la perspective du canal et la vue dégagée au-dessus de l'eau. Il vise à donner la sensation la plus légère possible aux usagers du pont et des quais. La priorité est donc ici donnée à la minimisation de la hauteur du tablier et de sa structure principale. L'ascenseur s'inscrit sur le fond des grands moulins de Pantin. Il sert de signal tout en restant léger par son traitement en façades de verre et sa structure en acier. L'ensemble forme un objet très transparent. Le signal est matérialisé par un effet lumineux logé sur la partie supérieure de la cabine animant les allers et retours verticaux (figure 3). Comme ligne de conduite en adéquation avec la matière, la maîtrise d'œuvre a souhaité travailler les matériaux pour leurs qualités propres : l'acier de structure pour ses performances mécaniques, l'acier inoxydable pour sa pérennité, sa brillance, sa couleur argentée, le bois pour son écriture navale et la qualité de son contact intime avec les usagers.

La structure porteuse du pont est peinte en gris clair, la sous-face est habillée en lames de bois dans l'esprit du platelage piéton, mettant en valeur les entretoises du pont.



2
© DR-REICHEN ET ROBERT & ASSOCIÉS, ARCHITECTES - URBANISTES



3

© DR-REICHEN ET ROBERT & ASSOCIÉS, ARCHITECTES - URBANISTES

Ces éléments de charpente sont dessinés et travaillés pour alléger et donner l'image d'un ouvrage inscrit dans la modernité. Les lignes sont nerveuses et tendues confirmant une volonté dynamique à l'image du tramway. Cette mise en scène renforce l'idée initiale d'un pont contemporain faisant toutefois référence aux constructions métallique du début du siècle en acier riveté (photo 4).

UN CONTEXTE GÉOTECHNIQUE DIFFICILE

La campagne de reconnaissance géotechnique effectuée au droit des appuis du pont a mis en évidence des anomalies de type zone décomprimée ou zone plus lâches dans les remblais et éboulis de pente et dans les marnes infra-gypseuses. Ces anomalies ont conduit d'une part à utiliser des valeurs prudentes pour les paramètres géotechniques de ces formations et d'autre part à réaliser des injections sous les têtes de pieux afin de garantir leur portance de pointe (figure 5).

Les blocs techniques des culées (et les rampes d'accès) atteignant 5 m de haut, le remblai support est donc susceptible de tasser pendant la phase de construction. Compte tenu des faibles valeurs des modules pressiométriques et de l'absence d'une nappe pérenne dans les formations superficielles, le remblai a tassé de manière concomitante à sa montée.

Le calcul de l'amplitude du tassement absolu a conduit à retenir une structure souple de type Terre Armée pour les ouvrages de soutènement. De plus, l'amplitude des tassements différentiels provoqués par les charges d'exploitation a nécessité un préchargement des rampes (2 m de remblais) en phase tra-

vaux. La structure souple a donc permis d'absorber les déformations du sol support dues au préchargement (figure 6).

L'ANALYSE DYNAMIQUE

L'expérience acquise récemment sur plusieurs ouvrages réservés aux piétons invite les concepteurs à une grande vigilance vis-à-vis des phénomènes dynamiques. Les passerelles piétonnes subissent au cours de leur durée de vie des vibrations mécaniques induites par l'action du vent et la marche des piétons. L'ouvrage sur le canal de l'Ourcq est aussi sollicité par les vibrations induites par les passages du tramway. Ces vibrations qui sont la plupart du temps non préjudiciables pour la structure des passerelles peuvent devenir plus ou moins gênantes voire inconfortables pour l'usager. Dans cette situation, il est possible d'équiper l'ouvrage d'un amortisseur dynamique accordé (ADA) afin d'améliorer son comportement vibratoire. Sous l'action dynamique des piétons, les calculs ont permis d'identifier

l'existence d'un mode propre critique à 1,97 Hz pour la travée centrale conduisant à des accélérations jugées inacceptables ($> 2,5 \text{ m/s}^2$) d'après les recommandations du guide SETRA/AFGC intitulé « Guide méthodologique : Passerelles piétonnes, Évaluation du comportement vibratoire sous l'action des piétons ». Néanmoins, il est assez courant que les calculs amènent à des résultats très défavorables alors que l'ouvrage est jugé confortable par tous. Des essais dynamiques *in situ*, qui ont mobilisé un groupe de 30 piétons, ont

3- Image de synthèse de l'architecte.

4- Tablier achevé.

3- Architect's synthesis image.

4- Completed deck.

permis de mesurer le niveau de confort du pont et ainsi de conforter le maître d'ouvrage dans sa décision de ne pas équiper le tablier d'un ADA.

DESCRIPTION TECHNIQUE DE L'OUVRAGE TERMINÉ RAMPES D'ACCÈS

Les rampes d'accès à l'ouvrage ont été réalisées suivant le procédé Terre Armée avec un parement Terratrel formé de panneaux de treillis métallique en acier galvanisé derrière lesquels est mis en place le remblai minéral (grès des Ardennes) puis un géotextile et le remblai technique (sablon). Ces deux ouvrages portent les voies du tramway côté Paris, la voie piétonne côté Pantin et l'ensemble des équipements, multitubulaire, poteaux porte LAC et assainissement de la plateforme tramway (figure 9). À l'approche des culées du pont, les rampes s'élargissent pour laisser la place à un escalier intégré aux rampes permettant ainsi de rejoindre les berges du canal et améliorer l'interconnexion piétonne.

PILES ET CULÉES

Les piles P1 et P2 sont fondées sur 4 pieux de diamètre 1 000 mm et 23,10 m de longueur, ancrés dans les marno-calcaires de Saint-Ouen. Une semelle de répartition de 1,5 m d'épaisseur permet la transmission des efforts du fût de pile aux pieux. Le fût de 4,45 m de hauteur présente un coffrage original dont les sections en pied et en tête sont de forme elliptique pivotées de 90° l'une par rapport à l'autre. Le chevêtre de pile présente une réservation centrale destinée à loger un dispositif d'éclairage de la sous-face du tablier. Le chevêtre reçoit deux appareils d'appui à pot d'élastomère

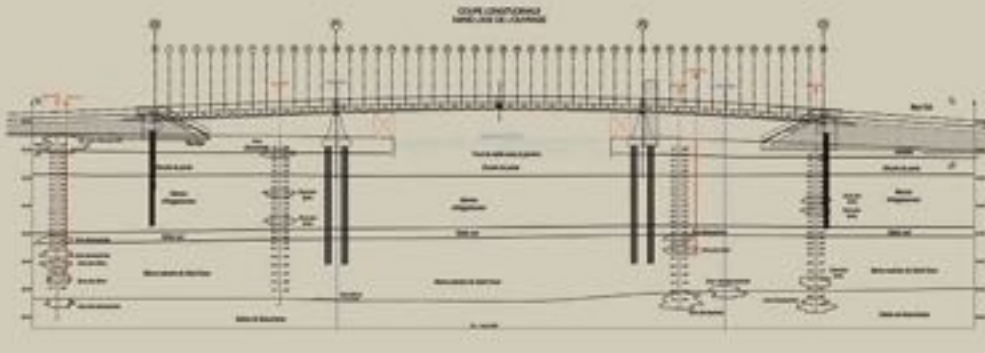


4

© MARC WEBER - EIFFAGE

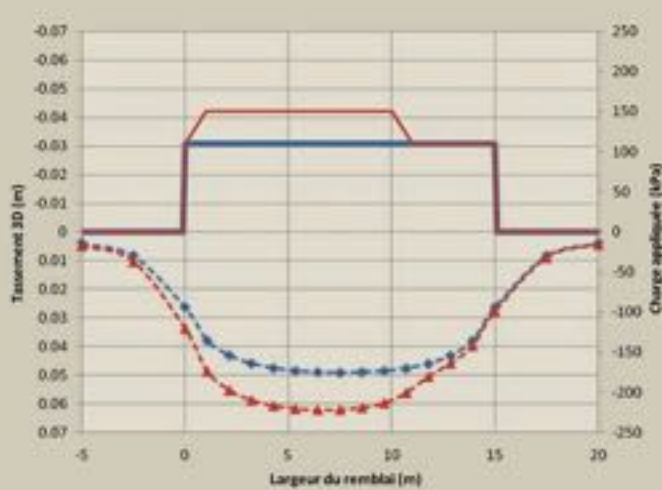
STRATIGRAPHIE DES SOLS

5



COURBE DE TASSEMENT DU SOL SOUS LES RAMPES

6

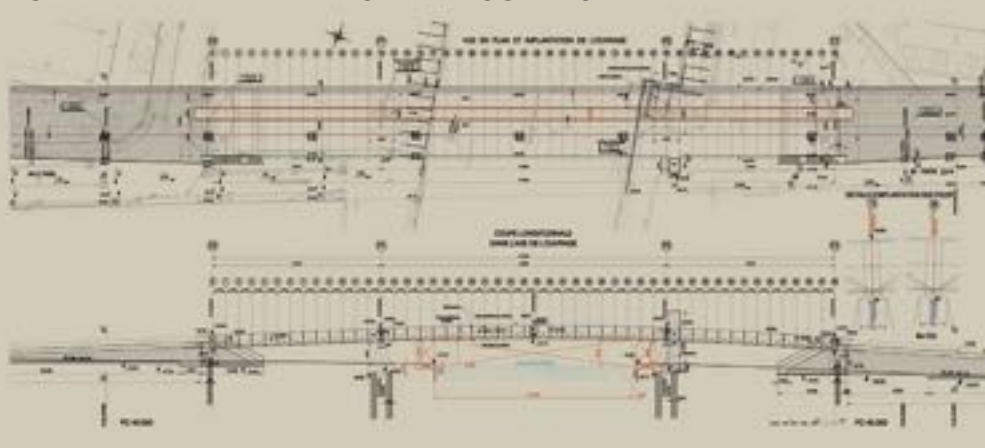


5- Stratigraphie des sols.
6- Courbe de tassement du sol sous les rampes.
7- Vue en plan et élévation de l'ouvrage.
8- Coupe en travers du tablier en section courante.

5- Soil stratigraphy.
6- Curve of soil subsidence under the ramps.
7- Plan and elevation views of the structure.
8- Cross section of a standard deck section.

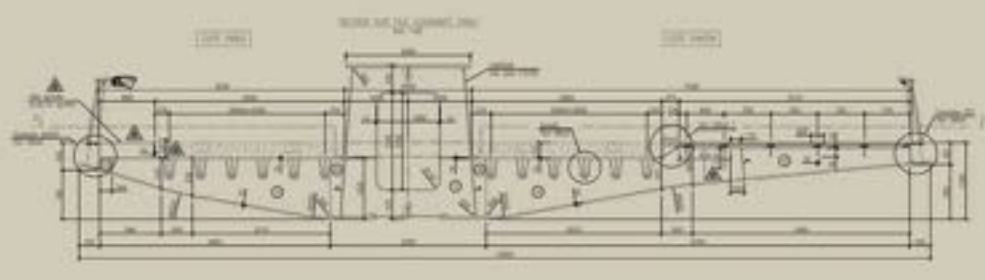
VUE EN PLAN ET ÉLÉVATION DE L'OUVRAGE

7



COUPE EN TRAVERS DU TABLIER EN SECTION COURANTE

8



à un entraxe de 3,85 m, et permet de laisser place aux dispositifs de vérinage situés au droit des âmes du caisson du tablier. La définition de cet entraxe a fait l'objet d'un calcul minutieux afin d'éviter tous phénomènes de soulèvement liés à des cas de chargement dissymétrique du tablier (figure 17).

Les culées sont fondées sur 3 pieux de diamètre 800 mm et 18,50 m de longueur dont l'un est positionné avec un entre axe de 0,90 m de façon à réduire les moments en tête des pieux. Les culées comprennent un sommier, un mur garde grève et deux murs caches latéraux. Le sommier reçoit deux appareils d'appui à pot d'un entraxe de 9 m de manière à s'affranchir des phénomènes de soulèvement. Ces culées sont entièrement habillées à l'avant par un rampant en béton armé revêtu d'un parement de type hérisson avec le même grès des Ardennes des rampes.

TABLIER

La section courante du tablier présentée sur la figure 8 est formée d'un caisson central trapézoïdal de forte inertie sur lequel sont assemblés des encorbellements qui reçoivent du côté Paris une voie de tramway et du côté Pantin la seconde voie de tramway et le trottoir piéton. Les encorbellements sont composés d'entretoise en forme de V qui reçoivent une dalle orthotrope. Les augets ont été disposés de façon à reprendre les efforts locaux du tramway, soit deux augets au droit des rails et le reste réparti de manière uniforme sur la largeur du tablier (figures 7 et 8). Les sections du tablier sur piles et culées comportent un caisson transversal de forte inertie qui traverse le caisson central de manière à transmettre les efforts aux appareils d'appui dont l'entraxe est supérieur à la largeur du caisson (figure 11).

ÉQUIPEMENTS ET SUPERSTRUCTURES

→ Le tablier comporte une étanchéité par feuille préfabriquée bitumineuse dont les relevés ont été traités par une résine spécifique. Une fois réceptionné, l'étanchéité a été protégée par une couche d'enrobée de 3 cm d'épaisseur vis-à-vis notamment des travaux de pose de voie qui ont suivi les travaux du pont (figure 12).

→ Le platelage de la voie piétonne réalisé en chêne de classe 4 vis-à-vis des attaques biologiques a fait l'objet d'un platelage prototype au démarrage du chantier afin de valider entre autre ses caractéristiques de glissance. ▷

Les essais de résistance à la glissance menés par le laboratoire de la Ville de Paris, suivant la norme NF EN 13036-4, ont conduit à rajouter une bande anti-dérapante à chaque lame dans l'une des rainures prévues initialement au marché (photo 13).

→ Les garde-corps sont constitués de montants en acier inoxydable, reprenant le dessin en plan des membrures inférieures de la structure. La main courante en chêne clair doré finalise le garde-corps et affirme par sa massivité la courbe générale de l'ouvrage en vue éloignée. Une maille métallique en acier inoxydable rigide assure le remplissage des gardes corps pour la mise en sécurité et garantit un effet de grande transparence et de brillance.

CALCULS JUSTIFICATIFS MODÉLISATION EN FLEXION LONGITUDINALE

La flexion longitudinale du tablier a été étudiée avec un modèle 3D en élé-

ments finis de poutres. L'ouvrage est modélisé par une poutre représentant le caisson et munie de barres orthogonales infiniment rigides permettant de positionner transversalement les appuis, et de poutres modélisant les consoles support de la dalle orthotrope et du trottoir (figure 14). L'ouvrage est dimensionné non pas en contrainte mais par les critères de flèche et de dévers définis par le système de transport. La flèche est limitée au 1/750^e de la portée qui dimensionne les épaisseurs des tôles du caisson central. Le dévers est quant à lui limité à 2 mm/m.

JUSTIFICATION À LA FATIGUE

L'ouvrage étant métallique et circulé par des tramways, il est soumis à des effets cycliques qui peuvent entraîner la fatigue des soudures. Les zones particulièrement sensibles à la fatigue sont :

→ La soudure des augets sur la console de la dalle orthotrope ;

→ La jonction des augets avec les

éléments transversaux sur piles et culées de la dalle orthotrope ;

→ La soudure de la console sur l'âme du caisson central ;

→ La semelle inférieure intermédiaire.

Afin d'apprécier l'effet des charges locales sur la dalle orthotrope, l'entreprise a utilisé un modèle local aux éléments finis. Les conditions aux limites consistent à un blocage des déplacements de tous les nœuds du modèle adjacent à l'âme du caisson central.

La charge d'exploitation considérée correspond à un boggie du tramway chargé à 6 personnes/m² circulant sur une seule voie. Le nombre de cycles Nc correspond à 150 passages d'un tramway de 4 boggies par convoi par jour sur 100 ans. Le calcul a été ensuite mené dans l'hypothèse de l'évaluation du risque de fatigue par la méthode de durée de vie en considérant les conséquences de ruine d'éléments redondants comme importantes (cf. NF EN 1993-1-9).

Les calculs ont montré que les joints de continuité des augets étaient moins soumis à la fatigue lorsqu'ils sont placés au 1/4 de la portée.

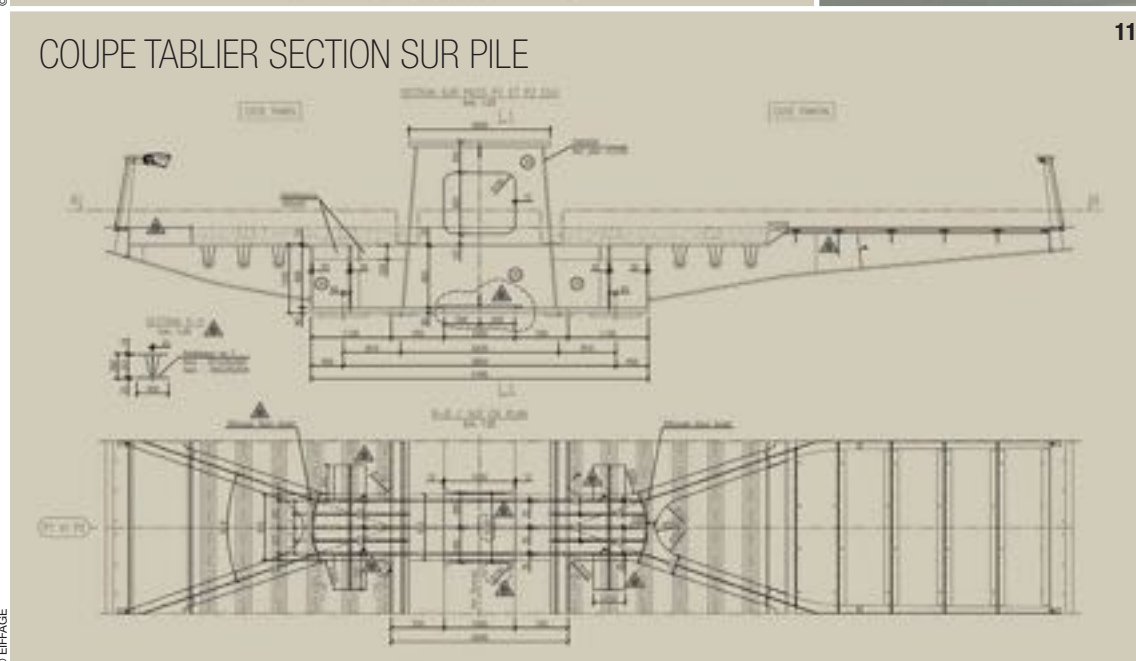
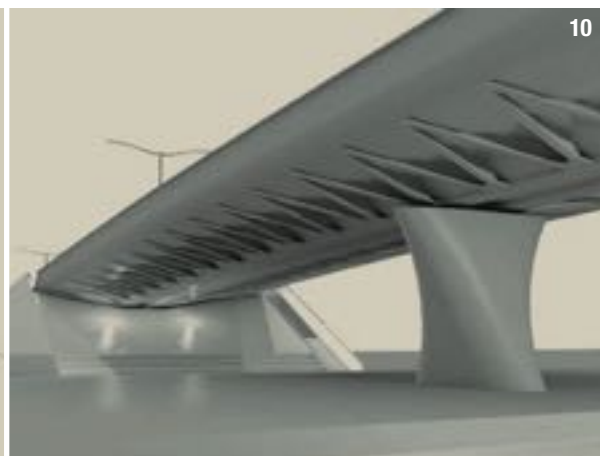
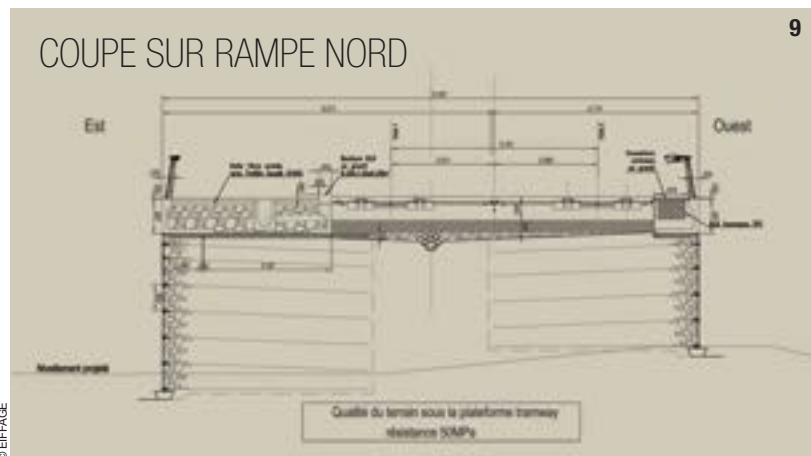
La partie la plus sensible est l'intersection des augets avec les caissons transversaux sur appuis qui amène une classe de détail de 36.

L'entreprise a proposé de mettre en place un gousset qui permet de diminuer l'étendue de contrainte dans cette soudure et faire passer la section à la fatigue. La figure 15 montre la solution finale retenue suite au calcul à la fatigue.

MODE DE CONSTRUCTION PILES

L'architecture atypique de la pile a imposé au constructeur Eiffage ETP de démarrer la conception du coffrage dès le démarrage du chantier.

Afin de reprendre la forme imposée, le coffrage est constitué d'un négatif dans une forme géométrique simple.



9- Coupe sur rampe Nord.

10- Image de synthèse de la pile.

11- Coupe tablier section sur pile.

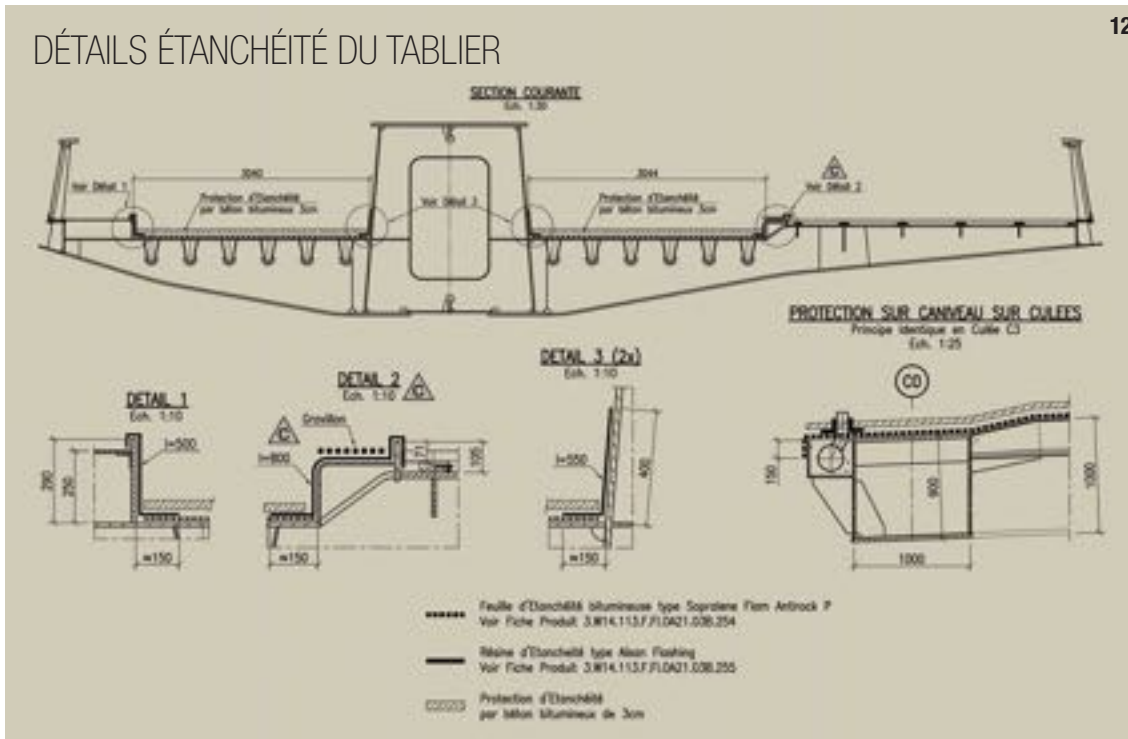
9- Cross section on northern ramp.

10- Synthesis image of the pier.

11- Deck cross section on pier.

DÉTAILS ÉTANCHÉITÉ DU TABLIER

12



12- Détails étanchéité du tablier.

13- Prototype platelage.

14- Modèle filaire du tablier.

15- Détails d'encastrement des augets sur pile.

12- Deck waterproofing details.

13- Decking prototype.

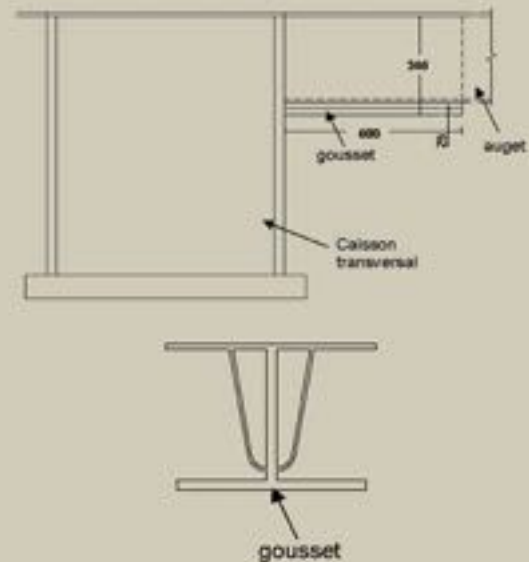
14- Single-line model of the deck.

15- Details of inclined reinforcing bar embedment on pier.



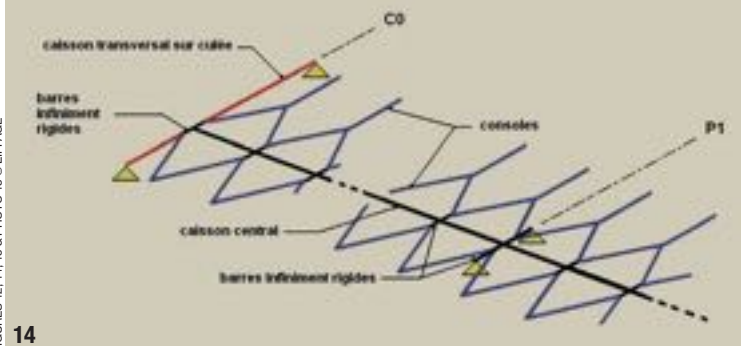
13

DÉTAILS D'ENCASTREMENT DES AUGETS SUR PILE



15

MODÈLE FILAIRE DU TABLIER



14

La poussée du béton horizontale peut être reprise de deux façons : soit par le passage de tiges traversantes (solution incompatible avec la volonté architecturale d'absence de trous de tiges ou de marques de rebouchage sur le béton), soit par un ceinturage extérieur. Dans cette dernière solution, si l'on opte pour une forme rectangulaire, de nombreux profilés métalliques sont nécessaires pour « éviter » les zones de béton de la pile, ce qui augmente la durée des tâches de manutention,

alors qu'avec une forme cylindrique, l'utilisation de sangles seule permet la reprise des efforts. C'est donc tout naturellement que le choix du fabricant s'est orienté vers La société Tarare Bois, seule société qui proposait un « coffrage bois cylindrique ». Des vaux régulièrement espacés, tous de géométrie différente et dessinés à partir de coupes du modèle 3D, permettent d'établir des points de référence pour la peau de coffrage, com-

posée de couches de contreplaqué de 5 mm suffisamment souples pour épouser la forme imposée. Le coffrage est ensuite recouvert d'une peinture polyuréthane pour gommer les joints entre les plaques de contreplaqué, et finalement poncé pour lui assurer une régularité optimale. Les efforts de bétonnage sont repris par le système de ceinturage. D'abord découpé en quatre coques afin de satisfaire aux contraintes du transport en convoi exceptionnel, l'as-

semblage s'est fait sur site, par paires, en respectant l'obligation architecturale de n'avoir qu'une jointure de coffrage masquée par une baguette de forme triangulaire. L'autre challenge de cette pile était le ferrailage. Plusieurs mois ont été nécessaires pour finaliser un plan dont la nomenclature est constitué de près de 200 repères uniques (rayons variables pour toutes les armatures) et permettant de garantir un accès au cœur de la pile.



16



17

LE CHANTIER EN CHIFFRES

MATÉRIAUX ET ÉQUIPEMENTS

RAMPES : 6 400 m³ de remblai et 870 m² de panneau de parement Terratrel

FORAGE D'INJECTION : 1 922 ml

PIEUX FORÉS À LA TARIÈRE CREUSE : 300 ml

BÉTON : 1 100 m³

ARMATURES : 80 tonnes

CHARPENTE MÉTALLIQUE : 732 tonnes

PLATELAGE BOIS ET FAUX PLAFOND : 1 264 m² + 720 m² soit 200 m² de chêne brut

ÉQUIPEMENTS INOX : 548 ml de garde-corps soit 28 tonnes d'acier inoxydable

LES HOMMES

Près 150 personnes pour le Génie Civil et 250 pour la charpente ont œuvré pour la construction de cet ouvrage, compagnons, sous-traitants, techniciens et ingénieurs.



18

Afin de ne pas abimer la peau « cofrante » en peinture polyuréthane lors de la manipulation des fers à bétons, un gabarit correspondant à un demi-coffrage a été utilisé sur site pour le montage. L'accès au cœur de la pile a permis la finalisation du ferrailage et sa vérification (figure 16).

Vient enfin l'étape très délicate de la mise en œuvre.

Un élément prototype en forme de tulipe de 1,5 m de hauteur a été construit et a permis la réalisation de plusieurs essais afin de vérifier et d'ajuster la formulation définitive du type de béton (teinte, affaissement, maniabilité, bul-

lage), de tester différentes huiles de décoffrage écologiques et sans traces sur le béton, de confirmer le choix de la peinture polyuréthane de peau et de tester la fermeture par sangles à hautes résistances, ce afin de lever toutes les incertitudes sur l'efficacité du dispositif (photo 17).

16- Ferrailage et coffrage de la pile P1.

17- Pile P1 après décoffrage.

18- Fabrication des platelages dans les ateliers de Lauterbourg d'ECM.

19- Plateforme d'assemblage de la charpente sur site.



19

© MARC WEBER - EIFFAGE



Lors du bétonnage, les risques importants de bullage engendrés par la forme évasée de la pile ont pu être maîtrisés grâce à l'utilisation d'un vibreur à canne et de guides métalliques. La levée du coffrage par poussée du béton a été bloquée par deux profilés métalliques, posés en tête de coffrage et liaisonnés à la semelle de pile par des tiges.

Il restait encore l'ultime étape de décoffrage qui met au grand jour l'ensemble du travail réalisé autour de cette pile, allant du premier trait de crayon de l'architecte au dernier coup de taloché du compagnon.

TABLIER

La structure métallique a été fabriquée dans les ateliers d'Eiffage Construction Métallique à Lauterbourg (67).

L'ouvrage est découpé dans sa longueur en neuf tronçons, constitués chacun d'un caisson central, de deux encorbellements portant les voies de tramway (platelage) et de la partie piétonne en porte à faux (trottoir).

Le dessin atypique des encorbellements latéraux constitués d'entretoises en forme de V supportant la dalle orthotrope a nécessité une vigilance particulière lors des étapes de découpe, montage et soudage afin de respecter la géométrie au millimètre et permettre l'assemblage des tronçons sur site (photo 18). Ces tronçons, dont le poids allait jusqu'à 54 tonnes ont été transportés par voie routière afin d'être acheminés au chantier.

Pour des raisons de planning, l'assemblage sur site a été effectué simultanément

20a & 20b- Hissage de la travée centrale.

20a & 20b- Hoisting the centre span.

en trois endroits malgré l'exiguïté du site (photo 19).

→ 1/3 Nord posé à la grue sur les appuis et palées provisoires à partir de la plateforme Nord,

→ 1/3 Sud posé à la grue sur les appuis et palées provisoires à partir de la plateforme Sud,

→ 1/3 Central posé à la grue sur barge à partir de la berge Nord.

La mise en place de la travée centrale de 260 Tonnes entièrement soudée

et équipée a été effectuée par ECM à l'aide de vérins creux et barres de pré-contrainte accrochées aux extrémités des caissons des travées Nord et Sud posées sur leurs appuis définitifs.

La pièce centrale constituée de 3 tronçons a été mise en place par flottage sous les vérins. Le hissage a été effectué par l'action simultanée des 4 vérins d'un pas de 400 mm (photos 20a et 20b). Les opérations de soudage en place de la partie centrale, la protection anticorrosion et la mise en œuvre des équipements des travées Nord et Sud (garde-corps, faux plafond bois, platelage bois et étanchéité) ont suivi. □

PRINCIPAUX INTERVENANTS

MAÎTRE D'OUVRAGE :
Mairie de Paris

MAÎTRE D'ŒUVRE :
Setec TPI (mandataire) /
Reichen et Robert et associés /
Péna & Péna / Concepto

ARCHITECTE :
Reichen et Robert & associés

ENTREPRISES :
Le marché a été attribué
au groupement d'entreprises
Eiffage TP (mandataire) et
Eiffage Construction Métallique

CALENDRIER D'EXÉCUTION

Période de préparation	Terrassement	Rampes + préchargement	Appuis	Charpente	Équipements superstructure
2 mois	1 mois	4 mois	3 mois	6 mois	2 mois
01/12/2009	← 16 mois de travaux →				01/06/2011

ABSTRACT

EXTENSION OF THE T3 TRAMWAY IN PARIS: THE BRIDGE OVER THE OURCQ CANAL

SETEC TPI: M. GURTNER, L. AGNESE, W. GBONGBON - M. ZANZUCCHI, ARCHITECTE
REICHEN ET ROBERT & ASSOCIÉS - EIFFAGE: J. CHANLIAUD, A. VIADUC, M. WEBER

The new bridge crossing the Ourcq canal, which carries the two tracks of the Paris T3 tramway, is a steel bridge 120 m long and 14 m wide resting on two piers constructed on the banks. Two ramps 120 m and 80 m long, built by the reinforced earth process, provide access to the structure. The highly urban environment gives priority to pedestrian traffic, with a footpath 3.5 m wide and a careful choice of materials. Two months' preparation and sixteen months of works were needed for the construction of this new Paris bridge. □

AMPLIACIÓN DEL TRANVÍA T3 DE LA CIUDAD DE PARÍS: EL PUENTE DEL CANAL DEL OURCQ

SETEC TPI: M. GURTNER, L. AGNESE, W. GBONGBON - M. ZANZUCCHI, ARCHITECTE
REICHEN ET ROBERT & ASSOCIÉS - EIFFAGE: J. CHANLIAUD, A. VIADUC, M. WEBER

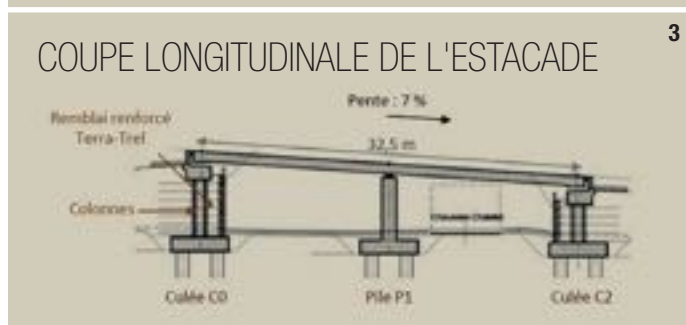
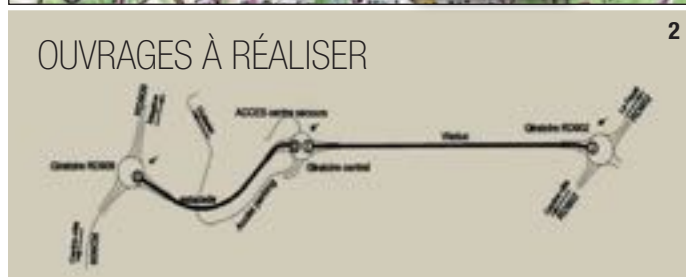
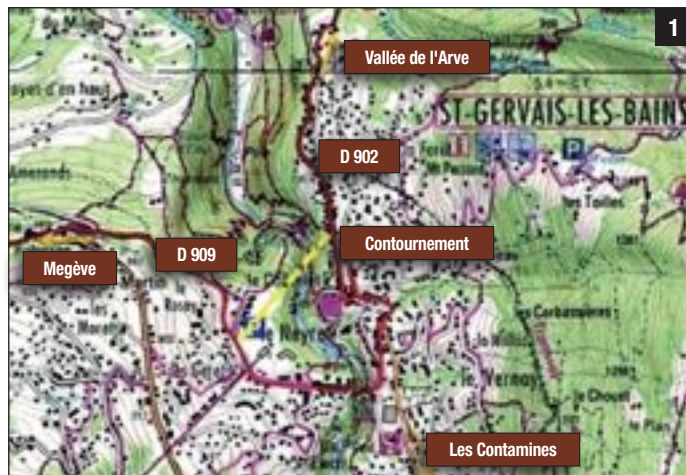
La nueva estructura de paso del canal del Ourcq, que sostiene la doble vía del tranvía T3 de París, es un puente metálico de 120 metros de longitud y 14 metros de anchura apoyado en dos pilares construidos perpendicularmente a las orillas. Dos rampas de 120 metros y 80 metros, construidas según el procedimiento de tierra armada, permiten el acceso a la estructura. El entorno, muy urbano, da prioridad a la circulación peatonal, con una acera de 3,5 metros de anchura y una cuidada elección de los materiales. La construcción de esta nueva estructura parisina ha requerido dos meses de preparación y dieciséis meses de trabajo. □



OUVRAGE DE FRANCHISSEMENT DU BONNANT À ST-GERVAIS (HAUTE-SAVOIE)

AUTEURS : LAURA PONCHON, INGÉNIEUR TRAVAUX, BOUYGUES TP RÉGIONS FRANCE - OLMIER VIRET, CHEF DE GROUPE TRAVAUX, BOUYGUES TP RÉGIONS FRANCE - JEAN-LOUIS TAFFOREAU, DIRECTEUR TECHNIQUE, BOUYGUES TP RÉGIONS FRANCE

AFIN DE LIMITER LE TRAFIC EN CENTRE-VILLE, LA COMMUNE DE SAINT-GERVAIS-LES-BAINS (74) A LANCÉ LE CHANTIER DE SON CONTOURNEMENT. CETTE VOIE NOUVELLE COMPREND TROIS CARREFOURS GIRATOIRES, DES REMBLAIS DE TYPE TERRE RENFORCÉE ET DEUX OUVRAGES D'ART, DONT LE FRANCHISSEMENT DE LA GORGE DU BONNANT PAR UN VIADUC EXCEPTIONNEL DE 240 ML. LE MARCHÉ DU LOT 1 -OUVRAGES D'ART, SOUS MAÎTRISE D'ŒUVRE EGIS-A ÉTÉ CONFIE PAR LE CONSEIL GÉNÉRAL DE HAUTE-SAVOIE AU GROUPEMENT BOUYGUES TRAVAUX PUBLICS RÉGIONS FRANCE/BENEDETTI. CET ARTICLE DÉCRIT SOMMAIREMENT LE PREMIER OUVRAGE (PASSAGE INFÉRIEUR À DALLE PRÉCONTRAINTÉ) ET DÉTAILLE LE MODE DE CONSTRUCTION DU VIADUC.



Le chantier du contournement de Saint-Gervais-les-Bains a été financé à 79 % par le conseil général de Haute-Savoie et à 21 % par la commune de Saint-Gervais les Bains. Démarré en avril 2010, il se terminera à la fin octobre 2012. Le marché du contournement est composé de 4 lots :

- **Lot 1** : Terrassements et ouvrages d'art ;
- **Lot 2** : Terrassements et giratoires ;
- **Lot 3** : Enrobés ;
- **Lot 4** : Éclairage.

Le lot 1 terrassements et ouvrages d'art est réalisé par le groupement d'entreprises Bouygues Travaux Publics Régions France (mandataire) / Benedetti. Ce marché comprend les terrassements (déblais, murs en terre renforcée, remblais) ; un ouvrage permettant de franchir le parking du télécabine du Bettex ; un viaduc enjambant la gorge du Bonnant.

Cet article a pour objet de présenter les ouvrages d'art de ce projet et plus

particulièrement la construction de l'ouvrage exceptionnel qu'est le viaduc de franchissement du Bonnant.

UN PROJET AMBITIEUX

Le centre-ville de Saint-Gervais-les-Bains, station de sports d'hiver et ville thermale, subit d'importants bouchons durant les saisons touristiques hivernales et estivales.

En effet, l'ensemble du trafic en direction des Contamines et de Megève (également des stations de ski) traverse le centre de Saint-Gervais-les-Bains.

Pour améliorer cette situation, un contournement de la ville est prévu : les véhicules seront détournés avant le centre-ville, traverseront la gorge du Bonnant sur un viaduc puis seront orientés dans la direction de leur choix par un carrefour giratoire (figure 1).

Le projet prévoit la réalisation de plusieurs ouvrages :

- Un rond-point de connexion à la RD 909 ;

- Un rond-point de connexion à la RD 902 ;

- Un rond-point central, avec la réalisation d'une voie d'accès au hameau du Châtelet ;

- Un ouvrage d'art dit « estacade » permettant de franchir le parking du

télécabine du Bettex et la voie d'accès au Châtelet ;

→ Un viaduc sur la brèche du Bonnant, ouvrage mixte en béton précontraint et à diagonales métalliques, construit par encorbellement successifs (figure 2). Par la suite, seuls seront décrits les ouvrages d'art et leur méthode de réalisation.

ESTACADE ET REMBLAIS D'ACCÈS RENFORCÉS

Cet ouvrage est de type passage inférieur en dalle précontrainte (PIDP).

Il a une longueur de 32,50 ml et est composé de deux travées de portées identiques et égales à 16,25 ml.

La voie de circulation portée sur l'ouvrage s'inscrit sur une courbe de rayon égal à 74 m, a une pente de 7 % du giratoire de la RD 909 vers le giratoire intermédiaire et présente un devers de 5 % vers le Châtelet. L'estacade comprend : 2 voies routières de 3,31 ml de large, 2 pistes cyclables de 1,50 ml de large et 2 trottoirs de 1,50 ml (figure 3).

La pile et les culées de l'ouvrage sont fondées sur deux files de trois pieux surmontées d'une semelle. La pile est constituée d'un voile unique en forme d'ellipse. Chaque culée, est constituée d'un chevêtre posé sur trois poteaux en béton armé désolidarisés du remblai renforcé par un chemisage en viroles béton préfabriquées. Le tablier de l'ouvrage est constitué d'une dalle en béton précontraint, coulée sur cintre (photos 4 et 5).

Le tablier de l'estacade a été terminé en décembre 2010 pour laisser la place à l'exploitation du parking sous l'ouvrage (délai partiel).

Ensuite, les remblais accès ont été réalisés, l'ouvrage a été équipé de ses superstructures (corniches, barrières de sécurité, étanchéité, enrobés et de joints de chaussée).

Les épreuves ont eu lieu le 1^{er} août 2011 et l'estacade a été ouverte à la circulation (photo 6).

VIADUC À GÉOMÉTRIE PARTICULIÈRE

Cet ouvrage permet de franchir la brèche encaissée du Bonnant. Sa longueur totale est de 240 ml, répartie en trois travées : deux travées de rive de 35 m de long et la travée centrale d'une longueur de 170 ml.

C'est un ouvrage mixte avec deux hourdis en béton précontraints reliés par des diagonales métalliques. Le hourdis supérieur est plan afin d'accueillir la circulation, tandis que le hourdis inférieur est arqué.



Du fait de cette géométrie particulière, la travée centrale de l'ouvrage est construite par encorbellement successifs. Les voussoirs sont coulés en place à l'aide d'un équipage mobile.

La pente de l'ouvrage est de 1,25 % du giratoire de la RD 902 vers le giratoire intermédiaire. Le profil en travers se décompose en : deux trottoirs de 1,50 ml de large, deux pistes cyclables de 1,50 ml de large et deux chaussées de 2,95 ml de large (la largeur utile est donc de 11,90 m). Enfin, le tablier de l'ouvrage est conçu avec un devers vers l'extérieur de 2,5 % chaque côté de la chaussée (photo 7 et figure 8).

Le viaduc comporte trois travées de longueurs inégales et de conception différentes du fait de la présence de la gorge. Les travées de rive sont constituées d'un caisson en béton tandis que la travée centrale est constituée d'un hourdis inférieur et d'un hourdis supérieur reliés par des diagonales métalliques. L'ensemble du béton est précontraint afin de pouvoir atteindre une portée entre piles de 170 ml.

Une des spécificités de l'ouvrage est l'appui inversé des travées de rives au niveau des culées. En effet, l'éloignement des charges de la travée centrale (son propre poids propre, l'équipage et la grue), crée un effet de levier, soulevant la travée de rive (figure 9).

Le principe du phasage de la construction du viaduc est de décaler dans le

temps la construction des travées de rive afin de pouvoir travailler en parallèle sur les deux rives et d'utiliser un seul équipage mobile.

Dans un premier temps, sont réalisés les déblais et les parois clouées afin de pouvoir commencer les fondations des culées et des piles. Puis, la construction de la culée C0 débute avec le bétonnage de la semelle puis des élévations. Ensuite la pile est bétonnée, puis le radier et les voiles de la travée de rive C0/P1. Enfin, la dalle de couverture de cette travée est réalisée.

Ensuite, l'équipage mobile est monté au bout de la travée de rive C0/P1 et le fléau Ouest est construit. Parallèlement, les travaux en rive droite sont menés dans le même ordre que précédemment, avec la réalisation de la culée C3, de la pile P2 et de la travée

4- Pile centrale.

5- Cintre de l'estacade.

6- Estacade et ses remblais d'accès renforcés.

7- Vue architecturale d'ensemble du viaduc du Bonnant.

8- Coupe longitudinale du viaduc.

4- Centre pier.

5- Jetty arch.

6- Jetty and its reinforced access embankments.

7- Overall architect's view of Bonnant viaduct.

8- Longitudinal section of the viaduct.

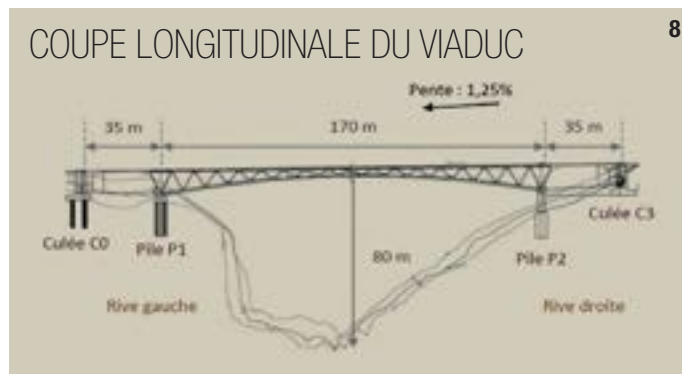
de rive C3/P2. Un décalage est donc introduit dans la réalisation des travées de rive afin qu'à la fin de la construction du fléau Ouest, la travée de rive C3/P2 soit terminée et donc en mesure d'accueillir l'équipage qui aura été partiellement démonté pour son transfert, puis remonté.

LES CULÉES, PILES ET TRAVÉES DE RIVE

L'ensemble des piles, des culées, et des travées de rives est réalisé en béton C35/45 XF4, à l'exception des chevêtres sur pile, des amorces et des voiles biais qui sont en béton C80/95 XF4 comme la travée centrale.

Le raccordement des deux extrémités de l'ouvrage aux rives de la gorge du Bonnant a nécessité des aménagements importants comprenant notamment des blindages en parois clouées (photo 10).

Les deux **culées** sont de conception similaire. Elles sont constituées d'un mur garde-grève et d'un mur de front ou « mur mortaise ». Le garde-grève a une épaisseur de 80 cm et une hauteur de 9,40 ml et est destiné à retenir le remblai d'accès. Le mur mortaise est de même hauteur que le garde-grève et d'une épaisseur de 1,40 ml, il est traversé par les tenons, solidaires de la travée de rive. Ces derniers viennent s'appuyer sur la partie supérieure des réservations dans le mur mortaise,



9- Schéma explicatif du fonctionnement de l'ouvrage.

10- Blindage de la motte castrale (culée C0).

11- Culée C0 (rive gauche).

12- Mur de front « mortaise ».

13- Puits marocain sous la pile P2.

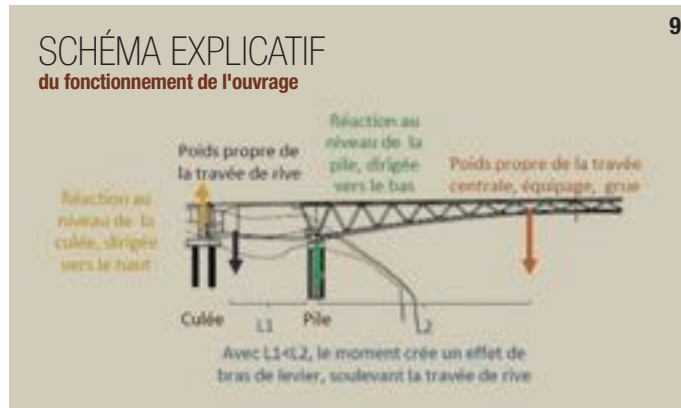
9- Explanatory diagram of the structure's functioning.

10- Castle mound sheeting (abutment C0).

11- Abutment C0 (left bank).

12- "Mortice" front wall.

13- "Moroccan well" shaft under pier P2.



du fait de l'effet de levier décrit précédemment.

En rive gauche, la culée C0 est fondée sur huit pieux de diamètre 1 800 mm surmontés d'une semelle de grande dimension (10,8 ml x 16,50 ml x 2,00 ml). En rive droite, la culée C3 est fondée superficiellement sur une semelle de 10,80 ml de long et d'une

largeur variable allant de 17,92 ml à 21,63 ml, et d'une épaisseur de 2 ml (photos 11 et 12).

Les **piles** sont fondées sur des puits marocains encastrés dans le rocher sain. Ce sont des puits de gros diamètre, qui ont été réalisés en alternant les phases d'excavation par passe de 1,5 m (à la pelle mécanique ou au

BRH/explosif lorsque le rocher sain est atteint) et de soutènement à l'aide de béton projeté (photo 13).

En rive gauche, la pile P1 est fondée sur deux puits de 5,00 ml de diamètre, reliés en tête par une semelle de 2,00 ml d'épaisseur.

En rive droite, la pile P2 est fondée sur un seul puits de section oblongue (5,00 ml x 12,00 ml) dont le grand axe est perpendiculaire à l'axe du pont. Sur les piles, quatre appareils d'appui néoprène de taille importante (1 200 mm x 1 200 mm x 300 mm) sont disposés et un emplacement est réservé pour les plots de vérinage du tablier (photo 14).

Les **travées de rive** sont constituées de caissons en béton précontraint d'une hauteur de 9,33 ml sur culée et de 11,12 ml sur pile.

Ces caissons sont fermés côté travée centrale par un mur incliné, rappelant l'inclinaison de la première diagonale du treillis. ▷





14



15



16



17

Les deux travées de rive sont similaires, la principale différence étant que la dalle de la travée C3/P2 s'évase au-dessus de la culée C3 du fait de la naissance du carrefour giratoire en rive droite.

Lorsque la culée et la pile sont terminées, un cintre est monté afin de pouvoir bétonner le « radier » (hourdis inférieur du caisson). Ce cintre est constitué d'un assemblage de profilés métalliques type HEB 300, HEB 600 et HEB 1000, et de plateaux coffrants. Au-dessus des piles, se trouve un chevêtre accueillant le voile biais et dont l'extrémité coté travée centrale a la forme du hourdis inférieur de cette dernière (photo 15).

Lorsque le radier est bétonné, les voiles latéraux sont coulés en six fois, en commençant du côté de la pile. Ces voiles ont une hauteur de 9 m environ et une longueur de 11 m environ et leur épaisseur varie de 70 cm à 2,5 m. Ils comportent chacun huit câbles de précontrainte qui viennent s'ancrer d'un côté dans les tenons et de l'autre dans les quatre premiers voussoirs de la travée centrale. Enfin, le voile biais est réalisé sur la pile (photos 16 et 17). Le cintre du radier est ensuite démonté,

puis le cintre de la dalle de couverture est installé. Celui-ci est constitué de HEB 300 posés dans des niches en tête des voiles sur lesquels sont disposés des plateaux coffrants. Près des tenons, du fait de l'épaisseur des voiles et de la dalle, le cintre a été réalisé à l'aide de tours d'étalement ou de prédalles béton en rive droite (photos 18 et 19).

Après bétonnage de la travée de rive, le cintre de la dalle est démonté et les niches sont rebouchées.

La travée de rive C0/P1 a été réalisée entre janvier et avril 2011, la travée de rive C3/P2 a été bétonnée entre avril et octobre 2011, en parallèle de la réalisation du fléau Ouest de la travée centrale.

LA TRAVÉE CENTRALE

Du fait de son importante portée de 170 ml, de sa géométrie et de la présence d'une brèche de 80 ml de profondeur à son aplomb, la travée centrale est construite par encorbellements successifs à l'aide d'un équipement mobile. Les voussoirs ont une longueur de 10,00 ml chacun et sont au nombre de dix-sept : huit pour le fléau Ouest, huit pour le fléau Est et un assurant le clavage. Le fléau Ouest

14- Pile P1 et ses appareils d'appui.

15- Cintre du radier de la travée C3/P2.

16- Bétonnage des voiles de la travée C3/P2.

17- Voile biais sur pile P1 avant bétonnage.

14- Pier P1 and its support systems.

15- Arch of the deck on span C3/P2.

16- Concreting the shear walls of span C3/P2.

17- Slanting shear wall on pier P1 before concreting.

PRINCIPALES QUANTITÉS

BÉTON : 9 000 m³

COFFRAGES : 9 000 m²

PAREMENTS MATRICÉS : 1 150 m²

ARMATURES PASSIVES : 1 100 tonnes

ARMATURES DE PRÉCONTRAÎTE : 160 tonnes

PAROIS CLOUÉES : 1 700 m²

DÉBLAIS : 12 000 m³

REMBLAIS DE PRÉCHARGEMENT : 20 000 m³

REMBLAIS CONTIGUS : 3 000 m³

REMBLAIS RENFORCÉS : 6 000 m³

DIAGONALES (TUBES ACIER) : 180 tonnes

est réalisé en premier, puis l'équipage est démonté partiellement, transféré et remonté en bout de la travée C3/P2 afin de réaliser le fléau Est. Les voussoirs supérieurs sont tous identiques, d'une largeur de 13,10 ml

et d'une épaisseur variant entre 26 cm et 77 cm aux nervures. Du fait de la géométrie en arc du hourdis inférieur, les voussoirs sont de plus en plus fins et de plus en plus larges, ce qui permet aux diagonales de conserver une incli-

naison transversale constante sur toute la travée (figure 20).

→ Les diagonales

Le hourdis supérieur et le hourdis inférieur sont reliés par des diagonales métalliques afin d'assurer la structure de poutre treillis. Ces diagonales sont en acier de nuance S355, ont une longueur variant entre 8,84 ml et 2,48 ml, et leur diamètre est constant et égal à 61 cm.

Les diagonales sont reliées au béton au niveau des nervures par l'intermédiaire de bossages appelés berceaux sur le hourdis inférieur et chapiteaux sur le hourdis supérieur. Du fait de la structure en treillis, les diagonales travaillent soit en compression soit en traction. Afin de renforcer la résistance des diagonales tendues, celles-ci sont mises en précontrainte (figure 21).

Les diagonales comprimées sont posées lors du cycle de bétonnage du hourdis supérieur. Leur partie supérieure est prise dans le béton coulé lors de la réalisation du voussoir tandis que leur partie inférieure s'ancre dans les berceaux N-1 par l'intermédiaire de tiges filetées reliées à des aciers pris dans le béton (figure 22).

18- Dalle de la travée C0/P1 avant bétonnage.

19- Dalle de la travée C0/P1 bétonnée.

18- Slab of span C0/P1 before concreting.

19- Slab of span C0/P1 after concreting.

Les diagonales tendues sont mises en place lors du cycle de bétonnage du hourdis inférieur. Elles sont prises en bas dans le béton et s'attachent aux chapiteaux du hourdis supérieur par l'intermédiaire de tiges filetées reliées à des aciers pris dans le béton N-1 (figure 23).

→ La précontrainte

Quatre types de précontrainte sont utilisés : la précontrainte de fléau, la précontrainte éclisse, la précontrainte des diagonales et la précontrainte extérieure.

Les câbles de précontrainte de fléau sont mis en œuvre pour chaque voussoir supérieur : après le bétonnage, quatre câbles sont tendus entre l'about du voussoir et l'arrière de la travée de rive, près de la culée. Ces câbles permettent de renforcer l'ouvrage en encorbellement durant la phase de construction. Le tracé des câbles des voussoirs 1 à 4 passe dans la dalle supérieure au niveau de la travée centrale, puis dévie dans les voiles de la travée de rive pour s'ancre au niveau des tenons. Cela permet d'une part de soutenir chaque voussoir, mais aussi de mettre en précontrainte les tenons, qui sont soumis à d'importants efforts du fait de la réaction d'appui. Les câbles des voussoirs 5 à 8 passent seulement dans la dalle supérieure et s'ancrent juste sous les joints de chaussée. Après réalisation du voussoir 9, des câbles de continuité sont tendus dans la dalle supérieure sur toute la longueur de l'ouvrage (figures 24 et 25).

La précontrainte éclisse se situe au niveau du hourdis inférieur et est mise en œuvre à la fin de la construction. Les câbles sont tendus entre chaque voussoir Est et Ouest, à partir du vous-

soir 3. Cette précontrainte permet de renforcer la structure en arc.

La précontrainte dans les diagonales est mise en œuvre uniquement pour les diagonales tendues, afin d'assurer une parfaite connexion entre le hourdis supérieur et le hourdis inférieur.

Enfin, la précontrainte extérieure n'est pas mise en œuvre lors du chantier, elle est seulement envisagée afin que le Tramway du Mont-Blanc puisse emprunter l'ouvrage ultérieurement. Des réservations et des bossages sont préparés sous le hourdis supérieur pour éventuellement mettre en place des câbles de précontrainte.

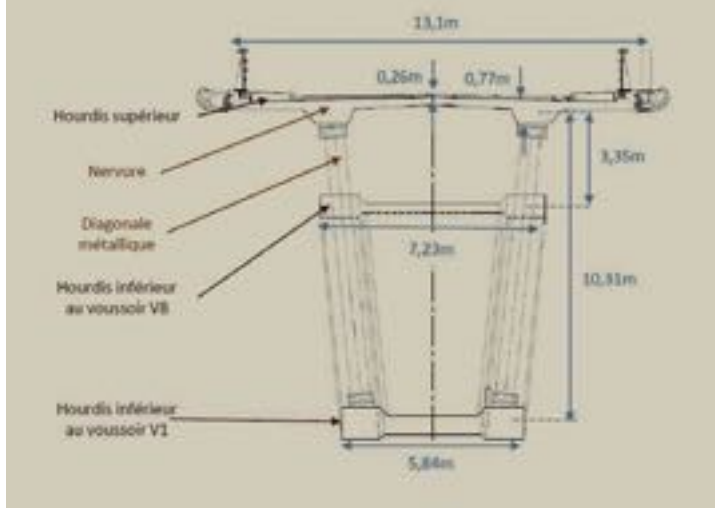
PRÉSENTATION DE L'ÉQUIPAGE MOBILE

L'équipage mobile a été conçu par SEMI, en partenariat avec le service méthodes de Bouygues Travaux Publics Régions France, l'encadrement et la maîtrise du chantier. Il a été construit dans les ateliers de CMIS/Localpal dans l'Aisne, puis les éléments ont été acheminés jusqu'au chantier et montés sur site. L'équipage a été conçu dans le but de permettre au maximum la manutention des cages d'armatures préfabriquées. ▷



SECTION DE LA TRAVÉE CENTRALE

20



Cet outil est prévu pour fonctionner en cycles de dix jours de travail pour la réalisation d'un voussoir, soit deux semaines pour réaliser un plot de hourdis supérieur et un plot de hourdis inférieur.

DESCRIPTION DES DIFFÉRENTS ÉLÉMENTS

L'équipage mobile comporte une partie supérieure et une partie inférieure, chacune équipée de coffrages afin de pouvoir réaliser la partie supérieure et la partie inférieure des voussoirs.

Les treillis et les coffrages extérieurs, la poutre en C, le surbandage, la poutre avant et l'équipage inférieur sont tous fixes les uns par rapport aux autres, tandis que le treillis central et le coffrage central sont mobiles l'un par rapport à l'autre et par rapport au reste de la structure. Ainsi, lors du ripage de l'équipage, le treillis central et le coffrage central restent accrochés au béton nouvellement coulé, laissant un accès pour l'alimentation du hourdis inférieur lors des phases de sa réalisation. Puis, lorsque le voussoir inférieur est terminé, le treillis puis le coffrage central sont ripés (figure 27).

L'élément essentiel de l'équipage est la poutre en C. Il s'agit d'une poutre transversale posée en bout du dernier plot bétonné. Elle comporte une partie horizontale et deux retours latéraux soutenant les treillis extérieurs, donnant à l'ensemble une forme de C. Cette poutre accueille les chevêtres de suspension des trois treillis de l'équipage supérieur et les mâts centraux du surbandage.

L'équipage inférieur est suspendu à l'équipage supérieur par huit tiges

20- Section de la travée centrale.

21- Coupe longitudinale de la travée centrale.

22- Diagonales comprimées.

23- Diagonales tendues.

24- Tracé des câbles de précontrainte - Coupe longitudinale au niveau de la travée de rive.

25- Précontrainte - Demi-coupe transversale au niveau de V1 et V9.

20- Cross section of the centre span.

21- Longitudinal section of the centre span.

22- Compressed diagonal braces.

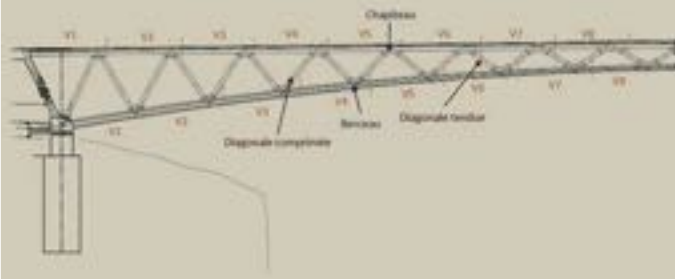
23- Tensioned diagonal braces.

24- Layout of prestressing cables - Longitudinal section at the level of the end span.

25- Prestressing - Half cross section at the level of V1 and V9.

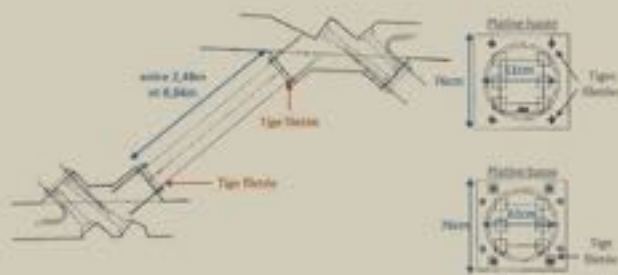
COUPE LONGITUDINALE DE LA TRAVÉE CENTRALE

21



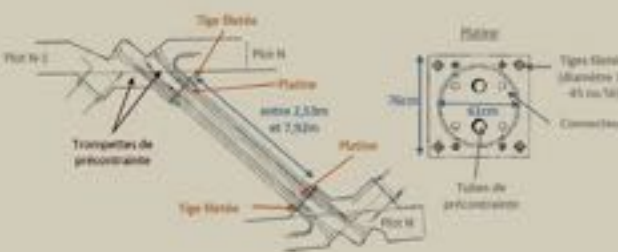
DIAGONALES COMPRIMÉES

22



DIAGONALES TENDUES

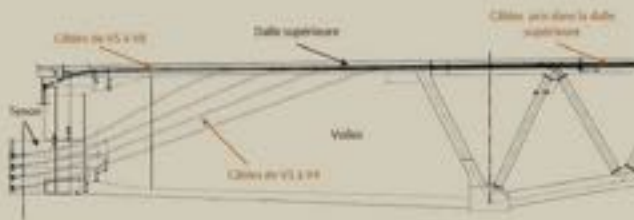
23



TRACÉ DES CÂBLES DE PRÉCONTRAINTE

24

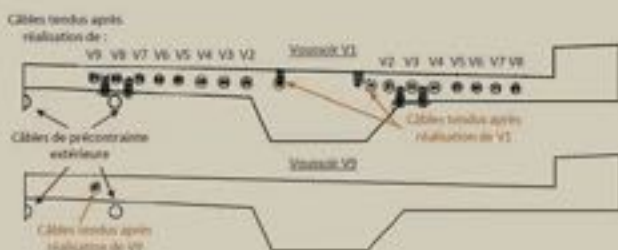
Coupe longitudinale au niveau de la travée de rive



PRÉCONTRAINTE

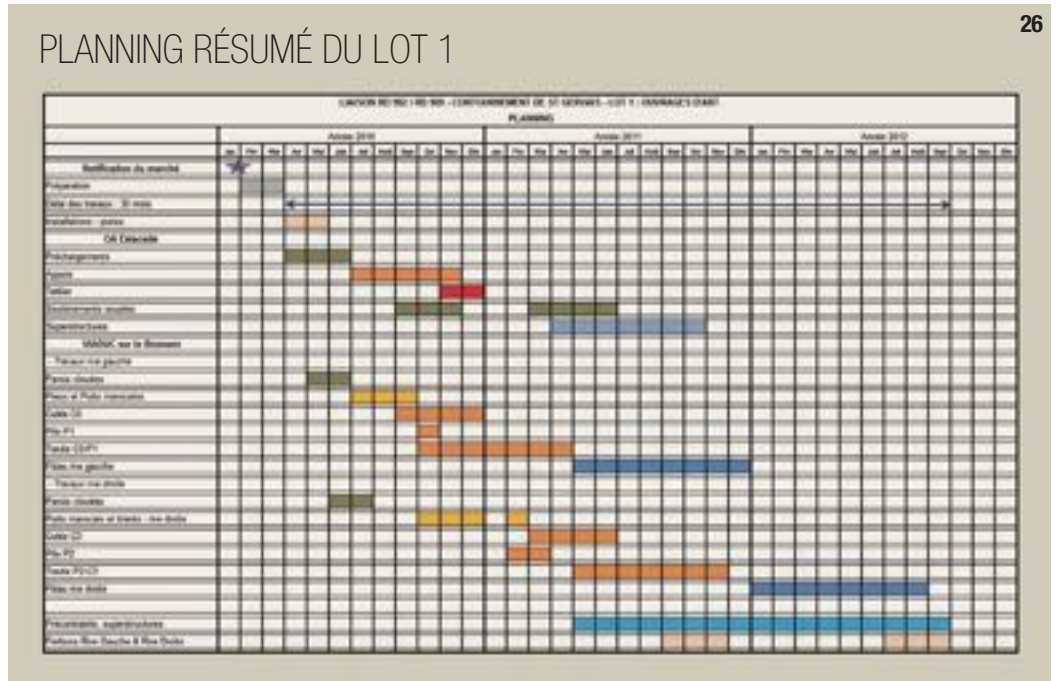
25

Demi-coupe transversale au niveau de V1 et V9



- 26- Planning résumé.
- 27- Vue 3D de l'équipage.
- 28- Schéma des différentes géométries impliquées dans le réglage de l'équipage.
- 29- Principe de réglage de l'équipage supérieur.
- 30- Principe de réglage de l'équipage inférieur – Coupe longitudinale.

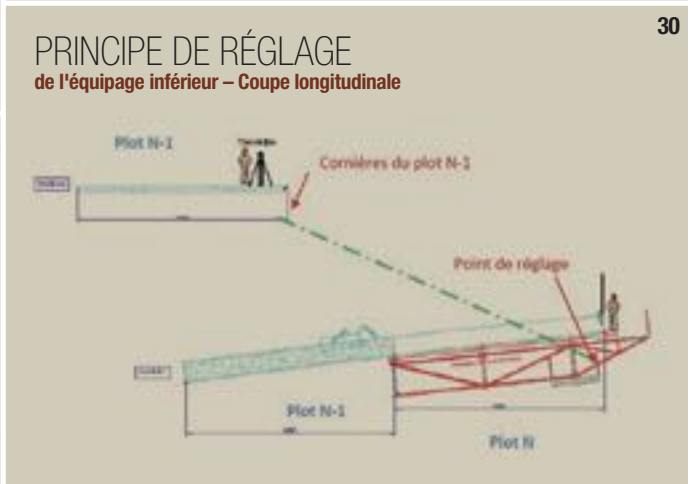
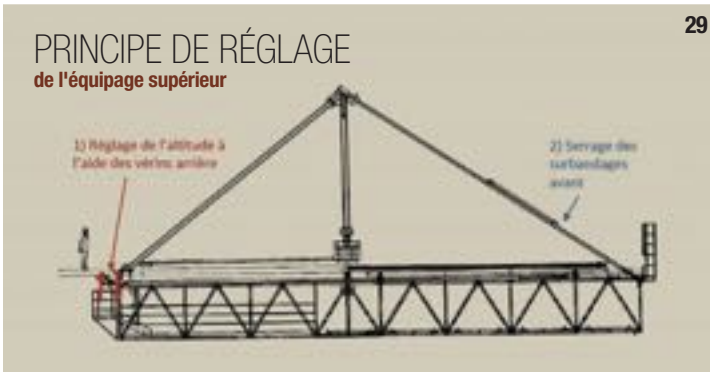
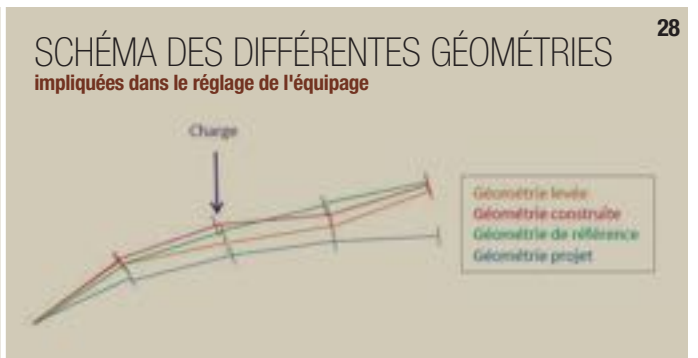
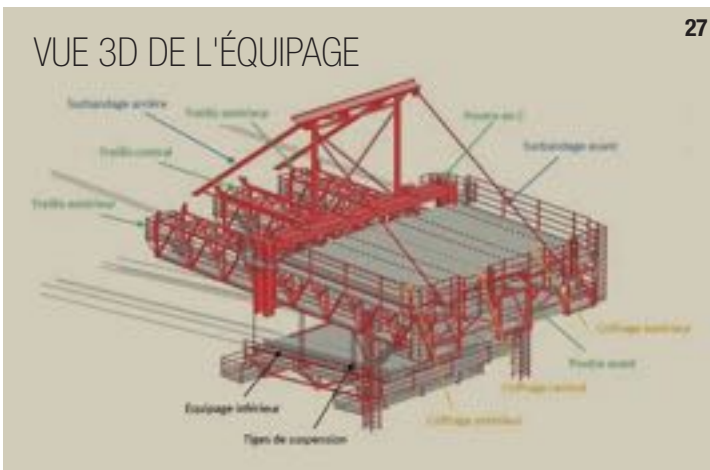
- 26- Summary work schedule.
- 27- 3D view of the rig.
- 28- Diagram of the various geometric measures involved in setting the rig.
- 29- Schematic of upper rig setting.
- 30- Schematic of lower rig setting – Longitudinal section.



et il est attaché à l'arrière au béton. Sa structure est constituée de plusieurs treillis, sur lesquels repose un coffrage en trois parties qui peut s'élargir au cours de la réalisation du fléau et équipé d'un système chauffant. Du fait de la pente importante du hourdis inférieur (15 % au premier voussoir) et du béton type C80/95 qui est très

fluide, un contre-coffrage doit être mis en place sur les cages d'armatures des voussoirs inférieurs afin de retenir le béton. Des trappes sont aménagées afin de pouvoir mettre en place le béton et le vibrer, puis elles sont refermées au fur et à mesure. L'équipage supérieur est constitué de trois treillis suspendus à la poutre en C

et reliés par la poutre avant. La poutre en C, la poutre avant et les treillis extérieurs sont solidaires, tandis que le treillis central et le coffrage central sont mobiles par rapport au reste de la structure et l'un par rapport à l'autre afin de pouvoir garantir l'accès à l'équipage inférieur lors de la réalisation des voussoirs inférieurs.





31



32



33



34



35



36



37

- 31- Pose de l'équipage inférieur.
- 32- Pose des treillis de l'équipage supérieur.
- 33- Pose des cages d'armatures des voussoirs inférieurs.
- 34- Bétonnage du voussoir V2 supérieur.
- 35- Équipage avant coffrage de V2 supérieur.
- 36- Équipage en place avant réalisation de V2 inférieur.
- 37- Voussoir V4 supérieur - Équipage avant coffrage.

- 31- Placing the lower rig.
- 32- Placing the wire mesh for the upper rig.
- 33- Placing the concrete reinforcing cages for the lower segments.
- 34- Concreting of upper segment V2.
- 35- Rig before upper V2 formwork.
- 36- Rig in position before execution of lower V2.
- 37- Upper segment V4 - Rig before formwork.

Chaque treillis est surmonté d'un coffrage calorifugé et équipé d'un système chauffant pour continuer les bétonnages en hiver. Les espaces entre les coffrages correspondent aux nervures du hourdis, et sont coffrés traditionnellement à chaque plot pour que l'équipage ne bute pas sur les diagonales à l'avancement.

Lors des bétonnages, afin de reprendre le poids du béton, des haubans sont installés à l'avant (deux pour le bétonnage du hourdis inférieur, quatre pour le hourdis supérieur) et renvoient la

charge sur deux haubans fixés dans le béton à l'arrière. L'ensemble de l'équipage est équipé de garde-corps et de passerelles de circulation afin de garantir la sécurité au vide du personnel.

RÉGLAGE DE L'ÉQUIPAGE MOBILE

Plusieurs géométries de l'ouvrage sont distinguées dans la méthode de réglage de l'équipage :

→ La **géométrie levée** résulte des levés topographiques réalisés après chaque bétonnage des voussoirs supérieurs. Parallèlement à ces levés, les

charges présentes sur le tablier sont répertoriées et la température en plusieurs points des dalles supérieure et inférieure du viaduc est relevée.

→ La **géométrie construite** correspond à la géométrie levée débarrassée des déformations dues aux charges présentes sur le tablier et aux effets de gradient thermique par calcul du bureau d'études.

→ La **géométrie projet** est la géométrie définie dans le contrat.

→ La **géométrie de référence** correspond à la géométrie projet plus

les contreflèches de l'ouvrage durant la phase de construction. Ces contreflèches sont dues à la déformation du béton à plus ou moins long terme sous l'effet du poids propre du béton, de l'équipage (flèches dirigées vers le bas) et à la précontrainte (flèches dirigées vers le haut). La géométrie de référence est donc la géométrie à suivre lors de la phase de construction pour obtenir à la fin une géométrie conforme au contrat (figure 28).

Le réglage se fait à l'aide du logiciel Datum, conçu par Bouygues Travaux



38

38- Fléau rive gauche.

38- Left-bank cantilever section.

Publics pour la construction d'ouvrages en voussoirs préfabriqués et adapté à la construction de ponts par encorbellements successifs. Les points de référence pour suivre le comportement de l'ouvrage sont des cornières mises en place au bout de chaque voussoir supérieur lors de leur bétonnage.

→ L'équipage supérieur est réglé en « X, Y » à l'aide des vérins de translation de l'équipage et en « Z » à l'aide des vérins arrière des treillis, la configuration est ensuite bloquée en serrant les tiges des surbandages avant (figure 29).

→ L'équipage inférieur étant suspendu à l'équipage supérieur, sa position en « X, Y » est donc déjà réglée. Le réglage en « Z » est effectué par rapport aux cornières du plot N-1, en égalisant la distance entre ces cornières et le centre du coffrage (distance déterminée par

le bureau d'étude) puis l'assiette du coffrage est égalisée. Ce réglage est effectué à l'aide de vérins creux montés sur les tiges de suspension (figure 30).

RÉALISATION DE LA TRAVÉE CENTRALE MONTAGE DE L'ÉQUIPAGE MOBILE

L'équipage est arrivé sur chantier en éléments de taille plus ou moins importante entre mi-avril et mi-mai 2011. L'ensemble de l'équipage a été assemblé à l'arrière de la culée C0 à la grue à tour puis monté depuis la travée de rive à la grue mobile 250 T (photos 31 et 32).

Le bétonnage du premier voussoir supérieur a été réalisé, puis l'équipage a été avancé et la partie inférieure a été accrochée à la partie supérieure et un premier cycle complet a commencé.

DÉROULEMENT D'UN CYCLE DE CHANTIER

Les cycles de réalisation d'un voussoir supérieur ou d'un voussoir inférieur sont prévus en cinq jours, après mise en cadence (photos 33 à 38). □

PRINCIPAUX INTERVENANTS

LE CONTOURNEMENT DE ST-GERVAIS

MAÎTRISE D'OUVRAGE : Conseil Général de Haute-Savoie

MAÎTRISE D'ŒUVRE : Egis JMI

ARCHITECTE : Strates

ENTREPRISES :

- Lot 1 - Génie civil et terrassements pour les ouvrages d'art : Bouygues TP Régions France/Benedetti
- Lot 2 - Terrassements et giratoires : Guelpa/Benedetti
- Lot 3 - Enrobés : Appia
- Lot 4 - Éclairage : Grammari

COORDINATION SPS : Dekra

LE VIADUC ET L'ESTACADE (LOT 1)

COTRAITANTS :

Bouygues TP RF : Ouvrages d'art (mandataire)

VSL France : Précontrainte et vérinage

Benedetti : Pistes d'accès et terrassements

SOUS-TRAITANTS ET FOURNISSEURS :

COGECI : Bureau d'études d'exécution

SEMI/MCOA : Méthodes équipage mobile

ALPHAROC : Parois clouées

PROFOND : Pieux

BRA : Béton

MANNA/NPA : Armatures

Z & M : Diagonales métalliques

CMIS/LOCAPAL : Fourniture équipage mobile

ABSTRACT

STRUCTURE CROSSING THE BONNANT AT ST-GERVAIS (HAUTE-SAVOIE REGION)

BOUYGUES TP: LAURA PONCHON, OLMIER VIRET, JEAN-LOUIS TAFFOREAU

In order to restrict traffic in the city centre, the commune of Saint-Gervais-les-Bains launched a bypass project. This new road includes three roundabouts, reinforced earth type embankments and two engineering structures, including the crossing over the Bonnant gorge by an exceptional viaduct 240 metres long. The contract for work section 1, engineering structures, with project management performed by Egis, was awarded by the Conseil Général de Haute-Savoie to the consortium formed by Bouygues Travaux Publics Régions France and Benedetti. This article briefly describes the first structure (prestressed-slab underpass) and describes in detail the viaduct construction technique. □

ESTRUCTURA DE PASO DE LA GARGANTA DEL BONNANT EN ST-GERVAIS (ALTA SABOYA)

BOUYGUES TP: LAURA PONCHON, OLMIER VIRET, JEAN-LOUIS TAFFOREAU

Para limitar el tráfico en el centro urbano, el municipio de Saint-Gervais-les-Bains (74) ha comenzado las obras de su circunvalación. Esta nueva vía consta de tres rotondas, terraplenados de tipo tierra reforzada y dos estructuras, entre las que figura el paso de la garganta del Bonnant mediante un excepcional viaducto de 240 metros. El contrato del lote 1 estructuras, bajo la dirección de obra de Egis ha sido confiado por el Consejo General de Alta-Saboya a la agrupación Bouygues Travaux Publics Régions France/Benedetti. Este artículo describe brevemente la primera estructura (paso inferior con losa de hormigón pretensada) y detalla el modo de construcción del viaducto. □



PASSERELLE SUR LA MOSELLE À ÉPINAL (VOSGES)

AUTEURS : G. FRANTZ, C. CEZARD, D. RAVISY - EGIS JMI

LA VILLE D'ÉPINAL EN LORRAINE A ENTREPRIS DE RÉAMÉNAGER SON CENTRE-VILLE. CE PROJET DONT LA RÉALISATION S'ÉCHELONNE SUR PLUSIEURS ANNÉES, INCLUT NOTAMMENT LA MISE EN VALEUR DES QUAIS DE LA MOSELLE ET L'AMÉLIORATION DES CHEMINEMENTS OFFERTS AUX PIÉTONS ET AUX CYCLISTES LE LONG DE LA RIVIÈRE, AINSI QUE D'UNE BERGE À L'AUTRE. PARMIS LES PROJETS D'AMÉNAGEMENT URBAIN RÉALISÉS, FIGURE LA PASSERELLE DE LA MOSELLE CONSTRUITE ENTRE LES QUAIS JULES FERRY ET LOUIS LAPICQUE, OBJET DU PRÉSENT ARTICLE.

HISTORIQUE

En septembre 2002, la Ville a conclu avec quatre équipes d'urbanistes choisies sur concours un marché de définition destiné à formaliser ses objectifs d'aménagement, et à préciser les modalités techniques et financières de leur réalisation. Elle a ensuite réparti entre ces quatre équipes la maîtrise d'œuvre du projet, dont elle a confié le pilotage au cabinet GARCIA-DIAZ (février 2004).

L'un des quatre marchés de maîtrise d'œuvre incluait la réalisation d'une passerelle sur la Moselle entre les quais Jules Ferry et Louis Lopicque, au niveau des places Pinau, en rive gauche, et Georquin en rive droite. Il a été attribué au groupement constitué par :

→ L'Atelier d'Architectes Bruno Dumétier (AABD), mandataire,
→ EGIS JMI, bureau d'études d'ouvrages d'art,
→ L'Atelier du Paysage, paysagiste,

→ SEFIBA, bureau d'études V.R.D.

La consultation des entreprises sur le projet établi par AABD et EGIS JMI a été lancée le 8 novembre 2004, par appel d'offres ouvert. Les offres ont été reçues le 17 janvier 2005. Le marché de travaux a été notifié le 24 février 2005 à l'entreprise VIRY, de Remiremont. Le délai d'exécution était fixé à huit mois et demi. La passerelle a été réceptionnée le 1^{er} décembre 2005. La passerelle franchit la Moselle par

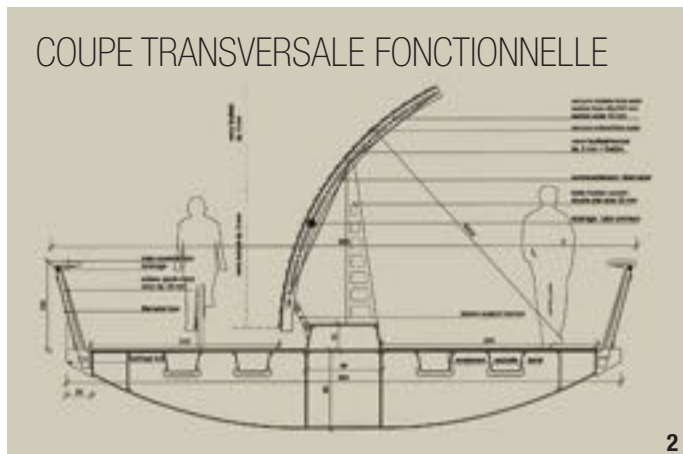
une travée unique en acier de 62 m de portée. Comme les contraintes du site limitaient l'épaisseur du tablier au-dessus de la chaussée à 88 cm, celui-ci est raidi par une nervure centrale de hauteur variable de 0 à 100 cm, délimitant deux allées de 2,20 m de largeur utile. Cette nervure supporte un auvent transparent destiné à protéger les usagers du vent.

Des chambres ont été ménagées dans la nervure pour recevoir des amortis-



1

© S. DEMAILLY



2



3

FIGURE 2 & PHOTO 3 © DR

1- La passerelle sur la Moselle achevée.

2- Coupe transversale fonctionnelle Projet (AABD).

3- Le site avant les travaux : la passerelle a remplacé le jet d'eau.

4- Construction du mur de quai rive gauche au voisinage de la passerelle. Les maisons ont été démolies par la suite.

1- The completed footbridge over the Moselle.

2- Functional cross section.

3- The site before the works: the foot bridge has replaced the water jet.

4- Construction of the left-bank quay wall in the vicinity of the foot bridge. The houses were subsequently demolished.

seurs dynamiques accordés, mais les essais de vibration effectués à la fin de la construction ont montré qu'il était possible d'en faire l'économie (figure 2).

CONTRAINTES DE CONCEPTION PROGRAMME

Le maître d'ouvrage avait fixé un programme précis :

→ La passerelle devait être perpendiculaire aux murs de quais.

→ Sa largeur devait être au moins de six unités de passage.

→ Elle devait offrir un cheminement

accessible aux personnes à mobilité réduite, sans aucune dénivellation infranchissable en fauteuil roulant.

→ Les usagers devaient trouver un abri contre le vent, dont la direction la plus fréquente est parallèle au cours de la Moselle.

→ Enfin, elle ne devait pas faire obstacle à l'écoulement des crues : aucun appui n'était admis entre les murs de quai, distants de 60 m environ.

CONTRAINTES HYDRAULIQUES

La Moselle coule entre deux murs de quai, qui limitent le débouché des

crues. Leur crête est à la cote 325,5 en rive gauche et 325,7 en rive droite. Le fond du lit est à 320 environ.

Un seuil situé à 450 m en aval maintient un niveau minimal des eaux pendant l'été et prévient les affouillements. La crue de référence considérée par le service de la navigation du Nord-Est, en charge de la police de l'eau, atteint la cote 324,9 (système normal IGN 1969) ; mais la ville garde le souvenir de crues encore plus importantes (1947, 1990) qui submergeaient les quais.

Le tablier, dont l'extrados est calé au niveau des quais par les exigences d'accessibilité, pourra donc être atteint par les crues exceptionnelles. Il convenait donc de le faire aussi mince que possible, de profiler son intrados pour faciliter l'écoulement des eaux, de justifier sa résistance au choc des corps flottants, et de l'amarrer sur ses appuis pour qu'il ne puisse être déplacé par le courant (photo 3).

CONTRAINTES DE FONDATIONS

Conformément au programme, la passerelle franchit la rivière par une seule travée. Afin de conserver l'alignement des murs de quai, dont les maçonneries de grès rose donnent son caractère au site, les culées sont noyées dans le remblai.



4

© ARCHIVES DÉPARTEMENTALES

Les quais ont reçu leur forme actuelle à la fin du XIX^e siècle. On n'en a pas retrouvé les dessins.

La stabilité des murs semblait en tous cas trop précaire pour qu'ils puissent supporter directement les charges de la passerelle. Les reconnaissances ont confirmé qu'il s'agissait de murs-poids, fondés superficiellement vers 320,4 NGF, sur une semelle de gros béton plus ou moins désagrégé (photo 4).

En revanche, de 5 à 20 m sous la chaussée des quais, les sondages ont rencontré des alluvions compactes, constituées de sable et de graviers, dont les caractéristiques géotechniques sont bonnes. Au-delà, le substratum est constitué de grès compact, semblable à celui des maçonneries des quais. Il était donc possible de reporter les charges de la passerelle sous le niveau du fond de la rivière, dans les alluvions compactes où des fondations profondes trouveraient un bon appui.

SISMICITÉ

Le zonage annexé au décret du 14 mai 1991, en vigueur lors de la construction de l'ouvrage, situait le canton d'Épinal dans la zone sismique I.A, correspon-



5

© S. DEMAILLY

dant à un risque faible. Suivant l'arrêt du 15 septembre 1995, la passerelle appartenait à la classe B des ouvrages à risque normal.

L'accélération nominale caractérisant l'action sismique de calcul était alors égale à 1,0 m/s².

Le zonage de 2005 entré en vigueur depuis lors n'a pas significativement modifié l'appréciation du risque : Il classe la commune d'Épinal en zone de sismicité modérée, où l'accélération maximale de référence ag est égale à 1,1 m/s².

CONTRAINTES D'EXÉCUTION TRAVAUX EN RIVIÈRE

Comme il n'était prévu ni piles, ni remblais définitifs dans la rivière, l'autorisation préfectorale prévue par l'article L 214 du code de l'environnement n'a pas été nécessaire. En revanche, les interventions dans le lit de la Moselle ont dû faire l'objet d'une autorisation temporaire d'occupation du domaine public fluvial. Toute obstruction et tous travaux étaient interdits entre le 15 octobre et le 15 avril, période où les risques de crues sont les plus importants.

5 & 6- Auvent transparent fixé sur la nervure.

7- Culée rive droite : appuis à rouleaux et butée unidirectionnelle axiale.

8- Coupe transversale à mi-travée (projet d'exécution).

5 & 6- Trans-parent canopy attached to the rib.

7- Right-bank abutment: roller-mounted supports and unidirectional axial thrust stop.

8- Cross section at mid-span (final design).



6

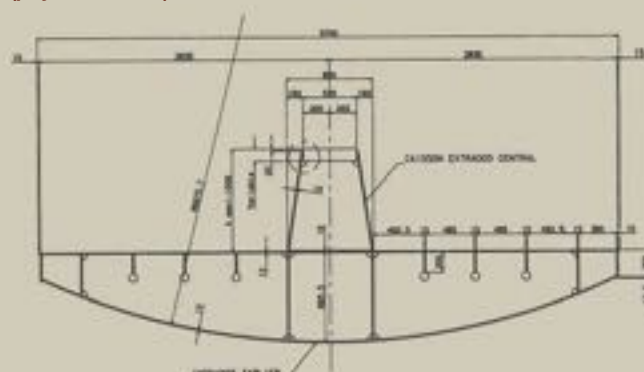
© S. DEMAILLY



7

© JMI

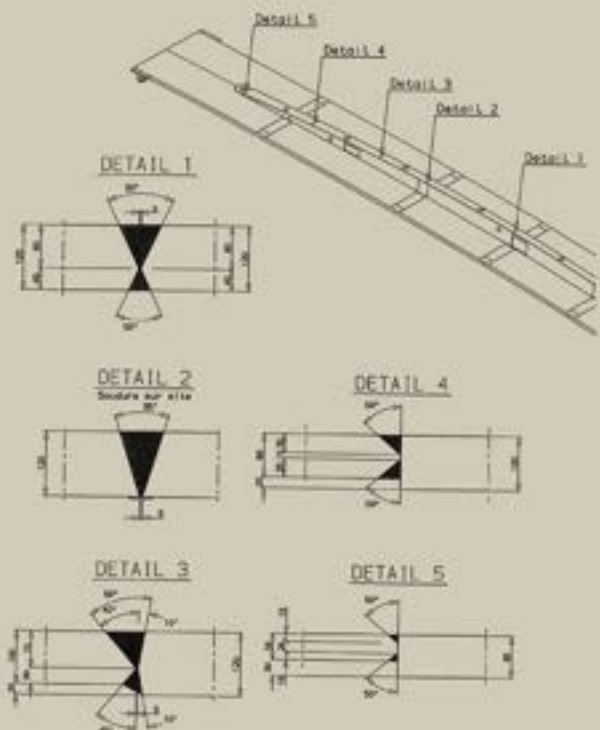
COUPE TRANSVERSALE À MI-TRAVÉE (projet d'exécution)



8

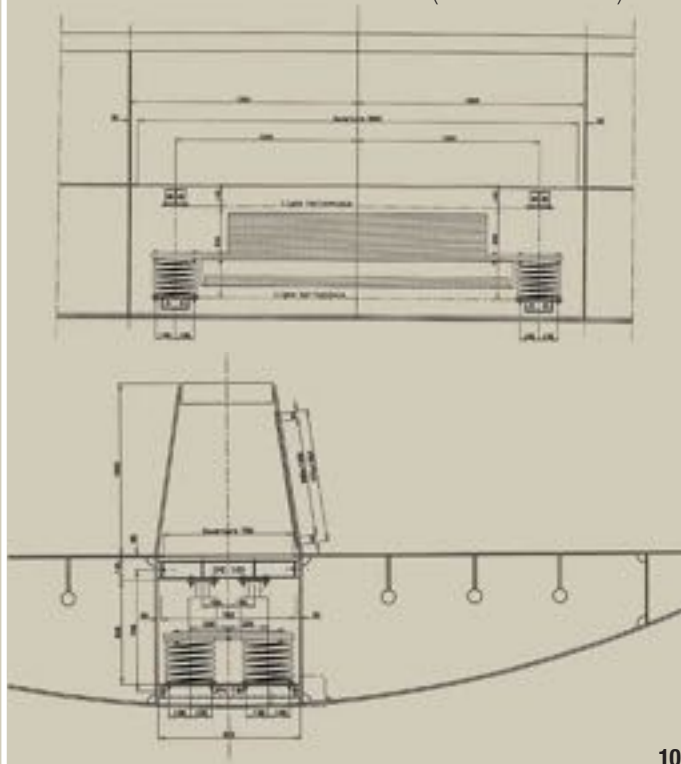
© JMI

SOUDURES DE LA MEMBRURE SUPÉRIEURE DE LA NERVURE



9

AMORTISSEUR DYNAMIQUE ACCORDÉ DE 4 T PRÉVU À MI-TRAVÉE (ÉTUDE GERB)



10

9- Soudures de la membrure supérieure de la nervure.

10- Amortisseur dynamique accordé de 4 t prévu à mi-travée (Étude GERB).

11- Exécution des micropieux de la culée rive droite.

9- Welds on the top member of the rib.

10- 4-tonne tuned dynamic damper planned at mid-span (GERB design).

11- Execution of micropiles for the right-bank abutment.

TRAVAUX EN SITE URBAIN

Le chantier de la passerelle se trouvait en plein centre de la ville.

Les installations de chantier sur le site ont été réduites au minimum, la majeure partie du matériel et des matériaux restant stockée dans les implantations locales des entreprises.

Les caractéristiques des voiries et les contraintes de la circulation limitaient la taille des pièces susceptibles d'être préfabriquées hors du site. En outre, le

trafic des quais ne pouvait être coupé que deux semaines en rive droite et trois à quatre semaines en rive gauche, et seulement au mois d'août. En dehors de cette période, des restrictions partielles ont pu être apportées au trafic pour la déviation des réseaux et la construction des culées.

Enfin, les reconnaissances à l'emplacement des culées ont mis en évidence de très nombreux réseaux, qu'il a fallu protéger ou dévier au démarrage des travaux.

CHOIX DU PARTI TECHNIQUE ET ARCHITECTURAL

Les contraintes de conception imposaient un ouvrage à travée unique de 62 m de portée. Pour permettre l'écoulement des crues, la ligne d'intrados du tablier devait être aussi proche que possible du profil en long du cheminement. Une passerelle haubanée, un bow-string, ou tout autre ouvrage dont la structure porteuse est placée au dessus du plan de circulation auraient satisfait cette exigence, mais dans le périmètre de protection de la basilique Saint Maurice, monument classé, un ouvrage plus discret, moins « high-tech » paraissait préférable.

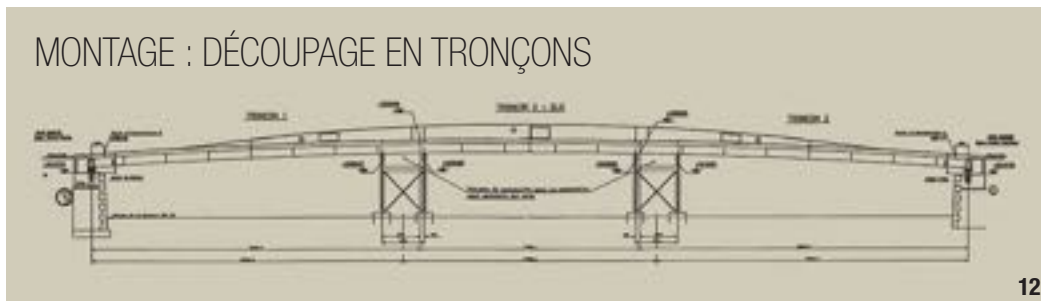
On a donc retenu pour le tablier un caisson très mince en acier, de section transversale profilée. Pour accroître sa rigidité, on a ajouté au dessus du niveau de la chaussée une nervure de hauteur variable, constituée d'un caisson de section trapézoïdale placé dans l'axe du tablier.

Cette nervure sépare le cheminement offert aux piétons et aux cycles en deux allées de 2,20 m de largeur. L'allée aval est protégée des vents dominants par un auvent transparent fixé sur la nervure ; les piétons qui l'empruntent trouvent sous l'auvent des bancs disposés face à la rivière.



11

MONTAGE : DÉCOUPAGE EN TRONÇONS



12 © JMI

L'allée amont, libre de tout mobilier urbain, est plutôt destinée aux cyclistes. Long de 42 m, l'avent requis par le programme est constitué de lames de verre disposées en persiennes sur des nervures en arc de cercle, espacées de 1,50 m. Sa hauteur augmente des extrémités vers le milieu de la passerelle, où elle atteint 2,95 m. Les allées sont bordées du côté de la rivière par un garde-corps associant le bois et le métal tissé. Une corniche en bois plein file sur chaque rive du tablier. Le sol est constitué d'un revêtement mince antidérapant, assurant pour un poids minimum la protection du platelage contre la corrosion. L'éclairage public est assuré par des tubes fluorescents installés sous la main-courante des garde-corps et sur l'avent (photos 5 et 6).

PROJET SOUMIS À LA CONSULTATION TABLIER

La travée unique de 62 m de portée était un caisson en acier de 5,70 m de largeur, raidi transversalement par des diaphragmes disposés tous les trois mètres. Pour qu'il ne flotte pas lors des crues, ses appuis sur les culées étaient constitués d'un côté par deux articulations métalliques et de l'autre par deux biellettes. Le schéma statique recherché était celui d'une poutre sur appui simple vis-à-vis des charges verticales, et d'une poutre encastrée vis-à-vis des charges horizontales de direction perpendiculaire à l'axe du tablier.

La section courante du tablier comportait cinq cellules, de dimensions constantes.

Son épaisseur maximale était de 88 cm seulement. La tôle de platelage de 12 mm était raidie transversalement par des diaphragmes placés tous les 3 m, et longitudinalement par quatre augets, complétés par les deux petites cellules latérales formant poutres de rigidité. La nervure rapportée sur le platelage à l'aplomb des âmes centrales avait une section en trapèze. Sa hauteur, nulle à 6 m des appuis, croissait jusqu'à un mètre à mi-travée. L'inclinaison de ses parois était constante. Seule variait l'épaisseur de la membrure supérieure, de 70 à 120 mm (il était prévu de la réaliser au moyen de tôles profilées en long).

Elle se raccordait au platelage par deux platines biaisées soudées sur leurs quatre côtés.

12- Montage : découpage en tronçons.

13- Tronçon rive gauche (23,5 m, 56 t).

14- Tronçon central première partie (16 m, 29 t).

15- Tronçon central : nervure (16 m, 12 t).

16- Tronçon rive droite (23,5 m, 56 t).

12- Assembly: breakdown by sections.

13- Left-bank section (23.5 m, 56 t).

14- Centre section first part (16 m, 29 t).

15- Centre section: rib (16 m, 12 t).

16- Right-bank section (23.5 m, 56 t).



13



14



15



16

PHOTOS 13, 14, 15 & 16 © JMI



17

© S. DEMAILLY

À l'exception des axes et chapes des appareils d'appui, la limite d'élasticité de l'acier n'excédait pas 355 MPa.

APPUIS

Les culées étaient de simples sommiers en béton armé, remplaçant les maçonneries de la partie supérieure des murs de quai. Elles devaient être fondées sur huit micropieux de type III d'une douzaine de mètres, constitués d'un tube d'acier 98/114 scellé sur toute sa hauteur par injection globale et unitaire.

En outre, des injections de régénération des maçonneries des murs étaient prévues sous chaque culée, sur une largeur de 10 m et une hauteur de 3 m environ.

PRISE EN COMPTE DES RISQUES DE VIBRATIONS

Le tablier ainsi conçu était très déformable. La flèche à mi-portée atteignait 33 cm sous charges permanentes et 22 cm sous l'effet de la charge $a(l)$ du fascicule 61 titre II du CPC.

L'étude dynamique montrait que ses fréquences propres étaient très basses (Tableau 1).

Il risquait donc d'entrer en résonance suivant les deux premiers modes verticaux au passage de certains usagers, ou sous l'effet de sollicitations rythmées appliquées par un petit groupe de personnes au milieu de la travée. L'installation d'amortisseurs dynamiques accordés aux quarts et au milieu de la travée permettait d'éliminer ce risque.

17- Auvent, garde-corps et corniche.
18- Perspective de l'auvent.

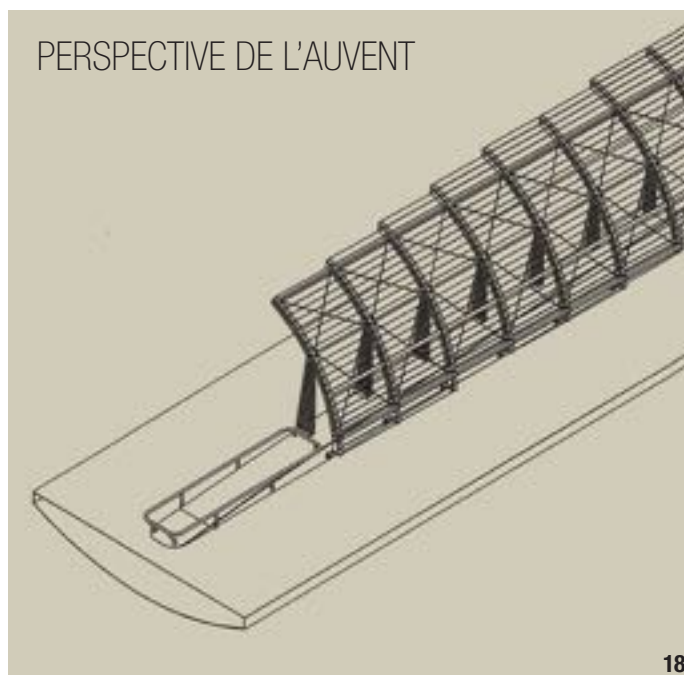
17- Canopy, guard rail and parapet.
18- Perspective view of the canopy.

Il convenait toutefois de s'assurer de sa réalité en procédant à des essais sur l'ouvrage achevé. En effet, les calculs ignoraient l'effet favorable du garde-corps et de l'auvent, dont les frottements internes sont susceptibles d'amortir les oscillations du tablier. Le marché de travaux prescrivait donc :
→ D'effectuer un nouveau calcul dynamique sur la base des caractéristiques définitives,
→ De prévoir en tout état de cause lors de la fabrication du tablier les dispositions permettant d'installer quatre

amortisseurs dynamiques accordés d'environ deux tonnes aux quarts de la portée et près de son milieu,
→ De procéder à des essais de vibration après la mise en place des équipements du tablier, pour mesurer ses fréquences propres et son amortissement, et ainsi pouvoir décider de la nécessité d'installer les amortisseurs dynamiques accordés,
→ Suivant la décision du maître d'ouvrage, de mettre en place les amortisseurs, et de vérifier leur efficacité par de nouveaux essais.

PROJET D'EXÉCUTION

La principale modification apportée par le projet d'exécution concerne les appareils d'appui. Sur la proposition de l'entrepreneur, articulations et bielles métalliques ont été remplacées par des appuis à rouleau de 200 mm de diamètre. Des bèches scellées dans le sommet des culées assurent la reprise des efforts engendrés par les charges horizontales perpendiculaires à l'axe du tablier. Celle de la rive gauche bloque les déplacements du tablier dans le plan horizontal, et celle de la rive droite coulisse dans un mors équipé de plaques de glissement, qui laisse le tablier se dilater librement suivant son axe. Vis-à-vis des charges verticales, le schéma statique reste celui d'une poutre sur appuis simples. Vis-à-vis des charges horizontales perpendiculaires à l'axe du pont, il est plus proche de celui d'une poutre articulée à ses extrémités que de celui d'une poutre ▷



PERSPECTIVE DE L'AUVENT

18

© JMI

encastrée, et la fréquence propre du premier mode de vibration dans le plan horizontal diminue (photo 7).

Les augets qui raidissaient le platelage ont été remplacés par de simples plats, bien plus faciles à façonner suivant le profil en long du tablier.

La membrure supérieure de la nervure centrale n'a pas été profilée en long, mais partagée en huit éléments d'épaisseur constante, égale à 50, 80, 100 et 120 mm (figure 8).

Les joints transversaux de la tôle de fond sont tendus à l'ELS. Ils sont soudés en pénétration totale et contrôlés par ultrasons à 100 %. (classe de qualité 1 de la norme NFP 22-471).

Sauf aux extrémités, les joints de la membrure supérieure sont soudés aussi en pénétration totale (figure 9).

Les autres assemblages sont réalisés en classe de qualité 2 au moyen de soudures d'angle, dont la gorge varie de 5 à 10 mm.

Des chambres de trois mètres de longueur ont été ménagées aux quarts et au milieu du tablier afin de pouvoir installer si nécessaire des amortisseurs dynamiques accordés. Leurs dimensions ont été fixées d'après l'avant-projet établi par GERB, qui prévoyait un amortisseur de 4 t à mi-travée et deux amortisseurs de 2 t aux quarts de la portée (figure 10).

RÉALISATION DES TRAVAUX CULÉES

Après plusieurs semaines employées à déplacer les réseaux enterrés, les culées ont été construites dans des emprises très exigües. Les pierres taillées des murs de quai ont été démontées, retaillées et réinstallées en habillage des parements.

Les huit micropieux de chaque culée ont une longueur utile de 12,5 m (photo 11). Ils ont été réalisés par injection gravitaire et unitaire dans des forages de 185 mm. Ils sont constitués d'un tube pétrolier 70/89 en acier N80 (limite élastique 560 MPa), doublé en tête sur 3 m par un second tube 100/114, dont la paroi extérieure a été graissée pour éviter de surcharger les maçonneries des murs. Les deux tubes sont munis de platines de répartition noyées dans la masse du chevêtre. Un micropieu supplémentaire a été réalisé en rive gauche et soumis à un essai de chargement jusqu'à 65 tonnes.

Le confortement des maçonneries a été exécuté au préalable, par injection de coulis de ciment sous faible pression (2 MPa maximum) dans onze forages de 100 mm de diamètre. On a ainsi

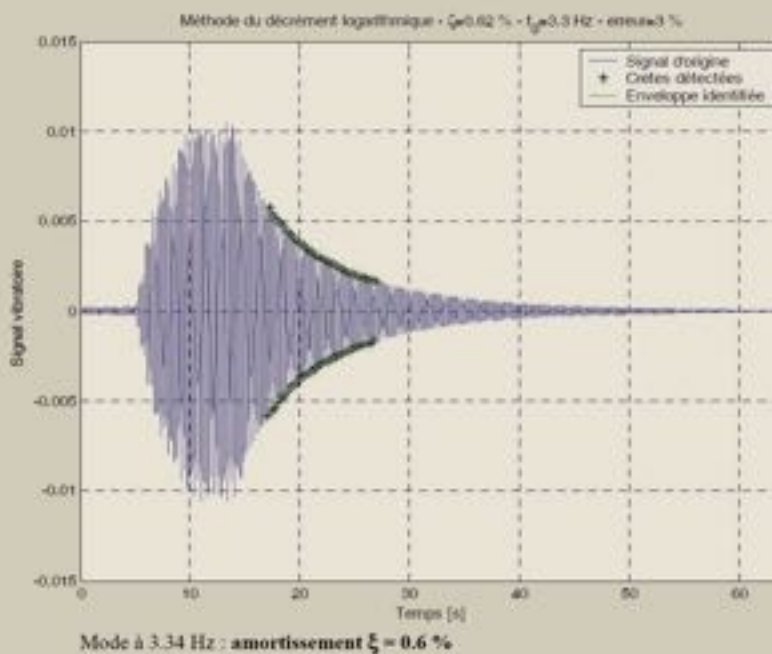
TABLEAU 1 : ÉTUDE DYNAMIQUE (SOLUTION PRÉVUE AU PROJET)

n°	Modes	Schéma statique considéré	
		Plan vertical]—[Plan horizontal	Plan vertical]—[Plan horizontal
1	Symétrique à une onde dans le plan vertical	1,0 Hz	0,9 Hz
2	Antisymétrique à deux ondes dans le plan vertical	3,3 Hz	3,1 Hz
3	Symétrique à une onde dans le plan horizontal	5,4 Hz	3,7 Hz

TABLEAU 2 : VIBRATIONS SUBIES PAR LE TABLIER NON CHARGÉ

n°	Modes	Valeurs mesurées		Valeurs calculées
		Amortissement	Fréquence	Fréquence
1	Symétrique à une onde dans le plan vertical	2,3 %	1,1 Hz	1,0 Hz
2	Antisymétrique à deux ondes dans le plan vertical	0,6 %	3,3 Hz	3,3 Hz
3	Symétrique à une onde dans le plan horizontal	2,4 %	3,0 Hz	2,5 Hz

DÉTERMINATION DU POURCENTAGE D'AMORTISSEMENT CRITIQUE DU DEUXIÈME MODE VERTICAL



injecté dans chaque forage de 50 à 90 litres de coulis fluide (C/E = 2).

TABLIER

Les tôles utilisées sont de nuance S355 K2G3. La qualité J2G3 a été admise pour les tôles de 10 mm. La fabrication du tablier s'est déroulée pendant une période de forte tension du marché de l'acier, si bien qu'elles ont des origines variées. Celles qui venaient de Slovaquie ou du Brésil ne bénéficiaient pas de la marque NF-acier, des essais de conformité (analyse chimique, résilience, résistance à la traction) ont

19- Détermination du pourcentage d'amortissement critique du deuxième mode vertical.

19- Determining the critical damping percentage for the second vertical mode.

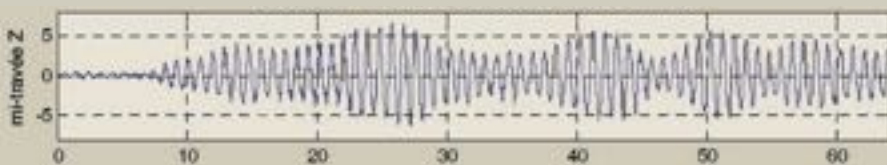
dû être effectués. Le tablier métallique a été préfabriqué par tronçons aussi grands que le permettaient les contraintes d'accès au site. Comme le phasage des travaux d'aménagement du centre-ville ne permettait pas d'assembler ces tronçons sur la terre ferme avant de lancer le tablier au dessus de la rivière, l'entrepreneur a choisi de l'assembler directement dans sa position définitive, à l'aide de deux palées provisoires implantées à 22 m des culées, et d'une grue de 500 tonnes installée successivement sur un quai, puis sur l'autre. Cette méthode exigeait

TABLEAU 3 :

Marche aléatoire			
Amplitude maximale à mi-travée	Accélération	Vitesse	Déplacement
Composante verticale	0,07 m/s ²	4,1 mm/s	0,3 mm
Composante horizontale	0,03 m/s ²	1,7 mm/s	0,1 mm

TABLEAU 4 :

Marche synchronisée à la cadence de 1,11 Hz (excitation du mode 1)			
Amplitude maximale à mi-travée	Accélération	Vitesse	Déplacement
Composante verticale	0,07 m/s ²	6,5 mm/s	0,8 mm
Marche synchronisée à la cadence de 1,67 Hz (excitation du mode 2)			
Amplitude maximale aux quarts de travée	Accélération	Vitesse	Déplacement
Composante verticale	0,11 m/s ²	7,1 mm/s	0,7 mm



20

TABLEAU 5 :

Course aléatoire			
Amplitude maximale aux quarts de travée	Accélération	Vitesse	Déplacement
Composante verticale	0,32 m/s ²	15,5 mm/s	0,8 mm
Composante horizontale	0,10 m/s ²	5,5 mm/s	0,3 mm



21

TABLEAU 6 :

Amplitude maximale	Accélération	Vitesse	Déplacement
Excitation du mode 1 (vertical) à 1,11 Hz	0,39 m/s ²	48,7 mm/s	6,6 mm
Excitation du mode 2 (vertical) à 1,67 Hz	0,52 m/s ²	28,2 mm/s	1,7 mm
Excitation du mode 3 (horizontal) à 2,93 Hz	0,19 m/s ²	11,6 mm/s	0,8 mm

une parfaite maîtrise du planning, car la circulation sur les quais ne pouvait être coupée que très peu de temps (figure 12).

La mise en place a été précédée d'un montage à blanc devant l'usine. Elle s'est déroulée en quelques heures, du 16 au 24 août.

En revanche, plusieurs semaines ont été nécessaires au sous-traitant Sorival pour souder entre eux les quatre tronçons. Les matériaux de la plate-forme provisoire qui occupait les deux tiers du lit de la Moselle ont été enlevés à la fin de septembre (photos 13 à 16).

20- Marche synchronisée à la cadence 1,11 Hertz : vitesse vibratoire en mm/s.

21- Course aléatoire : vitesse vibratoire en mm/s.

20- Synchronised operation at a frequency of 1.11 Hertz: vibration speed in mm/s.

21- Random travel: vibration speed in mm/s.

PROTECTION CONTRE LA CORROSION

Les parois extérieures du tablier sont protégées contre la corrosion par le système de peinture à trois couches certifié par l'ACQPA sous la référence C3ANV 566.

À l'exception des chambres réservées pour le logement des amortisseurs éventuels, les volumes intérieurs des caissons n'ont pas été protégés ; mais leur étanchéité à l'eau et à l'air a été contrôlée. La mise en œuvre soustraite à MPLS a donné lieu à de nombreuses reprises.

ÉQUIPEMENTS

Le complexe d'étanchéité-revêtement du platelage et les joints de dilatation ont été réalisés par RCA. Épais de 3 mm, le revêtement « Sinotane 2 » de SRS est une résine polyuréthane projetée à chaud, gravillonnée et protégée du rayonnement ultra-violet par une couche de finition « Isoplast 2301 S ». Afin de bénéficier à coup sûr des conditions hygrométriques requises, il n'a été exécuté qu'au printemps 2006.

Le primaire AC10 qui avait été appliqué dans l'usine sur les tôles préalablement grenillées a dû être sablé, et un nouveau primaire « Sinoprime » a été mis en œuvre.

Un joint en bitume élastomère "Poly-joint" équipe l'extrémité fixe du tablier, et un joint de trottoir à plaques glissantes « RG125 » équipe l'extrémité mobile.

Les garde-corps se composent de panneaux en maille d'acier inoxydable Jakob « webnet » (fils Ø 1,5, maille 60 mm, résistance 1200 J).

Ces panneaux de 1,50 x 0,80 m sont fixés sur des potelets en plats oxycoupés, protégés par galvanisation et peinture cuite au four (teinte RAL 7022).

Les lisses sont en ipé, comme les corniches de section triangulaire qui affinent les rives du tablier (photo 17). Long de 42 m, l'auvent transparent est constitué de 672 lames de verre de 8 mm d'épaisseur et de 15 cm de largeur, fixées tous les 1,50 m sur des nervures en acier masquées par un habillage de bois.

Le contreventement et la lisse basse de protection contre les chocs sont en acier inoxydable.

Le verre est trempé ou feuilleté suivant la position des lames par rapport aux usagers (figure 18).

L'éclairage est assuré par des tubes luminescents, de type Niepce 40 sous les lisses des garde-corps et Niepce 70 à mi-hauteur de l'auvent.

ÉPREUVES STATIQUES ET DYNAMIQUES

Les épreuves statiques ont été réalisées le 17 novembre 2005. Une charge de 79 tonnes représentant 75 % de la charge a(l) du fascicule 61 titre II a été appliquée au moyen de bâches remplies d'eau, d'abord sur les deux allées, puis sur une seule.

Les flèches mesurées à mi-portée atteignent 85 à 90 % des valeurs calculées.

Les essais dynamiques de la passerelle ont été effectués le 21 novembre 2005 par la société AVLS.

Le tablier était muni de tous ses équipements, à l'exception des joints de dilatation et du revêtement mince des cheminements.

L'analyse spectrale des très petites vibrations subies en permanence par le tablier non chargé montre que seuls les trois premiers modes sont susceptibles d'être excités par le passage des usagers (Tableau 2).

La fréquence propre des suivants est trop élevée (en particulier, la fréquence mesurée pour le premier mode de torsion atteint 6,3 hertz).

Le premier mode vertical (mode 1) et le premier mode horizontal (mode 3) présentent un amortissement non négligeable pour une passerelle métallique. Mais ce n'est pas le cas du deuxième mode de vibration vertical (mode 2), dont la fréquence est proche du double de celle de la marche normale (figure 19).

Les déplacements, la vitesse et l'accélération des vibrations verticales et transversales ont été mesurées aux quarts et au milieu de la travée sous les sollicitations suivantes appliquées par un groupe dense de 14 piétons : marche aléatoire, marche synchronisée, course aléatoire, excitation localisée à fréquence définie (vandalisme).

L'examen du spectre de vitesse vibratoire obtenu lors de l'essai de marche aléatoire montre que le deuxième mode vertical est principalement représenté. Les amplitudes sont nettement plus faibles dans le plan horizontal que dans le plan vertical (Tableau 3).

Les essais de marche synchronisée ont donc eu pour but d'exciter les modes verticaux (Tableau 4 et figure 20).

La course aléatoire excite peu les modes 1 et 3.

Par contre, le mode 2 donne lieu à des accélérations non négligeables aux quarts de la travée (Tableau 5 et figure 21).

22- La passerelle sur la Moselle achevée.

22- The completed footbridge over the Moselle.

Enfin, on a pu atteindre des accélérations proches des limites admises en demandant aux 14 piétons de fléchir les genoux ou de sauter d'un pied sur l'autre en cadence, en un point précis du tablier (Tableau 6).

Les essais montraient clairement qu'il serait superflu d'installer un amortisseur dynamique accordé à mi-travée, puisque les modes qui mobilisent cette section présentent déjà un amortissement relativement élevé.

Par contre, la question pouvait se poser pour les amortisseurs prévus aux quarts des travées, où le passage de 14 coureurs non synchronisés avait fait apparaître une accélération de 0,3 m/s².

On a considéré que la passerelle n'était ni assez longue, ni assez fréquentée pour que se pose un problème de confort.

On a estimé que le risque de vandalisme pouvait être négligé, en raison des nombreuses conditions qu'il avait fallu remplir simultanément pour exciter significativement la passerelle : nombre et position des participants, cadence précise des impulsions...

Lors des études, le guide du SETRA consacré à l'évaluation du comportement vibratoire des passerelles pour piétons était encore en préparation, et les effets d'une foule n'ont pas été envisagés. Elle a pourtant été utilisée immédiatement comme belvédère lors du feu d'artifice de la Saint-Nicolas, à la satisfaction des spectateurs qui s'y étaient rassemblés. □



22

© JMI

PRINCIPALES QUANTITÉS

CHARPENTE MÉTALLIQUE DU TABLIER : 150 t (appareils d'appui inclus)

PROTECTION ANTI-CORROSION : 1 000 m²

BÉTON B30 DES CULÉES : 2 x 17 m³

COFFRAGE DES CULÉES : 2 x 62 m²

ARMATURES PASSIVES DES CULÉES : 2 x 1,9 t

MICROPIEUX : 2 x 8 x 13 m

INTERVENANTS

MAÎTRE D'OUVRAGE : Ville d'Épinal.

MAÎTRE D'ŒUVRE : Groupement AABD (mandataire), Egis JMI

CONTRÔLE EXTÉRIEUR (SOUDURES, PROTECTION ANTI-CORROSION) : LRPC de Nancy

RECONNAISSANCES GÉOTECHNIQUES : Fondasol

AVANT-PROJET DES AMORTISSEURS DYNAMIQUES ACCORDÉS : Gerb

ENTREPRENEUR : Viry SA

PRINCIPAUX SOUS-TRAITANTS :

- Terrassements et génie civil : Bonini
- Micropieux et injections : Tetra
- Façonnage de tôles : Devillers oxycoupage
- Équipement électrique et éclairage : Meurant
- Essais dynamiques : AVLS

ABSTRACT

FOOT BRIDGE OVER THE MOSELLE IN EPINAL (VOSGES REGION)

EGIS JMI: G. FRANTZ, C. CEZARD, D. RAVISY

The town of Epinal in the Lorraine region has undertaken redevelopment of its town centre. This project, work on which will extend over several years, includes, in particular, the development of the quays of the Moselle River and improvement of the pedestrian and cyclist paths running along the river, and from one bank to another. The urban development projects carried out include the foot bridge over the Moselle built between the Jules Ferry and Louis Lapique quays, which is the subject of this article. □

PASARELA SOBRE EL RÍO MOSELA EN ÉPINAL (VOSGOS)

EGIS JMI: G. FRANTZ, C. CEZARD, D. RAVISY

La ciudad de Épinal, en Lorena, ha comenzado a reformar su centro urbano. Este proyecto, cuya realización se escalona durante varios años, incluye en particular el aprovechamiento de los muelles del río Mosela y la mejora de los caminos destinados a los peatones y ciclistas a lo largo del río, así como de una orilla a otra. Entre los proyectos de ordenación urbana realizados figura la pasarela del río Mosela construida entre los muelles Jules Ferry y Louis Lapique, objeto de este artículo. □



Avez-vous prévu l'imprévu ?



Êtes-vous bien assuré même lorsque cela n'est pas obligatoire ?

Êtes-vous couvert pour tous les types d'ouvrages de génie civil tels que les ponts, stations d'épuration, parkings, parcs de stationnement ?



Conçu pour les professionnels du BTP et les collectivités locales, FONDÉOS est le premier contrat d'assurance dédié à vos opérations de construction d'ouvrages d'infrastructure.

- **UN CONTRAT MODULABLE** : grâce à un choix à la carte de quatre conventions indépendantes et complémentaires.
- **UN CONTRAT SÉCURISANT** : indemnisation rapide des dommages à l'ouvrage avant et après réception.
- **UN CONTRAT SUR-MESURE** : des garanties optionnelles spécifiques pour chaque type d'ouvrage.

**FONDÉOS, l'assurance de référence
des ouvrages d'infrastructure.**



RÉPARATION DU PONT DE LA RD 201 SUR LE CANAL DE HUNINGUE À ILLZACH (HAUT-RHIN)

AUTEURS : B. HAASMANN, CONSEIL GÉNÉRAL 68 - S. FYON, CONSEIL GÉNÉRAL 68 - D. THAVEAU, EIFFAGE TP RHÔNE-ALPES - A. SCHOTTER, EIFFAGE TP RHÔNE-ALPES - Z. HAJAR, EIFFAGE TP – STOA - C. SERVANT, EIFFAGE TRAVAUX PUBLICS

MIS AU POINT DANS LE CADRE DU PROJET NATIONAL DE RECHERCHE ORTHOPLUS, LE PROCÉDÉ ORTHODALLE UTILISE LES PROPRIÉTÉS DE RÉSISTANCE ET DE DURABILITÉ DES BÉTONS FIBRÉS À ULTRA-HAUTE PERFORMANCES (BFUP) AFIN DE PROLONGER LA DURÉE DE VIE DES OUVRAGES EXISTANTS, À DALLE ORTHOTROPE OU PLUS GÉNÉRALEMENT À OSSATURE MÉTALLIQUE. DÉCLARÉ LAURÉAT DE LA CHARTE INNOVATION ROUTIÈRE 2010 PILOTÉE PAR LE SETRA, LE PROCÉDÉ ORTHODALLE A ÉTÉ EXPÉRIMENTÉ PAR EIFFAGE TRAVAUX PUBLICS SUR UN OUVRAGE EN SERVICE DONT LE PLATELAGE ORTHOTROPE PRÉSENTAIT UNE FORTE PATHOLOGIE, À ILLZACH PRÈS DE MULHOUSE, PAR LA MISE EN ŒUVRE D'ÉLÉMENTS DE DALLE PRÉFABRIQUÉS EN LIEU ET PLACE DU REVÊTEMENT BITUMINEUX.



PRÉSENTATION DU PROJET

La solution technique pour le projet de réparation du pont de la RD201 sur le canal de Huningue à Illzach est issue du programme de recherche Orthoplus retenu en novembre 2006 par l'Agence Nationale de la Recherche (ANR) dans

le cadre de l'appel à propositions du Réseau Génie Civil et Urbain (RGCU). L'objectif principal du projet de recherche Orthoplus piloté par le SETRA était de mettre au point les outils théoriques et méthodologiques de prise en compte de l'épaisseur et de la nature

**1- Pont Illzach –
Élévation poutres
latérales.**

**1- Illzach Bridge –
Elevation view
of side girders.**

du revêtement dans le calcul en fatigue d'un tablier métallique à dalle orthotrope.

Ces outils ont ainsi été utilisés dans un second temps pour optimiser les revêtements bitumineux épais existants et pour développer une solution innovante

de revêtement mince en béton fibré à ultra-hautes performances (procédé Orthodalle).

Ce procédé, déclaré lauréat de la Charte Innovation Routière 2010, a été expérimenté sur un ouvrage en service dont le platelage orthotrope présentait une forte pathologie, à Illzach près de Mulhouse, par la mise en œuvre d'éléments de dalle préfabriqués en lieu et place du revêtement bitumineux au cours de l'été 2011.

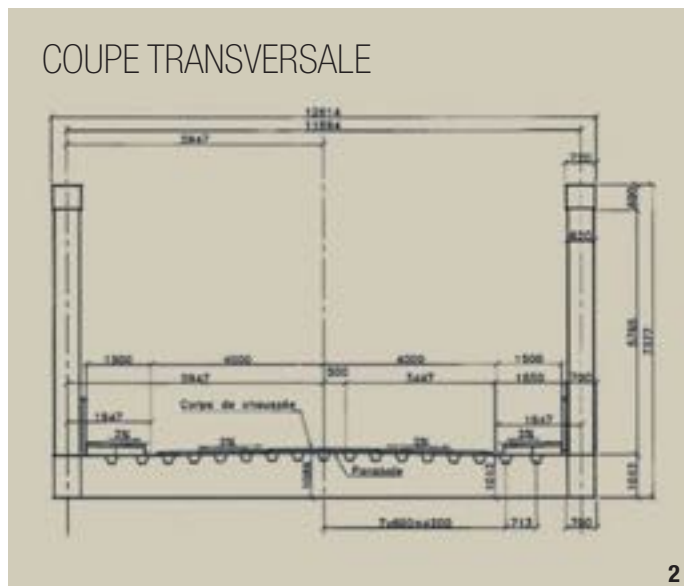
La réparation du tablier constitué de poutres latérales de type WARREN encadrant le platelage s'inscrit donc dans le cadre du développement de solutions innovantes de renforcement de platelages orthotropes à base de BFUP (photo 1).

DESCRIPTION DE L'OUVRAGE ET DES DÉSORDRES OBSERVÉS

L'ouvrage mis en service en 1970 se compose d'une travée isostatique constituée d'un tablier à poutres latérales de type WARREN de 106 mètres de longueur encadrant un platelage de type orthotrope. La largeur totale de l'ouvrage, égale à 12,60 m, porte une chaussée de circulation à deux voies (une dans chaque sens) de 8 mètres de large (largeur utile du tablier égale à 11,00 mètres) (figure 2).

La dalle orthotrope est constituée d'une tôle métallique de platelage d'épaisseur de 12 mm raidie transversalement par 34 pièces de pont qui forment 33 intervalles appelés « caisson » et raidie longitudinalement par 17 nervures trapézoïdales fermées appelées augets.

L'espacement des pièces de pont est de 3,20 m environ et les augets sont discontinus au droit des pièces de pont. Le revêtement sur ouvrage d'épaisseur 80 mm à la mise en service est constitué d'un asphalte bicouche surmonté



- 2- Coupe transversale.
- 3- Pont d'Illzach – Sous-face du platelage.
- 4- Désordres observés.

- 2- Cross section.
- 3- Illzach Bridge – underside of the decking.
- 4- Observed disorders.

de BBSG. Avant sa réparation, le tablier présentait de nombreuses fissures le long de la soudure auget/pièce de pont (183 fissures repérées en 2001 et 60 supplémentaires relevées lors de l'inspection détaillée en été 2009).

Ces fissures étaient localisées en pied du cordon de soudure auget/pièce de pont, généralement dans l'âme de la pièce de pont, parfois dans le platelage. Il n'y avait pas, à proprement parler, de propagation, toutefois quatre fissures se prolongeaient longitudinalement entre l'auget et le platelage (photos 3 et 4). La présence d'eau constatée dans les augets indiquait un risque de fissuration de fatigue dans le platelage non détectable en présence du revêtement. De nombreuses traces de corrosion sur les diagonales des poutres WARREN et dans le platelage en intrados du tablier, ont aussi été constatées.

Afin de maintenir les conditions d'exploitation du franchissement, l'ouvrage a été mis en sécurité vis-à-vis du risque de décrochage des augets en février 2010. Parallèlement, une solution permettant de réparer et renforcer l'ouvrage a été recherchée par le CG68 et le CETE de l'Est.

LA SOLUTION DE RÉPARATION PROPOSÉE PAR EIFFAGE TRAVAUX PUBLICS

Les dégradations constatées portaient essentiellement sur le platelage (jonction auget-pièce de pont) alors que les poutres porteuses principales étaient en bon état de conservation.

De ce fait, la solution de réparation la plus appropriée consiste à accroître fortement la rigidité du platelage supérieur en lui connectant rigidement une dalle mince en BFUP. L'inertie étant sensiblement accrue, les efforts de flexion longitudinale sont filtrés par le revêtement et les contraintes à la jonction auget-pièce de pont sont notablement réduites.

Cette solution a été mise en œuvre en combinant la préfabrication et le clavage en place des éléments préfabriqués.

Le revêtement est ainsi constitué de 66 dalles préfabriquées de 3,45 m x 2,70 m et 5 cm d'épaisseur disposées longitudinalement sur 2 files.

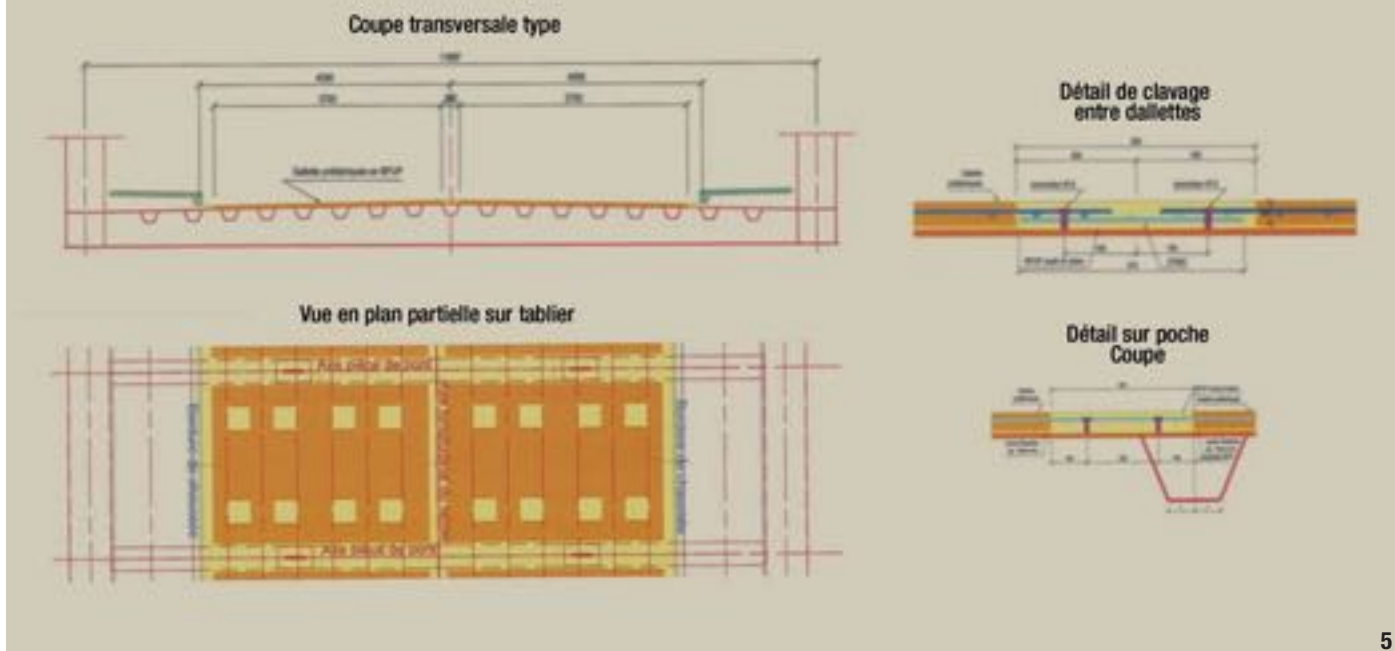
La partie coulée en place est constituée de bandes de clavages longitudinales au nombre de 3 (une centrale de 30 cm et deux latérales de 20 cm de large), ainsi que des bandes de clavage transversales de 60 cm de large, axées sur les pièces de pont.

La continuité mécanique du BFUP au travers des joints de reprise est assurée à l'aide d'un ferrailage en treillis soudé ST 65C disposé au niveau du feuillet moyen de la dalle.

La dalle BFUP est connectée au platelage à l'aide de goujons type Nelson disposés dans les bandes de clavage et dans les poches des éléments préfabriqués de 400 mm x 400 mm (figure 5). L'utilisation de dalles préfabriquées a permis de réduire au strict minimum les nuisances et restrictions de circulation ▷



PRINCIPE DE RENFORCEMENT



5

et de minimiser les quantités de BFUP à couler en place, les cantonnant aux seules zones de clavage entre dalles ce qui permet d'avoir des moyens de bétonnage limités.

Cette solution avec dalles préfabriquées a été également favorisée par la géométrie du tablier (alignement droit), permettant de couvrir toute la surface avec un seul type d'élément préfabriqué.

LE PROGRAMME EXPÉRIMENTAL. LES ESSAIS ET ÉTUDES PRÉALABLES AVANT TRAVAUX

L'étude expérimentale du comportement du complexe dalle orthotrope – BFUP ne pouvant s'appuyer sur un protocole d'essais classiques puisqu'il s'agit d'un complexe innovant de deux structures sans références antérieures en France, il est apparu pertinent de réaliser une première campagne d'expérimentation basée sur l'essai de flexion « cinq points » utilisé par les entreprises routières pour tester en fatigue les revêtements de chaussée (essai normalisé NFP 98-286).

Ces essais ont permis d'étudier sur des échantillons de petites dimensions 580 x 220 mm, trois types de connexion pour une épaisseur constante de BFUP de 35 mm.

Ces essais à petite échelle ont montré un excellent comportement en statique et en fatigue du complexe tôle/BFUP quel que soit le mode de connexion : goujons, treillis-soudé ou treillis-soudé

avec plaque crénelée de connexion soudée à la tôle.

L'essai de flexion « cinq-points » ne permettant pas de simuler le comportement de la dalle orthotrope munie de ses augets, il en résulte que ni le comportement en flexion longitudinale ni le cumul des contraintes longitudinales et transversales n'étaient accessibles dans ce type d'essai.

Il a donc été nécessaire de réaliser une campagne d'essais sur structure réelle de grande dimension « échelle 1 » dans le cadre du programme Orthoplus.

5- Principe de renforcement.

6- Corps d'épreuve 2,40 X 4 m.

5- Reinforcing technique.

6- 2.40 x 4.00 m test specimen.

Le programme d'expérimentation a consisté à étudier le comportement d'un platelage de type « VMD » (Viaduc Métallique Démontable) fourni par le CNPS (Centre National des Ponts de Secours) situé au dépôt de Chaumes-en-Brie. Le tablier « VMD » de 12,80 m de longueur et de 3,50 m de largeur a été transféré sur le site de Monthyon, près de Meaux, où Eiffage Travaux Publics dispose d'une usine de fabrication d'enrobés et d'installations permanentes, afin de faire l'objet de différents tests.

Au préalable, pour valider la procédure de mise en œuvre du BFUP plusieurs planches d'essais ont été réalisées à l'aide d'éléments témoins de dimension 2,40 x 4,00 m fabriqués à cette occasion dans l'usine d'Eiffage Construction Métallique de Lauterbourg (photo 6).

Le tablier « VMD » avait pour rôle principal de quantifier le bénéfice structurel apporté par le revêtement en BFUP par rapport à une configuration tôle nue ou à celle avec un revêtement bitumineux non participant. Pour ce tablier dont l'épaisseur de la tôle supérieure était de 10 mm, les augets sont espacés tous les 600 mm.

Le revêtement mis en œuvre sur le tablier « VMD » (photos 7a et 7b) n'a pas fait l'objet d'une seule solution technique supposée être optimale. Plusieurs solutions pouvant être adoptées dans le futur, selon la nature du projet à réaliser dans le cadre d'un marché de travaux



6



pour la construction d'un tablier neuf ou pour la réparation d'un tablier existant présentant des signes pathologiques, ont ainsi été testées.

Pour valider la solution technique retenue pour le pont de la RD201 à Illzach, un élément de dalle préfabriquée en BFUP a été connecté à cette occasion au platelage orthotrope du tablier « VMD ».

La dalle préfabriquée était munie de « poches » permettant de concentrer les connecteurs par paquets et d'assurer la liaison par clavage du BFUP coulé en place. Cette disposition est proche de celle mise en œuvre pour les ponts mixtes bipoutres à dalle béton armé préfabriquée.

Des épreuves de chargement ont été ensuite réalisées après que le tablier « VMD » ait été instrumenté afin de quantifier le gain apporté en flexion locale et flexion générale.

LES ÉTUDES D'EXÉCUTION

Les justifications de l'ouvrage ont été menées dans les deux configurations « État initial » et « État renforcé », en considérant les charges routières civiles et les charges militaires pour lesquelles l'ouvrage avait été conçu.

La modélisation de la structure a été conduite à l'aide de modèles aux éléments finis 3D à partir d'éléments coques simulant finement le platelage orthotrope et son revêtement en BFUP (figure 8).

Les calculs ont été réalisés, en considérant dans un premier temps un comportement élastique linéaire des matériaux avec une loi d'interface acier-béton issue des essais push-out réalisés dans le cadre du projet Orthoplus. La prise en compte de la fissuration du BFUP dans les zones sur appuis au droit des pièces de pont a également

**7a & 7b-
Tablier VMD –
Revêtement
en BFUP.
8- Vue
modèle 3D.**

**7a & 7b-
Deck of
dismountable
steel viaduct
– UHPFRC
surfacing.
8- 3D model
view.**

été analysée, de manière à évaluer les effets de redistribution dans le platelage mixte acier-BFUP.

La comparaison des résultats du calcul de l'ouvrage avant et après renforcement (Tableau 1), a montré un gain important au niveau de la raideur ainsi qu'une réduction appréciable des contraintes dans le platelage métallique.

Le calcul à la fatigue, en adoptant le convoi Bf et les catégories de détail de l'EC3, a montré que la solution de renforcement permet d'avoir une durée de vie d'environ 20 ans pour le détail

auget-pièce de pont et de plus de 80 ans pour le détail auget-platelage. En ce qui concerne les justifications propres au revêtement en BSI, elles sont basées sur les « Recommandations provisoires AFGC-SETRA pour les BFUP de 2002 », en considérant la classe IV correspondant à une section armée par des fibres et des aciers passifs. Pour les joints de reprise la résistance de la section correspond à celle d'une section en BA sans contribution des fibres.

LES TRAVAUX DE RÉPARATION

Le challenge était de réaliser les travaux de renforcement de la dalle orthotrope en bénéficiant, d'une interruption totale de la circulation de l'ouvrage en été pendant les mois de juillet et août 2011.

La préfabrication des dalles BFUP (66 au total) a démarré début avril 2011 avec un rythme moyen en atelier de 4 dalles par jour. Sur site, les travaux préparatoires aux travaux de renforcement ont consisté en :

→ La dépose des revêtements sur ouvrage, couche d'enrobé et d'étanchéité ;

Cette dépose a été assurée par des moyens mécaniques autres que du rabotage afin de ne pas détériorer la tôle de platelage et de faciliter le décollage par plaque des revêtements adhérent à la tôle, les finitions ponctuelles étant réalisées manuellement (photos 9a et 9b).

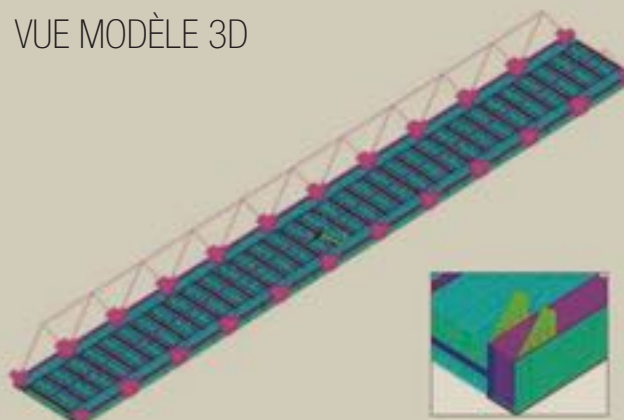
→ La préparation de la surface de la tôle de la dalle orthotrope après dépose des revêtements par hydrodécapage afin d'éliminer toutes les matières non adhérentes au support.

Pour les travaux de renforcement prévus sur 9 semaines, il s'agissait d'effectuer :

TABLEAU 1 : CONTRAINTES À L'ELU :
COMPARAISON ÉTAT INITIAL – ÉTAT RENFORCÉ

		Contraintes en MPa		
		Pont initial	Pont renforcé	Écart
Tôle de Platelage	σ_x (longi)	263	163	-38 %
	σ_y (trans)	390	154	-61 %
Augets	σ_x sous face	398	298	-25 %
	σ_x âme	252	107	-58 %
	σ_{xz} âme	122	59	-52 %

VUE MODÈLE 3D



8



9a



9b

→ **La pose des goujons-connecteurs**, par soudure à l'arc par fusion et forgeage au pistolet (photo 10). Pour permettre un accès permanent à l'engin de pose des dalles, il n'a pas été possible de souder l'ensemble des goujons avant la pose des dalles. Ainsi, seuls les goujons implantés dans les bandes de clavages centrale et latérales, ont été soudés avant la pose des dalles. Les autres goujons situés au droit des poches de connexion et dans les bandes transversales ont été posés après la mise en place des dalles.

Au total, près de 12 000 goujons ont été soudés sur l'ouvrage.

→ **La pose et réglage des dalles préfabriquées** en BFUP (photos 11a & 11b) à l'aide d'un chariot télescopique, en partant du milieu de la travée vers les appuis.

→ **La pose des armatures** (treillis soudés) dans les zones de clavage transversal et longitudinal.

→ **La réalisation des bandes de clavage** transversal et des poches en BFUP coulé en place (photos 12a & 12b). La fabrication du BSI® sur le site a été réalisée avec un malaxeur classique à axe vertical et par gâchées de 250 l.

→ **L'injection au coulis de l'interface dalle/tôle** (photo 13) est réalisée à l'aide d'un mortier sans retrait. Des trous d'injection et des événements sont prévus dans les dalles préfabriquées, permettant de garantir le bon remplissage de l'interface.

→ **La mise en œuvre de l'étanchéité** et du revêtement.

Après une préparation du support par grenailage, un traitement par pontage des reprises de bétonnage et application d'un primaire en résine époxydique, une couche de roulement en résine gravillonnée est mise en œuvre

(photo 14), sur une épaisseur totale d'environ 10 mm.

Les travaux préparatoires ont démarré le 14 juin 2011.

La pose des dalles s'est déroulée en juillet/août 2011.

La remise en service du tablier renforcé a pu être faite le 1^{er} septembre 2011, permettant ainsi notamment aux transports scolaires de circuler à nouveau sur l'ouvrage.

LE CONTRÔLE ET SUIVI DE CHANTIER

Le Réseau Scientifique et Technique (SETRA + CETE EST + LR Strasbourg) du Ministère de l'Énergie, de l'Écologie, du Développement Durable et de la

9a & 9b- Dépose des revêtements.
10- Pose des goujons.

9a & 9b- Removal of surfacing.
10- Placing studs.

Mer (MEEDDM), a eu pour mission de contrôler les études d'exécution, le choix des matériaux et leur mise en œuvre ainsi que les procédures de mise en œuvre des matériaux.

Dans le cadre du suivi de chantier, il a été procédé aux différentes tâches suivantes :

→ **Inspection détaillée du platelage après que le revêtement bitumineux ait été retiré.**

Il s'agissait notamment de détecter d'éventuelles fissures à la jonction platelage/auget. Les contrôles par magnétoscopie n'ont pas révélés de fissures en surface de la tôle de platelage.

→ **Inspection détaillée des poutres porteuses après que le revêtement bitumineux ait été retiré.**

→ **Contrôle de la préfabrication et de la mise en œuvre.**

En phase de réception des travaux, il a été procédé :



10



→ Aux épreuves de chargement réglementaire comme s'il s'agissait d'un ouvrage neuf, avec notamment la mesure de la flèche générale de l'ouvrage à vide et sous charges, la mesure de la flèche d'une pièce de pont de l'ouvrage à vide et sous charges (photo 15) ;

→ À une inspection détaillée initiale « point zéro » suite au renfort du tablier.

LA VALIDATION DE L'EXPÉRIMENTATION

L'objet de cette validation est d'analyser le fonctionnement mécanique réel de l'ouvrage par rapport au fonctionnement théorique mis en évidence à l'occasion des études d'exécution par les modèles de calcul aux éléments finis. Il s'agit également d'étudier le comportement mécanique avant et après renforcement de manière à évaluer la durée de vie résiduelle de l'ouvrage réparé et d'étudier le comportement mécanique dégradé de l'ouvrage dans l'hypothèse de la rupture d'un auget.

Pour la flexion générale, il s'agit d'examiner l'impact de la mise en

œuvre de la dalle sur le comportement de la structure métallique d'origine pour la flexion générale de l'ouvrage et pour la flexion locale des pièces de pont, en s'intéressant notamment au niveau de la connexion sous l'action des charges de trafic, des effets thermiques (différence de température entre la dalle en béton et les poutres métalliques), et de retrait.

Pour la flexion locale, il s'agit d'évaluer, tout particulièrement au droit des augets les variations de contraintes en

**11a & 11b-
Pose des dalles
préfabriquées.
12a & 12b-
Bétonnage
des zones
de clavages.**

**11a & 11b-
Placing prefa-
bricated slabs.
12a & 12b-
Concreting of
keying zones.**

fatigue dans la nouvelle configuration par rapport à l'ancienne, et d'examiner également le comportement de la dalle orthotrope dans le cas de la rupture d'un auget (étude de la supra résistance au sens de l'Eurocode).

Pour la détermination des actions de fatigue, il est prévu :

→ De procéder à l'enregistrement du trafic pendant une durée de deux mois de manière à caractériser le trafic réel circulant sur l'ouvrage.

→ De mettre en évidence l'effet dynamique global et local du trafic par l'enregistrement simultané de variations de contraintes sur la poutre porteuse et sur les augets étudiés. On pourra ainsi pour un camion de poids parfaitement défini faire d'une part un essai statique et d'autre part un essai dynamique à 50 km/h. Cet enregistrement pourra aussi servir pour le calcul de l'endommagement par fatigue de l'ouvrage ainsi qu'aux variations de contraintes dans le platelage.

Pour ce faire, le programme d'instrumentation comportait les points suivants :

→ L'instrumentation d'une zone d'about de l'ouvrage ainsi que la zone de milieu de travée sur un ensemble de trois augets situés à l'aplomb d'une file de roues de poids lourd.

→ Pour chaque file d'auget, pour la flexion générale de l'auget, il sera établi le Navier de contrainte au droit de la jonction avec la pièce de pont ainsi qu'entre deux pièces de pont.

→ Pour la file d'auget la plus sollicitée, il sera étudié la flexion transversale du platelage, au droit de la pièce de pont ainsi qu'entre deux pièces de pont.

→ L'instrumentation de la section de mi-travée des poutres porteuses avec des jauges extensométriques (membrane supérieure et inférieure), ainsi qu'avec des sondes de température.

→ L'instrumentation de la section de mi-travée de la pièce de pont située à mi-travée avec des jauges extensométriques (membrane supérieure et inférieure), ainsi qu'avec des sondes de température.

→ L'instrumentation de l'about de l'ouvrage pour détecter d'éventuels glissements entre la dalle et le platelage. ▷



13



14



15

→ Le relevé de la déformation globale de l'ouvrage (à mi-travée) et locale (à mi-travée de flexion de la pièce de pont située à mi-travée de l'ouvrage).

LE PROGRAMME DE SUIVI DE LA DURABILITÉ DE LA RÉPARATION

Il s'agit de s'assurer du bon fonctionnement dans le temps de la réparation pendant une période de dix ans.

Le suivi de l'ouvrage après sa remise en service comprendra des **Inspections détaillées régulières** dont la fréquence sera ajustée en fonction des observations ainsi qu'une visite annuelle conduite par un expert du CETE de l'Est. À ce jour, les inspections détaillées sont programmées à un an, cinq ans puis dix ans après la réparation.

À l'occasion des inspections, il sera également procédé à un suivi de l'évolution des contraintes et de la flèche. Cette campagne d'instrumentation pourra être simplifiée par le comité de suivi technique après analyse des résultats obtenus lors des travaux de renfort de l'ouvrage.

CONCLUSION

Le procédé Orthodalle s'inscrit dans la continuité d'une démarche de recherche et développement appelée Orthoplus (projet ANR) visant à réduire les phénomènes de fatigue observés sur les tabliers de ponts à dalle orthotrope et à réaliser des ouvrages neufs exempts de ces pathologies.

Il consiste à rechercher une technique innovante de renforcement d'un tablier existant de pont en dalle orthotrope à l'aide d'un revêtement structurel en BFUP constitué d'éléments préfabriqués avec une connexion en deuxième phase.

L'application proposée du procédé Orthodalle à l'ouvrage de la RD201, montre tout l'intérêt de cette technique : → Elle permet d'accroître la capacité portante de la dalle orthotrope, en réduisant les contraintes dans le plâtelage métallique.

→ La durée de vie de l'ouvrage est allongée d'au moins 20 ans pour un coût relatif très avantageux par rapport à celui de la solution de remplacement de l'ouvrage.

13- Injection de l'interface dalle/tôle.

14- Mise en œuvre du revêtement.

15- Épreuves de chargement.

13- Injection of the slab/plate interface.

14- Placing the surfacing.

15- Loading tests.

→ Elle fait appel à l'emploi de BFUP, composites les plus durables existants à ce jour. La durée de vie attendue des BFUP conduit à un bilan environnemental sur l'ensemble du cycle de vie de l'ouvrage considérablement amélioré.

La mise en œuvre de ce nouveau procédé est accompagnée d'une instrumentation fine du tablier, de façon à s'assurer du bon comportement dans le temps de l'ouvrage réparé sous circulation routière. □

LES PRINCIPAUX INTERVENANTS

MAÎTRE D'OUVRAGE : Conseil Général du Haut-Rhin

MAÎTRE D'ŒUVRE : Conseil Général du Haut-Rhin

ENTREPRISES : Eiffage TP Rhône Alpes / Eiffage Construction Métallique

ÉTUDES D'EXÉCUTION ET MÉTHODES : Eiffage TP – STOA / CTICM

CONTRÔLES TECHNIQUES ET INSTRUMENTATION : Sétra / CETE de l'Est / LR Strasbourg

ABSTRACT

REPAIR OF THE BRIDGE OVER COUNTY ROAD RD 201 ON THE HUNINGUE CANAL AT ILLZACH

B. HAASMANN - S. FYON - EIFFAGE TP: D. THAVEAU, A. SCHOTTER, Z. HAJAR, C. SERVANT

The Orthodalle process, developed within the framework of the Orthoplus national research project, uses the strength and durability properties of ultra-high-performance fibre-reinforced concrete (UHPFRC) to extend the lifetime of existing orthotropic-slab or more generally steel-frame structures.

Declared the winner of the 2010 Road Innovation Charter conducted by the Setra, the Orthodalle process was experimented by Eiffage Travaux Publics on a structure in service whose orthotropic decking showed major disorders. The project, carried out at Illzach, near Mulhouse, involved installing prefabricated slab elements in place of the bituminous surfacing. □

REPARACIÓN DEL PUENTE DE LA CARRETERA DEPARTAMENTAL 201 SOBRE EL CANAL DE HUNINGUE EN ILLZACH

B. HAASMANN - S. FYON - EIFFAGE TP: D. THAVEAU, A. SCHOTTER, Z. HAJAR, C. SERVANT

Puesto a punto en el marco del proyecto francés de investigación Orthoplus, el procedimiento Orthodalle utiliza las propiedades de resistencia y de durabilidad de los hormigones con fibras de muy altas prestaciones (BFUP) para prolongar la vida útil de las estructuras existentes, de losa ortótropa o, más generalmente, de estructura metálica. Galardonado con la Carta Innovación Vial 2010 dirigida por Setra, el procedimiento Orthodalle ha sido sometido a prueba por Eiffage Travaux Publics en una estructura en servicio cuya pasarela ortótropa presentaba una importante alteración, en Illzach, cerca de Mulhouse, mediante la instalación de elementos de losa prefabricados en lugar del revestimiento bituminoso. □



© B. VOISIN

LA PASSERELLE SUR LE LOIRET À OLIVET

AUTEURS : NABIL YAZBECK, JEAN-PIERRE LEVILLAIN, FARID SAIFI - EGIS JMI

LA CRÉATION D'UNE PASSERELLE DE FRANCHISSEMENT DU LOIRET POUR PIÉTONS ET CYCLISTES, AU DROIT DU PONT MARÉCHAL LECLERC À OLIVET, S'INSCRIT DANS LE CADRE D'UNE POLITIQUE DE LA COMMUNAUTÉ D'AGGLOMÉRATION ORLÉANS VAL DE LOIRE (L'AGGLO) VISANT À PROMOUVOIR LA PRATIQUE DU VÉLO DANS L'AGGLOMÉRATION ORLÉANAISE. CETTE NOUVELLE PASSERELLE ACCOLÉE AU PONT EXISTANT EST EXCLUSIVEMENT RÉSERVÉE AUX MODES DOUX DE CIRCULATION.

CONTEXTE GÉNÉRAL DE L'OPÉRATION

La commune d'Olivet est située au sud d'Orléans. La communauté s'est dotée en 1997 d'un Schéma Directeur des Itinéraires Cyclables (SDIC) qui prévoit de porter la taille de son réseau de 150 à 400 km, et de le rendre continu et sûr. La RD920 en particulier, qui

franchit le Loiret par le pont Maréchal Leclerc, était identifiée dans le Plan de Déplacements Urbains comme itinéraire cyclable prioritaire Nord-Sud, pour relier les centres-villes d'Orléans et d'Olivet, et les massifs forestiers de la forêt d'Orléans et ceux de la Sologne, et ainsi offrir une traversée sécurisée et complète de l'agglomération.

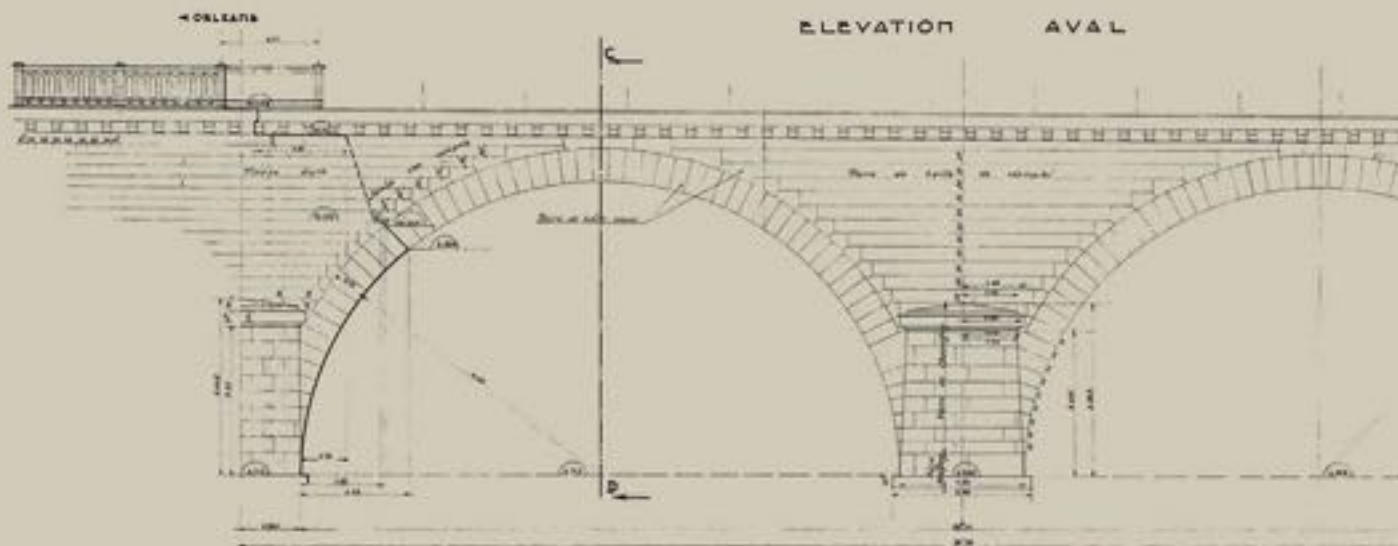
La rivière du Loiret, issue d'une résurgence de la Loire, prend sa source à l'Est d'Olivet, qu'elle traverse d'Est en Ouest sur 6 km environ avant de se rejeter dans la Loire. La rivière donne à Olivet son image de « ville-jardin », et concentre l'essentiel du patrimoine historique et paysager de la ville. Le site, pittoresque, offre un paysage

remarquable en agglomération. Situé au cœur d'une Zone de Protection du Patrimoine Architectural, Urbain et Paysager (ZPPAUP), il est classé au patrimoine mondial de l'Unesco.

Le pont Maréchal Leclerc supporte une chaussée à deux voies de 6,10 m de largeur, encadrée par deux trottoirs exigus de 1,20 m chacun. ▷

PONT MARÉCHAL LECLERC - PLANS DE RECONSTRUCTION (1946)

Élévation aval et coupe transversale



1
© DR

Compte tenu de l'importance du trafic routier sur la RD920, il ne permettait pas d'assurer pour ses usagers piétons et cycles une traversée sécurisée. C'est pourquoi le projet d'agglomération prévoyait la réalisation d'une passerelle accolée au pont existant, qui leur serait exclusivement réservée. À cette fin, le maître d'ouvrage, l'Agglo, a organisé un concours de conception mettant en compétition plusieurs équipes pluridisciplinaires composées d'ingénieurs et d'architectes. Au terme de ce concours, l'Agglo a confié en février 2006 à l'équipe composée de Egis JMI et du cabinet d'architecture Strates un marché de maîtrise d'œuvre complète, comprenant la construction de la passerelle et la rénovation des superstructures de l'ouvrage existant. Le marché de travaux, organisé en trois lots techniques (génie civil et équipements, charpente métallique, rénovation de l'existant) a été attribué en février 2010 au groupement d'entreprises Bouygues TP Régions France/ Les Métalliers Corrziens/ Colas Centre Ouest.

LE PONT MARÉCHAL LECLERC

L'ouvrage existant, propriété du Conseil Général du Loiret, est un pont en maçonnerie de pierres de taille. Sa première construction date vraisemblablement, pour la partie sur le Loiret, du XV^e ou XVI^e siècle. Suite à son endommagement par les crues exceptionnelles de 1846 et 1866, il a été démolé et reconstruit dans sa

1- Pont Maréchal Leclerc - Plans de reconstruction (1946) - Élévation aval et coupe transversale.

1- Maréchal Leclerc Bridge - Reconstruction drawings (1946) - Downstream elevation view and cross section.

configuration actuelle (1870), en l'établissant pour partie sur les fondations existantes.

Les arches en rivière P3-P4 et P4-P5, détruites par les bombardements en 1944, ont été reconstruites une seconde fois en 1946 en béton armé et maçonnerie de moellons récupérés, avec un parement de pierre.

D'une longueur totale de 305 m, il est en réalité composé de 2 ouvrages, l'un fluvial et l'autre terrestre en rive droite (le viaduc d'accès), de longueurs res-

pectives 200 et 105 m, et composés chacun de 11 arches en plein cintre. Dans la partie fluviale, celles-ci sont sensiblement identiques, et dégagent un tirant d'air de 6 m pour une portée entre axes de piles de 15 m environ.

Dans la partie terrestre, les dimensions des arches décroissent progressivement, la dernière présentant une portée de 6,80 m. L'ouvrage a fait l'objet d'inspections détaillées en 2000 et 2001. Celles-ci ont conclu à un bon état structurel, tout en mettant en évi-

dence des pathologies au niveau des superstructures, classiques pour ce type d'ouvrage : des faiblesses dans l'étanchéité du tablier et la dégradation des revêtements de chaussée favorisent la pénétration des eaux, et se traduisent par des traces d'humidité et des efflorescences sous les voûtes ; une altération de certaines pierres de plinthe et de corbeaux, leur nature les rendant sensibles aux effets du gel.

La construction de la passerelle a donc été mise à profit pour réaliser les travaux de rénovation nécessaires à son « hôte » : réfection de la chaussée et des trottoirs, remplacement des éléments en pierre dégradés, rénovation et remise en peinture des garde-corps en fonte.

Les plans de construction de 1870 et 1946, conservés aux archives du CG45, donnent des indications précises sur la structure de l'ouvrage, et notamment de la maçonnerie des piles (figures 1 et 2).

La profondeur des pierres de parement des becs est de 0,40 à 0,50 m, le volume intérieur étant rempli de moellons liés au mortier de chaux.

FICHE TECHNIQUE

LONGUEUR TOTALE : 280 m (+ 70 m de rampes)

LARGEUR UTILE : 2,30 m

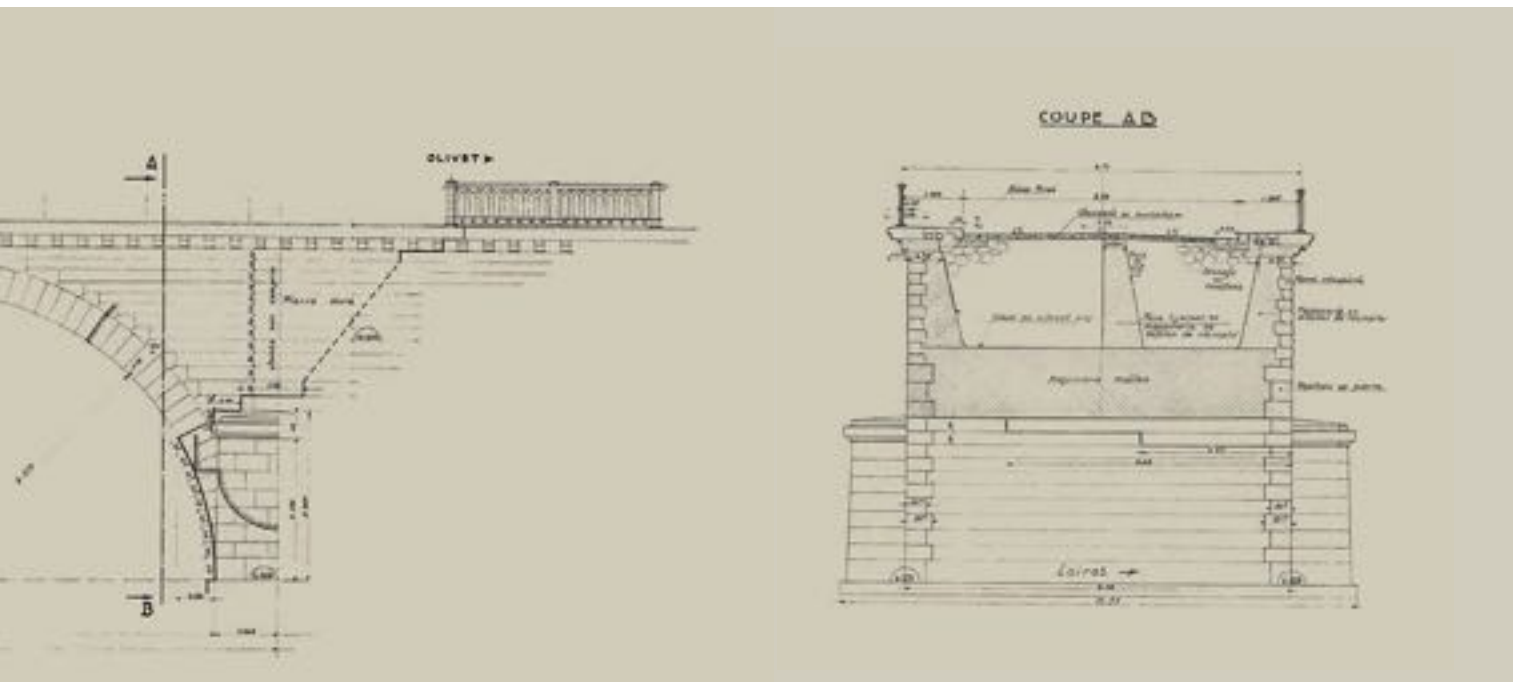
QUANTITÉS PRINCIPALES :

- Aciers de charpente : 87 tonnes
- Béton de structure : 200 m³
- Armatures passives : 26,5 tonnes
- Micropieux ø 200 : 700 ml
- Tirants actifs : 300 ml
- Clous pour ancrage des pieds d'arc : 240 ml
- Forages horizontaux dans le mur tympan : 300 ml
- Dépose/repose de corniches en pierre de taille : 350 ml (dont 140 ml en pierres neuves)
- Platelage bois : 780 m²

DÉLAI DE RÉALISATION : 13 mois de travaux à compter de mars 2010

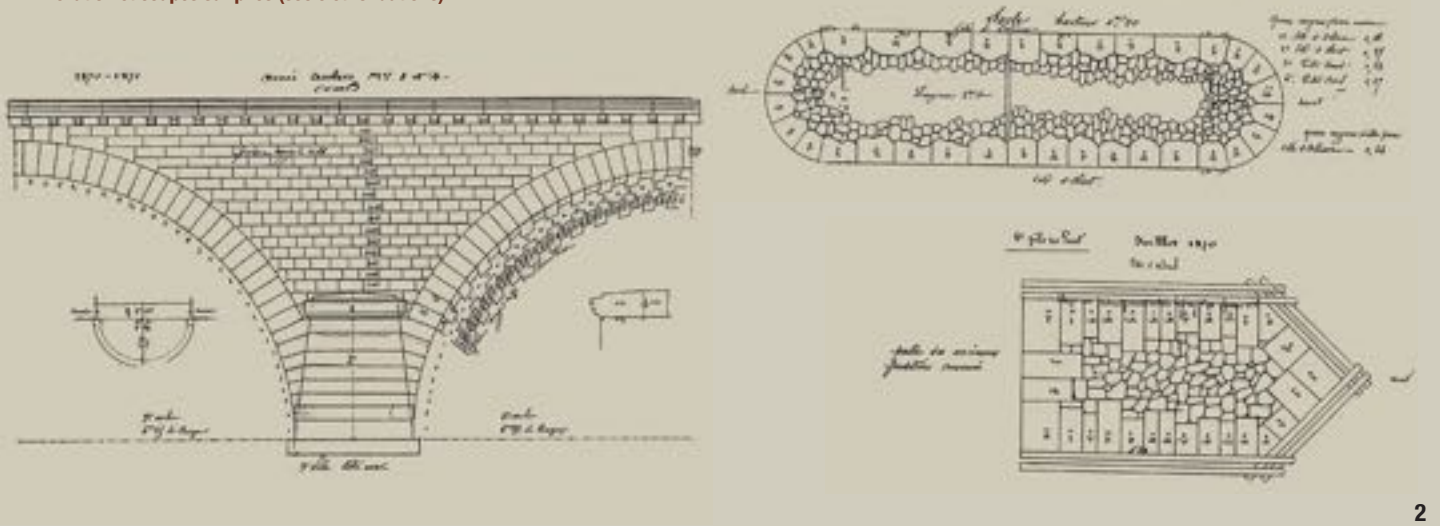
MONTANTS DES TRAVAUX : 3,2 M€ HT – base sept. 2010 :

- Génie civil et équipements : 1,6 M€
- Charpente métallique : 0,8 M€
- Rénovation du pont M. Leclerc : 0,8 M€



PONT MARÉCHAL LECLERC - PLANS DE CONSTRUCTION (1871)

Élévation et coupes sur piles (socle et fondations)



2

© DR

LES CONTRAINTES D'EMPRISE

L'urbanisation du site au droit du franchissement est relativement dense, notamment en rive droite où le viaduc d'accès est bordé par des propriétés privées, dont la limite se situe quasiment à l'aplomb des rives de l'ouvrage. Le raccordement au tissu viaire local et la préservation des berges du Loiret imposent donc de concevoir une passerelle parallèle et accolée à l'ouvrage existant.

Celle-ci est implantée le long de la rive aval du pont, pour minimiser les impacts sur les habitations.

Elle présente transversalement une emprise hors tout de 3 m à partir des garde-corps de l'ouvrage existant,

2- Pont Maréchal Leclerc - Plans de construction (1871) - Élévation et coupes sur piles (socle et fondations).

2- Maréchal Leclerc Bridge - Construction drawings (1871) - Elevation view and cross sections on piers (base and foundations).

pour s'insérer strictement dans l'emprise définie par le maître d'ouvrage. Sur toute la longueur du viaduc, elle surplombe ainsi une propriété privée bordée par un rideau d'arbres touffus.

LA CONCEPTION

Proposer une structure qui préserve l'intégrité et le caractère de l'ouvrage en maçonnerie, qui s'insère harmonieusement dans son environnement naturel et urbain, et qui peut être construite sans fermer le pont à la circulation, tels ont été les principaux objectifs des études de conception.

Le site se caractérise par le signal fort que constitue dans son environnement paysager le pont Maréchal Leclerc.

Le pont sur le Loiret est la partie la plus

visible de l'ouvrage ; le motif de l'arche y déploie sa symbolique. La passerelle ne doit pas s'opposer à ce mouvement, mais l'accompagner. La mise en valeur des arches existantes passait donc par la conception d'une structure simple et légère, la plus fine possible.

En rivière, les solutions consistant en un franchissement indépendant de l'ouvrage existant ont été écartées, pour des raisons architecturales et parce qu'elles impliquent la réalisation de fondations en rivière, dont le coût et les sujétions d'exécution les rendent non compétitives. Les descentes de charge modestes de la passerelle ne justifient pas de mettre en œuvre ces travaux ; elles peuvent être reprises par les piles en maçonnerie.

LES SOLUTIONS D'ÉLARGISSEMENT

Parmi les solutions d'élargissement, on peut distinguer :

→ La dalle générale béton armé en sur-largeur, reposant sur les murs tympan et le remblai. Assez usuelle sur les ponts en maçonnerie, elle permet d'augmenter la largeur de la chaussée et ainsi d'adapter les anciens ouvrages étroits aux contraintes de la circulation routière. Mais elle n'est pas la plus pertinente dans le cas du pont M. Leclerc, pour lequel il s'agit de créer un espace dédié aux circulations légères, en respectant les grandes lignes imposées par l'Architecte des Bâtiments de France, et notamment « la conservation de l'aspect des garde-corps existants et des rives de l'ouvrage (corniches, corbeaux) »,

→ Un platelage reposant sur des poutres console horizontales encastrées dans l'ouvrage existant. La reprise des

efforts d'encastrement est assurée par la mise en place de tirants précontraints horizontaux traversants, logés chacun dans un buton en béton prenant appui sur les tympans amont et aval.

Mais ces solutions sont relativement invasives. Leur mise en œuvre nécessite un décaissement dans la chaussée et une déconstruction partielle des superstructures existantes, qu'il est préférable d'éviter si elle n'est pas absolument nécessaire. La première solution impose une fermeture totale à la circulation, très contraignante sur cet axe dont la fréquentation atteint 16 000 véhicules par jour. La seconde, mise en œuvre sur le pont de Bourdely en Ardèche en 2005 (voir *Travaux*, n°818), nécessite de recourir à des consoles métalliques d'une hauteur conséquente, et conduit à solliciter la maçonnerie des murs tympan par des efforts localisés importants. Pour ces raisons, elles ont également été écartées.

UNE PASSERELLE MÉTALLIQUE AUX ARCS FINS

D'une longueur totale de 280 m, la passerelle se raccorde sur berges à la voirie existante par l'intermédiaire de deux rampes d'accès de 30 et 40 m, en déblai en rive gauche et en remblai en rive droite. La structure, entièrement métallique, se décompose en une passerelle sur le Loiret de 175 m et une passerelle terrestre de 105 m. Elle présente une largeur fonctionnelle de 2,30 m.

La partie sur le Loiret est composée d'une succession de 11 arcs fins prenant appui sur les becs en maçonnerie et inclinés par rapport à la verticale, de manière à rejoindre à leur clé la rive de la passerelle (figures 3a et 3b).

La flèche de ces arcs vus en élévation a été choisie de manière à ce que, à la clé, leur intrados soit calé au niveau du dessus de voûte, permettant ainsi de conserver totalement visibles les pierres d'arche.

Se rejoignant en partie basse à 1 m au-dessus des becs sur un bracon commun, les caissons les constituant sont de section parallélépipédique ; leurs membrures sont horizontales. Vu en élévation, l'arc présente une épaisseur constante de 200 mm.

En coupe transversale, sa largeur varie de 200 mm à la clé à 400 mm en pied, à l'encastrement sur le bec. L'épaisseur des tôles varie de 8 à 15 mm.

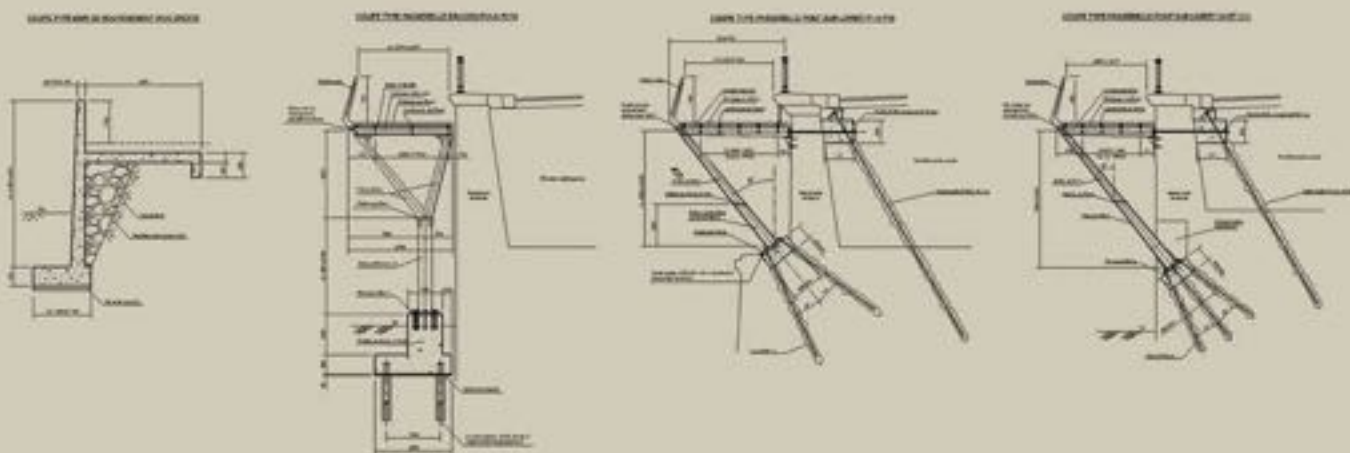
La rive extérieure de la passerelle est

3a & 3b- Élévation aval et coupes transversales de l'ouvrage.

3a & 3b- Down-stream elevation view and cross sections of the structure.

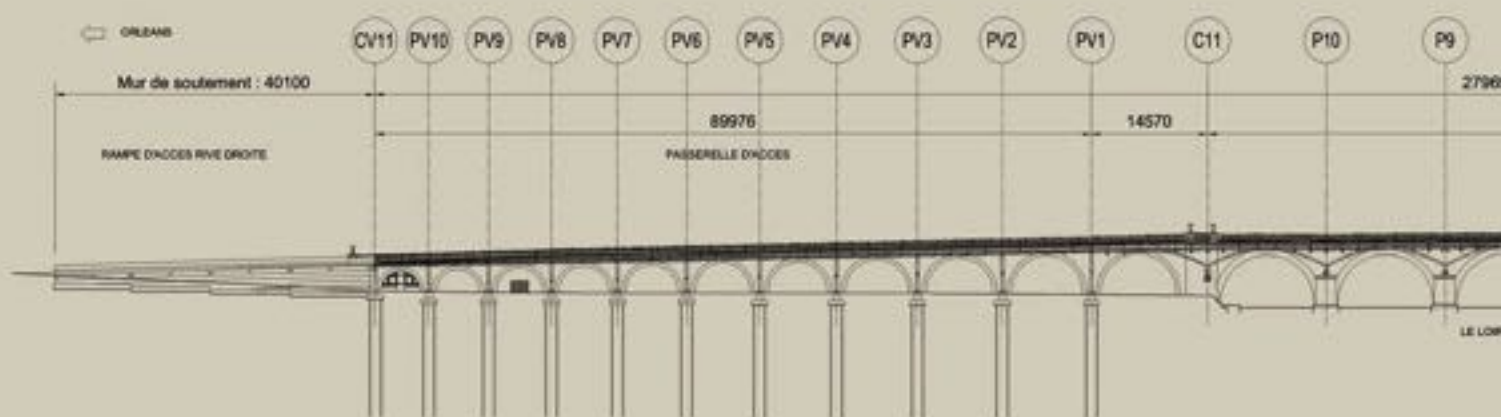
COUPES TRANSVERSALES DE L'OUVRAGE

© DR
3a



ÉLÉVATION AVAL

3b



délimitée par un profilé métallique longitudinal reliant les clés des différents arcs entre elles ; de caractéristiques équivalentes à celles d'un HEA200, son âme est inclinée dans l'alignement de l'arc. La structure porteuse horizontale est complétée dans le sens transversal par des consoles métalliques fixées dans la maçonnerie, et dans le sens

4- Coupe transversale type de la passerelle sur le Loiret.

4- Typical cross section of the foot bridge over the Loiret.

longitudinal par les solives IPE 140 supportant le platelage en bois. La dualité de forme entre les deux structures installées la passerelle dans le site sans porter préjudice au caractère de l'ouvrage en maçonnerie. L'inclinaison des arcs vers l'extérieur lui confère, dans ce jeu de mimétisme, sa personnalité propre.

Le schéma statique correspond à un fonctionnement en système triangulé, qui permet de concevoir une structure relativement rigide malgré la finesse de ses éléments constitutifs (figures 4 et 5) :

→ L'arc ramène en pied la quasi-totalité des charges verticales. Son inclinaison conduit à une réaction d'appui orientée vers l'intérieur, assurant une bonne diffusion de l'effort dans la masse de la pile. Les pieds d'arc sont encastrés dans la maçonnerie par des barres de clouage ;

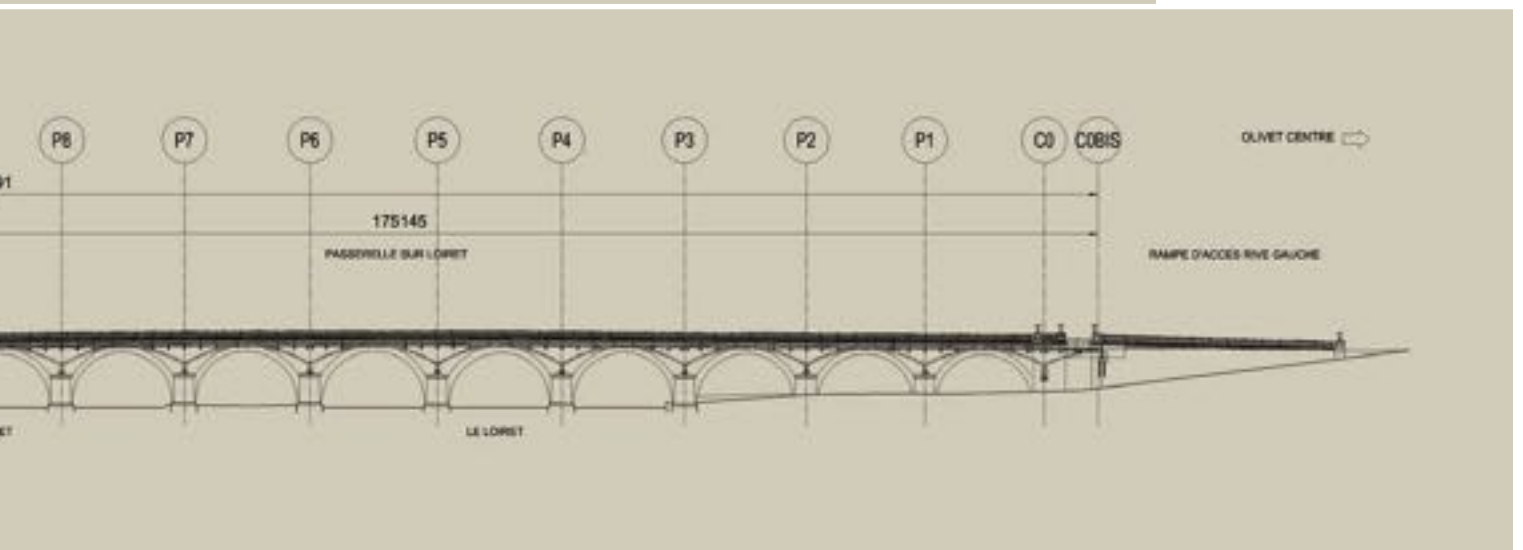
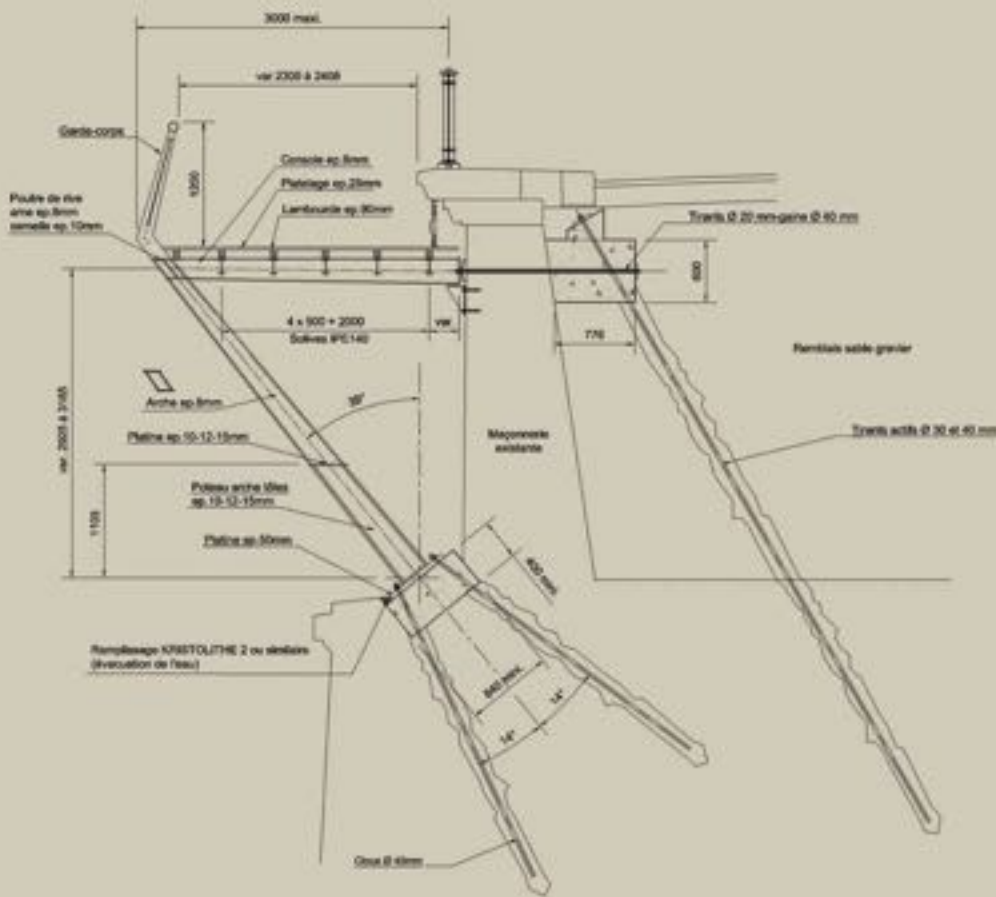
→ Au niveau des consoles hautes, cette inclinaison induit un effort horizontal qu'il convient de ne pas transmettre au mur tympan, pour ne pas modifier son équilibre initial. La solution retenue est de rajouter un effort incliné vers le centre de la pile, par l'intermédiaire de tirants actifs, ancrés dans une poutre de répartition disposée à l'arrière du mur. Leur tension est calibrée de manière à ce que la résultante comprime la base de celui-ci, permettant ainsi de garantir sa stabilité. L'ancrage des consoles hautes dans la poutre arrière est réalisé sans scellement dans le mur (les forages sont équipés de tubes PVC). La réaction verticale est reprise par un corbeau métallique scellé dans la pierre ; la console repose sur ce corbeau via un appui à grain.

L'emprise limitée des fouilles nécessaires à la réalisation de la poutre de répartition permet de maintenir la voie amont ouverte à la circulation durant les travaux.

Afin d'échapper à l'encombrement des consoles et corbeaux en pierre, le niveau fini de la passerelle a été calé à 0,72 m sous le niveau du trottoir du pont.

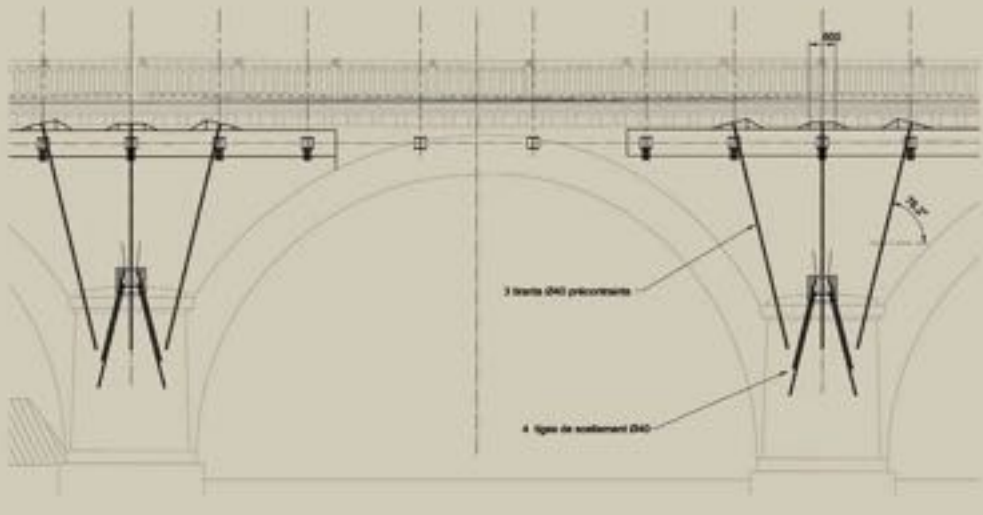
© DR
4

COUPE TRANSVERSALE TYPE de la passerelle sur le Loiret



VUE EN ÉLÉVATION
des fondations dans l'ouvrage existant

5 © DR



5- Vue en élévation des fondations dans l'ouvrage existant.

6- Élévation aval - Détail sur berge en rive droite.

7- Projet de replantation le long de la propriété privée.

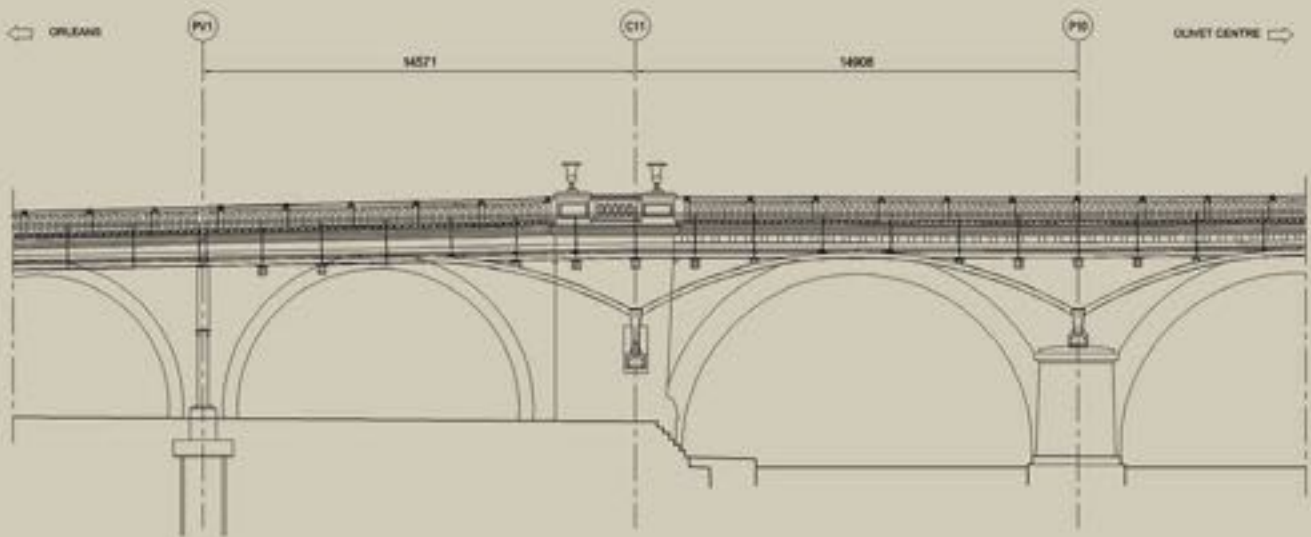
5- Elevation view of the foundations in the existing structure.

6- Downstream elevation view - Details on right bank.

7- Replanting project alongside private property.

ÉLÉVATION AVAL
Détail sur berge en rive droite

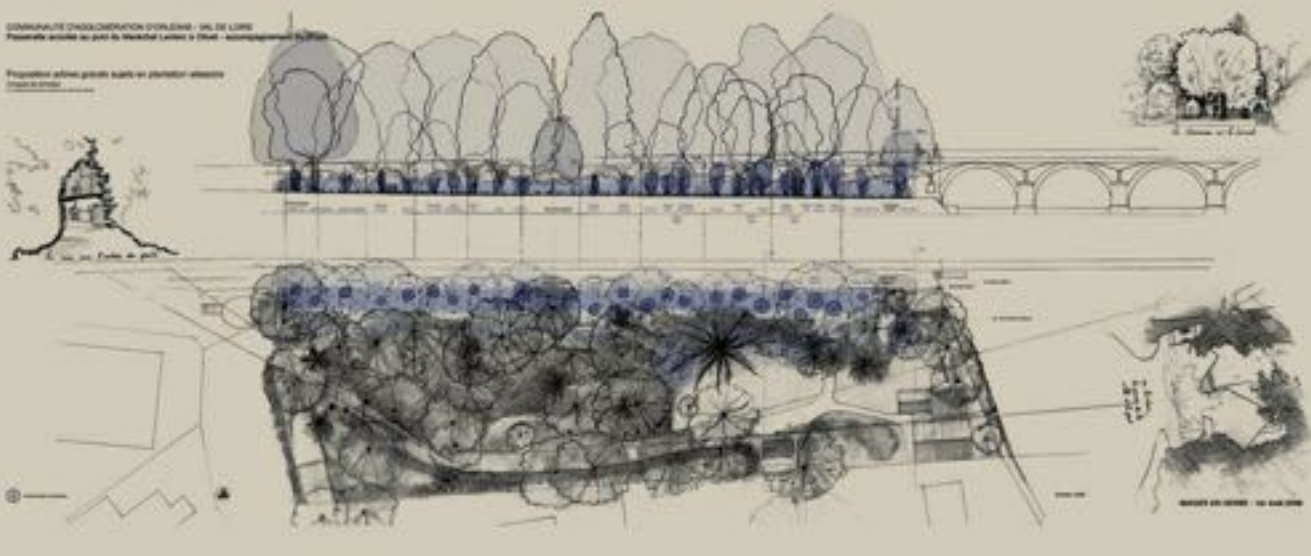
6



© DR

PROJET DE REPLANTATION LE LONG DE LA PROPRIÉTÉ PRIVÉE

7



© DR



8

© DR

Dans toute la zone sur le Loiret, où la passerelle s'accroche sur le pont existant, ce décalage est constant. Son profil en long est une ligne brisée avec des pentes constantes par travée, pour faciliter la fabrication de la charpente. Dans la partie terrestre, le PL remonte progressivement pour accoster à niveau sur la rampe en rive droite.

La pente maximale, relevée au voisinage de celle-ci, vaut 3,02 % et respecte les critères d'accessibilité aux personnes à mobilité réduite.

Le pont Maréchal Leclerc présente des variations décimétriques sur la portée de ses arches. Le niveau des dessus de bec, où prennent appui les arcs métalliques, est également variable. Ces arcs sont donc des pièces uniques ; on s'est néanmoins attaché à minimiser leurs variations, tout en conservant une unité architecturale : l'inclinaison des arcs par

rapport à la verticale est une constante (39°), ainsi que la loi de variation de leur section à partir de la clé ; leur point de jonction se trouve toujours à 1 m au dessus du pied du mur tympan.

En rive gauche, le dernier demi-arc prend appui, par l'intermédiaire de bielles anti-soulèvement, sur un chevette en béton noyé dans le remblai et fondé par clouage dans la maçonnerie. La rampe d'accès est taillée dans le remblai du pont, le parement en pierre latéral et son garde corps d'origine étant conservés (photo 15).

En rive droite, la passerelle change de structure (figure 6). Dans cette zone, elle est confinée dans une bande étroite délimitée d'un côté par le viaduc, et de l'autre par la limite de la propriété privée, située à l'aplomb de sa rive extérieure. La partie terrestre est une structure métallique de type poteaux-

8- Passerelle sur le Loiret - Raboutage des tronçons sur site.

9- Consoles support de l'estacade provisoire.

8- Foot bridge over the Loiret - End-to-end joining of sections on site.

9- Brackets supporting the temporary jetty.

poutres continue, structurellement indépendante de l'ouvrage existant ; les 10 travées ont des portées variant entre 6,80 m et 11,20 m. Les appuis, disposés en alignement des piles en maçonnerie, sont des piles métalliques en Y, encastées sur un socle en béton. La branche extérieure de l'Y présente une inclinaison identique aux arcs en rivière, assurant un alignement des éléments pour un point de vue en enfilade depuis la berge opposée.

Le poteau vertical est positionné à la limite d'emprise, dans le domaine public. Les semelles d'assise sont fondées sur des micropieux ancrés dans le calcaire sain. La passerelle est équipée de joints de dilatation à ses extrémités, et à la jonction entre la structure en arcs et la passerelle terrestre. Les joints d'extrémité sont des joints à hiatus ; le joint central est de type tôle couvre-joint.

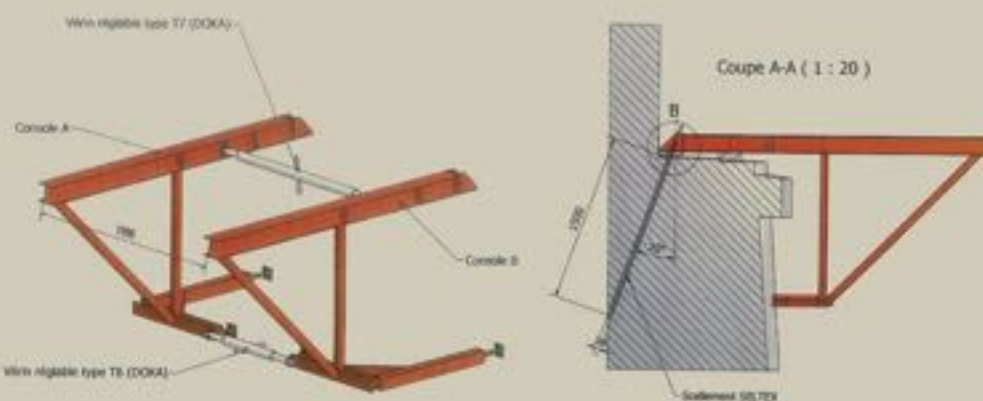
Un garde-corps architectural en acier surmonté d'une lisse en inox poli longe la rive extérieure. Au droit de la propriété privée, ce garde-corps est équipé d'un écran en rehausse, constitué de lamelles en acier inclinées. Du côté intérieur, l'espace situé entre les corbeaux en pierre et le platelage est fermé par une grille métallique dans laquelle sont encastés des spots assurant l'éclairage fonctionnel de la passerelle.

LES INVESTIGATIONS COMPLÉMENTAIRES EN PHASE PROJET GÉOTECHNIQUE

Le pont M. Leclerc a fait l'objet en 1989 d'une campagne de reconnaissance géotechnique des maçonneries et des sols de fondation.

CONSOLES SUPPORT DE L'ESTACADE PROVISOIRE

9



© DR



10



11



12



13



14



15

- 10- Passerelle terrestre avant pose du plateau.
- 11- Forage des clous de fondation des pieds d'arc.
- 12- Ferrailage d'une poutre de répartition.
- 13- Ancrage d'un tirant actif équipé de sa cellule de mesure, avant capotage.
- 14- Rive aval du pont avant fermeture des fouilles.
- 15- Culée C0bis.

- 10- Foot bridge on land before installing the decking.
- 11- Drilling foundation nails for arch bases.
- 12- Reinforcing bars for a distribution beam.
- 13- Anchoring a prestressed tie rod fitted with its measuring unit, before covering.
- 14- Bank downstream of the bridge before covering the excavations.
- 15- Abutment C0bis.

Les sondages pressiométriques réalisés à partir de la chaussée sur ouvrage ont montré que les maçonneries des piles sont de qualité très satisfaisante (béton cyclopéen très résistant à base de blocs et cailloux calcaires liés par du mortier de chaux, $3 \leq p \leq 4$ bars, $475 \leq E \leq 1130$ bars). Les premières études de portance des fondations de la passerelle ont été menées sur la base des informations issues de cette campagne.

Dans le cadre des études de projet, une campagne complémentaire a été confiée à la société Fondasol en août 2006. L'ouverture de fouilles à l'arrière des murs tympan a permis de reconnaître leur géométrie ainsi que la nature des matériaux de remplissage, composés essentiellement de sables, graviers et galets. Des sondages carottés ont

confirmé le niveau des maçonneries des piles et leur bonne qualité, ainsi que leur caractère relativement « ouvert », surtout en surface.

De manière à ne pas les endommager par des pressions trop élevées, les barres de clouage en pied d'arc ont été scellées par une injection globale et unitaire.

TOPOGRAPHIE

La construction géométrique de la passerelle en rivière, relativement complexe, nécessite une connaissance précise de la position d'un certain nombre de points sur l'ouvrage existant. Au stade de l'étude préliminaire, les seules données topographiques disponibles en élévation étaient issues d'un levé photométrique général. Une campagne topographique com-

plémentaire, confiée au cabinet Axis conseils et consistant en un levé d'environ 220 points sur l'ouvrage (chaussée, trottoir, corbeaux, corniches, mur tympan, tête de bec), a été nécessaire pour réaliser une modélisation tridimensionnelle de la passerelle lors des études de projet.

LES AMÉNAGEMENTS PAYSAGERS

Les servitudes de passage de la passerelle au-dessus du domaine privé ont fait l'objet d'un accord entre le maître d'ouvrage et le riverain ; la Déclaration d'Utilité Publique a été prononcée en juin 2009. Cet accord stipulait que pour les besoins des travaux, une bande de 6 m parallèle à l'ouvrage, à l'intérieur de la propriété privée, serait mise à disposition en jouissance temporaire.

Une étude phytosanitaire des arbres situés dans cette zone a été réalisée en mars 2007. Elle a permis d'identifier les spécimens dégradés, qu'il convenait d'abattre pour garantir la sécurité des usagers de l'ouvrage, et ceux qu'il fallait conserver.

Le parti d'aménagement retenu par le maître d'ouvrage et l'ABF était de reconstituer le rideau végétal le long de l'ouvrage, pour pérenniser le patrimoine arboricole et conserver l'impression de « promenade dans les arbres » que l'on ressent lorsque l'on emprunte l'ouvrage.

Une étude paysagère, réalisée par le cabinet orléanais Images en Herbe en août 2008, a permis de définir un programme de replantation (figure 7). Les travaux correspondants ont fait l'objet d'un marché spécifique.



© DR 16



17



18

16, 17 & 18-
Travaux de
rénovation
des corbeaux
et corniches
en pierre.

19- Modèle
CAO 3D de
la passerelle -
Vue partielle.

20- Assemblage
des tronçons
de passerelle
en atelier.

21- Caissons
d'arc en cours
de fabrication.

16, 17 & 18-
Renovation
work on stone
brackets and
parapets.

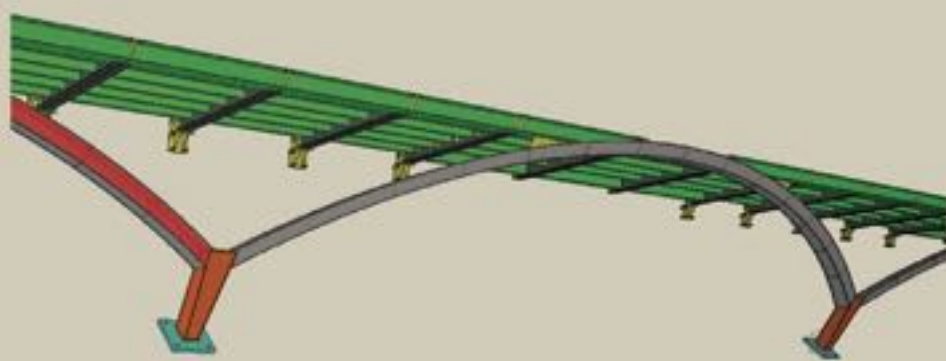
19- 3D CAD model
of the foot bridge -
Partial view.

20- Assembly
of foot-bridge
sections in
workshop.

21- Arch box
girders during
manufacture.

MODÈLE CAO 3D DE LA PASSERELLE

Vue partielle



© DR



© DR 20



21

LES TRAVAUX

Divers réseaux secs et humides, enfouis sous le trottoir et la chaussée aval, nécessitaient d'être déviés du côté amont pour les sortir de l'emprise des fondations de la passerelle. Ces travaux ont été réalisés à l'été 2007.

La phase de consultation des entreprises, organisée selon la procédure restreinte, a été engagée en mars 2009.

Sur les seize groupements candidats, sept ont été invités à concourir.

Le dossier de consultation a été remis aux concurrents retenus le 17 juin 2009, dès l'obtention de la DUP. Quatre offres ont été rendues.

Le cahier des charges imposait de maintenir en permanence une voie de circulation sur l'ouvrage, pendant toute la durée des travaux (sauf fermetures

ponctuelles, de nuit). La durée de restriction à une voie de circulation sur l'ouvrage constituait également un des critères de jugement.

Les concurrents avaient soigneusement étudié les méthodes de construction, en tenant compte de cette contrainte. Le groupement retenu, constitué des entreprises Bouygues TP/Les Métalliers Corrèziens/Colas, s'est engagé sur un délai global des travaux de 12,5 mois, pour un délai de base prévu à la consultation de 14 mois.

UNE ORGANISATION COMPLEXE

L'opération se caractérisait par la diversité des travaux à réaliser, nécessitant l'intervention coordonnée d'entreprises aux compétences variées (génie civil classique, charpente métallique, fonda-

tions spéciales, équipements et menuiserie, taille et pose de maçonneries en pierre, chaussées), et par l'organisation de la maîtrise d'ouvrage, associant les différents financeurs et donneurs d'ordres publics (l'Agglo ; le CG45, propriétaire du pont Maréchal Leclerc et maître d'ouvrage des travaux de rénovation ; la ville d'Olivet, futur propriétaire de la passerelle) et l'ABF. Les travaux préparatoires ont été réalisés au printemps 2010, avec d'une part le dégagement des emprises temporaires en rive droite dans la propriété privée (abattage, élagage et création de la piste d'accès), et d'autre part la mise en place d'une estacade provisoire en rivière, pour les travaux de fondation et de pose de la passerelle (photos 8 et 10).

L'estacade, d'une largeur de 2,75 m

et d'une longueur de 140 m environ, était composée de plateaux de 14 m reposant sur des consoles métalliques, prenant appui sur les dessus des becs par l'intermédiaire de cales en mortier à retrait compensé, et stabilisées par des tiges ancrées dans la maçonnerie (figure 9).

Ces consoles étaient équipées de deux vérins leur permettant de s'adapter à la géométrie variable des becs.

La structure est dimensionnée par le poids de la foreuse de 1 200 kg utilisée pour la réalisation des clous d'ancrage des pieds d'arc (photo 11).

La grue retenue pour la pose des éléments d'estacade permettait le travail en « calage châssis » depuis la voie aval, sans déploiement de patins, de manière à conserver la voie amont ouverte à la circulation. ▷

LIMITER LA GÊNE À LA CIRCULATION

Le planning élaboré par l'entreprise permettait d'alterner les périodes de circulation à une et à deux voies, de manière à limiter au maximum la gêne à la circulation :

- Neutralisation de la voie aval : mise en place de l'estacade, dépose des garde-corps en fonte et des corniches en pierre ;
- Remise en circulation à deux voies

pendant 2 mois (seul le trottoir aval est condamné), les travaux de fondation des pieds d'arc et les forages dans le mur tympan étant réalisés depuis l'extérieur ;

- Nouvelle neutralisation de la voie aval : réalisation des poutres de répartition et des tirants d'ancrage ; réparation des corbeaux puis repose des corniches et du garde-corps aval ; pose et assemblage des tronçons de passerelle en rivière (les éléments de

passerelle terrestre étant approvisionnés et posés en temps masqué, depuis le sol), réalisation d'enrobés provisoires sur la voie amont ;

- Dépose/repose de l'estacade côté amont ; basculement de la circulation côté aval ; travaux de réfection côté amont ; pose des équipements de la passerelle ;
- Réalisation de la couche de finition des enrobés (toute largeur, de nuit) ; travaux de finition ; épreuves.

Les forages horizontaux dans le mur tympan pour les armatures d'ancrage des consoles hautes ont été réalisés par carottage sur 0,40 m puis perçage avec une mèche à gros filetage, le carottage préalable dans la pierre de parement permettant de garantir la précision nécessaire et un réglage correct de l'horizontalité. Ces forages ont été équipés de tubes PVC horizontaux, prolongés à leur extrémité par un tube vertical permettant leur injection.



22



23



24



25



26



27

22- Ouverture par carottage de la niche d'appui du pied d'arc C0.

23- Soudure du pied d'arc C11 sur sa platine.

24- Pose du dernier tronçon en rive gauche.

25- Pose de nuit des tronçons au-dessus du Loiret.

26- Extrémité du dernier tronçon posé.

27- Point de vue depuis la passerelle en surplomb de la propriété privée.

22- Core drilling to open the recess supporting the base of arch C0.

23- Welding the base of arch C11 on its mounting plate.

24- Placing the last section on the left bank.

25- Placing sections above the Loiret by night.

26- End of the last section placed.

27- Viewpoint from the foot bridge overhanging private property.



28

© B. VOISIN

Les tirants actifs arrière ont été forés et scellés en préalable à l'ouverture des fouilles et à la réalisation des poutres de répartition (photo 12). Les armatures, des barres de diamètre 40 mm, sont équipées d'une protection à la corrosion de type P2.

La tête de tirant et l'ancrage, recouvert d'un capot de protection, sont injectés à la cire pétrolière. Conformément au cahier des charges, trois unités ont été équipées de cellules dynamométriques reliées à un boîtier de mesure visitable, permettant de suivre l'évolution des tensions durant la vie de l'ouvrage (photos 13 et 14).

OBJECTIF : S'APPROPRIER LA GÉOMÉTRIE DE L'OUVRAGE EXISTANT

Une des difficultés principales des études d'exécution résidait dans l'appropriation de la géométrie de l'ouvrage existant, et dans la maîtrise des tolérances d'exécution aux interfaces entre le génie civil et la charpente. C'est pourquoi le marché prévoyait la réalisation, durant la période de préparation, d'un second levé exhaustif de l'ouvrage, en plan, en élévation et en profil, recoupé et vérifié par un contrôle extérieur.

Sur cette base, l'entreprise et son bureau d'étude ont réalisé une modélisation tridimensionnelle détaillée de la totalité de la structure métallique, qui a servi à l'établissement du modèle de

calcul et aux échanges avec l'atelier (figure 19).

Afin de garantir un bon ajustement entre la charpente et ses dés d'appui déjà exécutés sur site, la géométrie exacte de ces derniers a été levée et transmise à l'atelier, pour la prise en compte dans la fabrication des légers écarts par rapport à l'implantation théorique sur plans. Du fait de la disposition en éventail des clous de fondation des pieds d'arc, la platine d'ancrage métallique a été positionnée sur le dé d'appui en béton avant enfilage des armatures, la soudure d'assemblage de la béquille sur cette platine étant réalisée sur chantier (photo 23).

Les calculs d'exécution ont validé le dimensionnement réalisé en phase projet. Les adaptations proposées par l'entreprise et retenues par le maître d'œuvre étaient les suivantes :

28- L'ouvrage en service vu depuis la rive gauche.

29- Épreuves de chargement.

28- Aerial view of the structure in service (left bank).

29- Loading tests.

→ Assemblages boulonnés pour les longerons support du platelage et pour les poutres porteuses de la passerelle terrestre sur les piles en Y ;

→ Fixation des lambourdes en bois sur les longerons par le biais de plats verti-

caux soudés sur leur aile supérieure et de tiges filetées traversantes ;

→ Diminution de l'épaisseur du platelage bois de 48 à 28 mm pour la passerelle sur le Loiret, où l'entraxe des longerons est de 0,50 m. Pour la passerelle terrestre, l'épaisseur de 48 mm prévue au marché a été conservée (l'entraxe des longerons valant 0,95 m dans cette partie de l'ouvrage).

UNE CHARPENTE MÉTALLIQUE À GÉOMÉTRIE COMPLEXE ET FINE

La fabrication de la charpente métallique a été essentiellement réalisée par LMC dans ses ateliers, situés à St-Pantaléon-de-Larche (19) (photos 20 et 21). Les éléments ont été débités, assemblés et soudés dans les ateliers de LMC, à l'exception du débit des tôles constitutives des PRS de rive et des caissons d'arc, qui a été réalisé par procédé laser par un sous-traitant (le procédé laser permettant d'obtenir une grande précision et une propreté de coupe).

L'assemblage de certains éléments secondaires, tels que longerons et entretoises du tablier, a également été partiellement sous-traité, en vue de respecter les délais très serrés de fabrication.

Compte tenu du faible tonnage (environ 90 tonnes) et des faibles épaisseurs des tôles (de 8 à 15 mm), la question de l'approvisionnement des aciers a été particulièrement délicate. ▷



© DR

29



30

© B. VOISIN

Le cahier des charges prévoyait l'emploi d'aciers S355 de qualité K2+N pour les tôles d'épaisseur inférieure à 30 mm. Les profilés du commerce (HEB 200, IPE 140 et IPE 220) respectant cette spécification n'étaient pas disponibles sur le marché dans des délais compatibles avec le planning des travaux. Ces profilés ne devant subir aucun chauffage ultérieur, il a été admis de recourir à de l'acier de qualité K2+AR (brut de laminage), l'exigence d'un marquage NF ayant été maintenue.

Les difficultés liées à l'exécution de la charpente métallique étaient en particulier dues à la géométrie complexe des pièces, à la finesse de l'épaisseur des tôles, et à l'association de différents types de poutres (profilés du commerce, PRS, caissons). Ces facteurs ont rendu délicates et plus longues les tâches de soudage et de redressage des pièces en atelier.

La réalisation a nécessité le recours à des méthodes de fabrication élaborées, en raison notamment des modes de soudage et des dimensions et formes des pièces.

Les techniques de mise en position, de bridage et de redressage adoptées ont permis de limiter les déformations de soudage, et d'obtenir l'aspect final

exigé pour le PRS de rive et les caissons d'arc.

La fabrication des arcs métalliques, qui sont des pièces uniques, a nécessité de réaliser en atelier des gabarits de fabrication sur mesure pour chacun d'entre eux. L'inertie variable des arcs et leur inclinaison par rapport à la verticale constituaient des difficultés supplémentaires (travail en 3 dimensions avec changement de géométrie).

Les tabliers de la partie en rivière ont été assemblés en continu en atelier et redécoupés après contrôles dimensionnels. Puis ils ont été transportés à l'envers par convoi exceptionnel chez la société MVO (Blainville S/Orme - 14) pour recevoir leur traitement anticorrosion. La protection anticorrosion de la passerelle terrestre a quant à elle été confiée à la société BORIFER à Bordeaux.

La pose des éléments de passerelle sur le Loiret a été réalisée en encorbellement depuis le pont, à l'aide d'une grue mobile de 50 t. Les opérations se sont déroulées de nuit sous fermeture de l'ouvrage à la circulation, afin de disposer de l'emprise nécessaire pour le calage de la grue et le retournement à 180° des tronçons avant levage (photos 25 et 26).

La mise en place des deux derniers arcs en rive gauche a été réalisée en journée depuis l'esplanade en contrebas du pont, permettant ainsi aux acteurs du projet et aux riverains d'assister à l'achèvement des opérations de pose (photo 24).

Compte tenu de leur répétitivité, seules deux travées consécutives de chacune des deux structures ont été soumises à l'épreuve de chargement. Les poids morts consistaient en des

cuves plastiques d'un mètre cube environ, remplies d'eau. Pour la partie terrestre, l'écart observé entre valeurs théoriques et mesurées était inférieur au millimètre, pour une flèche de l'ordre de 20 mm.

Pour la partie en rivière, des écarts de 10 à 20% ont été constatés sur les flèches de la poutre de rive, les valeurs mesurées (variant entre 14 et 28 mm le long du profilé) étant toujours inférieures aux prévisions des calculs. □

PRINCIPAUX INTERVENANTS

MAÎTRISE D'OUVRAGE : Communauté d'agglomération Orléans Val de Loire, en partenariat avec le Conseil Général du Loiret

MAÎTRISE D'ŒUVRE : Egis JMI / Strates

CONTRÔLES EXTÉRIEURS : Ginger CEBTP / Institut de Soudure / AXIS Conseils

GROUPEMENT D'ENTREPRISES : Bouygues TP Régions France (mandataire) / Les Métalliers Corrèziens / Colas Centre Ouest

BUREAU D'ÉTUDE D'EXÉCUTION : Bert

SOUS-TRAITANTS PRINCIPAUX : Trinquet (déboisage) ; Ada TP (terrassement) ; Tensol (fondations spéciales) ; Coulmeau (rénovation des maçonneries) ; Exopeints (remise en peinture garde-corps pont M. Leclerc) ; Borifer et Mvo (peinture anticorrosion passerelle) ; DR Equipements (garde-corps) ; Etdle (éclairage) ; Pcb (joints de dilatation)

ABSTRACT

THE FOOT BRIDGE OVER THE LOIRET AT OLIVET

EGIS JMI: NABIL YAZBECK, JEAN-PIERRE LEVILLAIN, FARID SAIFI

The creation of a foot bridge crossing the Loiret for pedestrians and cyclists, at the level of Maréchal Leclerc Bridge at Olivet, comes within the framework of the policy of the Orléans Val de Loire inter-municipal association ("l'Agglo") of promoting cycling in the Orléans urban area. This new foot bridge attached to the existing bridge is reserved exclusively for pedestrians and cyclists. □

LA PASARELA SOBRE EL RÍO LOIRET EN OLIVET

EGIS JMI: NABIL YAZBECK, JEAN-PIERRE LEVILLAIN, FARID SAIFI

La creación de una pasarela de paso del río Loiret para peatones y ciclistas, encima del puente Maréchal Leclerc en Olivet, se inscribe en el marco de una política de la comunidad de la aglomeración urbana de Orléans Val del Loira (l'Agglo) que tiene por objeto promover el uso de la bicicleta en la ciudad de Orléans. Esta nueva pasarela unida al puente existente está exclusivamente reservada a peatones y ciclistas. □

weber.mur pâte F²

UN NOUVEAU
POIDS PLUME

QUI ENVOIE
DU LOURD



Le nouveau weber.mur pâte F² allégé s'élève à la puissance 2 !

Destinée au débullage des murs et plafonds en béton, cette nouvelle formule de ragréage organique «fin» est utilisée dans les bâtiments neufs en intérieur comme en extérieur. Consistance plus «crémeuse» qui facilite le dosage, meilleure glisse et très bon remplissage des bulles garantissent des temps d'intervention réduits. Parce que chez Weber, l'utilisateur est au cœur de notre démarche d'innovation, weber.mur pâte F² a été allégé. Un seau de 21 kg offre donc aujourd'hui le même rendement qu'un seau traditionnel de 25 kg, la pénibilité de la manutention en moins. weber.mur pâte F² est également classé A+, le meilleur niveau réglementaire caractérisant les produits à très faible niveau d'émission de COV.



weber.mur pâte F²

ENDUIT ALLÉGÉ DE LISSAGE ET DÉBULLAGE DES
BÉTONS, A MÉLANGER AVEC DU CIMENT OU DU PLÂTRE

- moins de manutention : 21 kg équivalent à 25 kg traditionnels
- meilleure glisse, meilleur pouvoir garnissant
- très faible émission de COV : classé A+.



Notice produit



NOUVEAU

Avec notre application smartphone
vous avez tout Weber dans votre poche !
Téléchargement gratuit sur app.store.

Ensemble, durablement !

www.weber.fr

weber
SAINT-GOBAIN



1- Coffrage/
bétonnage
d'un chevêtre.

1- Formwork/
concreting of
a crossbeam.

© JEAN-PIERRE PERRIN

LE PONT SUR LA RIVIÈRE SAINT-ÉTIENNE À LA RÉUNION

AUTEURS : ANDRÉ GRIEBEL, DIRECTEUR DE TRAVAUX, DODIN CAMPENON BERNARD (VINCI CONSTRUCTION) - JEAN-PIERRE PERRIN, DIRECTEUR D'ACTIVITÉ ÎLE DE LA RÉUNION, DODIN CAMPENON BERNARD (VINCI CONSTRUCTION)

LORS DU PASSAGE DU CYCLONE GAMÈDE SUR L'ÎLE DE LA RÉUNION EN FÉVRIER 2007, L'UNE DES PILES DU PONT AVAL DE LA RIVIÈRE SAINT-ÉTIENNE A CÉDÉ SOUS LA PRESSION DES FLOTS, ENTRAÎNANT L'EFFONDREMENT DE L'ENSEMBLE DU TABLIER. LE CONSEIL RÉGIONAL DE LA RÉUNION A DONC ENTREPRIS LA CONSTRUCTION D'UN NOUVEAU FRANCHISSEMENT DE LA RIVIÈRE SAINT-ÉTIENNE, DONT LES FONDATIONS RENFORCÉES SERONT ANCRÉES À 35 M DE PROFONDEUR SOUS LE NIVEAU DE LA RIVIÈRE. LE MARCHÉ DU NOUVEAU PONT AVAL A ÉTÉ CONFIE À UN GROUPEMENT D'ENTREPRISES DONT DODIN CAMPENON BERNARD (VINCI CONSTRUCTION) EST MANDATAIRE, POUR UNE LIVRAISON PRÉVUE AU PRINTEMPS 2013.

LA GENÈSE DU PROJET

25 février 2007, « comme un château de cartes ! » est l'expression employée par toute la presse pour qualifier l'effondrement du pont de la rivière Saint-Étienne.

Ce dimanche matin, La Réunion s'éveille dans la chaleur moite du cyclone Gamède et c'est à 7h30, que l'une des neuf piles du pont aval cède sous la pression des flots de la rivière gonflée par les précipitations, entraînant l'effondrement de l'ensemble du tablier construit d'un seul tenant. Aucun véhicule ne circule à ce moment-là sur le pont, par chance l'effondrement n'a fait aucune victime.

La région sud de La Réunion se retrouve coupée en deux, d'autant plus que le radier du Ouaki, l'itinéraire alternatif en amont, a lui aussi été emporté. Dans les semaines qui suivent, les automobilistes circulent à double sens sur le pont amont, au prix de gigantesques embouteillages, avant qu'une double voie ne soit aménagée dans le



lit de la rivière sous la forme d'un radier. Suite à cet effondrement, la Région Réunion a entrepris les études nécessaires à la construction du futur franchissement de la rivière Saint-Étienne. Dans ce cadre, le maître d'œuvre a fait réaliser de nouvelles études hydrologiques et hydrauliques approfondies qui ont fortement contribué à la constitution du nouveau cahier des charges

2- Un peu d'histoire : l'ancien pont du CFR.

3- Perspective de l'architecte.

2- A little history: the old railway bridge.

3- Architect's perspective view.

pour l'ouvrage à construire. En effet, et contrairement à l'ouvrage amont encore existant et dont les fondations superficielles ne sont fondées qu'à environ 3 m de profondeur, le nouveau projet prend en compte un affouillement général de l'ordre de 15 m, auquel se rajoute (dans les matériaux considérés comme affouillables) un affouillement local de 13,50 m.

Ces hypothèses conduisent à ancrer les nouvelles fondations à près de 35 m de profondeur sous le niveau actuel de la rivière.

Si cela paraît extrêmement sécuritaire, cela est nécessaire pour garantir la résistance du nouvel ouvrage : si le débit moyen de la rivière est de l'ordre de 5 m³/s en temps normal, il peut atteindre, lors de la crue centennale la valeur considérable de 5 000 m³/s. Pour ces débits, la vitesse de l'eau et donc les efforts hydrodynamiques sont tels que cela provoque des phénomènes d'affouillement de grande envergure. ▷



© STRATES
3



4

LES DATES-CLÉS DU PROJET

25 FÉVRIER 2007 : Effondrement du pont aval de la rivière Saint-Étienne lors du passage du cyclone Gamède.

DÉCEMBRE 2007 : Étude préliminaire d'un ouvrage d'art (EPOA), qui envisage deux solutions : un pont mixte acier-béton ou un pont en béton précontraint.

DÉCEMBRE 2008 : Lancement de l'appel d'offres.

JUILLET 2009 : Choix du groupement d'entreprises par le Conseil Régional de la Réunion.

AOÛT 2009 : Pose de la première pierre.

MARS 2010 : Démarrage des travaux.

MARS 2011 : Bétonnage du premier chevêtre de pile.

SEPTEMBRE 2011 : Première phase de lancement de la charpente métallique.

EN 2012 : Charpente métallique, préfabrication et pose du tablier en béton armé.

AVRIL 2013 : Fin des travaux de l'ouvrage.



5

PHOTOS 4 & 5 © THIERRY ROUX

TROIS ANS DE CHANTIER POUR LE GROUPEMENT D'ENTREPRISES

Depuis le 25 février 2007, les étapes se sont succédées pour rouvrir la circulation aux habitants du Sud ; il était urgent d'offrir une solution aux automobilistes.

Une double voie provisoire fut donc mise en chantier dès le mois de mars 2007 dans le fond de la rivière.

Opérationnel dès le mois de mai 2007, ce radier permet aujourd'hui encore, en dehors des périodes de crue, de franchir la rivière Saint-Étienne en direction du Sud. Suite à l'appel d'offres concernant le chantier du nouveau pont aval, lancé par le Conseil Régional, le marché a été confié au groupement d'entreprises : Dodin Campenon Bernard (mandataire), SBTPC et Botte Fondations, toutes trois filiales de VINCI Construction, ainsi que Baudin Châteauneuf et Berthold SA pour la charpente métallique du pont mixte. Les travaux ont débuté au premier trimestre 2010 et vont se dérouler sur une période de trois ans.

Le marché comprend la construction du nouveau franchissement de la rivière par un ouvrage d'art qui sera le deuxième plus long de La Réunion, après le viaduc du Bernica sur la route des Tamarins.

Il comprend aussi la réalisation d'un passage inférieur et inclut des travaux annexes comme la construction d'une paroi moulée équipée de tirants d'ancrage, ainsi que la mise en œuvre d'enrochements liés sur les rives pour la protection des berges et des culées des ouvrages.

UNE CONFIGURATION RISQUÉE : DES BASSINS GÉOLOGIQUES DISTINCTS ET COMPLEXES

Le lit de la rivière Saint-Étienne est composé de deux bassins géologiques bien distincts côté Saint-Louis (rive droite) et côté Saint-Pierre (rive gauche) ; la rivière est leur point de rencontre.

Le sol de la rive droite, constitué d'une coulée boueuse insensible au phénomène d'affouillement) est de meilleure qualité que celui de l'autre rive.

4- Terrassement du puits marocain de la pile P4.

5- Forage de l'octogone de P8.

4- Earthworks for the "Moroccan well" shaft of pier P4.

5- Drilling the P8 octagon.

Il impose toutefois des fondations semi-profondes de type « puits marocains » pour les piles P1 à P4. Le bassin géologique de la rive gauche, qualifié d'alluvionnaire, est plus défavorable. Ce sol réunit toutes les conditions pour favoriser l'emportement des structures par une crue : érosion, affouillement puis abaissement du niveau de la rivière.

Pour faire face au risque d'affouillement de la rivière sous les piles P5 à P8, même en cas de crue centennale, une solution originale a été conçue : ériger

des fondations constituées d'un système de barrettes sécantes formant des octogones fermés.

LES PUIITS MAROCAINS : PRINCIPE

Ce type de fondations semi-profondes est utilisé lorsque l'on doit placer une pile ou une culée d'un viaduc ou d'un pont, sur un sol ne pouvant recevoir de fondations superficielles. On transfère ainsi les efforts plus bas dans le sol, sur un substratum porteur (photo 4).

Dans le cas de cet ouvrage, les dimensions des puits étaient les suivantes :

- Hauteur : de 5,70 m à 8,80 m ;
- Diamètre : de 5,70 m à 8,00 m ;
- Épaisseur de la paroi des puits : 1,00 m ;
- Épaisseur des radiers et des semelles : 2,00 m.

LES BARRETTES OCTOGONALES : UN SYSTÈME AMBITIEUX DE FONDATIONS PROFONDES

Pour assurer un bon ancrage du nouvel ouvrage et pour répondre favorablement aux hypothèses hydrauliques,

un système de fondation fermé s'est imposé aux yeux du concepteur. Ainsi, celui-ci a proposé un octogone constitué de 8 barrettes. « Il s'agit ici d'une géométrie et d'une complexité hors normes qui n'ont pas encore été réalisées par ailleurs. Le sol, constitué d'alluvions de rivière doit être excavé sur 35 m de profondeur avec du matériel de forage très lourd (benne preneuse de 23 tonnes et trépan croix de 16 tonnes), puis les barrettes réalisées successivement » explique Olivier Hesse, responsable du secteur Paroi chez Botte Fondations. La solution « octogone fermé » a imposé la gestion des recouvrements de forage ainsi que la construction d'un système de tenon-mortaise entre barrettes – une disposition qui lutte contre les déplacements des différentes barrettes dans le plan horizontal (photo 5).

Avec pour objectif de lutter contre des problèmes de stabilité externe dans les situations d'un affouillement maximal (risque de flambement), ces octogones ainsi constitués ont nécessité l'excavation de leur partie centrale, suivie par la réalisation d'une semelle intermédiaire à 14 m de profondeur.

Des travaux difficiles et délicats, sachant que cette liaison mécanique, composée de 176 barres HA40 manchonnées, doit être construite entre les

barrettes, dans un environnement très restreint et en profondeur.

- Hauteur : de 26 à 32 m ;
- Distance entre nus intérieurs : 4,25 m ;
- Épaisseur des barrettes : 1,20 m.

LA PAROI MOULÉE

Afin de protéger d'un affouillement la berge de la rive gauche et les fondations de la nouvelle et de l'ancienne culée, une paroi moulée de 260 m de longueur, 25 m de hauteur et 1,2 m d'épaisseur a été réalisée. Elle est surélevée par un mur de rehausse en béton armé de 5 m (photos 6 et 7).

Afin de tenir la paroi moulée qui protège le talus soutenant la culée C9, en prévision d'un affouillement éventuel, 105 tirants d'ancrage actifs ont été réalisés avec le système DSI, en 12T15S

protégés par un système de type P2 (photo 8).

Chaque tirant est composé d'une tête d'ancrage, qui transmet les forces de traction à l'armature du tirant, d'une partie libre, qui est la longueur du tirant comprise entre la tête d'ancrage et le début du scellement et d'une partie scellée, qui est la longueur du tirant sur laquelle la force de traction est transmise au terrain environnant par l'intermédiaire du coulis de scellement et du tube à manchette.

Dans le cas de cet ouvrage, les tirants sont actifs. Ils sont mis en charge préalablement à l'application des actions, afin de limiter les déplacements de la structure à tenir.

LES ENROCHEMENTS LIÉS

En complément de la paroi moulée, le projet de protection des berges prévoit la mise en œuvre de 35 000 m³ d'enrochements liés, répartis sur les deux rives, notamment derrière et aux extrémités de la paroi (photo 9).

Réalisés en part propre, ces travaux ont constitué un véritable « chantier dans le chantier », nécessitant non seulement la mobilisation permanente des équipes, mais aussi de nombreuses phases de pompage, compte tenu des venues d'eau d'une part et de la profondeur des bèches d'autre part.

LES PILES « CANNE À SUCRE »

Les piles du pont sont constituées d'un ensemble fût-chevêtre de forme évasée et sont pourvues d'un matriçage au motif « canne à sucre ».

Comme pour les autres parements matriçés de l'ouvrage, ce motif a été réalisé à l'aide d'éléments en résine de polyester renforcée avec des fibres de verre, fabriqués localement.

Outre la proximité du lieu de production, cette matière a permis d'épouser au mieux les formes complexes et non développables des chevêtres (photo 10).

Au vu des risques d'inondation du chantier, le groupement a choisi d'utiliser, pour son outil coffrant, une structure métallique haubanée à deux mats verticaux en forme de bateau (photo 1).

Ce design particulier permet à l'outil ainsi choisi de ne pas encombrer l'environnement de la pile à construire et de ne présenter qu'un strict minimum de points d'attaque vis-à-vis des crues cycloniques. « Nous devons assurer la tenue des outils de construction pendant la phase travaux. De plus, notre outil métallique répondait parfaitement au cahier des charges de l'architecte qui, en plus de la forme complexe des chevêtres, a dessiné un parement matriçé, comme pour l'ensemble des parements béton du chantier. »

6- Forage de la paroi moulée.

7- Mur de rehausse matriçé.

6- Drilling the diaphragm wall.

7- Raised wall.



LES MATÉRIAUX UTILISÉS

BÉTON

FONDACTIONS - C30/37 :

15 000 m³

PILES - C35/45 :

6 000 m³

TABLIER - C35/45 :

5 000 m³

ENROCHEMENTS LIÉS -

C25/30 :

12 500 m³

ACIER

CHARPENTE MÉTALLIQUE :

4 300 t

ARMATURES DE BÉTON ARMÉ :

6 000 t

PRÉCONTRAINTÉ :

60 t

ENROCHEMENTS

ENROCHEMENTS LIÉS :

35 000 m³

ENROCHEMENTS LIBRES :

5 000 m³



8

LES CARACTÉRISTIQUES DE L'OUVRAGE PRINCIPAL

- **TYPE** : bipoutre mixte acier-béton à pièces de pont
- **LARGEUR** : 21,70 m mini / 34,16 m maxi
- **LONGUEUR** : 694,50 m
- **TRAVÉES** : 7 travées de 82 m, 2 travées de rive de 60,25 m
- **APPUIS** : 2 culées et 8 piles, dont 7 possèdent le même chevêtre et sont précontraintes transversalement
- **FONDACTIONS** :
 - > Puits marocains (sol : coulée boueuse) sous les piles P1 à P4
 - > Caissons de barrettes sécantes (sol : alluvionnaire compact) sous les piles P5 à P8
 - > Barrettes classiques sous les culées
- **PROTECTION DES BERGES** :
 - > Paroi moulée de 260 ml, équipée de 105 tirants d'ancrage
 - > Enrochements liés : 35 000 m³
- **DURÉE DES TRAVAUX** : de 2010 à 2013



9

PHOTOS 8 & 9 © THIERRY FLOUX

Par ailleurs, la conception de l'outil a permis de ne pas dégrader le parement architectural par des tiges de coffrage », explique Thomas Huet, Ingénieur Travaux chez SBTPC.

La modélisation et le fonctionnement mécanique de l'outil ont permis de réduire considérablement le nombre de tiges de coffrages traversantes, puisque seules huit unités ont été nécessaires pour cet outil de près de 100 tonnes. Une fois les différents éléments de fûts de pile et les chevêtres réalisés (plus de 300 m³ de béton), une équipe complète le dispositif par la précontrainte transversale en tête de chevêtre.

De par leur caractère massif, les appuis ont fait l'objet de toutes les attentions quant à la limitation de la température à cœur du béton au cours de la prise. Afin de gérer la problématique de la RSI (réaction sulfatique interne), deux principaux aspects ont été étudiés spécifiquement. Outre des études particulières des formulations de béton, menées par le fournisseur et le réseau scientifique du groupe VINCI, il a été nécessaire d'une part de confectionner le béton avec de l'eau refroidie à 4-6°C,

et d'autre part de procéder à un refroidissement dans la masse du béton fraîchement mis en œuvre.

Ce sont ainsi plus de 20 km de tuyaux en PEHD qui ont été mis en place dans les cages d'armatures, et dans lesquels une équipe spécifiquement dédiée a fait circuler de façon continue, pendant les 72 heures suivant le bétonnage, de l'eau à 18-20°C (photo 11).

Précisons que le maillage des tuyaux et les temps de refroidissement avaient été préalablement définis sur la base de calculs thermiques menés par VINCI Construction.

UN PONT EN DEUX PARTIES : UNE STRUCTURE MIXTE AVEC 4 300 TONNES DE CHARPENTE MÉTALLIQUE ET PRÈS DE 700 ÉLÉMENTS PRÉFABRIQUÉS

Le choix du maître d'ouvrage s'est porté sur la construction d'un pont à structure mixte acier/béton. Le pont est droit, de profil transversal constant et de largeur égale à 21,70 m entre la culée C9 à la pile P3 (soit environ 2/3 de la longueur totale). Pour le dernier tiers, l'ouvrage présente une courbe, s'élargit jusqu'à

8- Tirants actifs du mur de rehausse.

9- Vue aérienne des enrochements liés en rive gauche aval.

8- Prestressed tie rods of the raised wall.

9- Aerial view of bound rockfill on the downstream left bank.

34,20 m, et sa coupe transversale évolue d'un profil « en toit » vers un devers unique. L'ouvrage est donc en deux parties distinctes. La partie droite, mise en œuvre par lançages successifs, sera équipée de dalles toutes identiques. La partie courbe, mise en place par grutage, sera, quant à elle, équipée de pré-dalles toutes différentes et uniques. La fabrication des 208 prédalles s'est achevée mi-novembre 2011, immédiatement suivie par le démarrage de la production des 472 dalles.

BAUDIN CHÂTEAUNEUF : 90 ANS D'EXPÉRIENCE

La charpente métallique du pont de la rivière Saint-Étienne a été réalisée par l'entreprise Baudin Châteauneuf, basée à Châteauneuf sur Loire (45). Fabriquée dans l'usine du Loiret, elle est constituée de tronçons découpés et soudés qui ont fait l'objet d'un essai d'assemblage « à blanc » à l'atelier afin d'en vérifier chacun des éléments.

Les différentes pièces de la charpente ont été acheminées par transport routier, puis par bateau. Les premières poutres sont arrivées fin 2010 à La Réunion.

D'abord stockées sur le port, les poutres sont ensuite convoyées au fur et à mesure sur le chantier pour être posées et soudées avant de recevoir leur dernière couche de peinture (couleur gris lumière RAL 7035).

DES CONVOIS VRAIMENT EXCEPTIONNELS

Les pièces de la charpente métallique sont acheminées entre Le Port et Saint-Louis par convois exceptionnels. Le premier des 64 convois, comprenant



10

© THIERRY ROUX

10- Les piles P3 à P8.

11- Réseau de tuyaux PEHD dans une cage d'armatures de chevêtre.

12- Livraison d'une poutre par convoi exceptionnel.

13- Partie lancée en cours d'assemblage ; avant-bec sur P6.

**10- Piers P3 to P8.
11- System of HDPE pipes in a crossbeam concrete reinforcing cage.
12- Delivery of a beam by extra long load transport.
13- Launched part undergoing assembly; launching nose on P6.**

une poutre de 31 mètres de long et de plus de 50 tonnes, a effectué le trajet de 40 kilomètres en quatre heures, le 25 mai 2011 (photo 12).

ASSEMBLAGE ET MISE EN ŒUVRE PAR LANÇAGE

La partie lancée représente environ les deux tiers du poids total de la structure,

soit près de 3 000 tonnes (photo 13). Depuis l'aire d'assemblage de la rive gauche, ce sont huit phases de lancement qui vont se succéder de septembre 2011 à juillet 2012.

Les opérations se déroulent classiquement avec l'aide d'un treuil principal, situé à l'arrière de la plate-forme et relayé par des poulies, et avec un avant-bec mis en place à l'avant de la structure.

ASSEMBLAGE ET MISE EN ŒUVRE PAR GRUTAGE

La partie grutée représente près de 1 300 tonnes et comporte les éléments de poutre les plus lourds (86 tonnes). Pour ces éléments, l'épaisseur des semelles inférieures est au maximum de 150 mm. Cette épaisseur a été obtenue par l'adjonction de semelles additionnelles en complément du laminage (photo 14).

LA PRÉFABRICATION : UNE VÉRITABLE PETITE USINE

Une équipe de huit personnes a été mise en place pour fabriquer quotidiennement le nombre de prédalles prévu. C'est une véritable petite usine qui a vu le jour avec un pont roulant permettant d'effectuer toutes les manutentions, une zone de ferrailage, une zone de coffrage et de coulage, une zone de déglacage, un quai de chargement et une zone de stockage. ▷

© JEAN-PIERRE PERRIN



11



12

© JEAN-PIERRE PERRIN



13

© THIERRY ROUX



14



15

PHOTOS 14 & 15 © THIERRY ROUX

LA CHARPENTE MÉTALLIQUE EN QUELQUES CHIFFRES

- 4 300** tonnes de poids total, dont **76** tonnes de goujons
- 54** tronçons de poutres
- 171** pièces de pont
- 342** consoles
- 7** bateaux pour acheminer les différents éléments
- 64** convois exceptionnels du Port à Saint-Louis
- 60** camions classiques

Chaque prédalle présente une géométrie différente, et de multiples contrôles doivent être effectués quotidiennement sur le site de préfabrication.

Ce sont notamment la présence de goujons connecteurs en quantité très importante et atteignant une hauteur de 400 mm, ainsi que la densité du ferrailage des zones de clavage, qui rendent particulièrement complexe le bon positionnement des armatures passives et le réglage des éléments préfabriqués.

Une modification des coffrages a ensuite été réalisée pour la production des dalles qui durera six mois. Celles-ci seront posées en août 2012 dès lors que la charpente métallique sera achevée à 100 % (photo 15).

UNE ORGANISATION EFFICACE POUR FACILITER LA POSE

Chaque prédalle étant différente au point de vue géométrique, chacune a été soigneusement numérotée et stockée selon un plan précis. Elles pourront ainsi être facilement identifiées sur le schéma de pose par les deux équipes responsables du chargement, de la réception et de la pose. Cette opération doit durer un mois pour les prédalles et un mois pour les dalles.

UNE DOUBLE DÉMARCHÉ ENVIRONNEMENTALE : PROTÉGER LA VIE AQUATIQUE ET PRÉSERVER LES OISEAUX MARINS

« La préservation de l'environnement sur ce chantier est une préoccupation

14- Partie grutée en cours d'assemblage.

15- L'aire de préfabrication des dalles et prédalles.

16- Pêche électrique de sauvegarde.

14- Crane-hoisted part undergoing assembly.

15- The slab and precast slab prefabrication area.

16- Safety insulating rod.

majeure. Elle s'axe plus particulièrement autour d'actions de préservation des oiseaux et de l'écosystème de la rivière », explique Émilien Chenuet, Ingénieur QPE chez Dodin Campenon Bernard

DÉTOURNEMENT DES BRAS DE LA RIVIÈRE

La règle principale qui régit l'ensemble du chantier est l'interdiction absolue de traverser la rivière ou de travailler dans son immédiate proximité ; ceci afin d'éviter tout risque de pollution de ce milieu fragile, riche en faune et pourvoyeur des fameuses bichiques, poissons si chers aux Réunionnais, faisant l'objet d'une technique de pêche associative. Il est donc nécessaire, chaque fois que les travaux l'imposent, de détourner les bras de la rivière, dont trois coulent toute l'année.

PÊCHES DE SAUVEGARDE POUR PRÉSERVER LA FAUNE AQUATIQUE

Dès que l'avancement du chantier nécessite le franchissement de l'un de ces bras, on commence par réaliser le tracé d'un lit provisoire ; puis une pêche de sauvegarde est organisée avec la fédération départementale de la pêche et les associations de pêcheurs, dans

LE FINANCEMENT

Le coût de l'opération s'élève à **75,4 millions d'euros TTC financés par l'État à hauteur de 18,2 millions d'euros TTC, et par la Région Réunion pour 57,2 millions d'euros TTC**



16

© EMILIEN CHENUET



LES PRINCIPAUX INTERVENANTS DE L'OPÉRATION

MAÎTRE D'OUVRAGE : Région Réunion

MAÎTRE D'ŒUVRE : Direction des Grands Travaux de la Région Réunion

ARCHITECTE : Strates

COORDONNATEUR S.P.S. : PREVENTIO

CONCEPTEURS : Sétra et CETE Méditerranée.

GROUPEMENT D'ENTREPRISES : Dodin Campenon Bernard (mandataire), SBTPC et Botte Fondations (toutes 3 filiales de VINCI Construction) pour les terrassements, les fondations, le génie civil et les aménagements ; Baudin Châteauneuf et Berthold SA pour la charpente métallique.

PRINCIPAUX SOUS-TRAITANTS : SAMT et CEPA (armatures pour béton armé) ; Forintech (sondages et carottages de contrôles) ; Alpharoc et DSI (tirants d'ancrage) ; Freyssinet (précontrainte et joints de chaussées) ; Comely (barrières BN4 et corniches caniveaux) ; JB Topo, Topo Services, SEGC, IDDOI et CNDR pour les contrôles externes ; Prosoudure et Exopeint pour le soudage et la peinture sur chantier.

PRINCIPAUX FOURNISSEURS : Lafarge (béton et granulats) ; Coffrage & Equipage et ABMS pour les outils coffrants des chevêtres et des dalles/prédalles ; Bourbon Composite (matrice) ; Etic (appareils d'appui).

BUREAUX D'ÉTUDES D'EXÉCUTION ET DE MÉTHODES : Campenon Bernard Ingénierie, Botte Fondations (toutes 2 filiales de VINCI Construction), BII, Baudin Châteauneuf, SNCF, Sogreah-Groupe Artelia.

le bras à détourner ; cette opération permet d'endormir la faune afin de la décompter avant de la déplacer dans le nouveau bras créé (photo 16).

DES OISEAUX MARINS POTENTIELLEMENT EN DANGER

De nombreux oiseaux endémiques et indigènes nichent dans les reliefs environnants : puffins de Baillon, pétrels de Barau ou noirs... Ces falaises sont leurs seuls lieux de reproduction. Les parents nourrissent les oisillons pendant plusieurs semaines avant de repartir en

haute mer. La moindre nuisance peut donc se révéler catastrophique pour ces espèces.

DES MESURES EFFICACES

Les éclairages perturbent ces oiseaux, particulièrement sensibles à la lumière, lors de leurs déplacements nocturnes. Or, le chantier nécessite des interventions de nuit, absolument indispensables, par exemple lors d'une modification du tracé du radier à double voie ou lors de travaux de forage des fondations profondes.

C'est pourquoi, deux types de mesures ont été prises : d'une part, l'éclairage sur le chantier est assuré grâce à des lampes au sodium dont la longueur d'onde n'est pas perçue par les oiseaux ; d'autre part, toutes les personnes intervenant sur le chantier ont été sensibilisées et informées de la procédure à suivre s'ils trouvent un oiseau égaré. Une démarche de prévention couronnée de succès car, pour le moment, seuls deux oiseaux égarés ont été retrouvés et remis aux bénévoles de la Seor (Société d'Études Ornithologiques de La Réunion). □

17- Vue de l'ouvrage fin mars 2012.

18- Vue aérienne de l'ouvrage début avril 2012.

17- View of the structure at end March 2012.

18- Aerial view of the structure in early April 2012.

ABSTRACT

THE BRIDGE OVER SAINT-ETIENNE RIVER ON REUNION ISLAND

DODIN CAMPENON BERNARD (VINCI); ANDRÉ GRIEBEL, JEAN-PIERRE PERRIN

When Cyclone Gamède passed over Reunion Island in February 2007, one of the piers of the downstream bridge over Saint-Etienne River yielded under the pressure of the stream, causing the entire deck to collapse.

The Regional Council of Reunion therefore undertook the construction of a new crossing over Saint-Etienne River, whose strengthened foundations will be anchored at a depth of 35 m below the river level. The contract for the new downstream bridge was awarded to a consortium of which Dodin Campenon Bernard (Vinci Construction) is the leader, for delivery scheduled in the spring of 2013. □

EL PUENTE SOBRE EL RÍO SAINT-ETIENNE EN LA REUNIÓN

DODIN CAMPENON BERNARD (VINCI); ANDRÉ GRIEBEL, JEAN-PIERRE PERRIN

En febrero de 2007, durante el paso del ciclón Gamede por la isla de la Reunión, uno de los pilares del puente aguas abajo del río Saint-Etienne cedió bajo la presión del oleaje, lo que provocó el hundimiento del conjunto del tablero. El Consejo Regional de La Reunión ha comenzado la construcción de un nuevo paso del río Saint-Etienne, cuyos cimientos reforzados estarán anclados a 35 metros de profundidad bajo el nivel del río. El contrato del nuevo puente aguas abajo se ha confiado a una agrupación de empresas, cuyo mandatario es Dodin Campenon Bernard (Vinci Construction), y la entrega está prevista para la primavera de 2013. □

LE DOUBLEMENT DU VIADUC SUR LA LOIRE DE L'AUTOROUTE A87, AU SUD D'ANGERS

AUTEURS : FRANÇOIS BARATOU, ASF, DIRECTEUR D'OPÉRATION - NASTARAN VIVAN, ARTELIA, DIRECTRICE DU DÉPARTEMENT INFRASTRUCTURE - MICHEL MOUSSARD, ARCADIS, DIRECTEUR MÉTIER GÉNIE CIVIL ET OUVRAGES D'ART - DOMINIQUE AUBRON, ARCADIS, CHARGÉ D'ACTIVITÉ DET

L'AMÉNAGEMENT DES EX-RN 260 ET ROCADE EST AU SUD D'ANGERS EN AUTOROUTE, ET LEUR INTÉGRATION À L'A87, ONT ÉTÉ CONFIÉS PAR L'ÉTAT À VINCI AUTOROUTES, DANS LE CADRE DE SA CONCESSION. CET AMÉNAGEMENT A CONDUIT, EN PARTICULIER, AU DOUBLEMENT DU VIADUC SUR LA LOIRE EN AMONT DES PONTS DE CÉ. CETTE OPÉRATION A ÉTÉ MENÉE DANS UN CONTEXTE PARTICULIÈREMENT EXIGEANT, D'UNE PART À CAUSE DU MAINTIEN DE LA CIRCULATION EN COURS DE TRAVAUX, D'AUTRE PART DU FAIT DE CONTRAINTES ENVIRONNEMENTALES FORTES.



1- L'ouvrage dans sa nouvelle configuration.

1- The structure in its new configuration.

© DR

La réponse à ce programme a été la réalisation d'un ouvrage de doublement en béton précontraint, de conception semblable à celle de l'ouvrage existant, complétée par la réhabilitation et l'aménagement de l'ouvrage existant, l'ensemble permettant de passer de deux fois deux voies, sans BAU, à deux fois trois voies, avec BAU.

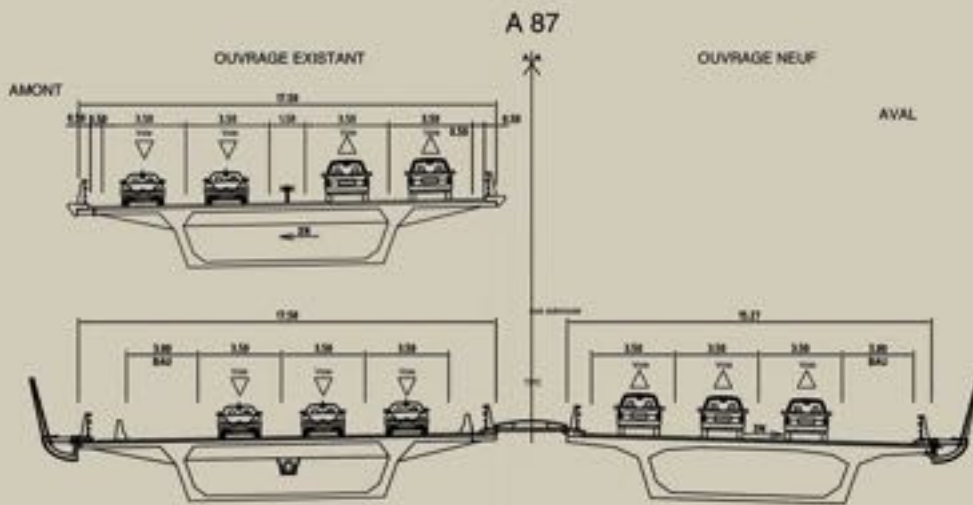
De nombreuses mesures pour la protection et la qualité de l'environnement ont été prises, pendant les travaux et dans la configuration définitive. Sous l'impulsion du maître d'ouvrage, la sécurité du personnel affecté aux travaux, de même que celle des exploitants et usagers de l'autoroute, ont fait l'objet d'une attention et d'une vigilance de haut niveau.

PRÉSENTATION DU PROJET

En 2007 et 2008, l'État a confié successivement à ASF (Autoroutes du Sud de la France) l'exploitation puis l'aménagement des ex-RN 260 et rocade Est avec pour objectif une mise à niveau autoroutière. En devenant une partie de l'A87, ce tronçon s'est alors intégré dans le réseau de Vinci Autoroutes, en continuité de l'A87 Angers/La-Rochesur-Yon et de l'A11 Angers/Le Mans.

Cette section restera libre de péage entre les échangeurs de Gatignolle (n°14) et de Mûrs-Erigné (n°23). Un programme d'aménagements a été mis en œuvre, les améliorations apportées visant à renforcer le niveau de sécurité et les services pour les clients tout en atténuant l'impact de l'autoroute sur son environnement. Les travaux engagés sont financés par ASF pour un montant de 120 millions d'euros.

COUPES EN TRAVERS AVANT ET APRÈS AMÉNAGEMENT



2

Pour réduire l'impact environnemental de l'A87 dans ce secteur, ASF investit dans de nombreuses mesures pour protéger la ressource en eau, réduire l'impact sonore pour les riverains et préserver le site remarquable du Val de Loire classé au patrimoine mondial de l'Unesco et comportant notamment une zone de captage d'eau potable et deux zones Natura 2000.

Ces aménagements ont, entre autres, amené à engager l'élargissement à 2 x 3 voies de 5 km d'autoroute entre les échangeurs de La Monnaie/Angers-Est (n°20) et de Haute-Perche/Brissac-Quincé (n°22). Ce chantier d'envergure comprend la construction d'un second viaduc sur la Loire. Ce nouvel ouvrage complète le viaduc existant et permettra au terme du chantier de franchir La Loire en 2 x 3 voies.

La Direction d'Opérations d'Angers d'ASF a confié la maîtrise d'œuvre de ce viaduc à un groupement Arcadis/Coteba (Artelia depuis 2/1/12) et une mission d'accompagnement architectural aux cabinets SCP Beguin & Macchini et AEI ; la construction a quant à elle été confiée à la société ETPO. Il est à noter que le viaduc a été un des premiers en France à être calculé aux Eurocodes. S'agissant de travaux d'élargissement d'une infrastructure existante, l'opération s'est déroulée sous circulation autoroutière, ce qui a généré de nombreux phasages.

Les travaux de construction du viaduc ont débuté en mai 2009 après une période de préparation début 2009 et se sont achevés en juin 2011. La réalisation de l'ouvrage est assez

2- Coupes en travers avant et après aménagement.

2- Cross sections before and after development.

classique, bien que les délais soient très optimisés.

Par contre les contraintes environnementales sévères ont amené le maître d'œuvre et l'entreprise à décliner et réaliser de nombreuses mesures particulières qu'ASF a souhaité voir appliquer sur cette opération ; on notera que :

→ Un plan de respect de l'environnement (PRE) a été établi dès le démarrage de l'opération et a fait l'objet de plusieurs évolutions.

→ Une estacade provisoire a été réalisée pour franchir la Loire et son affluent ; celle-ci a été rendue étanche pour éviter tout rejet direct dans le milieu naturel, et constitue un ouvrage à part entière.

→ Les équipages mobiles ont bénéficié d'aménagements pour réduire au minimum les chutes de déchets de construction dans la Loire (notamment lors des bétonnages).

→ Des mesures exceptionnelles pour la protection des espèces naturelles ont été prises : déplacement et sauvegarde des Moules d'eau douce, suivi

et mesures de surveillance des populations de Sternes Pierregarin...

Par ailleurs on peut noter que la conception de l'ouvrage intègre une centaine de nichoirs à chiroptères et que les rives des cours d'eau ont bénéficié d'une réhabilitation en génie écologique.

Les travaux se poursuivent jusqu'à l'automne 2012 (réhabilitation de l'ancien viaduc, mise à 2 x 3 voies au nord et au sud du viaduc, mise en place de protections acoustiques, ...) date à laquelle le tronçon à 2 x 3 voies sera complètement mis en service.

CONCEPTION DE L'OUVRAGE

Le programme du maître d'ouvrage est de passer d'une plate-forme autoroutière à deux fois deux voies de 3,5 m, sans bandes d'arrêt d'urgence, à une plate-forme autoroutière à deux fois trois voies de 3,5 m avec bandes d'arrêt d'urgence de 3 m.

Ceci conduit d'une part à la construction d'un ouvrage de doublement, et d'autre part à l'aménagement de l'ouvrage existant pour l'adapter à la nouvelle configuration des voies (figure 2) ; cet aménagement s'accompagne de travaux de réhabilitation afin d'assurer à cet ouvrage une pérennité aussi proche que possible de celle de l'ouvrage neuf.

CONTRAINTES ET ENJEUX

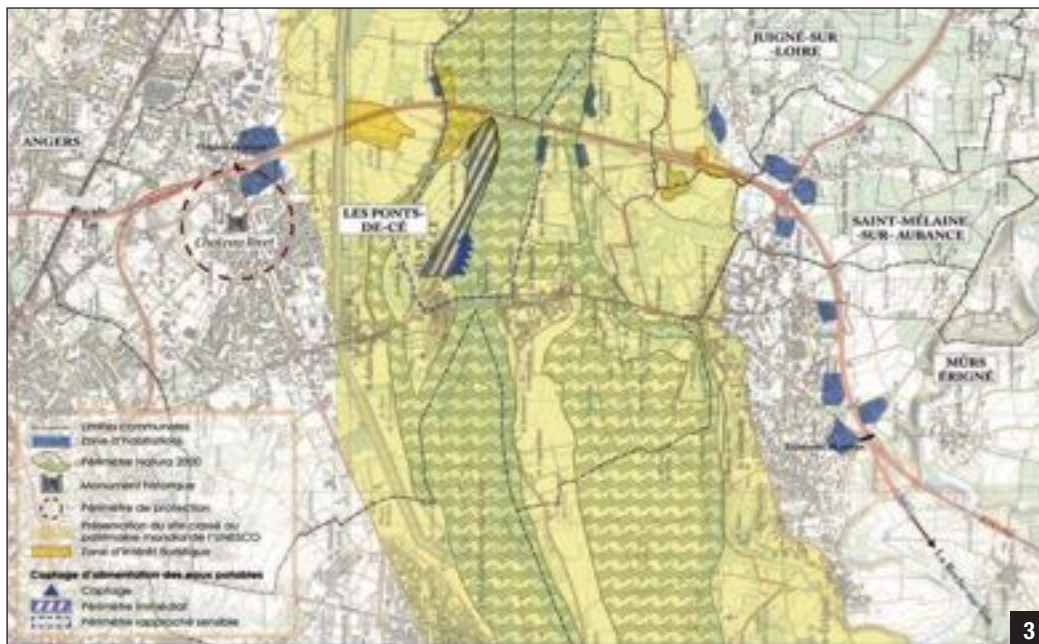
Les contraintes et enjeux de cette opération s'articulent principalement autour de deux thèmes, d'une part le doublement d'un ouvrage existant, d'autre part l'insertion dans un environnement très sensible (voir figures 2 et 3).

L'ouvrage se situe dans l'environnement du Val de Loire Classé au patrimoine Mondial de l'Unesco. L'architecture des ouvrages et notamment l'aménagement des rives des tabliers ont fait objet d'un avis des ABF et de la commission des sites. La quasi-totalité du secteur est classée en Zone Naturelle d'Intérêt Écologique, Floristique et Faunistique et en Zone d'Intérêt Communautaire pour les Oiseaux. La Vallée de la Loire entre Montsoreau et Ponts de Cé et entre Ponts de Cé et Nantes est également un site Natura 2000.

La présence en aval de l'ouvrage de la station de pompage permettant l'alimentation en eau potable de l'agglomération Angevine (270 000 habitants) et une partie du département de Maine et Loire a également créé une contrainte forte nécessitant une protection accrue de la ressource en eau au droit des travaux (figures 3 et 4).

RÉALISATION DES VOUSOIRS SUR PILE (VSP)

- Réalisation de la prédalle de fond de VSP et fixation des appareils d'appuis à pot.
- Mise en place des cales de stabilité de fléau sur boîtes à sables en tête de pile.
- Pose de la prédalle (les appareils d'appuis à pots n'étant pas en contact avec les bossages inférieurs à ce stade).
- Mise en place des plateformes de VSP et des coffrages.
- Coffrage et ferrailage de la première phase (hourdis inférieur et amorce des âmes).
- Étalement de la seconde phase.
- Armatures, coffrage, pose des gaines de précontrainte de fléau, pose des ancrages de précontrainte extérieure ou des tubes déviateurs et bétonnage de la phase 2 (âmes et hourdis supérieur).
- Décoffrage et mise en tension du câble de fléau n°1.
- Mise en tension des câbles de clouage (4 câbles en U par VSP) avant montage d'une paire d'équipages mobiles.



3
© DR

Le fait qu'il s'agisse du doublement d'un ouvrage existant impose des contraintes fortes à tous les stades du projet :

→ En phase de conception, où il faut s'assurer de la cohérence et de l'harmonie entre l'ouvrage existant et l'ouvrage à construire, et de l'impact que ces deux ouvrages auront l'un sur l'autre.

→ En phase de construction au cours de laquelle le maintien de l'exploitation est un enjeu majeur pour le maître d'ouvrage, exploitant de l'autoroute.

→ En phase d'exploitation, au cours de laquelle il faudra s'efforcer par une maintenance appropriée d'assurer aux deux ouvrages des durées de vie comparables, malgré le décalage d'une quarantaine d'années entre leurs dates de construction.

L'impact de l'ouvrage sur le site doit être minimisé :

→ En phase de conception, par la prise en compte de l'impact visuel et de l'impact sonore, de l'impact des appuis sur le régime hydraulique du fleuve, des risques de pollution liés au rejet des eaux pluviales et au déversement accidentel sur la chaussée de produits toxiques.

→ En phase de construction, par la maîtrise à chaque étape des risques de pollution de la Loire, de la protection des espèces protégées (Sternes, Bivalves, Chiroptères, Insectes, etc.), de la protection vis-à-vis des habitations.

L'OUVRAGE EXISTANT

Le franchissement de la Loire par l'Autoroute A87 en amont des Ponts de Cé

est un ouvrage en béton précontraint construit en 1974/1975 par l'entreprise Campenon Bernard, en voussoirs préfabriqués posés en encorbellement au moyen d'une poutre de lancement. Il comprend 10 travées de 50,97 m – 8 x 85,10 m – 54,51 m, soit une longueur de 786,28 m (photo 5).

Le tablier est un caisson de 17,50 m de large, portant deux voies de 3,50 m dans chaque direction, sans bandes d'arrêt d'urgence. La grande largeur du hourdis supérieur a conduit à prévoir des nervures transversales à l'entraxe de 1,77 m.

Les piles sont des voiles en béton de forme trapézoïdale, évasées vers le haut. À l'exception de la pile n°6, fondée sur le substratum par l'intermédiaire d'un massif en béton, les appuis sont fondés sur des barrettes. Sous les piles, douze barrettes d'une section de 0,6 x 1,6 m constituent un cylindre « dodécagonal ». Ces barrettes sont fondées dans le substratum schisteux situé sous des alluvions d'une épaisseur de 10 à 15 m.

L'OUVRAGE NEUF

Le projet d'ouvrage d'art, qui résulte de l'EPOA et de l'APOA, a été établi sur la base des options suivantes :

→ Un tracé en plan parallèle à celui de l'ouvrage existant, situé en aval, à une distance permettant un espace de l'ordre de 2,5 m entre les deux tabliers, jugé suffisant pour la construction, et un profil en long identique à celui de l'ouvrage existant (parabole saillante d'un rayon de 70 000 m dont le point haut se situe à 330 m de la culée rive droite

3- Synthèse générale des enjeux.

4- Espèces protégées.

3- General summary of the challenges.

4- Protected species.



4

(RD) et qui se raccorde à deux pentes de 0,26 % en RD et de 0,30 % en RG), → Un dévers sur l'ouvrage neuf de 2,5 % pour faciliter l'écoulement des eaux, compte tenu des faibles pentes longitudinales.

En phase de conception, la prise en compte de l'impact environnemental du projet a été mise au centre des préoccupations. L'insertion paysagère et acoustique du viaduc a conduit à la mise en place d'écrans acoustiques en verre, dont la conception a été validée par l'Architecte des Bâtiments de France. Les lignes d'appuis ont été situées dans le prolongement de celles de l'ouvrage existant, afin de minimiser l'impact hydraulique de l'ensemble.

Un assainissement avec rejet éloigné des zones sensibles a été mis en œuvre, ainsi qu'un capot étanche entre les deux ouvrages, évitant ainsi les rejets accidentels dans la Loire.

Des nichoirs à chiroptères, mêlant plusieurs matériaux (ciment composite de verre, polystyrène, PVC, plexiglass...) ont été mis en place.

Il a été décidé, avant tout pour optimiser le résultat de la consultation des entreprises, d'étudier une solution en béton précontraint et une solution mixte acier-béton, dans la mesure où la solution mixte présentait un intérêt économique lors des études de conception.

Solution en béton précontraint

Cette solution se caractérise par une grande similarité vis-à-vis de l'ouvrage existant, à quelques différences près :

→ Une largeur de 15,20 m hors corniches, pour 17,5 m de l'ouvrage existant, ce qui a conduit à ne pas nervurer le hourdis ;

→ Un travail architectural sur les piles, consistant à placer sur les grandes faces des rainures verticales s'élargissant vers le haut, amincissant les piles en leur donnant l'aspect d'un V (photo 6) ;

→ Des fondations sur pieux et non pas sur barrettes : chaque pile est fondée sur quatre pieux de 2 m de diamètre ancrés d'au moins 2 m dans le substratum.

Pour la construction du tablier, deux solutions ont été envisagées : voussoirs préfabriqués posés en encorbellement au moyen d'une poutre de lancement ou voussoirs coulés en place en encorbellement au moyen d'équipages mobiles. La solution de préfabrication a l'avantage de minimiser l'impact sur le site et les risques de pollution, mais la consultation des entreprises a montré qu'elle n'était pas compétitive pour « seulement » 800 m de longueur.



© DR 5

6

Solution mixte acier-béton

Cette solution est un bi-poutre mixte à inertie variable, à pièces de pont espacées de 3,54 m, soit le double de l'espacement des nervures du pont existant.

La hauteur du tablier à la clef est la même que celle de l'ouvrage existant, soit 2,50 m, et la hauteur sur pile est de 3,70 m, inférieure à celle de l'ouvrage existant, de 4,80 m. Cette réduction de hauteur est rendue nécessaire par le lancement de la charpente (limitation de la pente de l'intrados à 6 %) et par le transport des éléments.

L'entraxe des poutres longitudinales, de 7,60 m, nettement supérieur à l'entraxe des appuis sur pile de la solution béton, de 4,60 m, a nécessité un aménagement des têtes de piles qui a consisté à coiffer d'un chevêtre métallique les fûts de piles en béton de l'ouvrage existant. Compte tenu de la complexité de cette solution d'un point de vue réalisation et maintenance future de l'ouvrage, une solution de chevêtre béton a également été étudiée.

Chaque pile est fondée sur quatre pieux de 1,60 m de diamètre (pour 2,00 m pour la solution béton).

Au fur et à mesure de l'avancement des études, plusieurs paramètres ont contribué à annuler l'économie de la solution mixte par rapport à la solution béton.

Il s'est agi d'une part de l'application des Eurocodes et plus précisément la dissymétrie transversale des chargements qui s'est avérée très pénalisante pour un tablier en bipoutre mixte, et d'autre part du prix de l'acier qui ne cessait d'augmenter suite à la forte demande des pays émergents.

Conception des culées

Les culées sont de conception classique ; toutefois elles ont fait l'objet

5- Ouvrage construit en 1974-1975.

6- Piles de l'ouvrage neuf et de l'ouvrage existant.

5- Structure built in 1974-1975.

6- Piers of the new structure and the existing structure.

d'une étude architecturale spécifique, qui a conduit à prévoir un habillage de schiste, à l'instar des constructions traditionnelles de la région angevine.

Les rives extérieures d'ouvrages sont équipées de corniches caniveau, afin d'éviter tout rejet dans la Loire et de traiter les eaux recueillies avant de les renvoyer dans des bassins situés à plus de 3 km, hors site Natura 2000 ; ces corniches supportent elles-mêmes des écrans phoniques en verre, dont la hauteur varie entre 2,50 m dans les zones nécessitant une protection phoniques et 1,00 m dans les autres zones pour assurer la continuité visuelle.

L'ensemble corniche et écrans a fait l'objet d'un traitement architectural

soigné (photo 7). Les rives intérieures sont reliées par un capot en tôle laquée qui assure d'une part la sécurité vis-à-vis du risque de chute d'usagers ou de personnel dans la Loire en cas de situation accidentelle, et d'autre part l'étanchéité vis-à-vis des risques de déversements accidentels notamment d'hydrocarbures.

TRAVAUX SUR L'OUVRAGE EXISTANT

Ces travaux comprennent une part de réhabilitation et une part d'aménagements fonctionnels.

La réhabilitation comprend le ragréage et la protection des parements extérieurs contre la carbonatation, le remplacement des BN4 et la réfection complète de l'étanchéité.

Les aménagements fonctionnels comprennent la mise en place d'une GBA en bordure de la BAU, et l'installation en rive extérieure d'une corniche caniveau et d'écrans anti-bruit.

CONSULTATION DES ENTREPRISES

À ce stade, compte tenu de l'écart peu significatif entre les deux solutions, le DCE pour l'ouvrage neuf a été établi sur la base de la solution béton.

Les travaux de réhabilitation et d'aménagement de l'ouvrage existant ont fait l'objet d'un appel d'offres spécifique postérieur à celui de l'ouvrage neuf.

Après consultation des entreprises, les travaux de l'ouvrage neuf ont été confiés à l'entreprise ETPO, pour un montant de 27,9 Millions € HT en base août 2008. Pour la réhabilitation et l'aménagement de l'ouvrage existant, les travaux ont été confiés à l'issue d'un appel d'offres à l'entreprise Freyssinet pour un montant de 4,8 millions € HT en base novembre 2010.

RÉALISATION DES FLÉAUX

Compte tenu des moyens mis en œuvre, l'objectif de l'entreprise a été de tenir pour les équipages mobiles un cycle de 3 jours décomposé comme suit :

- **Jour 0 : Bétonnage d'une paire de voussoirs.**
- **Jour 1 : Décintrage et avancement des coffrages extérieurs et fond de moule (résistance requise : 18 Mpa), Enfilage et mise en tension de la paire de câbles de fléau, mise en tension des 2 côtés simultanément (résistance requise 24 Mpa), Nettoyage et réglage des coffrages, Pose des armatures de l'intrados et des âmes.**
- **Jour 2 : Avancement de la table (sous face du hourdis supérieur) et des coffrages intérieurs, Pose des armatures du hourdis supérieur, des masques et des gaines de précontraintes de fléau.**
- **Jour 3 : Bétonnage.**

L'utilisation de la maturométrie permettant de connaître en temps réel la résistance du béton a permis d'optimiser au mieux les différentes phases du cycle des équipages mobiles et de respecter ces objectifs. La réalisation de l'ensemble des fléaux y compris les clavages a duré 11 mois (1^{er} voussoir courant bétonné le 14/01/2010, dernier clavage bétonné le 15/12/2010).



PHASE TRAVAUX

À l'issue de l'appel d'offres, le marché de travaux a été attribué à l'entreprise ETPO en janvier 2009. L'ouvrage a été livré fin mai 2011 au maître d'ouvrage, pour une mise en service en mode 2 x 2 voies sans BAU courant août 2011. Cette phase provisoire permet de fermer l'ouvrage ancien et de procéder à sa réhabilitation.

Le délai du marché de 27 mois se décompose en 3 mois de préparation de travaux et en 24 mois de travaux.

TRAVAUX PRÉPARATOIRES

Les travaux préparatoires ont débuté en Avril 2009 par la réalisation des 2 estacades provisoires, une première de 100 m sur le Louet (bras de Loire) et une seconde de 480 m franchissant le bras principal de la Loire. Ces dispositions permettent d'assurer en permanence la desserte du chantier (photo 8). Les estacades d'une largeur 7,60 m permettent ainsi de faire transiter les divers engins de chantier (grue mobiles, toupies de béton, camions d'armatures...) et de ménager latéralement une zone de circulation piétonne de 85 cm protégée par des garde-corps. Elles sont constituées par des travées isostatiques de 10 m, fondées sur des pieux battus Ø 800 de 15 m, d'entre axe 6,00 m, surmontés d'un chevêtre (HEB 500). Pour répondre aux contraintes environnementales, n'autorisant aucun rejet en Loire, les estacades ont fait l'objet d'un traitement particulier avec :

- Pente transversale unique de 2,5 % ;
- Mise en place en rive d'un caniveau latéral permettant de recueillir les eaux de pluies, raccordé à des déshuileurs situés sur les berges, l'évacuation de ces derniers étant faite dans des bassins de décantation avant rejet dans le milieu naturel ;
- Traitement des joints transversaux entre travées afin de garantir leur étanchéité.

Au droit de chaque pile des épis ont été réalisés afin de placer les grues à tour nécessaires à la réalisation des appuis et des fléaux.

LES FONDATIONS/APPUIS

Les Piles

Les fondations de l'ouvrage sont constituées de pieux de 1 800 mm diamètre forés dans des tubes laissés en place (4 pieux par pile, sauf sur la pile P6 comportant les appuis fixes qui est fondée sur 6 pieux Ø 1 800), ancrés dans les schistes sains. La longueur de ces pieux est variable d'un appui à l'autre de 6,5 m pour les plus courts (pile P6) à 15 m pour les plus longs (pile P10). Ils sont surmontés d'une semelle de 10 m x 10 m x 3 m.

Phasage de réalisation des appuis de l'ouvrage :

- Implantation et battage des palplanches (PU22 à PU28 suivant les profondeurs de terrassement à réaliser) ;
- Butonnage des batardeaux et terrassements ;

7- Corniche caniveau et écran acoustique – parement en schiste des culées.

8- Estacade étanche.

7- Parapet drainage channel and noise barrier – schist facing of abutments.

8- Waterproof jetty.

la présence en Loire d'espèces protégées (moules d'eau douce/Union Crassus) il a été procédé au droit des futurs batardeaux, au raclage du fond de la Loire par des plongeurs spécialisés. Des pêches de sauvegarde dans les batardeaux avaient été prévues mais elles n'ont pas été nécessaires.

Les Culées

Les culées sont fondées sur 4 pieux de Ø 1 600 mm d'environ 20 m de longueur afin de s'ancrer comme pour les piles dans les schistes sains.

LE TABLIER

La coupe transversale du tablier est de géométrie classique, avec une largeur de 15,27 m permettant de recevoir 3 voies de 3,5 m et une BAU de 3,00 m avec une pente transversale unique de 2,5 %.

Les eaux sont recueillies dans des corniches caniveau.

Le tablier en béton précontraint a été coulé en place par encorbellements successifs à partir des piles avec des équipages mobiles (photo 9). Les toiles tirées sous les équipages mobiles ont permis de récupérer de grandes quantités de matériaux.

Compte tenu de la longueur de l'ouvrage (789 m) et de sa travure il a été nécessaire de réaliser :

- 9 voussoirs sur pile ;
- 162 voussoirs courants de 3,85 m ;
- 8 voussoirs de clavage de 3,85 m ;
- 2 voussoirs sur culée et 2 travées sur cintre.

Afin de garantir le respect des délais d'exécution, l'entreprise a mis en œuvre sur le chantier 2 jeux de coffrage de voussoirs sur pile et 2 paires d'équipages mobiles, l'objectif étant de respecter des cycles d'équipage de 3 jours.

Précontrainte extérieure

Les déviateurs de précontrainte extérieure ont été réalisés en seconde phase, avec un coffrage traditionnel, avec mise en œuvre des tubes déviateurs.

- Réalisation des pieux ;
- Bétonnage des bouchons béton (2 m d'épaisseur) connectés aux pieux ;
- Pompage des batardeaux ;
- Réalisation des semelles puis des futs de pile.

Il est à noter que pour respecter les contraintes environnementales liées à

PRINCIPALES QUANTITÉS

PIEUX DIAM. 1 800 MM : 584 ml

PIEUX DIAM. 1 600 MM : 216 ml

ARMATURES BA : 2 600 Tonnes

PRÉCONTRAINTÉ INTÉRIEURE : 250 Tonnes

PRÉCONTRAINTÉ EXTÉRIEURE : 210 Tonnes

BÉTON C30/37 PIEUX : 1 550 m³

BÉTON C35/45 (SEMELLES/PILES/CULÉES) : 3 700 m³

BÉTON C40/50 (TABLIER) : 10 130 m³

COFFRAGES DES APPUIS : 2 580 m²

COFFRAGES DU TABLIER : 35 000 m²

ÉTANCHÉITÉ : 11 100 m²

BARRIÈRES BN4 : 1 585 ml

CORNICHES CANIVEAUX MÉTALLIQUES : 790 ml

ÉCRANS VERRE DE HT 2.50 M : 476 ml

ÉCRANS VERRE DE HT 1.00 M : 315 ml

ENROBÉS : 2 500 Tonnes



© DR 9

La mise en tension de cette précontrainte a été réalisée en deux phases principales, liées à l'avancement du clavage des fléaux.

L'injection des câbles à la cire pétrolière a fait l'objet d'un suivi par camera thermographique.

Équipement

Les équipements de l'ouvrage comprennent :

- 2 lignes de BN4 ;
- Des joints de chaussée de 500 mm de soufflé ;
- Un complexe d'étanchéité feuille + asphalte d'une épaisseur globale de 30 mm (8+22) ;
- Un caniveau latéral en asphalte assurant une connexion aux avaloirs, d'espacement variable de 5 à 20 m, en fonction de la pente longitudinale ;

9- Équipage mobile.

9- Mobile rig.

→ Une couche de BBSG 0/10 de 7 cm d'épaisseur mise en œuvre dans le cadre du marché de travaux de réalisation du viaduc, qui sera complétée par une seconde couche de 25 mm de BBTM 0/6 à la fin de l'opération de mise aux normes de l'A87.

Ces équipements sont complétés par des aménagements spécifiques :

- 100 nichoirs à chiroptères placés derrière la corniche caniveau le long de la longrine BN4 ;

→ Des écrans acoustiques en verre de hauteur 2,5 m sur plus de la moitié de l'ouvrage (480 ml), fixés sur les corniches caniveau.

CONCLUSION

Le doublement d'un ouvrage d'art exceptionnel sur une voirie péri-urbaine majeure, sous exploitation et dans un environnement sensible, est un défi pour les concepteurs et les constructeurs, qui a pu ici être relevé grâce à l'engagement au professionnalisme

de tous les acteurs, à chacune des étapes du projet. Le nouvel ouvrage a permis de répondre à l'ensemble des exigences du programme et s'inscrit harmonieusement dans son environnement (photo 1)

L'ouvrage a été inauguré le 15 juin 2011 et mis en service en septembre 2011 dans la configuration provisoire permettant de réaliser les travaux sur l'ouvrage existant (basculement de l'ensemble de la circulation sur le nouvel ouvrage). □

PRINCIPAUX INTERVENANTS

MAÎTRE D'OUVRAGE : ASF

MAITRE D'ŒUVRE : ARCADIS/COTEBA (ARTELIA depuis 2/1/12)

ARCHITECTE : AEI (Pierre Loyer) et SCP Beguin/Macchini

ENTREPRISE TITULAIRE : ETPO

PRINCIPAUX SOUS-TRAITANTS ET FOURNISSEURS :

- Secoa (Études d'exécution)
- Leduc (Estacades)
- Botte Fondations (Pieux)
- Welbon (Armatures)
- Spie Batignolles (Précontrainte)
- Pont Equipement (Corniche caniveaux / écrans)
- Lahaye TP (Terrassement et chaussée)
- Bergeret (Étanchéité)
- Rousseau (BN4)
- PCB (Joints de chaussée)
- VM/Anjou Béton (Fourniture béton)
- Ersem (Coffrage des VSP et Équipements mobiles)

ABSTRACT

DOUBLING THE VIADUCT OVER THE LOIRE ON THE A87 MOTORWAY, SOUTH OF ANGERS

FRANÇOIS BARATOU, ASF - NASTARAN VIVAN, ARTELIA - MICHEL MOUSSARD, ARCADIS - DOMINIQUE AUBRON, ARCADIS

The contract for motorway development of the former RN 260 highway and the eastern ring road south of Angers and their integration into the A87 was awarded by the government to Vinci Autoroutes, as part of its concession arrangement. This development involved, in particular, doubling the viaduct over the Loire upstream of Ponts-de-Cé. This project was carried out in an extremely demanding context, partly because traffic was maintained during the works, and partly due to major environmental constraints.

The solution adopted was the construction of a doubling structure in prestressed concrete, of a similar design to the existing structure, together with the renovation and improvement of the existing structure, to widen it from a two-lane dual-carriageway, without a hard shoulder, to a three-lane dual-carriageway, with hard shoulder. Numerous measures were taken to ensure the protection and quality of the environment, during the works and in the final configuration. The client insisted on close attention and high vigilance regarding the safety of personnel assigned to the works and of motorway operators and users. □

DUPLICACIÓN DEL VIADUCTO SOBRE EL LOIRA DE LA AUTOPISTA A87 AL SUR DE ANGERS

FRANÇOIS BARATOU, ASF - NASTARAN VIVAN, ARTELIA - MICHEL MOUSSARD, ARCADIS - DOMINIQUE AUBRON, ARCADIS

En el marco de su concesión, el Estado ha confiado a Vinci Autoroutes el acondicionamiento de la antigua Carretera Nacional RN260 y de la carretera de circunvalación Este al sur de Angers en autopista y su integración en la A87. Este acondicionamiento condujo, en particular, la duplicación del Viaducto sobre el río Loira aguas arriba de Les Ponts-de-Cé. Esta operación se ha realizado en un contexto especialmente exigente debido, por una parte, a que la circulación se mantuvo durante el desarrollo de las obras y, por otra, a importantes requisitos medioambientales.

La respuesta a este programa ha sido la construcción de una estructura de duplicación de hormigón pretensado, con un diseño similar al de la estructura existente, completada por la rehabilitación y el acondicionamiento de la estructura existente, dado que el conjunto permite pasar de dos x dos carriles, sin carril de parada de emergencia, a dos x tres carriles, con carril de parada de emergencia. Se tomaron numerosas medidas para la protección y la calidad del medio ambiente, tanto durante las obras como en la configuración definitiva. A iniciativa del promotor, se prestó una atención y una vigilancia de alto nivel a la seguridad del personal destinado a las obras y de los operadores y usuarios de la autopista. □

UN OUVRAGE SYMBOLIQUE FRANCHISSANT L'AUTOROUTE URBAINE À MUMBAI - INDE

AUTEURS : POUR SYSTRA FRANCE : THIERRY DUCLOS, MOHAMED KETFI, HAYTHEM AMAMI, CEDRIC AUBAZAC

LE FUTUR PROJET DE MÉTRO RAPIDE À MUMBAI LIGNE 1 EN INDE EST RÉALISÉ DANS LE CADRE D'UN PPP PAR LE CONSORTIUM MUMBAI METRO ONE PRIVATE LIMITED (MMOPL). SYSTRA EST COTRAITANT DE PARSONS BRINCKERHOFF AU SEIN DU GROUPEMENT D'INGÉNIERIES EPMC AGISSANT EN MAÎTRE D'ŒUVRE DU PPP. LA LIGNE AÉRIENNE DE 12 KM DE LONG UTILISE LE CONCEPT DÉVELOPPÉ PAR SYSTRA DE VIADUCS EN U. IL A ÉTÉ DÉCIDÉ DE RÉALISER UN OUVRAGE MARQUANT ET ESTHÉTIQUE S'INTÉGRANT AU PRINCIPE DE VIADUCS EN U DE LA LIGNE 1.



1- Site de WEH côté station.
2a- Équipements mobiles au-dessus de l'autoroute expresse Ouest.
2b- Vue en plan générale du projet de métro ligne 1 de Mumbai.

1- WEH site, station side.
2a- Mobile rigs above the Western Express Highway.
2b- General plan view of the Mumbai metro line 1 project.

Cet ouvrage haubané franchit l'autoroute expresse Ouest (Western Express Highway), qui relie le Nord de Mumbai à la liaison Bandra Worli au Sud, dont il tient son nom. Il franchit aussi la route principale reliant le lieu-dit Andheri, à l'Ouest, à Ghatkopar, à l'Est. Il est implanté dans une zone très urbanisée et très peuplée. Les concepteurs ont dû prendre en compte des contraintes naturelles fortes vis-à-vis du sous-sol et du fait du voisinage de l'aéroport international de Mumbai. Enfin, la proximité de l'océan entraîne des contraintes de conception afin d'assurer la durabilité vis-à-vis des chlorures présents dans l'atmosphère. Le pont à haubans comporte 5 travées, une travée principale de 86 m, et deux travées d'accès de part et d'autre, de

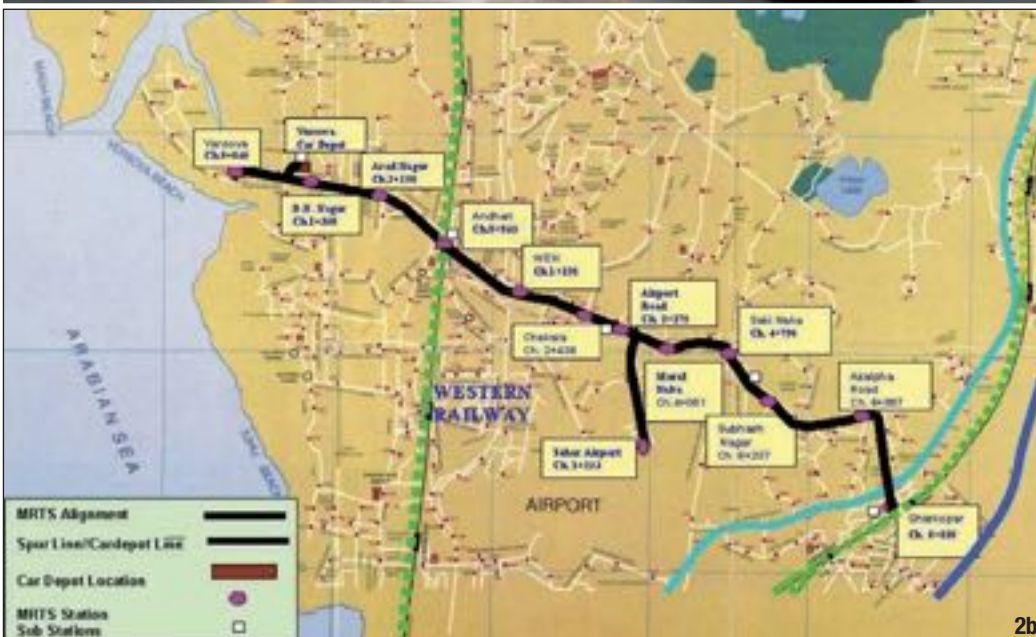
23 m chacune. Il supporte 2 voies de métro de 80 km/h de vitesse commerciale, et de charges à l'essieu de 17 tonnes. Compte tenu de la technique des longs rails soudés mise en œuvre, la conception intègre les contraintes d'interaction rail structure. Enfin l'ouvrage est soumis à des contraintes sismiques importantes. L'ouvrage est construit par encorbellements successifs, sa section transversale nécessite la conception d'un équipage mobile spécifique et la mise en place de phases de travaux particulières pour s'affranchir des piles intermédiaires anti-soulèvement placées en travées de rive. Une optimisation des quantités était rendue impérative dans le cadre du PPP de réalisation.

UNE LIGNE AÉRIENNE

La ligne de métro n°1 de Mumbai est implantée dans le Nord, entre Versova à l'Est et Ghatkopar à l'Ouest. Cette ligne principale appelée Voie VAG pour Versova-Andheri-Ghatkopar est aérienne et longue de 11,143 km. Comme les ouvrages sont situés près de la mer d'Oman, une limite stricte d'ouverture des fissures de 0,1 mm sous charges d'exploitation a été imposée en conformité avec le standard indien IRC CBC 97, dans le but d'assurer la durabilité de l'ouvrage (figure 2b). Une liaison avec l'aéroport était originellement prévue. Sa réalisation a été reportée à une date ultérieure. Le matériel roulant utilisé présente des boggies espacés de 12 m, avec essieu de 17 t. La rame du convoi comprend 5 à 6 wagons. La ligne qui traverse une zone très urbanisée et peuplée a été conçue en viaducs sur toute sa longueur, utilisant le concept du petit U, chaque tablier en U supportant une voie de métro (figure 3). Généralement le franchissement de carrefour le long de la ligne se réalise avec des travées particulières. Cependant le franchissement de l'autoroute expresse Ouest nécessite, du fait du biais, une travée minimale de 80 m imposant une conception d'ouvrage spécifique (photo 4).

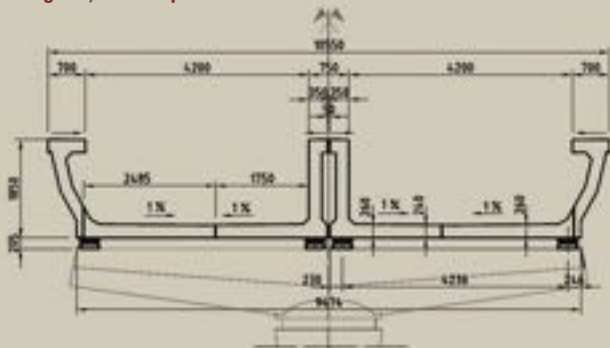
UN PONT À TABLIER MINCE HAUBANÉ

Le franchissement est positionné près de la station WEH. Les contraintes de profil en long pour limiter la hauteur de l'ouvrage, la proximité de la station située à l'Est, et le franchissement de l'autoroute impliquent de choisir un tablier mince et une méthode de construction appropriée. À ce sujet, la méthode de construction sur cintre était inadaptée vis-à-vis du trafic, tout comme la conception classique d'encorbellement qui aurait nécessité une plus forte épaisseur de tablier et n'aurait pas permis de respecter la contrainte de profil en long. L'utilisation d'une section transversale en U, ayant une faible épaisseur de dalle, est un bon compromis. De plus, elle s'intègre visuellement avec les travées courantes en U. Cependant l'élanement du tablier est alors trop important ($86 \text{ m} / 2 \text{ m} = 43$) pour supporter une voie ferroviaire et utiliser la méthode de construction par encorbellements successifs sans palées intermédiaires, alors que l'usage de celles-ci n'est pas possible du fait du franchissement de l'autoroute.



TABLIER DE TYPE PETIT U

de la ligne 1, une voie par U



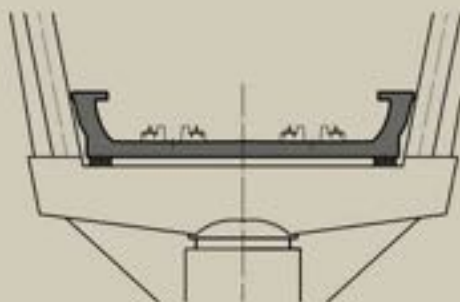
3



4

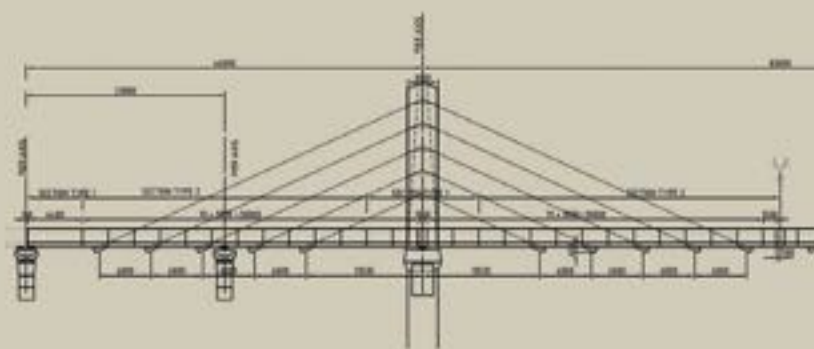
LARGE U SUPPORTANT 2 VOIES

5



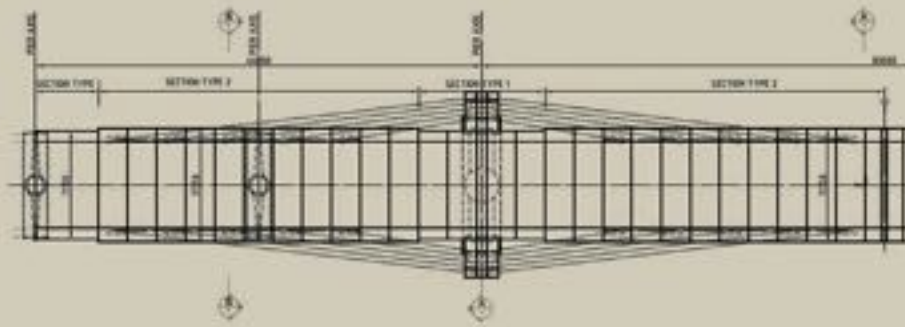
1/2 ÉLÉVATION ET DISTRIBUTION DES TRAVÉES

6



1/2 VUE EN PLAN AVEC LA DISPOSITION DES HAUBANS

7



3- Tablier de type petit U de la ligne 1, une voie par U.

4- Artère congestionnée sous l'autoroute.

5- Large U supportant 2 voies.

6- 1/2 élévation et distribution des travées.

7- 1/2 vue en plan avec la disposition des haubans.

Dans le but de conserver la méthode de construction avec un tablier mince, un tablier haubané a été retenu.

Ce type d'ouvrage crée un signal sur le parcours de la ligne. Les haubans travaillent en construction comme des supports provisoires et fournissent pendant les phases d'exploitation la rigidité nécessaire. La section transversale finale est un large U supportant les 2 voies de métro. Les 2 poutres maîtresses latérales sont très épaissies (figure 5).

La vue en élévation de l'ouvrage (figures 6 et 7) donne la distribution

générale des travées : 23 m – 23 m – 86 m – 23 m – 23 m en profitant de sa symétrie longitudinale.

Deux pylônes en béton armé encadrent l'autoroute. Ils comprennent deux mâts inclinés vers l'extérieur de 12,5°, d'une hauteur de 18,361 m. Leur épaisseur varie de 1,5 m en pied à 0,88 m en tête et leur largeur de 3,9 m en pied à 3,5 m en tête. Les nappes de haubans sont donc placées latéralement.

Les nappes suivent une disposition en harpe. L'angle d'inclinaison des câbles varie de 24,1° à 24,2°. Les haubans traversent ces mâts à l'intérieur de

selles qui offrent une rigidité au frottement suffisante pour éviter tout glissement [1]; le système VSL SSI 2000 est utilisé avec des unités de 27T15S par câble et une contrainte maximum en exploitation de 0,45 f_{pk}.

Le tablier passe entre les mâts de chaque pylône, et il est supporté par une entretoise transversale sur laquelle il repose par l'intermédiaire d'appareils d'appuis à pots.

Les travées de rive de 23 m chacune s'appuient sur des piles intermédiaires qui sont munies de systèmes anti-soulèvements.

3- Small-U type deck of line 1, one track per U.

4- Congested artery under the motorway.

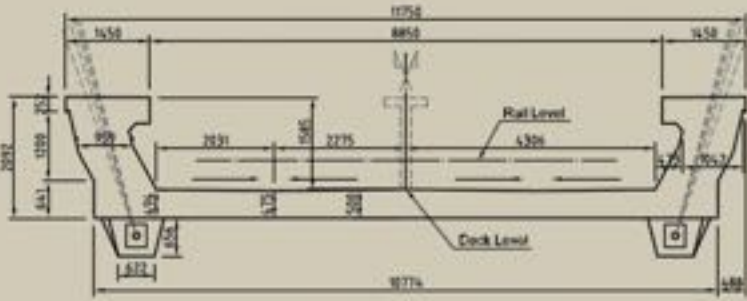
5- Large U supporting 2 tracks.

6- Half elevation view and layout of spans.

7- Half plan view with layout of the stay cables.

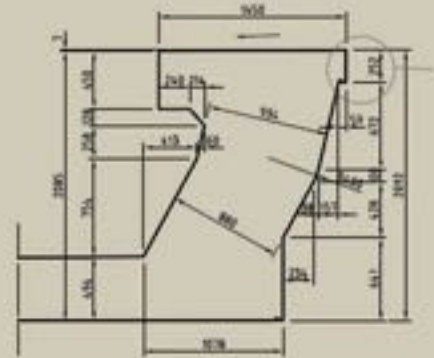
SECTION TRANSVERSALE DU GRAND U

8



DÉTAIL DE L'ÂME

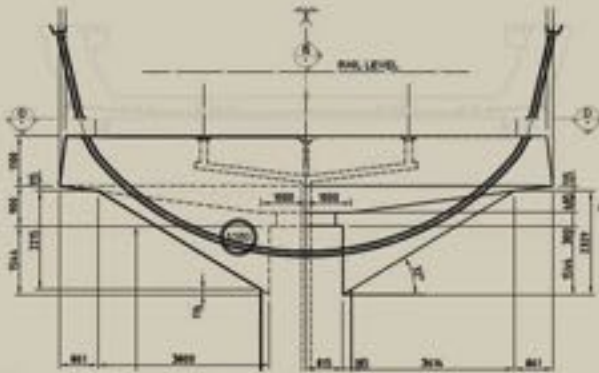
9



SYSTÈME ANTI-SOULÈVEMENT

sur pile latérale

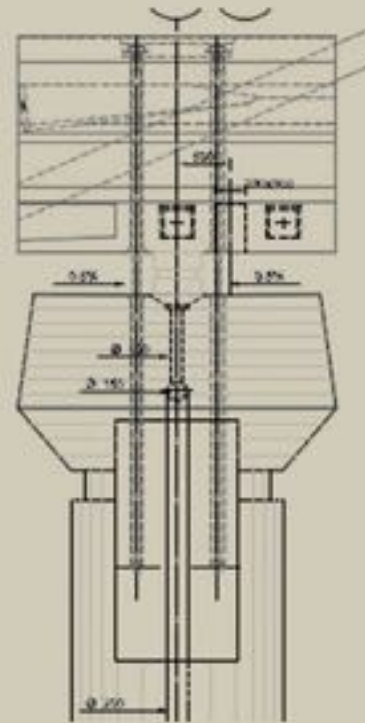
10



COUPE LONGITUDINALE

sur pile latérale

11



8- Section transversale du grand U.

9- Détail de l'âme.

10- Système anti-soulèvement sur pile latérale.

11- Coupe longitudinale sur pile latérale.

8- Large U cross section.

9- Details of the web.

10- Hold-down system on side pier.

11- Longitudinal section on side pier.

Les haubans sont ancrés sous les âmes. Pour la mise en tension, l'accessibilité se fait évidemment par la voie routière mais implique la mise en place d'étaisements avec des conséquences sur le trafic dans cette zone très congestionnée.

La conception a donc cherché à minimiser les phases de retenue des haubans en phase de construction et à les limiter pendant l'exploitation à des échéances de 1, 3, 5 et 10 ans pour compenser l'effet des déformations différées.

Pendant la construction la mise en tension est réalisée depuis l'équipage mobile dont la configuration permet cette mise en tension en s'appuyant sur la partie déjà construite.

La hauteur des âmes est de 2,09 m et leur épaisseur varie de 0,615 m au droit du pylône à 0,88 m en partie courante pour redescendre à 0,47 m sur culées, de façon à se rapprocher de la largeur effective de la section courante qui comprend 2 petits viaducs en U.

Au droit du pylône, l'âme décroît afin de limiter l'angle sur la verticale des haubans et leur permettre de rester pratiquement dans un plan (figure 7).

La dalle inférieure du grand U fait 50 cm d'épaisseur et sa largeur est de 10,774 m en partie courante, y compris les âmes (figures 8 et 9).

Les piles circulaires sont en général fondées sur 4 pieux de 1,5 m surmontés d'un chevêtre carré.

Le substratum de fondation est constitué de brèches volcaniques d'environ 15 m d'épaisseur.

Le système anti-soulèvement est constitué de précontrainte extérieure permettant le remplacement pendant la vie de l'ouvrage.

Cette précontrainte constituée de 2 x 7T15 bouclés est disposée transversalement dans les piles latérales (figures 10 et 11), et les appareils d'appui sont en élastomère fretté.

COMPORTEMENT DE L'OUVRAGE

Le comportement du pont de WEH est plus proche de celui d'un pont haubané que d'un pont extradosé, du fait de la hauteur et la rigidité des pylônes.

Ceci est confirmé par ce que l'on trouve dans la littérature à ce sujet [4]. Comme le frottement dans les selles est significatif, cette rigidité filtre une part des surcharges de la travée principale par l'intermédiaire des haubans. L'autre part passe par le tablier ce qui a pour effet de charger les appareils d'appui à pot placés sur le chevêtre des pylônes. Ceux-ci sont d'ailleurs significativement sollicités durant les événements sismiques, ainsi que lors de l'exploitation avec le passage des rames de métro sous charges maximum. ▽



12

Comme l'ensemble de ces sollicitations transitent par le pylône et les appareils d'appuis, le chevêtre des pylônes est particulièrement sollicité tant en cisaillement et flexion qu'en torsion.

Du fait de l'impact de la circulation, l'ouvrage étant implanté au milieu d'un boulevard urbain, la conception d'un chevêtre de type marteau supportant les mâts du pylône a été retenue. Pour supporter les charges

évoquées précédemment, le chevêtre est précontraint transversalement. Sa stabilisation a été complétée par deux voiles latéraux triangulaires, servant de raidisseurs, venant s'encaster dans les fûts des pylônes de 3,5 m de diamètre (photo 12 et figure 13).

La précontrainte du chevêtre est constituée de 8 câbles 19T15, positionnés en partie haute au milieu, tout en évitant les niches des vérins placés latérale-

12- Chevêtre du pylône pendant la construction.

13- Schéma de la précontrainte.

12- Pylon cross-beam during construction.

13- Prestressing diagram.

ment de part et d'autre des pots pour leur remplacement, ainsi que les goujons d'ancrage de ces pots.

Comme le système de long rail soudé est utilisé sur cette ligne, la longueur maximale dilatable gouverne la disposition des points fixes.

Sur cet ouvrage il a été nécessaire de les placer sur chaque chevêtre des pylônes. Cette disposition a rendu la travée principale sensible aux déformations imposées et différées par effet de portique : effets de température, de retrait et de fluage.

Du fait de la concomitance des charges du tablier et des effets induits, le ferrailage de la pile est significatif, voisin de 3 % de la section de béton. Enfin, comme Mumbai est en zone de sismicité 3 selon l'IS 1893 [2], l'effet du séisme a un impact sur les piles mais aussi sur les mâts des pylônes (figure 14).

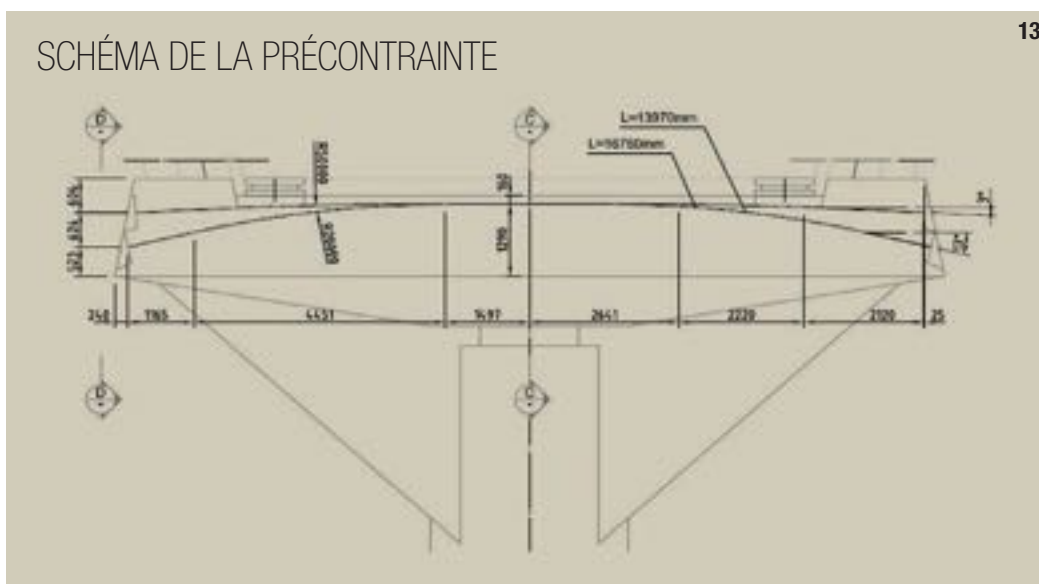
La condition de confinement vis-à-vis du séisme a pu être évaluée en complétant les règles indiennes par les règles américaines de l'AASHTO [3].

Cela concerne des dispositions de ferrailage en bas des fûts et en têtes des pieux, qui sont prolongées dans la semelle de fondations.

Pour rigidifier les travées latérales, le système anti-soulèvement évoqué plus

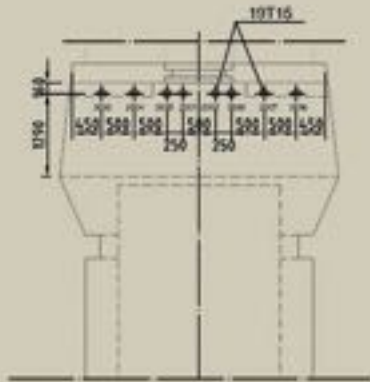
SCHÉMA DE LA PRÉCONTRAINTE

13



SECTION TRANSVERSALE DU CHEVÊTRE

14



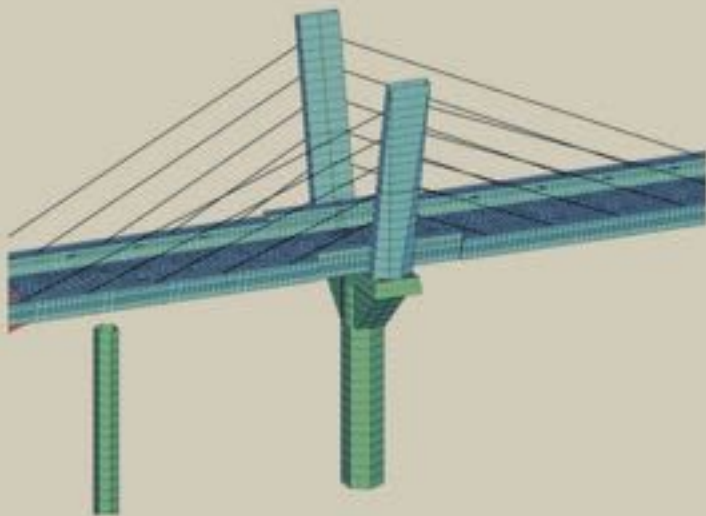
MODÈLE SOFISTIK

15a



MODÈLE SOFISTIK

15b



CHEVÊTRE DU PYLÔNE

16



haut (figure 10) a été mis en place. Il permet d'éviter tout soulèvement en phase d'exploitation ainsi que sous états limites ultimes. Cette disposition assure un comportement durable à la structure.

CALCULS DÉTAILLÉS

Du fait de la complexité de cet ouvrage (phases constructives et forme particulière du tablier) plusieurs programmes de calcul ont été utilisés. Le principal a été le programme Sofistik qui apporte des capacités d'analyses non-linéaires puissantes. Le contrôle et la justification de l'ouvrage ont été réalisés suivant les standards indiens.

Le modèle utilisé est hybride en ce sens qu'il associe des éléments filaires pour les âmes et des plaques éléments finis pour la dalle inférieure (figure 15) de façon à reconstituer la forme particulière du tablier. Le comportement statique du modèle a été vérifié par des

14- Section transversale du chevêtre.

15- Modèle Sofistik.

16- Chevêtre du pylône.

14- Cross section of the crossbeam.

15- Sofistik model.

16- Pylon crossbeam.

contre-calculs réalisés à l'aide du programme ST1 et du programme Robot. L'objectif initial d'utilisation de Sofistik était de régler la tension des haubans et de valider la précontrainte afin d'assurer le respect des contraintes et des déformations limites du tablier, et ce conformément au standard indien IRC CBC 97.

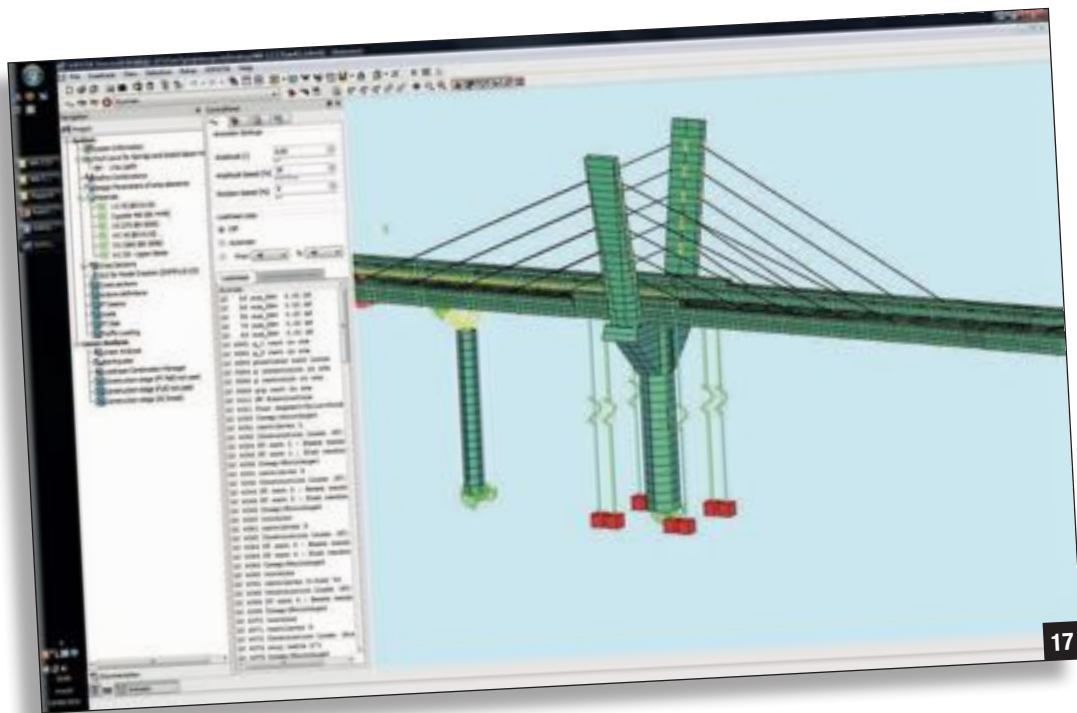
Le second objectif était de valider la stabilité des palées provisoires et leur système anti-soulèvement qui nécessite une analyse non-linéaire du fait d'une loi de contact/décollement.

La précontrainte et les câbles ont été introduits avec leur loi de comportement réel. Le béton suit la loi du code modèle CEB pour le retrait et le fluage. La durée des phases a été définie en cohérence avec le processus général de construction de l'ouvrage, incluant l'activation ou la désactivation des palées et leur système anti-soulèvement.

Le béton du pylône est un C45/55 comme pour le tablier. Pour les piles un béton C35/45 a été retenu. Cette résistance est nécessaire du fait de la précontrainte mise en place et des efforts appliqués (figure 16). Le pylône est un élément dont la géométrie a été parfaitement définie pour éviter tout comportement inadapté des haubans.

La déviation des selles et les excentricités ont été modélisées par l'intermédiaire d'éléments rigides reliés aux mâts de chaque pylône, reproduisant ainsi le non-glisement voulu des câbles sur leurs selles. Les câbles sont modélisés par des éléments câbles et reçoivent leur tension durant les différentes phases de construction (figure 17).

Pendant les premières phases de construction, des palées provisoires latérales avec leurs câbles de clouage verticaux (7T15 tendus à 136 tonnes) ont été nécessaires.



17

Leur comportement a été modélisé par des ressorts verticaux avec une rigidité de 13 770 tonnes par mètre linéaire complétée d'une loi de contact évitant l'apparition de réactions négatives. Seuls les câbles assurent alors au tablier de rester sur ses appuis. La rigidité de ces palées a été contrôlée durant les travaux.

Pour la phase d'analyse sismique, le modèle a intégré l'ensemble de la structure y compris les fondations. Ce modèle a été complété d'un autre modèle aux éléments finis afin de reconstituer la section en U et permettre de réaliser le calcul de flexion transversale.

La limite de fissuration imposée par des considérations de durabilité du fait de l'environnement a nécessité une justification particulière sous les charges d'exploitation. Pour conclure, une pré-

contrainte transversale constituée de câbles 7T15 placés tous les mètres environ a été nécessaire. Ces câbles sont mis en tension après bétonnage de chaque voussoir.

La conception particulière du chevêtre des pylônes a nécessité la réalisation d'une analyse particulière par un modèle de type bielles et tirants. Ceci a permis d'associer une analyse élastique pour l'exploitation à une analyse spécifique à l'état limite ultime afin d'ajuster la quantité d'acier passifs et la précontrainte à mettre en place.

Le système anti soulèvement sur les piles latérales a été étudié en intégrant les effets de fatigue en vue d'en vérifier la durabilité. Les Recommandations Françaises pour les Haubans ont été utilisées [5]. La fatigue est amenée par les déformations locales induites par les rotations des supports sous les charges

17- Palées du modèle Sofistik.

18- Coupe semelle sous pylône P166.

19- Vue en plan semelle sous pylône.

17- Bents of the Sofistik model.

18- Cross section of footing under pylon P166.

19- Plan view of footing under pylon.

d'exploitation et les déplacements horizontaux concomitants induits par ces mêmes charges. Le critère à vérifier était $\Delta\sigma \leq 80$ MPa sous 2 millions de cycles.

TRAVAUX

Les travaux sont réalisés par l'entreprise SEW, constructeur indien expérimenté, en cotraitance avec VSL. Ces travaux ont commencé en 2009 par la réalisation des fondations.

Pour limiter l'impact des travaux sur le trafic dans cette zone particulièrement congestionnée la semelle initialement carrée d'un des pylônes a été redimensionnée en un élément rectangulaire de 5 m d'épaisseur au lieu de 3,5 m, d'une longueur de 20 m au lieu de 11 m et d'une largeur de 6,5 m au lieu de 11 m (figures 18 et 19). Le modèle de bielles et tirants a été utilisé pour les justifications. Cette disposition a permis aussi de limiter l'impact sur les réseaux enterrés.

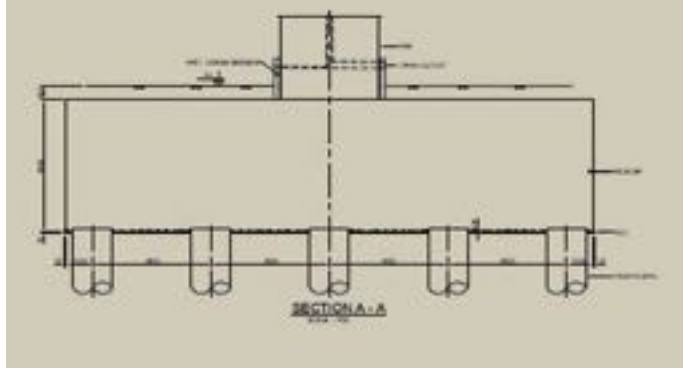
Du fait de la quantité conséquente de béton des semelles, il a été décidé pendant les travaux de mettre en place un système de refroidissement par circuit d'eau pour limiter la température à 65°C maximum. Cependant les relevés de température réalisés n'ont pas indiqué un tel dépassement et dans la suite des travaux ce dispositif a été enlevé. Aucun défaut ou fissuration anormale n'a été relevé après.

Les chevêtres des pylônes avec les deux mâts qui s'y encastrent sont particulièrement difficiles à réaliser du fait des quantités de béton à mettre en œuvre et de l'extrême densité du ferrailage et de la précontrainte.

De plus, la mise en place des appareils d'appui à pots qui concentrent des efforts importants contraint le constructeur à être très vigilant dans les phases constructives de ces éléments que ce

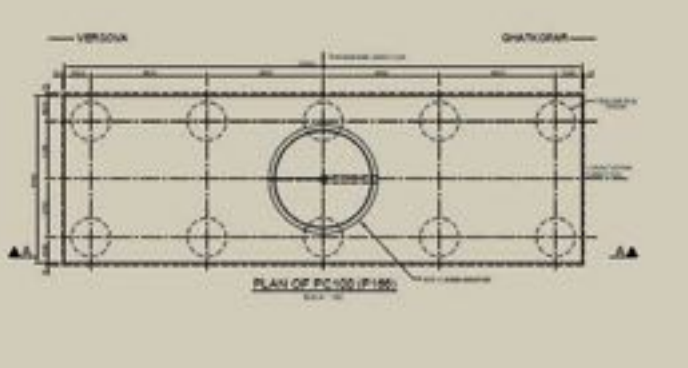
COUPE SEMELLE SOUS PYLÔNE P166

18



VUE EN PLAN SEMELLE SOUS PYLÔNE

19





20



21

20- Échafaudage du chevêtre.

21- Palée et équipage mobile.

22- Paire d'équipages mobiles en cours de construction.

20- Crossbeam scaffolding.

21- Bent and mobile rig.

22- Pair of mobile rigs during construction.



22

soit au bétonnage ou dans les phases de mise en tension.

Un important étaieement a été mis en place pour procéder à toutes ces phases de travaux (photo 20).

Après la réalisation du chevêtre des pylônes, puis le bétonnage des mâts dans lesquels s'incorporent les selles de déviation, les travaux du tablier ont débuté avec l'installation d'un étaieement provisoire complété des systèmes de palées anti-soulèvement (photo 21). Sur cette photo, l'équipage mobile est en cours de montage, pendant que l'on voit le hauban vertical de stabilité qui

permet d'assurer la sécurité en phase de construction.

Sur le mât, les selles de déviation du système VSL ont été calées à l'aide d'un gabarit provisoire assurant une position parfaite.

L'équipage mobile a ses poutres maîtresses situées au droit des âmes du tablier ce qui l'apparente à un équipage par-dessous ; il a été conçu spécifiquement pour ce chantier par VSL. Cet équipage offre une grande liberté d'accès pour la construction (photo 22). Pour la mise en tension des haubans, après bétonnage du voussoir, l'équi-

page où s'ancre le hauban ripe vers l'arrière pour libérer la zone de mise en tension. Comme on fonctionne en partie sur une section en précontrainte partielle, cette action permet de réduire le moment de flexion et donc la fissuration durant la construction. Sinon le phasage de mise en tension reste très classique (photos 23 à 25).

Avec la méthode de construction par encorbellements successifs utilisée, l'équipage mobile croise la pile anti-soulèvement. Celle-ci doit être réalisée suivant des séquences bien précises de façon à laisser passer l'équipage

mobile. Ceci nécessite la mise en place d'étaieements assez larges.

Quand le tablier franchit l'autoroute, la zone de franchissement est entourée de portiques de sécurité placés sur l'autoroute permettant de protéger l'équipage des hors gabarits du trafic routier. Ce franchissement présente des risques significatifs. Le constructeur doit contrôler régulièrement les dispositions de stabilisation et les dispositions de sécurité sur autoroute. Cet objectif est bien géré grâce à l'action de tous les acteurs dans cette phase de construction (photos 26 et 1).



23



24



25



26

CONCLUSIONS

La conception du viaduc franchissant l'autoroute express Ouest de Mumbai a présenté un certain nombre de difficultés dues aux contraintes de site (densité de population, trafic routier) et qui ont nécessité une adaptation continue de l'implantation des appuis et des techniques de construction. Ce phénomène a été accru par le niveau technique de l'ouvrage qui est conçu comme un pont emblématique. L'entreprise a d'ailleurs proposé nombre d'adaptations dans les séquences de

construction que l'équipe de conception a dû valider, pour s'assurer que les règles de dimensionnement étaient vérifiées.

De leur côté, les responsables de méthodes ont dû vérifier que les adaptations qu'ils proposaient respectaient les critères de conception.

Pendant toutes les phases de construction, Systra comme le responsable de la supervision sur site se sont assurés du bon comportement de la structure, en faisant un suivi rigoureux des flèches en construction. □

23- Ancrage de hauban.

24- Toron dans la selle.

25- Installation de hauban.

26- Étaie du système anti-soulèvement.

23- Stay cable anchoring.

24- Tendon in saddle.

25- Installing a stay cable.

26- Propping of the hold-down system.

[Références]

- [1] VSL - SSI 2000 – STAY CABLE SYSTEM – THE VSL SADDLE – page 12.
- [2] IS-1893-(part 1) – 2002 – Criteria for Earthquake Resistant Design of Structures – Map of India Showing Seismic Zones – page 5.
- [3] AASHTO LRFD 2002 – Division 1A section 6 – Design Requirements for Bridges in Seismic Performance Category B – pages 459 to 463.
- [4] Extradressed Bridges In Japan by Atsuo Ogawa and Akio Kasuga, in FIP notes 1994 – pages 11 to 15.
- [5] SETRA – LCPC – Recommandations de la Commission Interministérielle de la Précontrainte – Juin 2002 – § 14.2 p. 182 pour la fatigue, et § 6.2.3 p. 60 pour l'évaluation des moments dus aux rotations imposées.

ABSTRACT

A SYMBOLIC STRUCTURE CROSSING THE URBAN MOTORWAY IN MUMBAI, INDIA

SYSTRA: THIERRY DUCLOS, MOHAMED KETFI, HAYTHEM AMAMI, CEDRIC AUBAZAC

The project for line 1 of the future high-speed metro in Mumbai, India, is being carried out within the framework of a PPP by the Mumbai Metro One Private limited consortium (MMOPL). Systra is a co-contractor of Parsons Brinckerhoff in the EPMC engineering consortium acting as project manager for the PPP. The above-ground line 12 km long uses the U-shaped viaduct concept developed by Systra. It was decided to produce a striking and attractive structure fitting in with the U-shaped viaduct technique of line 1. □

UNA ESTRUCTURA SIMBÓLICA QUE CRUZA LA AUTOPISTA URBANA EN BOMBAY - INDIA

SYSTRA: THIERRY DUCLOS, MOHAMED KETFI, HAYTHEM AMAMI, CEDRIC AUBAZAC

El consorcio *Mumbai Metro One Private Limited* (MMOPL) realiza el futuro proyecto de metro rápido de Bombay línea 1, en la India, en el marco de una asociación público-privada (APP). Systra es co-contratista de Parsons Brinckerhoff en la agrupación de ingenierías EPMC actuando como director de obra de la APP. La línea aérea de 12 kilómetros de longitud utiliza el concepto desarrollado por Systra de viaductos en U. Se decidió realizar una estructura destacable y estética que se integrara al principio de viaductos en U de la línea 1. □



NOTRE TALENT
DÉFIE LE TEMPS

STRRES

Le STRRES est le syndicat national des entrepreneurs spécialistes de travaux de réparation et de renforcement des structures.

Il rassemble 60 entreprises qui exercent, à titre principal ou secondaire, une activité d'entretien, de réparation et de réhabilitation des structures de Génie civil.

Le STRRES est adhérent de la FNTF.

Retrouvez sur **www.strres.org** :

Les guides



Pour mieux connaître et appliquer les règles de l'art en matière de réparation et de renforcement d'ouvrages, **consultez ou téléchargez gratuitement 12 guides techniques du STRRES.**

Les entreprises



Trouver une entreprise **par domaine d'activité, par région et/ou par identification professionnelle.**

**SYNDICAT NATIONAL DES ENTREPRENEURS SPÉCIALISTES DE TRAVAUX
DE RÉPARATION ET RENFORCEMENT DE STRUCTURES**
3 rue de Berri 75008 Paris • Tél. : 01 44 13 31 82 • Fax : 01 44 13 32 44 •
strres@strres.org • **www.strres.org**

ABS • ADS ouvrages d'art • AFGC • AGTP • ARREBA • ATS • AXIMUM • BASF CC France • BAUDIN-CHATEAUNEUF • BEC • BEKAERT France • BERTHOLD SA • BTPS • CHANTIERS MODERNES SUD • COFEX Ile-de-France • COFEX LITTORAL • COFEX REGIONS • COLAS RAIL • CTICM • CROBAM • DEMATHIEU ET BARD • ECM • EGM TNC • EIFFAGE TP/ Département GCN • EIFFEL CONSTRUCTION MÉTALLIQUE • ENTREPRISE BONNET • ETANDEX • ETPO • EUROVIA BÉTON • FAURE SILVA • FAYAT • HOLCIM • FREYSSINET France • FREYSSINET International & Cie • GAUTHIER • GTS/Département ELITE • LAFARGE • LETESSIER • MAPEI • MCCF • NOUVETRA • OUEST ACRO SA • PAGEL SAS • PAREXLENKO • PERRIER SAS • POA • RAZEL • RCA • RENOFORS • RESINA • RESIREP • SNC • RICHERT • SAINT GOBAIN WEBER France • SARL ROMOEUF • SEFI-INTRAFOR • SIKA • SIRCO TRAVAUX SPÉCIAUX • SNCTP • SOFRARES • SOLETANCHE BACHY • SOTEM • SORREBA TECHNOLOGIE • SOTRAIB EAU • SPIE BATIGNOLLES TECHNOLOGIES • STPL • TEMSOL • TSV • VIA PONTIS • VINCI CONSTRUCTION France • VSL France

STRRES



NOTRE TALENT
DÉFIE LE TEMPS

PONT HASSAN II SUR L'OUED BOUREGREG À RABAT

AUTEURS : MICHEL DUVIARD, CHEF DE PROJET, EGIS JMI PARIS - BENJAMIN LUSK, ADJOINT AU CHEF DE PROJET, EGIS JMI BANGKOK - ARNOLD LEDAN, INGÉNIEUR – CHEF DU BUREAU DE DESSIN, EGIS JMI PARIS

LE PONT HASSAN II RELIE LES CENTRES DES VILLES DE RABAT – CAPITALE ADMINISTRATIVE DU MAROC - ET DE SA VOISINE SALÉ, PAR DESSUS L'ESTUAIRE DU BOUREGREG, A ENVIRON 2 KM DE L'OCÉAN ATLANTIQUE. LE ROI MOHAMMED VI L'A INAUGURÉ LE 18 MAI 2011, EN MÊME TEMPS QUE LE TRAMWAY RABAT-SALÉ QUI EMPRUNTE L'OUVRAGE. LE PONT HASSAN II, D'UNE ARCHITECTURE SOPHISTIQUÉE, S'INSCRIT DANS UN VASTE PROGRAMME DE DÉVELOPPEMENT POUR L'AMÉNAGEMENT DE LA VALLÉE DU BOUREGREG ET FAIT PARTIE DES PREMIÈRES RÉALISATIONS MAJEURES DE CE PROJET INITIÉ PAR LE ROI.



P1

LA SITUATION

De part et d'autre de l'embouchure de l'oued Bouregreg, les villes de Rabat et de Salé se regardent.

Leurs centres sont reliés par un ouvrage urbain vieillissant limité au trafic routier (Figure F1).

Sous l'impulsion du roi, les deux villes font partie d'un vaste projet de rappro-

chement et de développement mettant en œuvre un chantier de très grande ampleur, l'aménagement de la Vallée du Bouregreg.

La première phase a été baptisée Bab el Bahr (Porte de la Mer) et comprend la création d'une ligne de tramway reliant les deux agglomérations, la réalisation de liaisons permettant les circulations

douces et la modernisation des voies routières.

Ce faisceau renouvelé et renforcé de liens urbains s'insère dans le projet global des urbanistes Bernard Reichen et Philippe Robert.

Cet ensemble est situé au pied de la falaise qui borde le plateau sur lequel se dressent les deux monuments sym-

boles de la ville de Rabat, dominant toute la vallée en rive gauche de l'oued. Il s'agit d'abord de la Tour Hassan (44 m de hauteur), minaret jamais terminé d'une mosquée dont la construction fut entreprise par le Sultan Yacoub el Mansour en 1196. À cette époque, le Roi de France était Philippe II, dit Philippe-Auguste, et la construction de la

- P1- Le Pont Hassan II.
- F1- Situation générale.
- F2- L'ensemble du projet de franchissement.
- F3- Le lot 2 (avant projet).
- F4- Le lot 3 (avant projet).
- F5- La rampe tramway (avant projet).

- P1- Hassan II Bridge.
- F1- General location.
- F2- The wadi crossing project as a whole.
- F3- Work section 2 (preliminary design).
- F4- Work section 3 (preliminary design).
- F5- The tramway ramp (preliminary design).



nouvelle cathédrale de Chartres avait commencé depuis deux ans. Ce qui devait être le plus grand édifice religieux du monde n'était pas achevé à la mort du Sultan, trois ans plus tard. Les travaux s'arrêtèrent alors. Aujourd'hui réhabilité, ce monument est devenu l'emblème et la fierté des Rabatis. C'est au voisinage immédiat de cette tour qu'a été implanté le Mausolée Mohammed V. Sous ce monument, hautement symbolique pour le peuple marocain, reposent en terre les grand-père et père de Sa Majesté Mohamed VI.

La présence de ces deux symboles a été un élément fort de la réflexion de l'Architecte Marc Mimram. Le pont devait être exceptionnel tout en respectant ces monuments tutélaires.

LE PROJET DE FRANCHISSEMENT

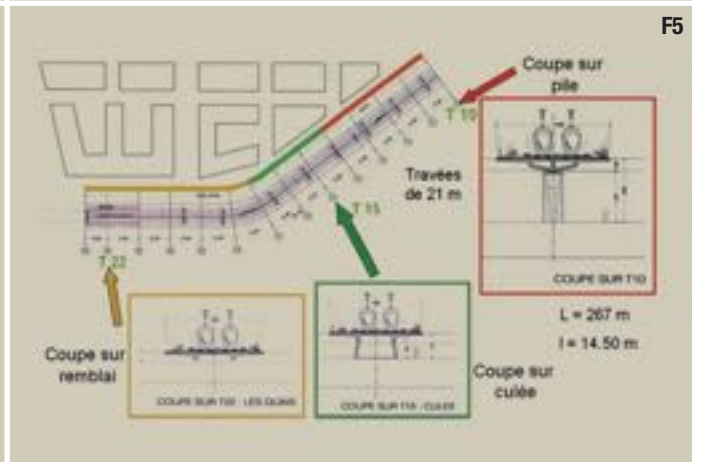
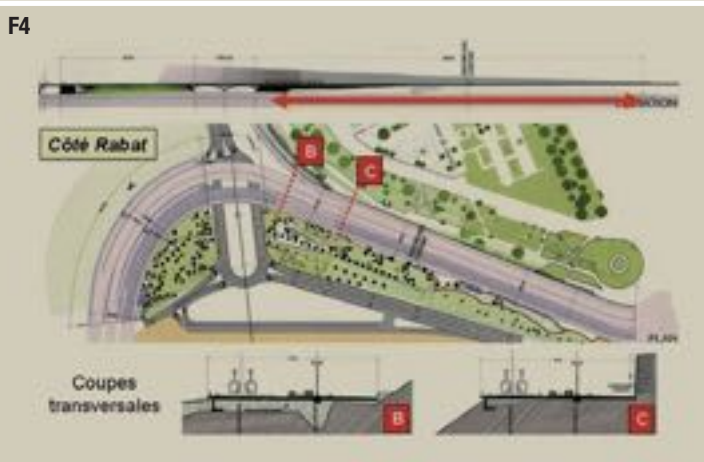
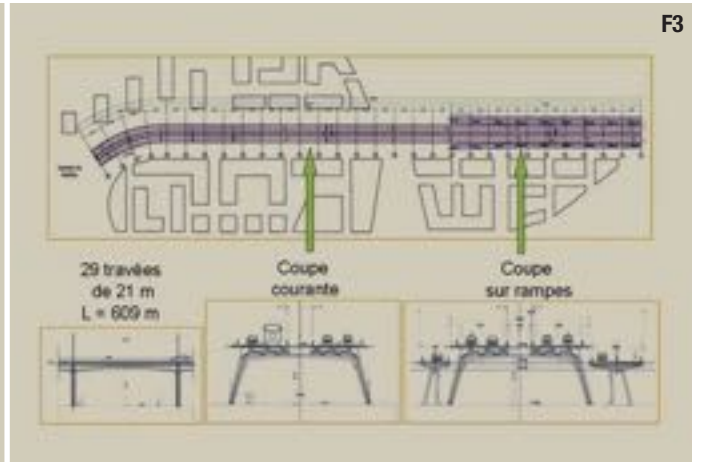
Trois lots distincts constituent l'ensemble du projet de franchissement dans lequel s'insère le pont proprement dit (Figure F2). Le lot 1 est l'objet du marché de construction signé par la société marocaine SGTM avec l'Agence d'Aménage-

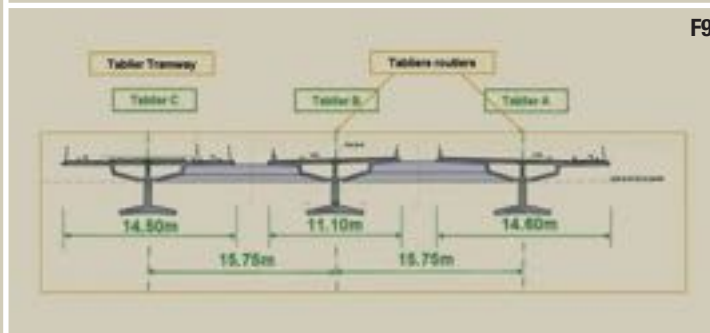
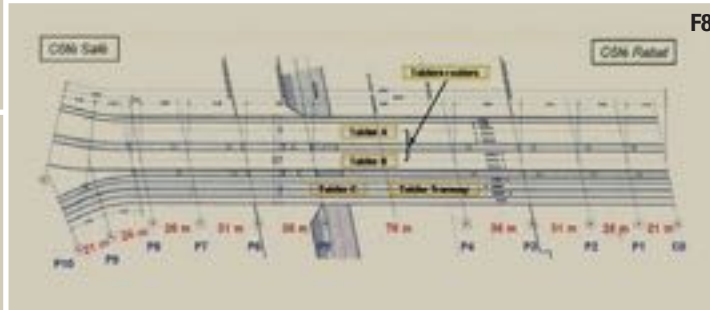
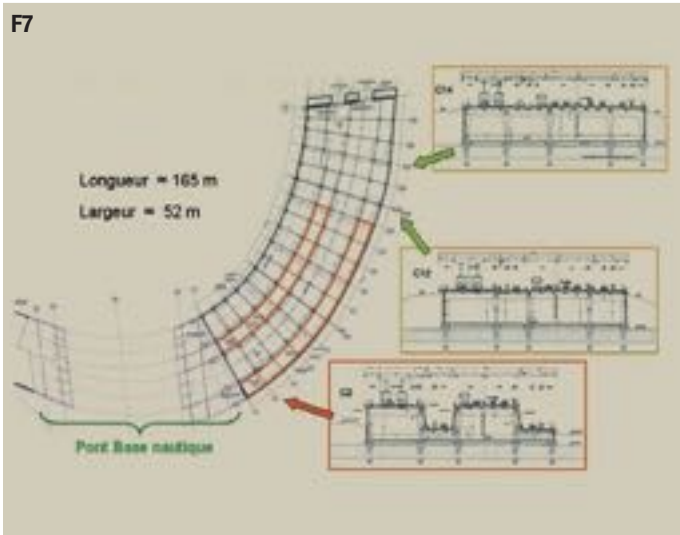
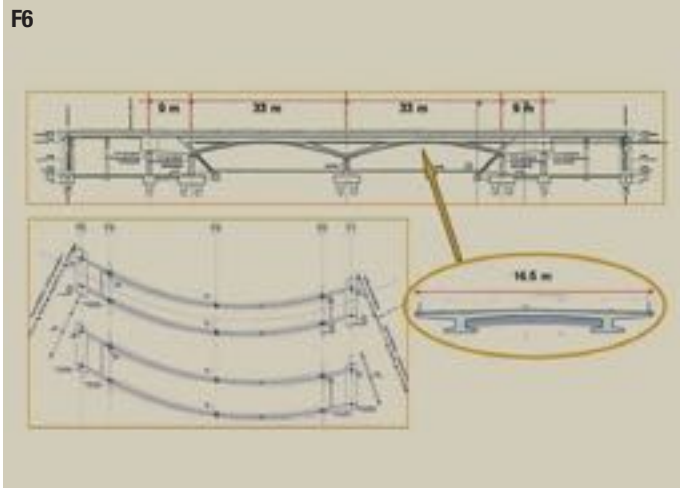
ment de la Vallée du Bouregreg. Il est encadré en rive droite, côté Salé, par le lot 2 et en rive gauche, côté Rabat, par le lot 3 qui constituent les accès aux ouvrages du lot 1.

Le lot 2 est un viaduc de 609 m de longueur constitué de 29 travées identiques de 21 m. Chaque appui des deux tabliers parallèles est constitué d'un portique transversal unique (Figure F3). La structure porteuse de chacun des deux tabliers est constituée, pour chaque travée, de trois poutres sous chaussée de forme sophistiquée, reposant à leurs extrémités sur un portique transversal.

Le lot 3 est une dalle sous chaussée qui s'étend au pied de la falaise bordant le site de la Tour Hassan (Figure F4). Cette dalle permet de raccorder le Pont Base Nautique à la chaussée existante. Le lot 1 comprend quatre parties qui constituent chacune un ouvrage spécifique :

- Le Pont Hassan II, qui franchit le Bouregreg, objet principal du présent article (photo P1) ;
- La Rampe Tramway, qui permet au tramway de monter depuis la rive côté Salé jusqu'au niveau du pont principal, d'où son nom (Figure F5) ;





→ Le Pont Base Nautique, qui permet aux voies de desserte de la rive gauche, en particulier de la future base nautique, de passer sous la liaison Rabat - Salé, d'où son nom (Figure F6 et photo P2) ;

→ La Culée Creuse est une boîte creuse et courbe qui assure la liaison entre le pont principal et le pont base nautique.

Dans sa structure sont incorporées deux rampes d'accès, une dans chaque sens.

Elles permettent l'accès depuis la rive gauche à la liaison générale Rabat - Salé, portée par les ouvrages du lot 1. Inversement elle permet aux usagers de la liaison de se rendre sur la rive gauche du Bouregreg (Figure F7).

LE PONT HASSAN II

Le pont qui franchit le fleuve a une longueur de 330 m. Il est divisé en dix travées dont les portées sont les suivantes : 21 m, 26 m, 26 m, 31 m, 36 m, 76 m, 36 m, 31 m, 26 m, 21 m (Figure F8). Il est composé de trois tabliers parallèles sur la majeure

partie de la longueur de l'ouvrage (Figure F9).

Les deux tabliers amont sont routiers et portent chacun trois voies de circulation de 3 m de largeur. Le tablier aval est dédié au tramway qui relie Salé à Rabat et porte deux voies ferrées sur une plate-forme dédiée de 7 m de largeur. En outre, des circulations douces sont prévues sur le tablier A qui propose une piste cyclable de 1,50 m de large et un trottoir de 2,30 m de large ; de même sur le tablier C qui réserve une largeur de 2,30 m aux deux roues et un trottoir de 3,20 m aux piétons.

La plate-forme ainsi obtenue a une largeur totale de 40 mètres.

Chaque tablier est composé d'un caisson à deux alvéoles en béton précontraint depuis les piles P0 jusqu'aux piles P8. Entre les piles P8 et P10 les tabliers sont en béton armé.

Chaque tablier est muni dans un plan vertical de deux types de bracons, les premiers en forme de tronçons d'arc, les « palmes », les seconds rectilignes, les « béquilles », qui confèrent à l'ouvrage sa personnalité unique (Photos P3 & P4).

F6- Le Pont Base Nautique (avant projet).

P2- Le Pont Base Nautique.

F7- La Culée Creuse (avant projet).

F8- Le pont Hassan II – Vue en plan générale.

F9- Le pont Hassan II – Coupe transversale.

F6- The Nautical Base bridge (preliminary design).

P2- The Nautical Base bridge.

F7- The hollow abutment (preliminary design).

F8- Hassan II Bridge – General plan view.

F9- Hassan II Bridge – Cross section.

À partir du tablier, palmes et béquilles convergent vers le bas pour constituer les zones d'appui de l'ouvrage sur ses piles.

La structure s'inscrit donc dans trois plans verticaux contenant chacun un tablier et bracons. Chacun des trois plans de structure pris indépendamment est donc instable par nature.

La stabilité d'ensemble est assurée par la création d'entretoises de liaison entre les tabliers (Photo P5).

Ces entretoises présentent un biais par rapport à l'axe de l'ouvrage de 78 degrés, parallèle au biais du fleuve franchi (Photo P6).

Le point de convergence d'une entretoise et d'une béquille avec l'âme centrale d'un tablier constitue un « nœud » de la structure.

Il convient ici de remarquer que, pour chaque tablier, la partie rectiligne de la structure, qui s'étend de la pile P0 à la pile P8, possède un axe de symétrie longitudinal situé dans l'axe de la grande travée.

Les piles homologues sont décalées selon le biais du lit du fleuve.



DONNÉES GÉNÉRALES
LE RÈGLEMENT DU MARCHÉ

Le règlement à appliquer pour effectuer les calculs nécessaires à la réalisation des études d'exécution est le règlement marocain. Celui-ci est identique au règlement français en vigueur avant l'application des Eurocodes.

LA MISSION D'EGIS JMI

La mission d'Egis JMI a été de réaliser la mise au point des études de conception, les études d'exécution du Pont Hassan II et du Pont Base Nautique, et d'assurer le contrôle des études d'exécution de la Rampe Tramway et de la Culée Creuse.

En ce qui concerne le Pont Base Nautique, Egis JMI s'est associé les compétences de T-ingénierie, pour des raisons de planification.

LES PRINCIPAUX OUTILS UTILISÉS

En ce qui concerne les calculs, deux logiciels principaux ont été mis en œuvre.

Le programme ST1 du Setra pour l'étude générale en construction, intégrant l'ensemble des phases de construction et leurs dates d'occurrence pour tenir compte de l'évolution des caractéristiques du béton avec le temps, et en service avec prise en

compte des chargements réglementaires incluant les charges spécifiques dues au tramway.

Le programme Esa Prima Win pour les études locales de flexion transversale des trois caissons constituant les tabliers de l'ouvrage et pour les études dynamiques sous séisme.

En ce qui concerne le dessin, une modélisation spatiale de la structure a été réalisée. Cette vision précise et détaillée en 3D, incluant tous les ancrages et câbles de précontrainte, a été, compte tenu de la complexité de la géométrie de la structure, la condition sine qua non pour une conception maîtrisée.

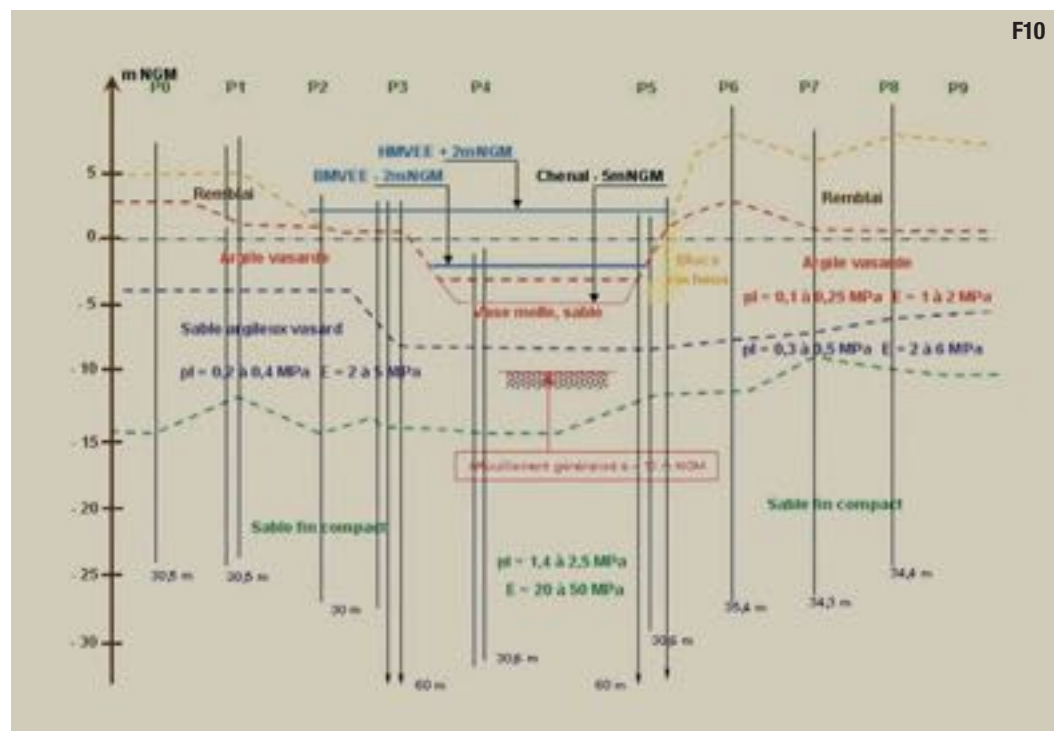
Elle a également permis de fiabiliser la production des plans d'exécution, puisque ceux-ci sont produits par exploitation directe de la maquette volumique.

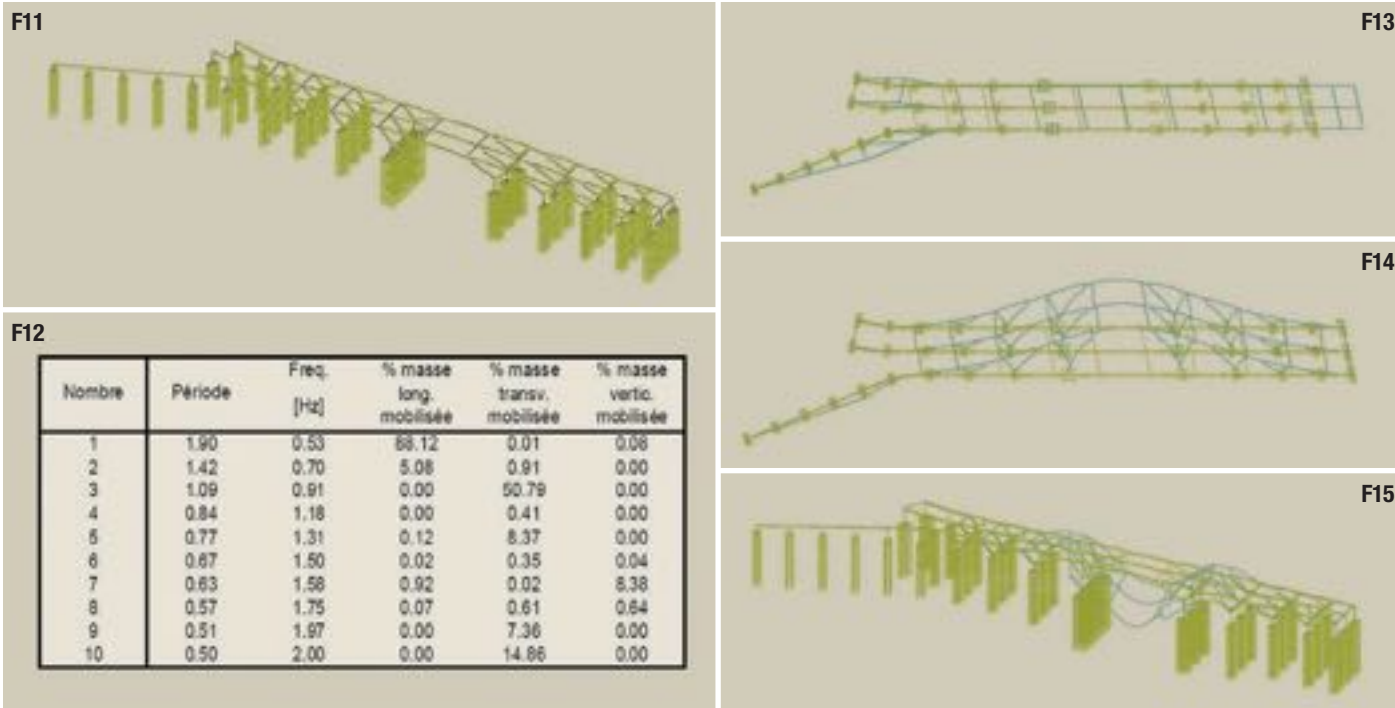
DONNÉES TECHNIQUES
LE TRACÉ EN PLAN ET LE PROFIL EN LONG

Le pont Hassan II est implanté le long d'une droite sur une longueur d'environ 290 m. À son extrémité côté Salé, sur les deux dernières travées, les tabliers routiers et le tablier tramway s'écartent sur une quarantaine de mètres selon des rayons de courbure variant de 68 à 183 m.

- P3- Bracons : webbed brackets and struts.**
- P4- Vue d'ensemble partielle en construction.**
- P5- Entretoises joignant deux tabliers au niveau des nœuds.**
- P6- Biais des entretoises.**
- F10- Profil en long géotechnique.**

- P3- Braces: webbed brackets and struts.**
- P4- Partial general view during construction.**
- P5- Cross ties joining two decks at the truss joint level.**
- P6- Cross tie slant.**
- F10- Geotechnical longitudinal profile.**





La mise en cohérence du profil en long de l'ensemble du lot 1, et celle de son raccordement aux interfaces avec les autres parties de l'opération, a constitué la première phase des études menées à bien par Egis jmi pour l'ensemble du lot 1.

Les contraintes imposées d'une part par la présence du tramway, et d'autre part par la nécessité pratique d'un nivellement commun aux trois tabliers, ont été harmonisées.

Le profil en long des trois tabliers est essentiellement constitué par un rayon de 10 276 m à concavité tournée vers le bas.

Pour les tabliers routiers ce rayon est encadré par des rayons de 1 900 m de concavité inverse. Pour le tablier tramway ces rayons sont moindres : 1 450 m et 1 000 m.

LA GÉOTECHNIQUE

Caractéristiques statiques

Les onze piles d'appui du pont reposent sur des fondations profondes. En effet, la vallée du Bouregreg, dans le site de l'ouvrage, présente la stratigraphie suivante :

→ Des remblais récents sur les deux rives constituent le terrain naturel, sur 2 à 7 m d'épaisseur ;

→ Des argiles vasardes ou des vases molles sableuses, sur 5 à 10 m, présentent un module pressiométrique variant de 1 à 2 MPa et une pression limite oscillant entre 0,1 et 0,25 MPa ;

→ Des sables argileux vasards, sur 2 à 11 m, qui diffèrent un peu d'une rive à l'autre :

- en rive gauche : $E = 2$ à 5 MPa, $pl = 0,2$ à 0,4 MPa,
- en rive droite : $E = 2$ à 6 MPa, $pl = 0,3$ à 0,5 MPa ;

→ Des sables fins compacts, dont le module pressiométrique vaut 20 à 50 MPa et dont la pression limite varie de 1,4 à 2,5 MPa.

Les essais de laboratoire pratiqués sur des échantillons de sol prélevés lors des sondages exploratoires ont permis de vérifier que les terrains rencontrés n'étaient pas liquéfiables sous l'action des séismes.

L'ensemble des fondations des appuis du pont sera constitué de pieux pénétrant dans la couche de sables fins compacts (Figure F10).

Quelques sondages profonds, descendant jusqu'à 60 mètres, n'ont pas permis de trouver de substratum.

Caractéristiques dynamiques

L'ouvrage étant soumis au séisme, les caractéristiques dynamiques des sols ont été déterminées à partir d'essais

F11- Vue isométrique du modèle de calcul.

F12- Participation de la masse par mode.

F13- Déformée du 1^{er} mode – Vue en plan.

F14- Déformée du 3^e mode – Vue en plan.

F15- Déformée du 7^e mode – Vue 3D.

P7- Semelle de pile P4.

P8- Batardeau de la pile P4.

F11- Isometric view of the design calculation model.

F12- Participation of the mass in each mode.

F13- Deformation in the first mode – Plan view.

F14- Deformation in the third mode – Plan view.

F15- Deformation in the seventh mode – 3D view.

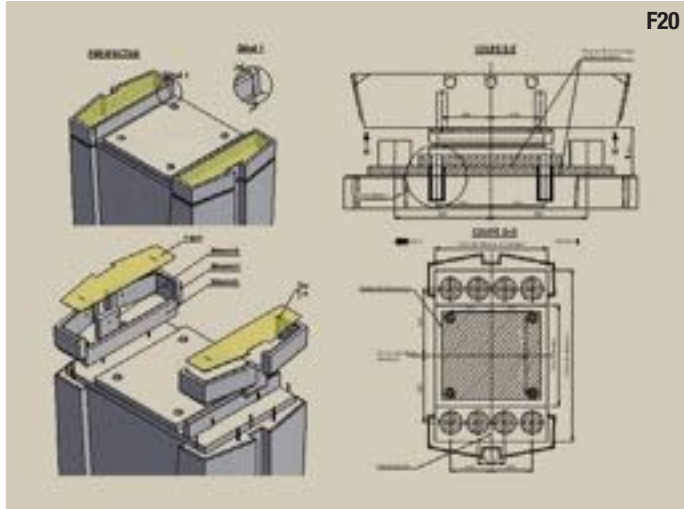
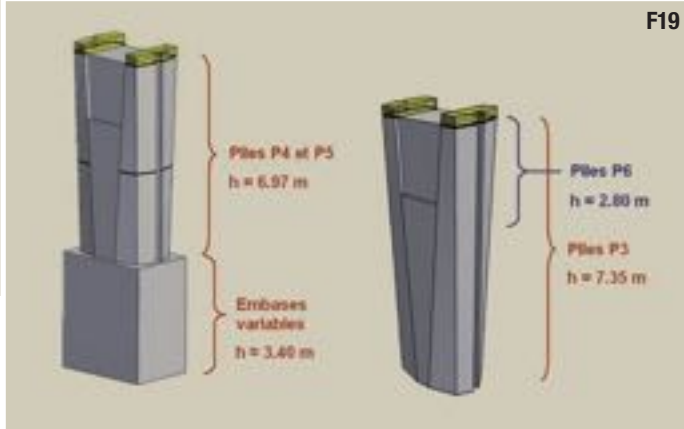
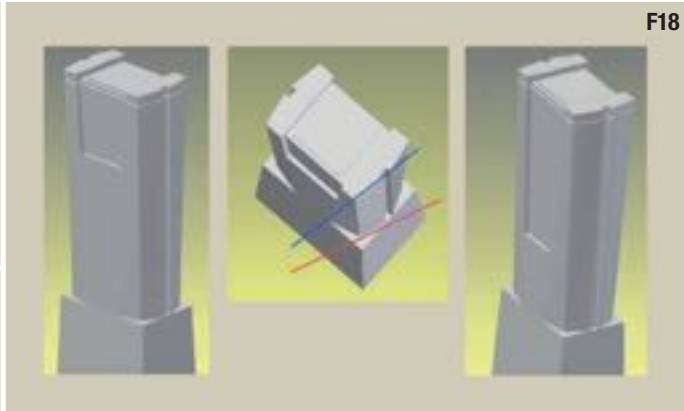
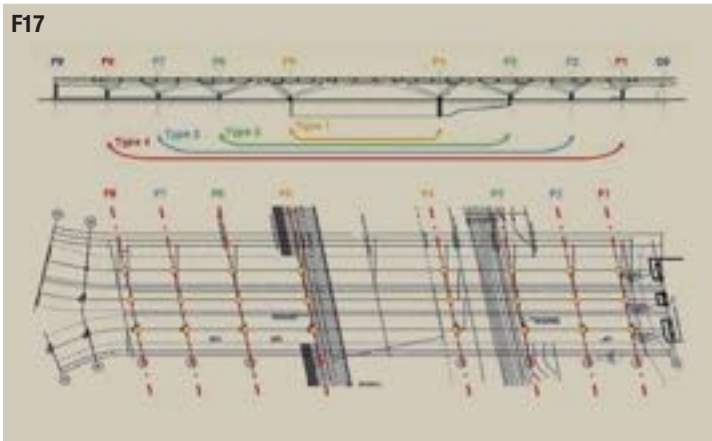
P7- Footing of pier P4.

P8- Cofferdam for pier P4.



« cross-hole » réalisés par l'Entreprise au début des travaux. L'homogénéité des terrains sous-jacents a permis de distinguer, sur toute la longueur de l'ouvrage, deux couches :

→ Une première couche de sols gra-



F16- Les fondations profondes.
F17- Coffrages des fûts de pile.
F18- Surfaces non planes du fût de P4 - Modèle 3D.
F19- Principe de standardisation des fûts de pile.
F20- Aménagement des têtes de piles.

F16- Deep foundations.
F17- Pier shaft formwork.
F18- Non-plane surfaces of the shaft of P4 - 3D model.
F19- Principle of standardisation of pier shafts.
F20- Arrangement of pier caps.

→ Une seconde couche de sols granulaires compacts correspondant à des vitesses des ondes de cisaillement supérieures à 400 m/s, c'est-à-dire appartenant au groupe a, ce qui permet de classer le site en S2, au sens du même Guide.
 À partir des valeurs des vitesses V_s m/s des ondes de cisaillement relevées tous les mètres, et du coefficient de Poisson du sol, sont déterminées les rigidités du sol k MN/m à partir des valeurs correspondantes du module de cisaillement de la couche.

$G = \rho \cdot V_s^2$ et $k = 1,2 \cdot 2 \cdot (1 + \nu) \cdot G$
 La rigidité varie ainsi de 500 à 13 000 MN/m entre 2 et 35 m de profondeur. En fait, compte tenu des ordres de grandeur des raideurs, seules les valeurs des raideurs de la première partie des sols encaissant les pieux ont une réelle influence sur le comportement de la structure du pont.

LE SÉISME
Données

Les données à prendre en compte pour l'étude des effets du séisme sur la structure ont été définies par le CID, conseil du Maître d'ouvrage :
 → Période de retour de 975 ans.
 → Ouvrage considéré comme appartenant à la classe D, c'est-à-dire dont l'intégrité est primordiale pour le maintien des communications.
 → Spectre élastique défini en accélération \times période correspondant à une accélération maximale de 0,16 g.
 Il a été spécifié par le CID, conseil du

nulaires moyennement compacts correspondant à des vitesses des ondes de cisaillement comprises entre 150 et 400 m/s, c'est-à-dire appartenant au groupe b selon le classement du guide AFPS 92.

Maître d'ouvrage, et validé par ce dernier, que le spectre élastique ci-dessus était entièrement pondéré et devait donc être utilisé sans aucun facteur multiplicatif.

Calculs

Le calcul des efforts auxquels la structure est soumise a été réalisé à l'aide du logiciel Esa Prima Win par analyse multimodale classique. Pour ce faire, à la structure du pont proprement dit a été adjointe la structure de la rampe tramway attenante, du fait des liaisons unissant les deux ouvrages au droit de leur pile culée commune (Figure F11). L'étude des modes propres de vibration de l'ouvrage a été menée à bien

en prenant en considération les 85 premiers modes.
 Pour les dix premiers modes, les facteurs modaux de participation sont donnés par le tableau figure F12.
 On constate que le premier mode mobilise longitudinalement presque 90 % de la masse, et que le troisième mode mobilise transversalement 50 % de la masse. Par ailleurs, il n'y a pas de mode vertical majeur ; la mobilisation verticale de la masse se fait sur plusieurs modes, de façon répartie.
 Les quelques schémas ci-dessus (Figures F13 à F15) permettent de visualiser les déformées des modes propres principaux.

Efforts et déplacements

À partir des efforts obtenus par l'analyse multimodale, les combinaisons classiques des règles AFPS 92 ont été utilisées :

$$E1 = \pm EX \pm 0.3 EY \pm 0.3 EZ$$

$$E2 = \pm 0.3 EX \pm EY \pm 0.3 EZ$$

$$E3 = \pm 0.3 EX \pm 0.3 EY \pm EZ$$

Les efforts longitudinaux repris par les piles P5, qui constituent le point fixe de l'ouvrage dans le sens longitudinal, sont de l'ordre de 4 500 kN. Ils correspondent à une fréquence de 0,53 Hz, donc à une accélération de l'ordre de 0,5 m/s² sur le spectre sismique.

Les efforts transversaux du mode propre de fréquence 0,91 Hz correspondent à une accélération limitée à 0,8 m/s². Les valeurs des efforts correspondants sont réduites : entre 450 et 1 200 kN par pile. Les piles cen-

trales P4 et P5 sont les plus sollicitées. En termes de déplacement longitudinal, le maximum de 4,2 cm est situé sur la pile P4. Pour les autres piles le déplacement reste compris entre 3,3 et 3,9 cm.

LES FONDATIONS

La totalité des 11 lignes d'appui portant l'ouvrage, soit 33 piles, repose sur des fondations profondes constituées de pieux forés Ø 1 200 mm. L'avant projet considérait l'ensemble des fondations fondé sur des pieux de 30 m de longueur.

Il a été demandé à Egis jmi d'accélérer la réalisation des pieux de fondation par rapport au programme des études initialement prévu. Pour permettre à l'Entreprise de répondre positivement à la demande du Maître d'ouvrage, le

F21- Fonctions des tabliers au droit des joints sur piles 10.

F22- Transition des appuis et des tabliers au droit de la pile P10.

P9- Raccordement des tabliers A et B avec le lot 2.

F21- Fonctions of the decks at the level of joints on pier P10.

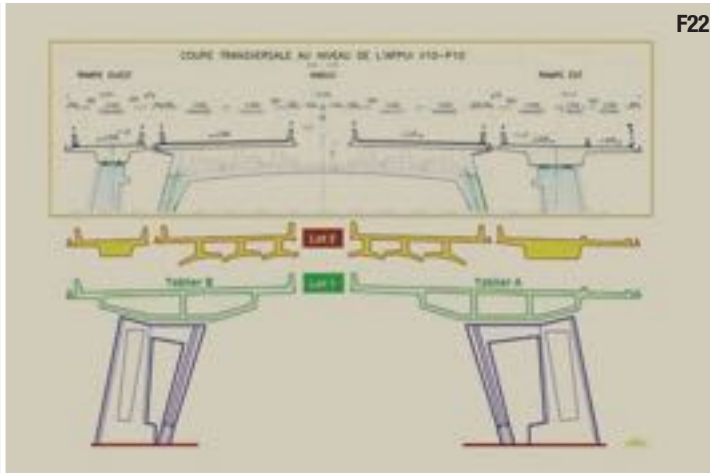
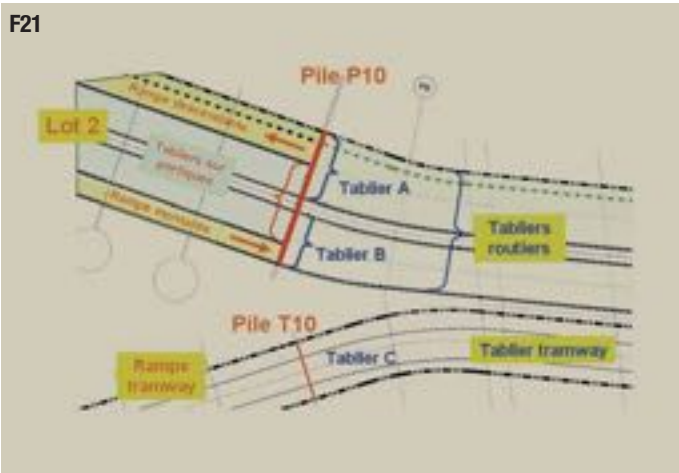
F22- Transition of supports and decks at the level of pier P10.

P9- Connection of decks A and B with work section 2.

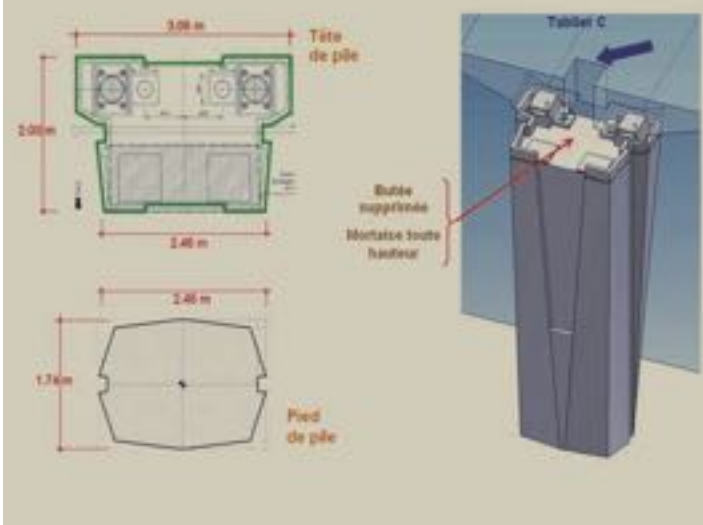
bureau d'études a dû figer les descentes de charges avant que l'ensemble des calculs correspondants ne soit terminé. Quelques précautions ont donc été prises en terme de portance des fondations.

LES FONDATIONS DES PILES P4 ET P5

Les trois piles P4 et les trois piles P5, encadrant la grande travée, reposent chacune sur 9 pieux de 38 m de long espacés de 3 m (Photo P7). Ces pieux disposés en carré sont coiffés par une semelle carrée de 8,40 m de côté et de 2,50 m d'épaisseur. Ils sont chemisés sur leurs 8 premiers mètres. Ils sont forés à travers ce tubage de 10 mm d'épaisseur, puis forés à la boue bentonitique au-delà. L'ensemble des trois fondations d'une même file de 3 piles



F23



est réalisé, pour P4 et P5, à l'abri d'un batardeau de 43 m de longueur, de 12,20 m de largeur et de 15 m de profondeur, comportant deux niveaux intermédiaires de liernes et de butons (Photo P8).

La mise en œuvre de ces batardeaux a été délicate. En effet, lors de la mise en fiche des palplanches, des blocs de pierre et des restes de structures métalliques se sont opposés à la pénétration normale des profilés provoquant des dégraiffages en pied de rideau. Des injections localisées ont dû être mises en œuvre pour supprimer les renards accidentels et permettre l'obtention d'une étanchéité suffisante pour réaliser les fondations en toute sécurité.

LES FONDATIONS DES AUTRES PILES

Les piles courantes P1 à P10, hormis P4 et P5, sont également constituées de files de trois fûts. Les 24 fondations sont constituées chacune de 6 pieux espacés de 3 m, de longueur variant de 24 m à 36 m. Ces pieux disposés en deux files de 3 unités, sont coiffés par une semelle de 8,40 m par 5,40 m et de 1,50 m d'épaisseur. Ils sont forés à travers un tubage provisoire sur les premiers mètres, puis forés à la boue bentonitique au-delà. En outre, chacune des fondations des trois piles P3 est réalisée à l'abri d'un batardeau spécifique.

La pile P0 constitue l'interface du pont Hassan II et de la culée creuse.

Comme les piles courantes, sa fondation est constituée de 3 semelles fondées chacune sur 6 pieux. Le caractère biais de l'extrémité de la culée creuse

F23- Nouvelle conception de la pile T10.

F24- Schéma statique de P1 à P8.

F25- Appareils d'appui sur pile P0.

F26- Appareils d'appui sur piles P9 et P10.

F27- Appareil d'appui P10-A-2.

F28- Pile P10 - Ferrailage.

F23- New design of pier T10.

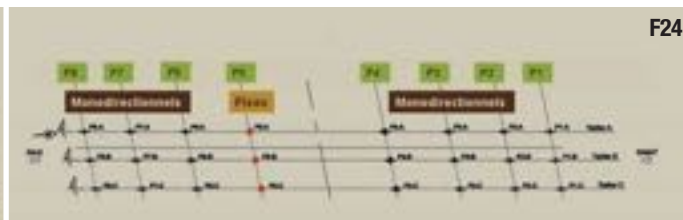
F24- Static diagram of P1 to P8.

F25- Support systems on pier P0.

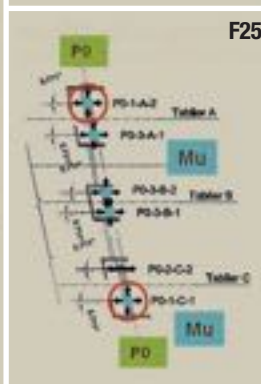
F26- Support systems on piers P9 and P10.

F27- Support system of P10-A-2.

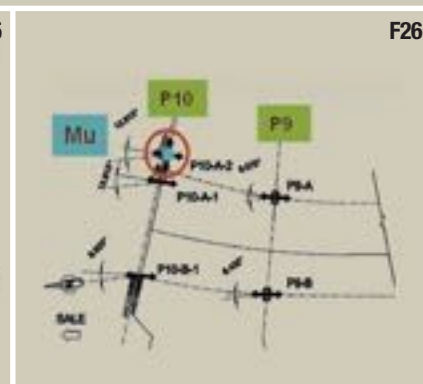
F28- Pier P10 - Reinforcing bars.



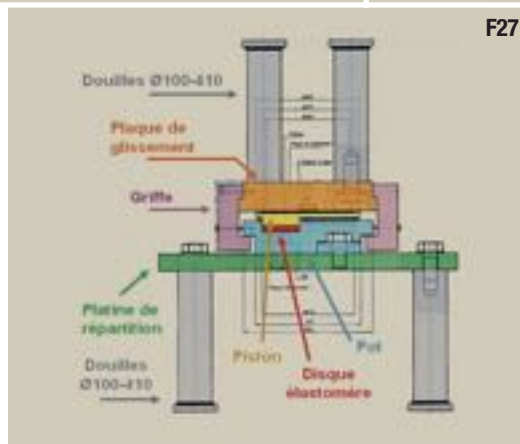
F24



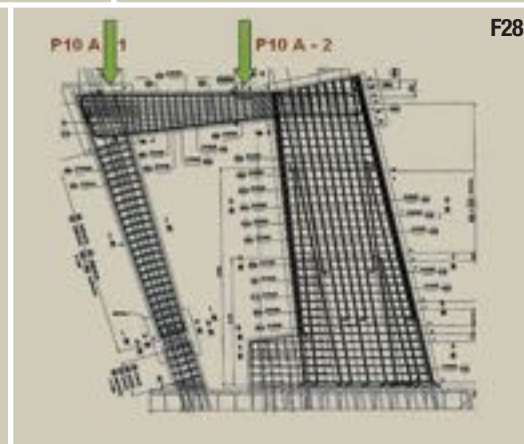
F25



F26



F27



F28

conduit à concevoir des semelles également biaisées de dimensions en plan variables et de 1,50 m d'épaisseur. Elles reposent sur des pieux de 35 m de longueur (Figure F16).

L'ouvrage dans son ensemble repose sur 217 pieux Ø 1 200 mm, de longueur variant de 24 à 38 m, correspondant à 8 000 m³ de béton B40.

La longueur moyenne des pieux est de 32,4 m, soit 8 % supérieure à celle de l'Avant projet.

Les aciers passifs à haute adhérence F_e E500 mis en œuvre conduisent à un ratio moyen de 107 kg/m³.

Ces pieux sont coiffés par 33 semelles pour lesquelles 3 400 m³ de béton B40 ont été mis en œuvre. Un ratio moyen de 146 kg/m³ d'aciers passifs a été nécessaire pour assurer leur résistance.

LES PILES LES PILES COURANTES

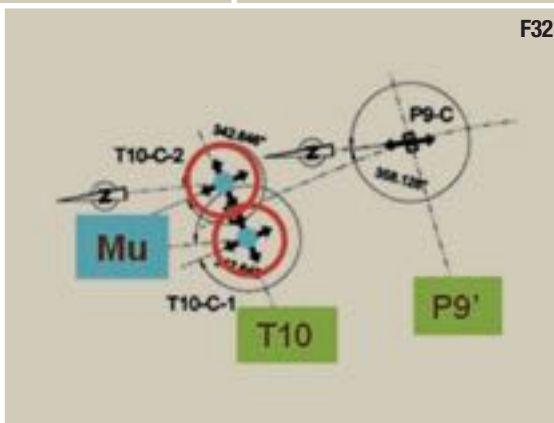
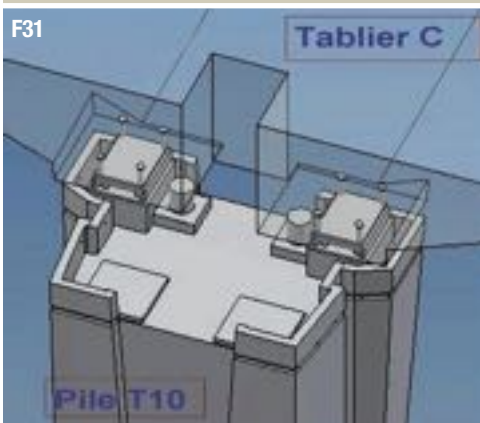
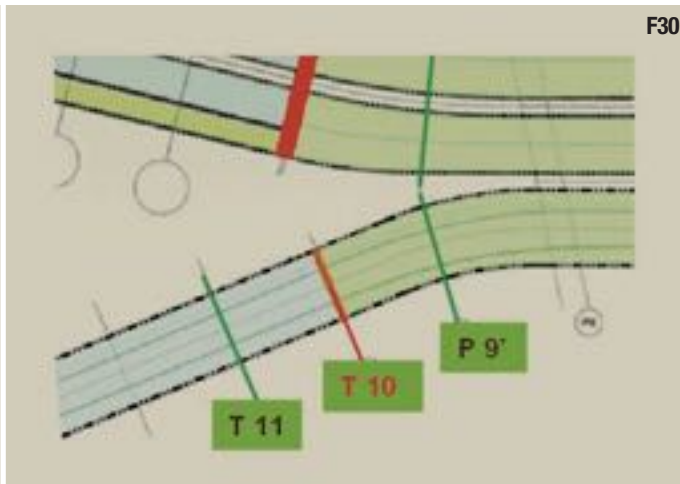
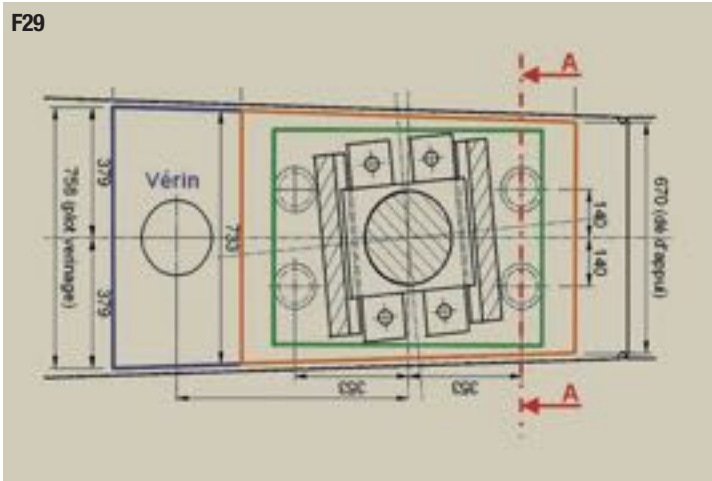
Les piles de l'ouvrage ont fait l'objet de la part de l'Architecte d'une recherche esthétique particulièrement sophistiquée. Il a toutefois été possible de

mettre en œuvre, au stade des études d'exécution, une certaine standardisation dans la conception des coffrages. Tout d'abord en systématisant la valeur du fruit vertical des parements pour tous les fûts. Mais aussi en limitant les coffrages à 4 types en tenant compte de la symétrie de l'ouvrage par rapport à l'axe de la grande travée (Figure F17). En effet, la taille de chaque tête de pile est adaptée à celle du pied de palme qui vient y reposer ; il est donc possible de concevoir 6 piles avec un même coffrage en partie supérieure, le fût étant tronqué, pour la pile la plus courte, à la hauteur nécessaire mesurée à partir de la tête de pile (Figure F19).

Le coffrage de la pile comporte huit surfaces non planes, dont les intersections par paires constituent les arrêtes du fût (Figure F18).

Les piles principales P4 et P5 ont des fûts identiques qui reposent sur une embase parallélépipédique de hauteur légèrement variable (Figure F19).

Les fûts des autres piles reposent chacun directement sur leur semelle. ▷



F29- Tête de pile P10 A.
F30- Les piles encadrant T10.
F31 & F32- La tête de pile T10 et le tablier C.
F33- Tenon-mortaise sur T10.
P10- Tenon-mortaise sur T10.
F34- Tenon-mortaise - Détails.

LES TÊTES DE PILES

L'aspect de la tête de la pile courante a été particulièrement soigné par l'Architecte qui a souhaité cacher autant que possible la présence de l'appareil d'appui.

L'exiguïté de l'espace disponible pour implanter les dispositifs de vérinage en même temps que l'appareil d'appui a conduit Egis jmi à concevoir des caches amovibles. Ceux-ci sont composés de plusieurs éléments pour que leur suppression, indispensable lors d'une opération de vérinage, reste acceptable.

En outre, à la demande de l'Architecte, ces éléments en béton ont été réalisés *in situ*, en même temps que le fût de pile, de façon à obtenir une parfaite continuité visuelle en termes de géométrie et d'aspect (Figure F20).

LES PILES P10

Les fûts des piles P10, pour les tabliers routiers A et B, et T10 pour le tablier tramway C, ont un coffrage singulier qui est adapté à leur fonction tout en correspondant à la même recherche esthétique sophistiquée que les autres

fûts (Figure F21). La conception de ces piles a été revue par Egis jmi de façon à assurer la cohérence des coffrages avec les besoins techniques, dans le respect des principes architecturaux. Les piles P10 assurent la reprise des réactions lors de l'interruption des tabliers routiers A et B à la limite avec la structure du lot 2.

Cette structure est constituée d'un tablier central supporté par un portique encadré par deux rampes d'accès, elles-mêmes supportées par les piles V10 A et V10 B (Figure F22 et photo P9).

F29- Pier cap P10 A.

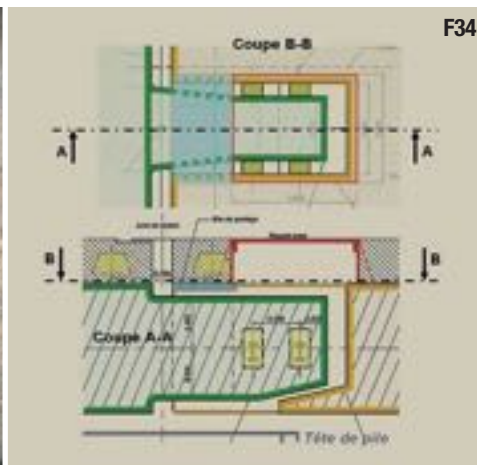
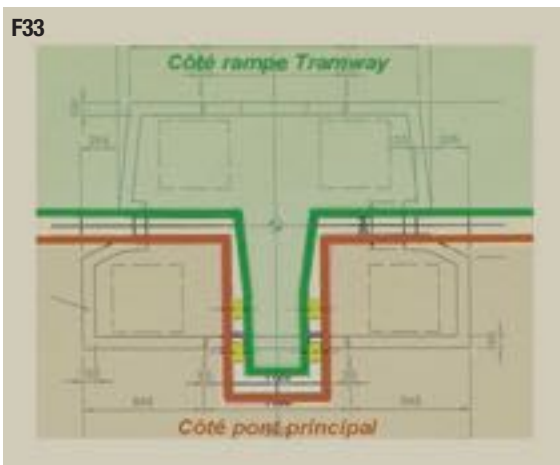
F30- Piers surrounding T10.

F31 & F32- Pier cap T10 and deck C.

F33- Mortise and tenon on T10.

P10- Mortise and tenon on T10.

F34- Mortise and tenon - Détails.



Chaque pile P10 en vis-à-vis du lot 2 est constituée d'un fût principal qui doit se superposer visuellement avec le fût de la rampe d'accès correspondante, et d'un fût secondaire très incliné qui doit se superposer de la même façon au montant du portique correspondant. Les deux fûts ont la même fondation et sont reliés en tête par une poutre de hauteur variable jouant le rôle de cheville d'appui des tabliers (Figure F22).

LA PILE T10

La pile T10 est en fait une pile culée puisqu'elle assure la transition entre le tablier C du pont Hassan II et le tablier de la rampe tramway.

La nécessité technique d'écarter les appareils d'appui du tablier C pour reprendre de manière satisfaisante les

efforts de torsion, et la nécessité esthétique de marquer l'extrémité du pont, qui n'avaient pas été prises en considération au stade du Marché, ont conduit à une nouvelle conception de la pile pour obtenir un coffrage original avec une architecture cohérente (Figure F23).

QUANTITÉS MISES EN ŒUVRE

Les 33 fûts de pile constituant l'ouvrage ont des hauteurs variant entre 2,30 m et 6,20 m.

Ils représentent un volume de 1 130 m³ de béton B65 clair, de fumée de silice blanche.

Un poids de 120 tonnes d'acier HA Fe E500 a été utilisé pour les armer, correspondant à un ratio variant de 75 kg/m³ pour la pile P6 à 166 kg/m³ pour la pile P5.

LES CONDITIONS D'APPUI DES TABLIERS

LES APPAREILS D'APPUI DES PILES COURANTES P1 À P8

Comme représenté sur la figure F24, la file d'appui P5 constitue le point fixe de l'ouvrage. Les trois appareils d'appui concernés sont fixes. Il s'agit, comme pour tout l'ouvrage d'appareils d'appui à pot d'élastomère. Tous les appareils d'appui restent comprimés.

Tous les appareils d'appui, hors ceux de P5, sont monodirectionnels dans le sens longitudinal. Les charges verticales maximales à l'ELS appliquées aux appareils d'appui varient de 9 400 kN pour les piles P1 et P8, à 26 700 kN pour les piles P4 et P5.

Sur les piles P4 et P5, les efforts horizontaux transversaux maximaux à l'ELU

sont de 1 330 kN et sur les piles P5 les efforts horizontaux longitudinaux maximaux à l'ELU sont de 4 600 kN.

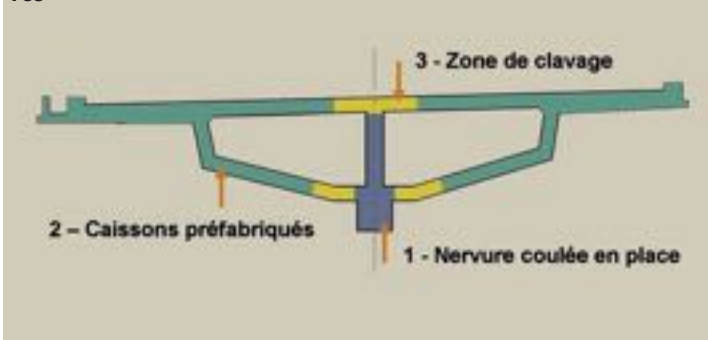
LES APPAREILS D'APPUI DE LA PILE P0

Les trois tabliers reposent sur le cheville général de la pile P0. Chaque tablier est supporté par deux appareils d'appui.

Sur les six appareils à pot de la file P0, cinq sont multidirectionnels (point bleu sur la figure F25). Le sixième sous le tablier C côté intérieur est monodirectionnel pour constituer le point fixe transversal.

Les appareils d'appui situés aux extrémités de la file (cercle rouge sur la figure F25) sont soumis à l'ELS à une réaction d'appui minimale voisine de 0. ▷

F35



F35- Le squelette de la structure.

F36- Le squelette de la structure.

P11- Le squelette de la structure.

P12- Les six palmes principales, les plus grandes, au stock.

P13- Une palme principale en cours de stockage.

F35- Skeleton of the structure.

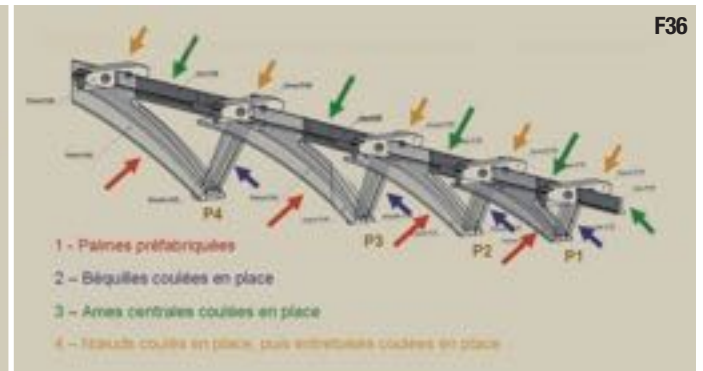
F36- Skeleton of the structure.

P11- Skeleton of the structure.

P12- The six main webbed brackets, the biggest, in stock.

P13- A main webbed bracket in storage.

F36



P11



P12



P13

À l'ELU, sous l'action de cas de chargement excentrés, la réaction devient négative, ce qui n'avait pas été prévu au stade du Marché. La valeur extrême de cette réaction est de -300 kN. Ces deux appareils d'appui à pot sont donc conçus en conséquence ; leur structure incorpore une griffe anti-soulèvement.

LES APPAREILS D'APPUI DES PILES P9 ET P10

Les appareils d'appui des piles P9 sont monodirectionnels. Comme l'ensemble des appareils d'appui des piles P9 et P10, le sens du déplacement longitudinal autorisé est orienté dans la direction du point fixe de l'ouvrage (Figure F26) ce qui n'avait pas été envisagé au stade du Marché. Le tablier B repose sur la pile P10-B par l'intermédiaire d'un appareil d'appui unique.

Le tablier A repose sur la pile P10-A par l'intermédiaire de deux appareils d'appui, nécessaires eu égard à la largeur du tablier en ce point. On trouve donc classiquement un appareil monodirectionnel et un appareil multidirectionnel. L'appareil d'appui P10-A-2 est soumis à l'ELS à une réaction maximale de $2\,100$ kN et minimale de soulèvement de $-1\,100$ kN. A l'ELU, ces réactions extrêmes valent respectivement $2\,700$ kN et $-1\,600$ kN. Un appareil du type Téton CD GL 2100 200.20 UL a été mis en œuvre pour répondre au problème posé (Figure F27).

La conception du ferrailage de la pile P10-A a été délicate. En effet l'appareil d'appui P10-A-2 exerce ses charges au niveau de plus grande sensibilité au cisaillement du chevêtre (Figure F28). L'implantation du bossage d'appui sur le chevêtre (Figure F29) et celle des douilles d'ancrage de l'appareil à pot dans les armatures ont été projetées et mises en œuvre avec la plus grande précision puisque dans les deux cas la tolérance de positionnement était quasiment nulle.

LES APPAREILS D'APPUI DE LA PILE T10

Le choix des appareils d'appui présents sur la pile T10 dépend des contraintes liées à la présence du tramway. En effet le franchissement par les voies ferrées du joint séparant le tablier C de celui de la rampe tramway nécessite que les déplacements transversaux et les rotations différentielles relatifs entre les rails situés de chaque côté du joint soient extrêmement faibles. Or la pile T10 se situe en extrémité de la zone courbe du tablier C (Figure F30).



P14



P15



P16

Il a donc été nécessaire de lier transversalement les deux tabliers. Le choix du concepteur s'est arrêté sur une liaison du type tenon-mortaise avec encastrement élastique, le tablier C constituant la mortaise (Figure F31).

L'étude des efforts dans la structure en service a mis en évidence que, dans le cas où les appareils d'appui sont bloqués transversalement sur T10, la pile T10 est soumise à des sollicitations transversales trop importantes.

Le choix a donc été fait de libérer les déplacements transversaux entre tablier et pile. Les efforts transversaux se répartissent alors sur les piles voisines T11 et P9' avec des valeurs admissibles. Les appareils d'appui de la pile T10 sont par conséquent du type multidirectionnel (Figure F32).

P14- Coffrage – Le pied n'est pas encore assemblé.

P15- Transport de la cage de la grande palme.

P16- Les trois palmes de l'arche centrale.

P14- Formwork – The base is not yet assembled.

P15- Transporting the reinforcing cage for the big webbed bracket.

P16- The three webbed brackets of the central arch.

L'étude d'exécution a montré en outre qu'ils reçoivent des réactions à l'ELS maximales de $2\,800$ kN et minimales de -130 kN. A l'ELU ces réactions deviennent respectivement $3\,780$ kN et -470 kN.

Les appareils d'appui sont donc ici aussi du type anti-soulèvement.

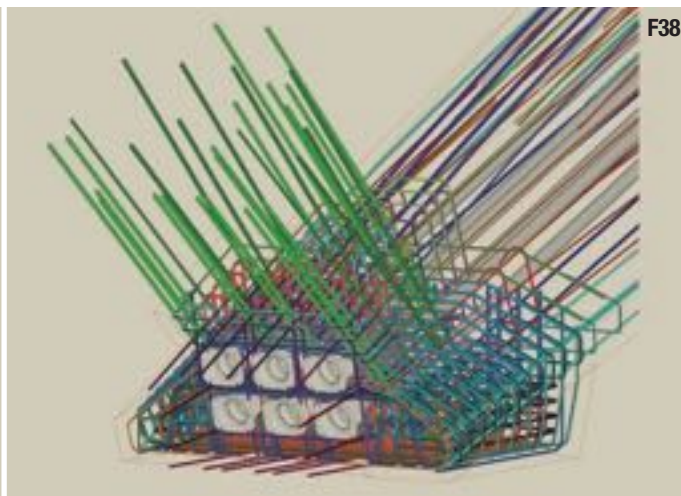
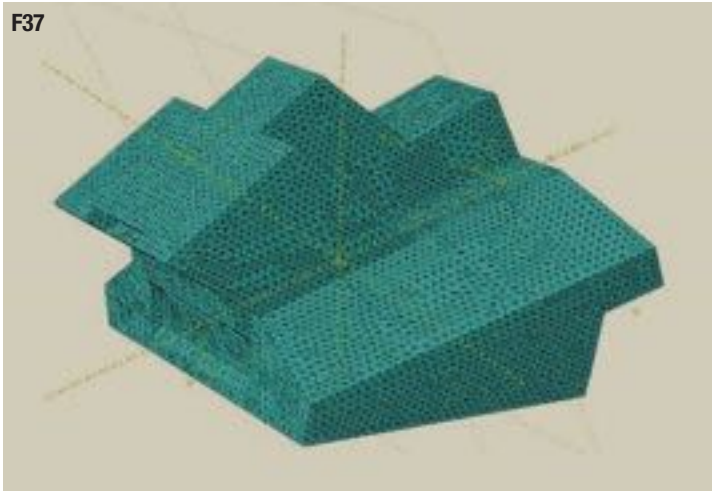
LES APPAREILS D'APPUI DU TENON-MORTAISE SUR LA PILE T10

La solution proposée par les plans de Marché ne permettait pas le remplacement des appareils d'appui. La conception de la liaison a donc été revue.

Pour cela (Figure F33 et photo P10), les aménagements d'abouts pratiques règnent sur toute la hauteur des tabliers.

Mais également un système pour les appareils d'appui, de cales biaises, réglables et amovibles a été spécifiquement mis au point.

Enfin un regard de visite a été aménagé par le dessus entre les deux voies ferrées, complété par une tôle épaisse permettant de ponter la mortaise à l'extrémité du tablier (Figure F34).



L'encastrement élastique est réalisé en disposant de chaque côté du tenon une paire d'appareils d'appui glissants en élastomère fretté, verticaux, de dimensions 150 x 300 mm. La continuité des déformations est ainsi assurée.

LES ÉLÉMENTS CONSTITUTIFS DE LA STRUCTURE LA NÉCESSITÉ DE LA PRÉFABRICATION

L'Architecte a conçu un ouvrage sophistiqué à l'esthétique originale et soignée. Il désirait obtenir un aspect général de la structure qui soit à la hauteur de ses choix. Il a considéré que seul l'emploi de la préfabrication permettrait de parvenir à une qualité satisfaisante du fini des parements.

Dans ce but le marché a été organisé de telle façon que les palmes et les caissons constituant les tabliers soient préfabriqués.

Ainsi, l'exigence de prévoir un nombre d'éléments préfabriqués, qui serait au minimum 218, a-t-elle été inscrite dans le marché de l'Entreprise, et conditionnait le règlement des travaux,

sans plus de détail sur le découpage envisagé pour prendre en compte cette contrainte.

Egis jmi, en liaison avec l'Entreprise, a donc proposé un découpage du tablier en éléments préfabriqués. Ce découpage a fait l'objet d'un calepinage détaillé. Il s'agit de constituer des demivoisiers préfabriqués venant encadrer l'âme centrale précédemment réalisée (Figure F35 et photo P24).

En outre, la géométrie extrêmement complexe des parties courbes des tabliers a conduit au stade de l'exécution à limiter cette exigence à la partie de structure comprise entre P1 et P8, c'est-à-dire à la structure rectiligne. Ces données imposées sont à l'origine du choix de la méthode de réalisation de l'ouvrage.

LE SQUELETTE GÉNÉRAL DE L'OUVRAGE ENTRE DE LA PILE P1 À LA PILE P8

Le squelette de chaque tablier comprend :

- Les palmes qui sont préfabriquées,
- Les bécquilles qui sont coulées en place,

F37- Pied de palme - Modèle 3D.

F38- Pied de palme - Armatures.

P17- Pied de palme principale.

P18- Bécquille liant les deux palmes en cours.

F37- Webbed bracket base – 3D model.

F38- Webbed bracket base – Reinforcing bars.

P17- Main webbed bracket base.

P18- Prop tying the two webbed brackets in progress.

→ Les âmes centrales des caissons constituant le tablier, dans le prolongement de la partie supérieure des palmes, qui sont coulées *in situ*,

→ Les nœuds qui sont coulés en place et qui constituent les entretoises des caissons tout en réalisant la jonction des éléments précédents.

Un squelette quasi identique existe pour chacun des trois tabliers (Photo P11). L'ensemble est relié par des entretoises coulées en place qui s'encastrent au droit des nœuds (Photos P21 et P22).

Les palmes

L'ouvrage comporte quatre types de palmes courantes. Six pièces de chacun des types sont préfabriquées. Ces pièces ont une longueur qui varie de 24,55 m à 31,74 m, et un poids allant de 150 à 260 t.



P19



P20



P21



P22

La moitié de ces 24 éléments est en béton précontraint, l'autre moitié en béton armé, hormis les parties supérieures, futures âmes centrales des tabliers. Les ratios d'armatures passives varient de 111 à 124 Kg/m³ (Photo P12). La géométrie des palmes est particulièrement travaillée puisque leur section varie dans les trois directions tout au long de la pièce (Photo P13). De plus elle a été ajustée avant exécution à la demande de l'Architecte. Chaque type est fabriqué en une seule fois dans un coffrage métallique global (Photo P14). La totalité de la cage d'armatures, comprenant ancrages et gaines de précontrainte, est préfabriquée sur un banc dédié, transportée, et mise en place sur le fond de coffrage (Photo P15). Le coffrage est fermé et le bétonnage réalisé. La palme, après durcissement du béton, qui contractuellement est un béton B65 à fumée de silice blanche, est stockée sur deux appuis provisoires. Les six palmes principales, sur P4 et P5, sont dotées en pied de six ancrages de précontrainte intérieure pour câbles 19T15. Les six palmes suivantes, sur P3 et P6, sont équipées d'un ancrage de précontrainte intérieure pour câble 31T15.

P19- Les trois béquilles de la file P6 en cours.

P20- Ouvrage terminé - Les trois béquilles de la file P3.

P21- Deux nœuds de la travée centrale.

P22- Un nœud courant du tablier C.

P23- Stabilité de la structure - Les entretoises.

P19- The three props of row P6 in progress.

P20- Completed structure - The three props of row P3.

P21- Two truss joints of the centre span.

P22- A standard truss joint on deck C.

P23- Structure stability - Cross ties.



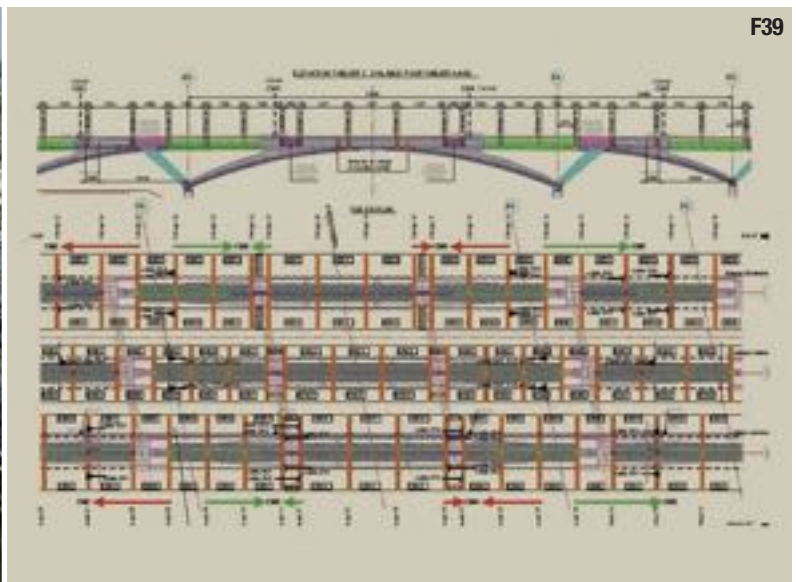
P23

Pour fabriquer la grande arche de l'ouvrage à partir de deux palmes principales, il faut placer entre elles une palme centrale (Photo P16). Le dossier de Marché prévoyait de couler en place cette jonction. L'Entreprise a insisté auprès du Maître d'ouvrage pour préfabriquer ces éléments de façon à gagner du temps et à obtenir un meilleur aspect de parement. Trois palmes centrales préfabriquées de 13,52 m de longueur existent donc, pesant chacune 101 t et ferrallées

à 123 kg/m³. Au total les 27 palmes représentent 2 150 m³ de béton et 252 t d'aciers passifs. Les palmes principales ont nécessité une étude particulièrement détaillée. En effet :
→ Le pied de ces palmes repose sur un appareil d'appui à pot qui s'y ancre à l'aide de douilles,
→ Six ancrages pour câble 19T15 y sont implantés (Photo P17),
→ Donc six gaines le traversent,
→ Et c'est au niveau de ce pied que se



P24



F39



P25



P26

croisent les aciers de la palme et ceux de la béquille.

Pour maîtriser au mieux cette difficulté un modèle 3D du pied de palme a été construit, constitué (Figure F37) d'éléments volumiques tétraédriques.

L'analyse des efforts ainsi obtenue a permis de dimensionner au mieux les aciers passifs à mettre en œuvre.

De façon à gérer les conflits de l'ensemble des éléments à imbriquer dans le coffrage, un modèle 3D des armatures et de la précontrainte, présentes dans le pied de palme, a été développé (Figure F38). Il a permis une fabrication sur chantier sans anicroche.

En ce qui concerne les palmes suivantes, le choix architectural était de prolonger l'extrémité supérieure de la palme au-delà de sa liaison avec la béquille. Cette liaison nécessaire, par armatures passives, conduit à aménager une réservation épousant la section de la béquille (Photo P18) de façon à laisser passer les attentes de celle-ci vers l'intérieur du nœud qui sera réalisé plus tard juste au-dessus.

Les béquilles

Les béquilles sont coulées en place entre le pied d'une palme et la tête de

P24- Les demi-voussoirs avant clavage.

F39- Découpage en voussoirs – Partie centrale de l'ouvrage.

P25- Parements préfabriqués des nœuds XC4 et XC5.

P26- Les travées courbes coulées in situ côté Salé.

P24- The half-segments before keying.

F39- Breakdown by segments – Central part of the structure.

P25- Prefabricated facings of truss joints XC4 and XC5.

P26- Curved spans cast in situ on Salé side.

la palme suivante (Photos P19 et P20). Ce sont des pièces qui ont une section variable sur toute leur hauteur. La longueur des béquilles diminue progressivement lorsqu'on s'éloigne de la grande travée P3 - P4.

Il existe une quasi-symétrie des béquilles par rapport à l'axe de la grande travée pour chaque tablier.

Les âmes centrales

Il s'agit des pièces qui constitueront à terme les âmes centrales des caissons du tablier. Ces éléments coulés *in situ* assurent la liaison des parties supérieures de deux palmes consécutives. Elles complètent le triangle qu'elles forment avec la partie inférieure de la palme et la béquille (Photo P11). Elles représentent 322 m³ de béton B65 ferrailé à 212 kg/m³.

Les nœuds

Les nœuds, coulés en place, sont situés au point de concours du tablier et des entretoises, sur la partie supérieure de la palme. Les six nœuds situés au tiers et aux deux tiers de la travée centrale correspondent à cette définition (Photo P21).

En revanche, les autres nœuds de la structure sont également le point de

convergence des béquilles (Photo P22). Ces nœuds qui achèvent de constituer le squelette de la structure, sont percés par des trous d'homme permettant une circulation dans les caissons. Ils servent également de déviateur à la précontrainte extérieure au béton passant dans les alvéoles, et de bloc d'ancrage pour cette même précontrainte.

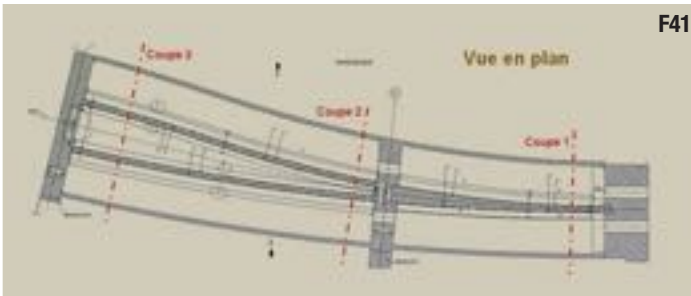
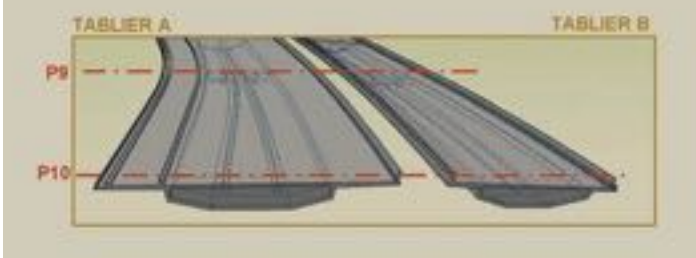
Les 30 nœuds de l'ouvrage représentent 940 m³ de béton B65 ferrailé à 200 kg/m³.

Les entretoises sont coulées en place entre deux nœuds voisins dans lesquels elles sont encastrées (Photo P23).

Après étude de leur fonctionnement, elles sont désolidarisées des encorbellements pour leur conférer moins de rigidité et obtenir des efforts locaux acceptables. Comme les autres éléments de la structure elles ont un coffrage dont la forme est complexe. La raison en est architecturale dans le choix des formes, mais aussi purement géométrique dans la variabilité des dimensions des tabliers qu'elles relient. Les 23 entretoises de l'ouvrage représentent 553 m³ de béton B65.

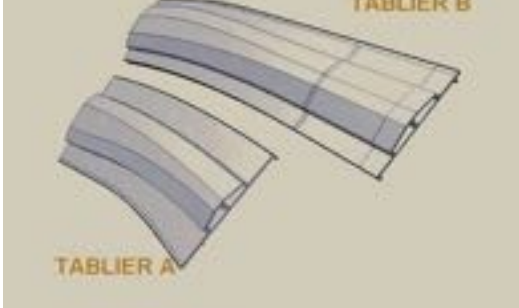
Leur ferrailage correspond à un ratio de 216 kg/m³.

F40



F41

F42



P27

F40- Élargissement des tabliers A et B.
F41- Évolution des âmes du tablier A.
F42- Variabilité complexe des sous faces.
P27- Sous face du tablier B puis du tablier A.
F43- Variabilité de la section transversale.
F44- Sections considérables d'aciers passifs.

F40- Widening of decks A and B.
F41- Progress on the webs of deck A.
F42- Complex variability of the undersides.
P27- Underside of deck B and then deck A.
F43- Variability of the cross section.
F44- Substantial passive steel sections.

LES TABLIERS

Les caissons

Les âmes centrales des caissons constituant le tablier ont été bétonnées en amont ; elles font partie du squelette de la structure.

Une fois ce squelette construit il est alors possible de mettre en œuvre les éléments préfabriqués qui viennent constituer les tabliers.

Ce sont des « demi-voussoirs » qui sont posés sur cintre de part et d'autre de l'âme centrale (Photo P24). Réglés précisément, et solidarités par bétonnage en place des deux clavages inférieurs et du clavage supérieur, ils viennent reposer sur l'âme centrale en incluant les attentes qui en sortent.

Un calepinage détaillé des demi voussoirs a été conçu par Egis jmi en accord avec l'Architecte (Figure F39).

On y retrouve, représentés en rose, les nœuds de la structure. 150 unités de demi voussoirs courants ont été fabriquées ayant de 5,05 m à 10,16 m de longueur. Le béton utilisé est un B65 à fumée de silice blanche.

À la demande expresse de l'Architecte, les parements extérieurs des nœuds ont été également préfabriqués (Photo P25). Le but est d'obtenir une finition de la même qualité pour tous les voussoirs, garantissant un rendu uniforme sur la plus grande longueur possible des tabliers de l'ouvrage. Ces éléments servent donc de coffrage

lors de la fabrication du nœud bétonné en place.

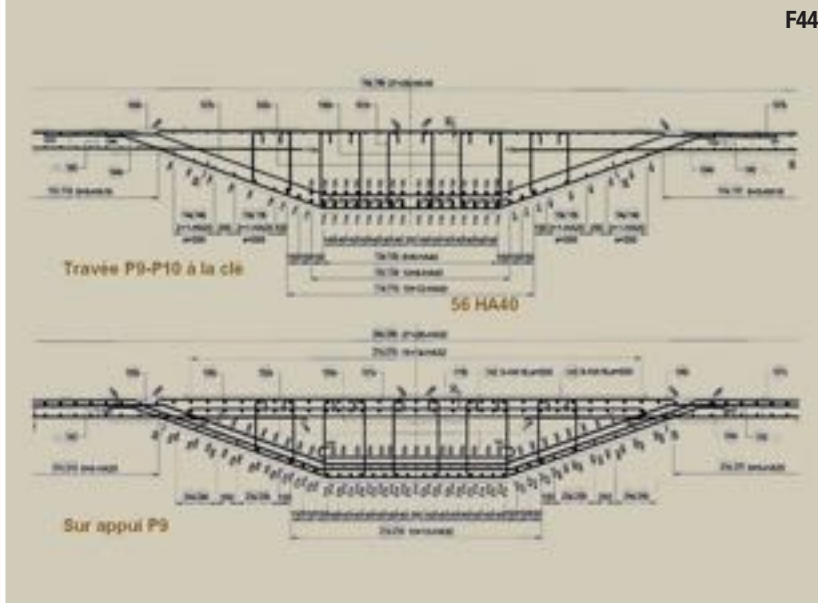
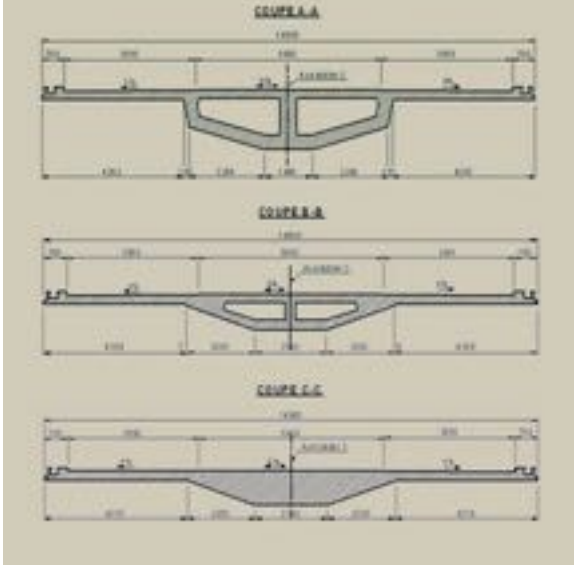
Cela représente la préfabrication de 60 éléments de parement dont la longueur varie entre 2,80 m et 6,60 m.

Les quantités utilisées en préfabrication

Les quantités des 237 pièces préfabriquées finalement décomptées dans l'ouvrage se répartissent de la façon suivante :

→ Les éléments de caisson préfabriqués représentent globalement 210 unités pour lesquelles ont été utilisées plus de 3 000 m³ de béton B65 à fumée de silice blanche et 7 600 t d'acier passif Fe E500, soit un ratio moyen de 141 kg/m³.

F43



F44

F45- Schéma général de câblage – Phases de mise en tension 1 à 15.

F46- Six unités 19T15 dans les palmes principales.

F47- Câbles intérieurs et extérieurs du tablier.

F48- Tracé du câble 4T15 courant.

P28- Ancrage et déviateurs en about de palme – cf. figure 47.

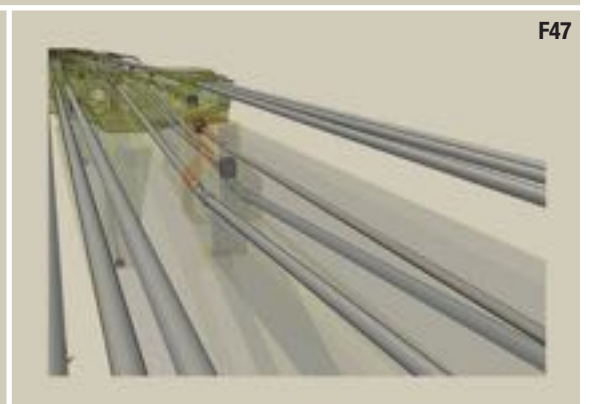
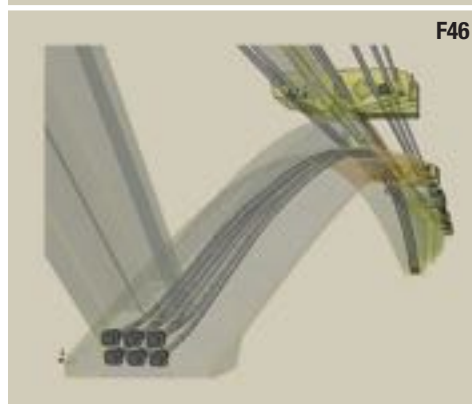
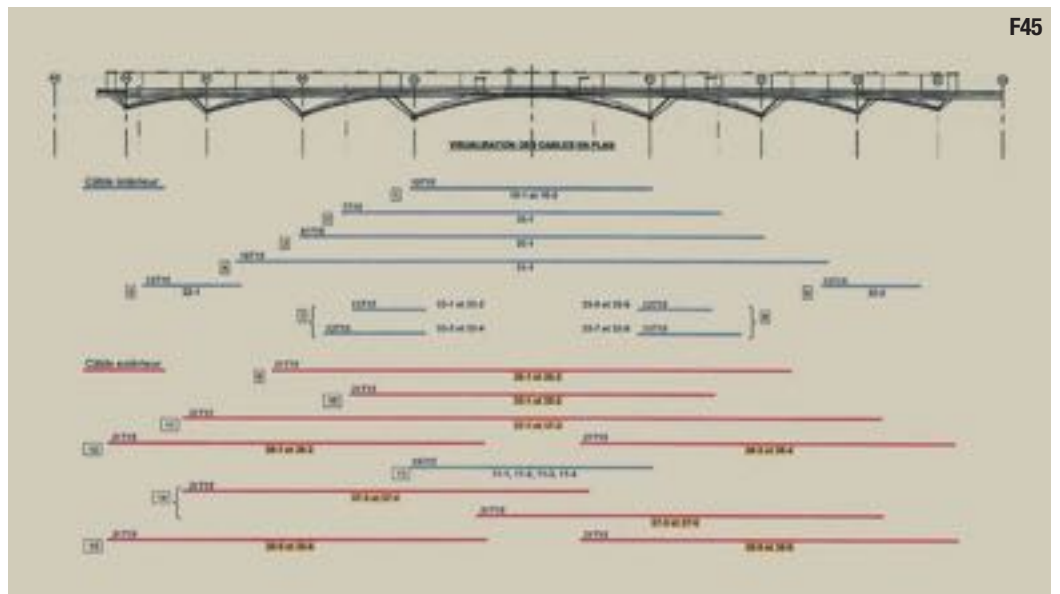
F45- General cabling diagram – Tensioning phases 1 to 15.

F46- Six 19T15 units in the main webbed brackets.

F47- Deck internal and external cables.

F48- Layout of standard 4T15 cable.

P28- Anchoring and stress deviators on webbed-bracket end plate – see Figure 47.



→ Les éléments de palmes préfabriquées sont au nombre de 27 ; ont été mis en œuvre 2 150 m³ du même béton B65 et 252 t d'acier passif, soit un ratio moyen de 118 kg/m³.

Les clavages

La liaison des différents éléments préfabriqués qui constituent l'ouvrage est réalisée par clavages longitudinaux et transversaux (Photo P24).

Les quantités nécessaires pour ce faire représentent 1 330 m³ de béton B65 et 200 t d'acier passif. Le ratio correspondant est de 149 kg/m³.

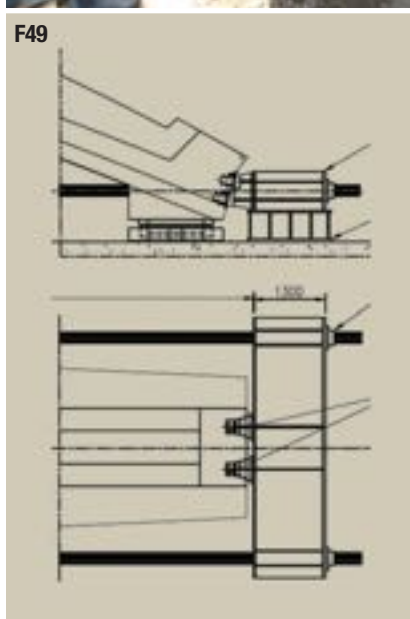
Les tabliers au-delà des piles P8

Entre les piles P8, et les piles P10 et T10, les trois tabliers sont courbes et leurs formes complexes. C'est en effet sur la longueur de ces travées que la continuité visuelle, entre les sections en caisson du pont Hassan II et les sections

des ouvrages connexes, a été assurée. L'utilisation de la préfabrication s'avérait particulièrement délicate. L'ensemble des six travées a donc été bétonné en place sur cintre général (Photo P26).

Les tabliers A et B

Les tabliers A et B s'élargissent entre les piles P8 et les piles P10 de 2,0 m chacun (Figure F40). Pour le tablier A, les âmes extérieures s'écartent l'une de l'autre ; l'âme centrale s'épaissit entre P8 et P9 et se dédouble entre P9 et P10 (Figure F41). L'encorbellement intérieur ne change pas de portée, tandis que la longueur de l'encorbellement extérieur diminue de plus de 1,1 m. Pour le tablier B, les âmes extérieures s'écartent de l'âme centrale ; l'encorbellement intérieur ne change quasiment pas de portée, tandis que la longueur de l'encorbellement extérieur diminue d'environ 0,9 m. ▷



La définition de la variation de géométrie sur cette longueur n'était pas fournie par le Marché.

Cette définition complexe a été mise au point par Egis JMI. Ainsi a pu être assurée la gestion rigoureuse de l'interface avec la section du lot 2 (voir figures F22 et F42). Il en découle une importante complexité des coffrages (Photo P27) puisqu'il est inévitable que certaines surfaces soient gauches.

Le tablier C

La largeur du tablier C reste constante entre les piles P8 et T10. En revanche, la hauteur du tablier passe de 1,7 m à 1,0 m et la topologie de la section

transversale est modifiée de façon importante. On passe en effet de la coupe A-A (Figure F43) en forme de caisson à deux alvéoles à la coupe C-C en forme de dalle pleine à larges encorbellements, qui est la section transversale de la rampe tramway. Pour une travée P9-P10 d'une portée de 21 m, la hauteur de la dalle pleine est de 1 m. Le marché ayant été passé sur la base d'une structure en béton armé, il n'a pas été possible de proposer de concevoir une dalle précontrainte qui aurait été plus adaptée.

C'est donc une dalle en béton armé très élancée qui a été étudiée et construite.

Par conséquent d'importantes sections d'acier passif ont dû être mises en œuvre pour assurer la résistance de ces travées.

L'extrait de plan de ferrailage ci-contre montre la section sur appui P9 dans laquelle de nombreux HA32 ont été mis en place, mais aussi la section de clé de la travée P9-P10 pour laquelle 56 HA40 ont été nécessaires ce qui est considérable (Figure F44).

Les quantités

Comme cela a été écrit dans le chapitre concernant la précontrainte, le câblage ne va pas au-delà de la pile P8.

Du côté Salé, les deux travées d'about

P29- Mise en tension globale d'un 31T15.

P30- Vérin mono-torlon pour tension d'un 31T15.

F49- Position des tirants d'une arche.

P31- Bâti d'ancrage des tirants 37T15.

P32- Les plaques d'ancrage d'appui.

P33- Portique de stabilité des arcs.

P29- Overall 31T15 tensioning.

P30- Monostrand jack for 31T15 tensioning.

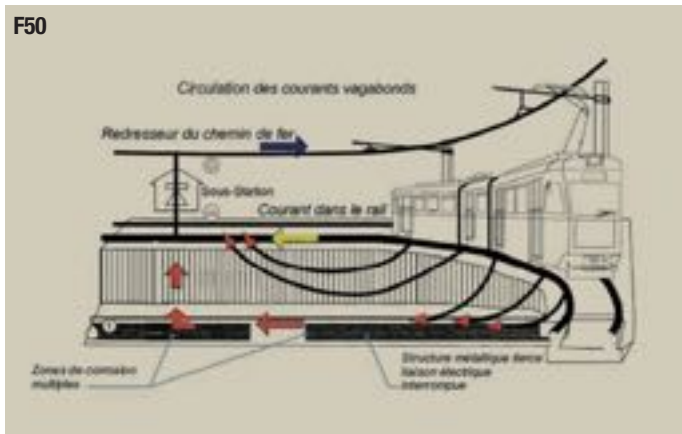
F49- Position of arch tension members.

P31- Anchoring frame for 37T15 tension members.

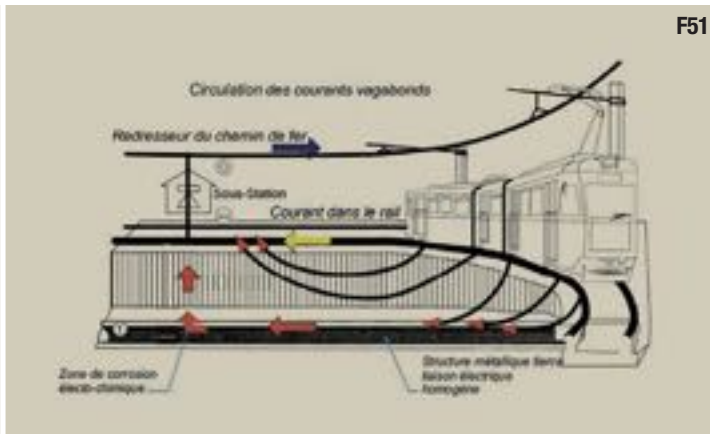
P32- Support anchor plates.

P33- Portal frame for arch stability.

F50



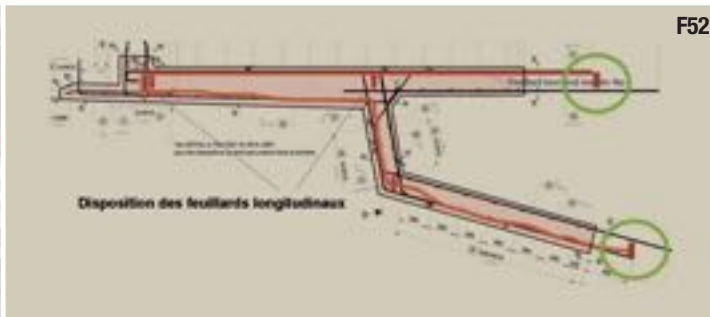
F51



P34



F52



F50- Liaison électrique interrompue.

F51- Liaison électrique homogène.

P34- Circuit en partie basse de palme.

F52- Circuit en demi voussoir préfabriqué.

F50- Interrupted electrical connection.

F51- Homogeneous electrical connection.

P34- Circuit in the lower part of a webbed bracket.

F52- Circuit in prefabricated half-segment.

de chacun des trois tabliers sont en béton armé. Pour réaliser les six travées d'about 750 m³ ont été nécessaires, correspondant à un ratio d'acier passif Fe E500 de 222 kg/m³.

LA PRÉCONTRAÎTE DE LA STRUCTURE

L'examen des câbles de la structure (Figure F45) permet de les séparer en deux grandes familles :

LA PRÉCONTRAÎTE LONGITUDINALE

→ Des câbles, dont les gaines sont entièrement noyées dans le béton de l'ouvrage (En bleu sur la figure F45). On peut y distinguer :

- des câbles qui sont ancrés dans le pied des palmes : unités 10-1, 10-2, 20-1, 11-1 à 11-4. Les câbles 10 et 11 concernent les palmes principales, de P4 à P5 ; il s'agit d'unités 19T15 (Figure F46). Le câble 20 concerne les palmes suivantes, de P3 à P6 ; il s'agit d'une unité 31T15.

- des câbles qui règnent dans le tablier : ce sont tous les autres câbles noyés. Il s'agit d'unités 7T15, 13T15, 19T15 et 31T15.

→ Des câbles qui sont extérieurs au béton sur la plus grande partie de leur parcours et qui sont mis en œuvre dans les alvéoles des caissons (en rouge sur le schéma de câblage). Il s'agit uniquement d'unités 31T15.

Les différents câbles de précontrainte, existant dans chacun des trois tabliers constituant l'ouvrage, sont représentés sur le schéma général de câblage, dans l'ordre de leur mise en tension lors du phasage de construction.

Le tracé de cette précontrainte a fait l'objet de mises au point longues et délicates en liaison avec le phasage très pointu de construction.

La modélisation en 3D de l'ensemble des unités mises en œuvre a permis de gérer avec sûreté les conflits potentiels et de maîtriser les diverses interactions (Figure F47 et photo P28).

LA PRÉCONTRAÎTE TRANSVERSALE

Le Marché prévoyait une quantité de torons permettant spécifiquement de précontraindre transversalement les hourdis supérieurs des trois tabliers de l'ouvrage.

Les études d'exécution ont permis une importante évolution de ce choix. En effet, les trois caissons constituant l'ouvrage ont une topologie identique,

mais leurs encorbellements ont des dimensions différentes (Figure F9).

Le tablier C a de larges encorbellements, mais ceux-ci portent essentiellement des circulations de piétons et de cycles. L'intensité des charges a permis de les faire fonctionner uniquement en béton armé.

Le tablier B a des encorbellements qui portent des circulations routières, mais ils sont beaucoup plus courts. Cette dimension a permis de les faire fonctionner en béton armé.

Le tablier A présente de larges encorbellements qui portent des circulations routières et piétons-cycles. Il a été ici nécessaire de mettre en œuvre de la précontrainte transversale pour conserver des caractéristiques géométriques voisines de celles des deux autres tabliers.

Le Marché ne donnait pas de détail concernant la conception de la précontrainte transversale.

Les études d'exécution ont permis de placer un câble 4T15 tous les 60 cm dans la dalle supérieure du tablier A (Figure F48). À l'about de l'ouvrage du côté de la pile-culée P0, une conception particulière a été développée pour conserver le même taux de compression sur les deux rives de la dalle, malgré une longueur développée différente. Cela représente sur toute la longueur de l'ouvrage 546 unités.

Ponctuellement, au niveau de chacun des nœuds 4 et 5 des tabliers B et C, ▷

16 câbles 4T15 ont été tendus entre les rives de la dalle supérieure pour améliorer l'état de contrainte dû à la diffusion des efforts dans l'ouvrage.

LA MISE EN ŒUVRE DE LA PRÉCONTRAINTÉ

Chaque fois que cela a été possible les mises en tension des câbles de précontrainte ont été réalisées avec un vérin de puissance adaptée au nombre de torons présents. Cela a été le cas par exemple des câbles 31T15 ancrés dans le pied des palmes P3 et P6 (Photo P29). Des aménagements ont été apportés au phasage de bétonnage pour faciliter certaines mises en tension.

Toutefois bon nombre de câbles de la même puissance sont ancrés dans les entretoises des nœuds et doivent être mis en tension à partir de l'espace exigu qu'offre l'intérieur d'un alvéole de caisson.

Ces conditions difficiles contraignent à réaliser les mises en tension toron par toron en utilisant le vérin adapté, de poids limité (Photo P30).

LES QUANTITÉS

La précontrainte transversale représente 40 t de torons T15 super de qualité $F_{prg} = 1\ 860$ MPa. Le nombre d'ancrages 4F15 utilisés est de 1 220. Pour la précontrainte longitudinale, 354 t de ces mêmes torons ont été mises en œuvre, dont 276 t pour la précontrainte extérieure.

LES TIRANTS DES PALMES CENTRALES

JUSTIFICATION

La construction de la grande travée d'un tablier commence par la mise place sur appuis provisoires et le clavage de trois éléments préfabriqués, deux grandes palmes et une palme centrale, suivi de la mise en tension, sur toute la longueur de l'arc ainsi assemblé, d'une paire de câble 19T15. L'arc repose sur le remblai par l'intermédiaire de tours Megashore.

Le risque de tassement du remblai a conduit à concevoir un moyen de réduire au minimum le délai pendant lequel ce risque est effectif, ce qui

P35- Isolation des gaines aux points sensibles.

F53- Ancrage isolé pour 19T15.

P36- Pied de grande palme – Plaques d'isolation.

F54- Coffret de mesure sur tablier C.

P35- Duct insulation at sensitive points.

F53- Insulated anchoring for 19T15.

P36- Base of large webbed bracket – Insulation plates.

F54- Test unit on deck C.

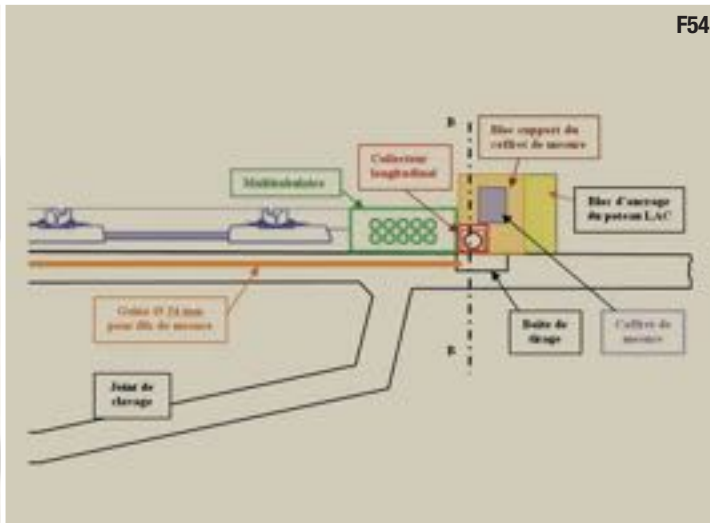
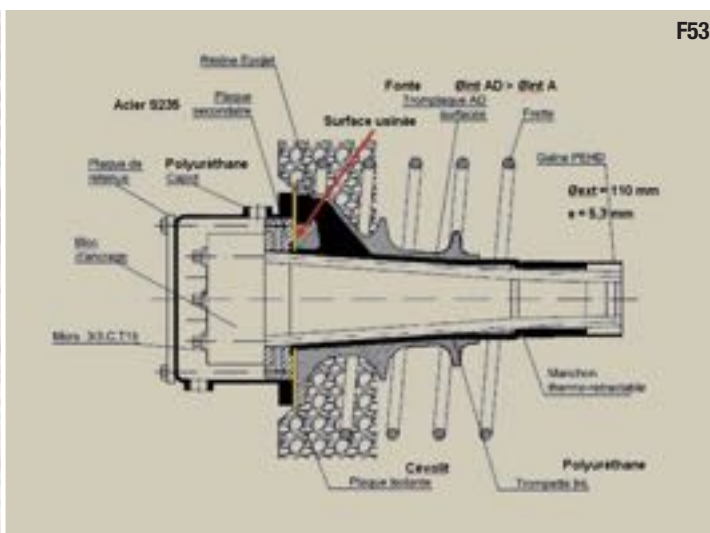
n'avait pas été envisagé au stade du Marché. Pour cela le choix a été fait de transférer la majeure partie des charges verticales des tours provisoires vers les pieds de l'arc qui reposent sur les têtes des piles P4 et P5. La mise en œuvre d'un tirant liant les pieds des grandes palmes permet d'activer le fonctionnement provisoire en arc de la structure et assure le transfert recherché.

DESCRIPTION

Chacun des trois tirants mis en œuvre sur les grandes travées des trois tabliers est constitué de deux câbles 37T15. Ces deux câbles sont placés de part et d'autre du pied des palmes et ancrés dans un bâti en acier (Figure F49 et photo P31).

Comme indiqué ci-dessus deux de ces câbles viennent d'être tendus. Il s'agit des deux câbles centraux. Il reste donc quatre plaques d'ancrages non encore utilisées (Photo P32).

Egis jmi a proposé le principe d'utilisation de ces plaques pour servir d'appui au bâti métallique.





La tension du tirant ainsi constitué est réglée de façon à obtenir un état admissible de contraintes dans la structure.

La stabilité transversale de chacun des trois arcs est assurée par un portique fixé par barres de précontrainte au point de levage inférieur de la grande palme, et soudé en tête de pieux en acier profondément fondés dans le sol (Photo P33).

LES COURANTS VAGABONDS LA POSITION DU PROBLÈME

Le tablier C de l'ouvrage porte deux voies ferrées utilisées par le tramway. Les rames de ce tramway sont alimentées, à partir de la sous station la plus proche, en courant continu par l'intermédiaire de pantographes au contact des fils d'alimentation, portés par les caténaires.

Ce conducteur constitue le pôle « + » du circuit d'alimentation. Le courant retourne à la sous-station essentiellement par l'intermédiaire des rails qui constituent le pôle « - » du circuit. Mais le courant peut également utiliser tout conducteur métallique en contact avec le sol pour retourner à la sous station.

P37- Le pont Hassan II terminé – partie centrale.

P38- Pont provisoire en construction.

P39- Pont provisoire – construction avancée.

P40- Portique sur l'aire de préfabrication.

P41- Portique sur le pont provisoire.

P37- Completed Hassan II Bridge – central part.

P38- Temporary bridge under construction.

P39- Temporary bridge – advanced construction.

P40- Portal frame on the prefabrication area.

P41- Portal frame on the temporary bridge.

C'est cette part de courant que l'on appelle les « courants vagabonds ». Des mesures de protection passives ont été mises en œuvre dans la conception des voies pour limiter les courants de retour par le sol. Il s'agit :

→ De la pose des voies sur un radier en béton,

→ De la mise en place de cales et d'attaches qui isolent le rail,

→ De la mise en œuvre d'une isolation latérale des rails,

→ Du pontage des joints de dilatation qui pourraient constituer des interruptions du circuit.

Ces dispositions devraient limiter, dans un premier temps, l'importance de ces courants vagabonds.

En fait il n'est pas possible de quantifier avec exactitude l'intensité à laquelle sera soumis l'ouvrage d'art du fait des pertes de courant.

Toutefois, l'expérience vécue dans plusieurs villes équipées de tramways montre que, en dépit des mesures de protection prises, il subsiste une « fuite » comprise entre 1 et 10 % des courants nominaux.

La sous station « Marina », qui alimente essentiellement le tramway

dans la zone du pont Hassan II, fournit une intensité moyenne qui peut être estimée à 440 A. À partir de cette valeur des calculs peuvent être menés qui permettent de quantifier la perte potentielle pouvant intervenir au bout d'une trentaine d'années sur les armatures en métal de l'ouvrage. Ils aboutissent à une perte d'environ 5 t, tant sur les aciers passifs que sur les câbles de précontrainte. Cela n'est pas négligeable.

Egis JMI a expliqué ce risque au Maître d'œuvre et au Maître d'ouvrage pour prise en considération, ce qui n'avait pas été fait, ni au stade de la conception du projet, ni lors de la mise au point du Marché.

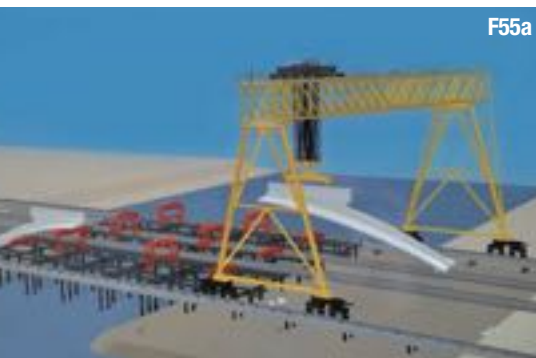
LE PRINCIPE DE PROTECTION

Les courants vagabonds peuvent circuler dans la structure par l'intermédiaire des conducteurs qui y sont présents. Dans le cas où ces pseudo-circuits présentent des interruptions de conductivité il se crée, là où des pertes se produisent dans le circuit, des zones de corrosion (Figure F50). Dans une structure comme celle du pont Hassan II, ces zones sont multiples.

Si l'on offre à ces pertes de courant un circuit homogène et continu qui permette de les reconduire vers la sous station, la zone de corrosion se situera au niveau de ce circuit au voisinage de la sous station (Figure F51), où elle peut être traitée, et non plus dans les constituants de la structure résistante elle-même.

Il s'agit donc, d'une part de constituer un circuit préférentiel permettant de gérer les courants vagabonds sans qu'il puissent affecter les armatures de la structure, et d'autre part de traiter tous les points potentiels d'interruption ou d'ouverture de ce circuit pour éviter toute corrosion ponctuelle des aciers résistants de la structure.

Il s'agit enfin de protéger les câbles de précontrainte, en les isolants des circulations de ces courants.



F55a



F55b



F55c

Les zones à risque sont donc :

→ Dans le sens horizontal, les deux lignes de joints de dilatation aux extrémités de l'ouvrage,

→ Dans le sens vertical, l'ensemble des piles et plus particulièrement les piles en rivière.

Seul le tablier C qui porte le tramway est concerné. En effet, il s'agit d'une structure indépendante longitudinalement, c'est-à-dire dans le sens de circulation des courants, et qui n'est reliée aux tabliers voisins que ponctuellement par des entretoises sensiblement perpendiculaires au sens des courants. Les courants vagabonds n'affecteront pas les tabliers A et B.

LES DISPOSITIONS PRISES

Les zones courantes du tablier C sont équipées d'un circuit préférentiel de circulation des courants vagabonds, d'une extrémité du tablier à l'autre. À partir du pied de chaque palme et béquille, le même type de circuit est établi jusqu'au tablier. Enfin le même type de dispositif est mis en place dans les appuis depuis les pieux jusqu'aux têtes de piles.

Les zones à risque sont également traitées.

Dans le sens horizontal, les deux joints de dilatation sont shuntés par des câbles conducteurs courts de forte section, liant le circuit de protection du pont Hassan II aux circuits de même nature constitués dans les ouvrages voisins.

Dans le sens vertical, la rupture de continuité a lieu au sommet de chaque pile. Là aussi un shunt relie les piles aux palmes et béquilles ou au tablier.

Ainsi, l'ensemble des ouvrages en béton, ponts et Culée Creuse, constitue un « îlot galvanique » dans lequel le courant de retour pourra circuler dans un réseau de conducteurs soudés ou shuntés.

Le circuit constituant l'îlot galvanique inclut toutes les parties de l'ouvrage depuis la base des pieux jusqu'aux extrémités des encorbellements.

En dehors des zones clés, il faut noter

**F55a, b & c-
Poses des
palmes du
tablier A.**

**F56- Mise
en tension
de 2 x 19T15.**

**F55a, b & c-
Placing bents
of deck A.**

**F56- Tensioning
of 2 x 19T15.**

que les trois piles P3, P4 et P5 sont en contact avec un milieu agressif : eau de mer, ou mélange eau douce - eau salée. Les fondations de ces piles sont des pieux chemisés qui présentent une grande surface métallique dans un milieu peu résistant électriquement. Par ailleurs, le long des viroles des pieux en rivière, la transition entre zone en eau et zone bétonnée sera le siège d'une pile dite géologique.

La pile géologique est constituée d'un objet métallique en contact avec un milieu alcalin (béton) et un milieu acide (sol gorgé d'eau saumâtre). La pile provoque une corrosion généralisée sur une hauteur de 4 à 5 fois le diamètre de la virole. Il convient de protéger spécifiquement cette zone par des anodes sacrificielles de zinc qui passiveront l'acier localement.

LA MISE EN ŒUVRE : ACIERS PASSIFS

Le circuit préférentiel pour les courants vagabonds est constitué de plats en acier de 25 x 3 mm². Chaque pièce en béton comporte des éléments filants longitudinaux dont la position est choisie en fonction de la forme de la section transversale, et des cadres transversaux reliant les précédents selon un pas longitudinal d'environ 4 m (Photo P34 et figure F52).

LA MISE EN ŒUVRE : CÂBLES DE PRÉCONTRAINTE

La protection des câbles de précontrainte du tablier C consiste à isoler

chaque câble et ses deux ancrages du reste de la structure, et à prévoir le nécessaire pour vérifier la réalité de cette isolation.

En partie courante tout d'abord la gaine en feillard est remplacée par une gaine géométriquement similaire mais constituée de PEHD. Il s'agit de la gaine Plyduct de Freyssinet.

Cette gaine, de 2,5 ou 3 mm d'épaisseur, est utilisée pour toutes les parties du câble où le tracé est rectiligne ou présente de faibles déviations. Dans le cas où le rayon de courbure du câble devient faible, c'est-à-dire ici dans les zones situées non loin des ancrages, on lui préfère un tube en PEHD classique, plus épais, pour éviter les blessures du gainage.

Des manchons thermo-rétractables permettent l'assemblage de ces deux composants.

Des précautions particulières sont prises pour assurer une pérennité de l'isolation malgré les risques liés aux contraintes de bétonnage.

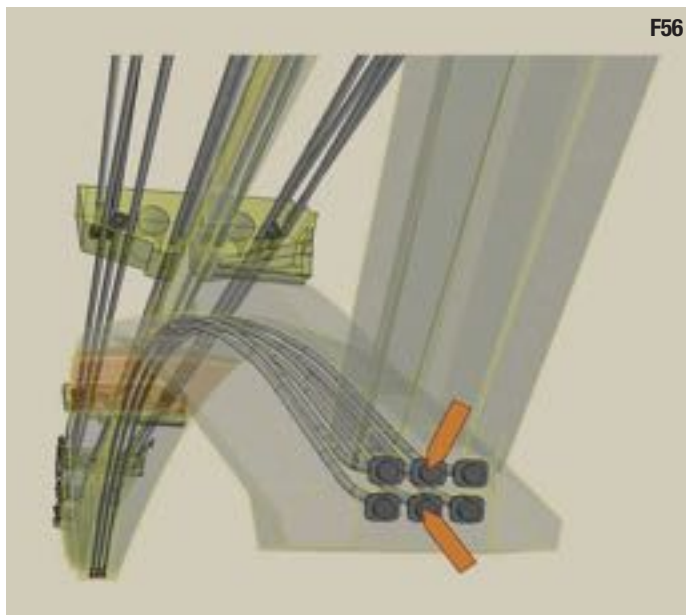
Sur chaque appui de la gaine sur les armatures passives, une protection plastique est mise en œuvre pour éviter toute blessure qui pourrait affecter la gaine (Photo P35) ; toutes les ligatures sont en matériau synthétique.

La conception des zones d'ancrage est également adaptée pour permettre une continuité de l'isolation du câble et du bloc d'ancrage.

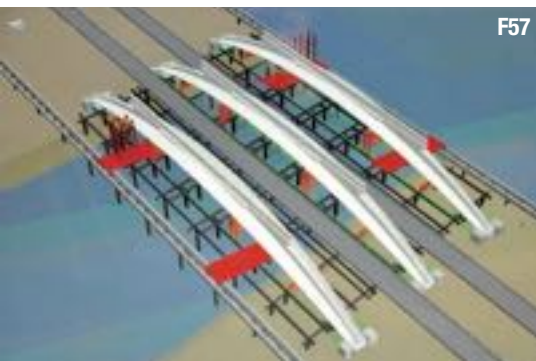
La gaine PEHD qui arrive au voisinage de l'ancrage (Figure F53) est ainsi reliée à la trompette en polyuréthane par manchon thermo-rétractable, lui-même isolant.

L'extrémité de la trompette vient reposer sur une plaque circulaire placée sur la surface spécialement usinée de la trompette (Photo P36). Cette plaque de Cevolit, matériau de haute résistance mécanique et de haute isolation électrique, reçoit le bloc d'ancrage.

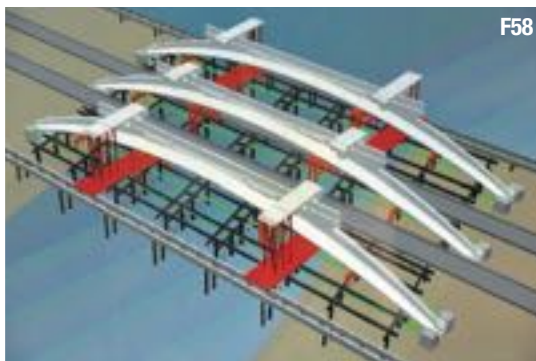
Après la mise en tension du câble et son recépage, l'ancrage sera protégé par un capot en polyuréthane.



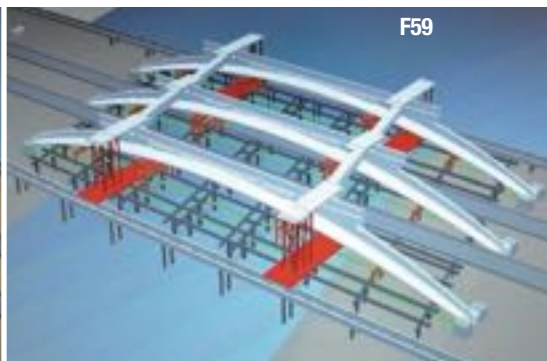
F56



F57



F58



F59

Il n'y a donc aucun contact conducteur entre le câble et son bloc d'ancrage, et le reste de la structure.

Des précautions similaires sont également prises pour les câbles de précontrainte extérieure dans toutes les zones où les câbles sont dans le béton : déviations et ancrages.

En outre, des dispositions sont prises pour pouvoir, périodiquement pendant la vie de l'ouvrage, contrôler la protection anticorrosion en effectuant des mesures de résistance électrique sur chacun des câbles de précontrainte. Ces dispositions permettent également la mise à la terre de chaque câble en cas de défaillance de la protection.

Pour cela on dispose des raccords électriques aux deux extrémités de chaque câble. Chacun de ces raccords est relié à un coffret de mesure situé sur le tablier C au voisinage de la multitubulaire longeant la voie ferrée (Figure F54). Le cheminement des 222 conducteurs est réalisé à travers les clavages reliant les éléments préfabriqués, vers un tube collecteur longitudinal.

Six coffrets de mesure sont disposés sur la longueur du tablier, à côté des blocs d'ancrage des supports de caténaires, pour centraliser les extrémités de ces conducteurs.

LA CONSTRUCTION

LE PONT PROVISOIRE

Le lit courant de l'oued Bouregreg s'étend de l'arrière de la pile P5 côté Salé à l'avant de la pile P2 côté Rabat (Photo P37). Pour construire les fondations des piles P3 à P5 deux remblais ont été réalisés, l'un incluant la pile P4 en rive gauche et l'autre la pile P5 en rive droite.

La nécessité de poser les palmes préfabriquées sur des palées provisoires a conduit dans un premier temps à envisager de remblayer complètement le fleuve en busant fortement la passe centrale. Malgré la justification hydraulique apportée par l'Entreprise, le Maître d'ouvrage a préféré laisser libre cette

passerelle pour préserver au mieux l'effet chasse d'eau des marées dans le grand estuaire.

La construction d'un pont provisoire a donc été décidée. L'étude en a été confiée à T-ingénierie. Ce pont est fondé sur pieux métalliques vibrofoncés munis de chevêtres (Photo P38).

Une fois les fermes maîtresses et secondaires mises en œuvre, des dalles préfabriquées viennent constituer deux traversées du fleuve circulables par les engins de chantier (Photo P39).

Les rives du pont provisoire sont constituées de poutres renforcées qui portent les rails du portique desservant l'ensemble du chantier. Les tours Megashore, constituant les palées provisoires des palmes formant l'arc central, sont implantées sur les profilés de l'ossature du pont (Photo P39). Le pont provisoire peut jouer son rôle.

F57- Arcs A, B et C.

F58- Les six nœuds réalisés.

F59- Entretoises bétonnées.

P42- Palmes P1, P2 et P3 posées.

F60- Palmes et béquilles P3 et P6.

F57- Arches A, B and C.

F58- The six truss joints executed.

F59- Concreted cross ties.

P42- Webbed brackets P1, P2 and P3 installed.

F60- Webbed brackets and props P3 and P6.

LE PORTIQUE DE MANUTENTION

Il s'agit d'un portique de 50 m d'ouverture qui dégage une hauteur de 20 m sous crochet. Sa capacité de levage est de 3 000 kN. Sa membrure supérieure est constituée par deux poutres treillis de 2 m de large et de 5 m de haut, espacées entre axes de 6 m et de 75 t de masse chacune. Ses montants verticaux ont une base, entre axes, de 20 m de large.

La largeur de ce matériel lui permet d'enjamber les trois tabliers de l'ouvrage et donc de desservir, à partir de l'aire de préfabrication (Photo P40) et grâce au pont provisoire (Photo P41), la construction de toute la partie rectiligne du pont.

Les 237 éléments préfabriqués constituant l'ouvrage, pesant jusqu'à 260 t, ont été manutentionnés de leur lieu de bétonnage à leur position de stockage, puis de leur position de stockage à leur position définitive, à l'aide de cet outil construit spécialement pour le pont Hassan II.

LE PHASAGE DE CONSTRUCTION

La description des éléments constitutifs de l'ouvrage et le contenu des chapitres précédents laissent entrevoir les grandes lignes du phasage de construction retenu.

Le phasage de construction étudié pour établir le DCE ne concernait qu'un tablier.

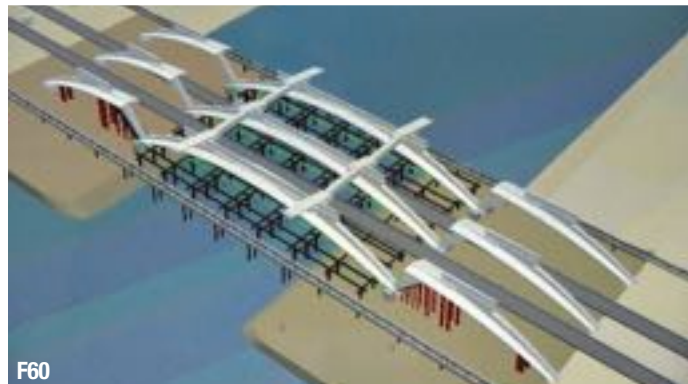
Or les trois tabliers sont reliés entre eux par les entretoises ce qui rend la structure dans son ensemble hautement hyperstatique.

La construction de l'ouvrage devait en outre être pensée de façon à assurer dès que possible la stabilité des parties de structure selon deux points de vue :

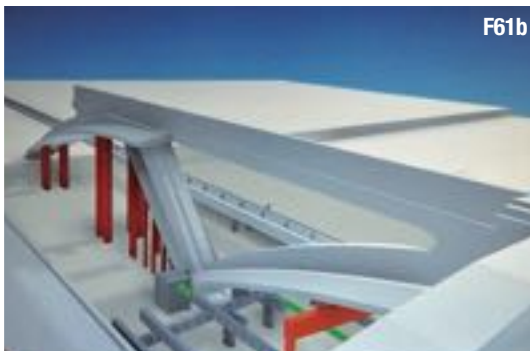
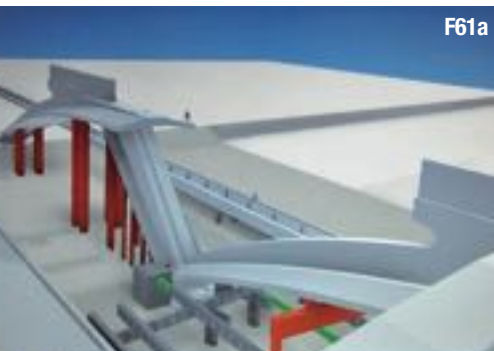
→ Stabilité par rapport aux tassements potentiels des remblais provisoires de la plate-forme,
→ Mais aussi stabilité globale transversale de chacun des plans-axes des tabliers.



P42



F60



Cette exigence conduit à commencer la construction par la constitution des squelettes des trois travées centrales, et à assurer la stabilité de cet ensemble à partir duquel tout le reste de la structure va être développé.

De façon succincte, les 171 dates de construction, chaque date pouvant correspondre à plusieurs phases, peuvent être résumées de la façon suivante.

En début de phasage, les palmes P4 et P5 du tablier A, puis la palme centrale correspondante, sont posées à l'aide du portique sur leurs appuis provisoires (Figures F55a, F55b et F55c).

Une fois ces éléments clavés, les deux câbles 19T15 centraux en pied des palmes sont mis en tension (Figure F56). Les pieds des palmes sont posés sur les appuis définitifs et une charpente métallique de stabilisation transversale est mise en place tant que les entretoises entre les trois tabliers ne sont pas exécutées (Photo P33).

Un tirant est disposé entre les pieds de l'arc central (Photo P31), de façon à pouvoir décharger les tours de support intermédiaires et équilibrer les composantes horizontales des réactions.

On effectue la même série d'opération pour les tabliers B et C (Figure F57). Pour assurer la stabilité de cet ensemble il faut lier les tabliers entre eux en réalisant les premières entretoises. Cela commence par la construction des nœuds, après mise en place des parements préfabriqués qui servent de coffrage (Photo P25), en ce qui concerne les tabliers A et C. Les six nœuds une fois réalisés (Figure F58), les entretoises qui les relient sont coulées en place (Figure F59).

Le squelette de base de la structure est ainsi constitué.

À partir de cette base et en allant symétriquement vers Salé et vers Rabat, les palmes préfabriquées sont posées sur étaie (Photo P42) et les béquilles sont coulées *in situ* (Figure F60).

Comme cela a été présenté précédemment sur la photo P11, de façon

F61a & F61b- Ames centrales entre deux palmes successives.

F62- Constitution d'un nœud.

F63- Nœuds 4 et 5 – Barres Ø 32 inclinées.

F61a & F61b- Central webs between two successive web-bed brackets.

F62- Formation of a truss joint.

F63- Truss joints 4 and 5 – Inclined bars of dia. 32 mm.

à constituer la suite du squelette de l'ouvrage il faut relier les palmes entre elles par bétonnage en place des âmes centrales des tabliers (Figures F61a et F61b) ; puis les nœuds suivants sont réalisés (Photos P21 et P22 et figure F62). Au fur et à mesure de la construction les entretoises sont progressivement bétonnées.

À partir du moment où l'avancement dans la construction du squelette est suffisamment important, c'est-à-dire une fois posées les palmes P1 et P8, on commence à poser sur cintre et à claver les demi-caissons préfabriqués des tabliers (Photo P24).

On commence par les abords de la travée centrale, entre l'axe P5 et la palme P7 puis on met en tension les câbles correspondants.

On procède de cette façon successivement pour les tabliers C, B et A.

Puis on réalise l'enchaînement équivalent côté P4, successivement cette fois-ci pour les tabliers A, B et C.

On adopte un ordre de pose dans le sens longitudinal en traitant les trois tabliers en parallèle.

Le phasage est très complexe. Pour gérer au plus près l'état des contraintes dans les différentes parties des trois tabliers, il faut intervenir :

→ La pose de demi-voussoirs dans des zones bien définies et limitées, souvent non connexes,

→ Un phasage précis pour retirer les tours d'étaie ou pour les maintenir en place malgré la mise en précontrainte des zones correspondantes,

→ La mise en tension ciblée des câbles de précontrainte, dont les longueurs et la géométrie ont été précisément travaillées par rapport à ce qui était prévu par le Marché,

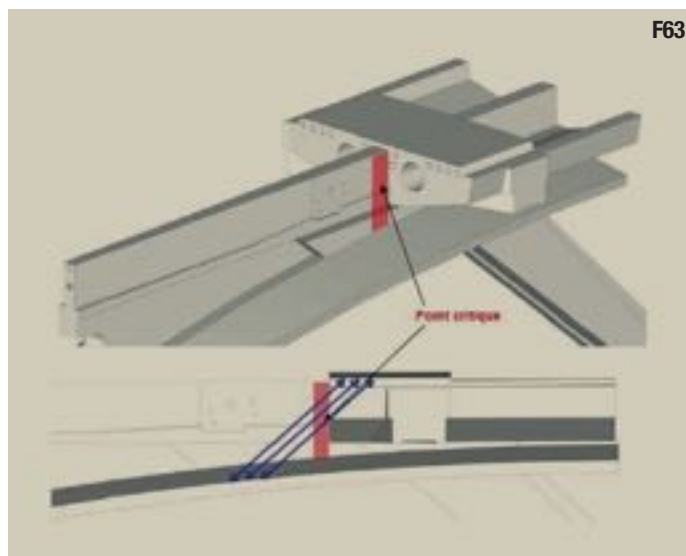
→ La retension ou la détension des tirants des arcs centraux : au cours de la construction de l'ouvrage la tension dans les tirants des trois arcs centraux aura été modifiée à sept reprises,

→ La dénivellation d'appui de certains pieds de palme en cours de construction de la structure,

→ Le vérinage sur étaie provisoires en cours de construction.

La réalisation des dernières travées P8 à P10 et P1 à P0 qui encadrent la zone des palmes préfabriquées, a été anticipée. Ces parties reposent sur des appuis provisoires adjacents aux nœuds P1 et P8. Elles sont en béton armé coulé sur cintre, donc non sensibles à la redistribution des efforts dus au fluage.

Après la réalisation du clavage des dernières travées coulées *in situ* avec la partie centrale largement préfabriquée, les dernières tâches de la construction concernent la pose des équipements de l'ouvrage.



QUELQUES DIFFICULTÉS DE JUSTIFICATION DES CONTRAINTES

Malgré le phasage de construction extrêmement sophistiqué présenté ci-dessus, issu d'un paramétrage des différentes actions de correction possibles, phasage qui ne permet pas d'interprétation, il n'a pas été possible d'obtenir un état de contrainte de la structure entièrement satisfaisant.

Cela est dû au fait que cet ouvrage est :
→ D'une part hautement hyperstatique à cause de sa complexité géométrique et structurelle,

→ Et d'autre part très tiré dans un certain nombre de zones.

Ceci est vrai que ce soit du point de vue du calcul des contraintes tangentes ou de celui des contraintes normales.

POUR LES CONTRAINTES TANGENTES

Immédiatement à l'arrière du nœud qui fait la liaison entre les palmes P3/P6 et les béquilles P4/P5 respectivement, les contraintes de cisaillement sont très élevées (Figure F63).

Le point critique a été renforcé par une précontrainte transversale inclinée à 45 degrés, constituée de 6 barres Ø 32 mm de type Freyssibar représentant un effort global effectif après mise en tension de 2.44 MN.

Ces barres sont mises en place dans la nervure/âme de la palme et mises en tension après l'enlèvement de la tour de support sous la palme (Photos P43 et P44).

Dans la même zone, les contraintes de cisaillement en partie basse de l'âme centrale ont des valeurs nettement plus élevées que celle de la contrainte admissible. De façon à résoudre cette difficulté de la précontrainte transversale a été ajoutée dans le hourdis supérieur.

Par ailleurs certaines zones ponctuelles font l'objet de dépassements modérés de contraintes tangentes. Une étude spécifique en service suivant l'Eurocode a été alors menée pour ces sections, au nombre de sept pour chaque demi-tablier. Elle a permis de constater que dans ce nouveau cadre réglementaire les contraintes redevenaient admissibles. Cette approche particulière a été validée par le Maître d'œuvre et le Maître d'ouvrage.

POUR LES CONTRAINTES NORMALES

De même, certaines zones ponctuelles font l'objet de dépassements modérés de contraintes normales. Il s'agit de cinq sections pour chaque demi-tablier et de deux sections des palmes P3 et P6



de chaque tablier, soit en construction, soit en service.

Une étude spécifique suivant l'Eurocode a été alors menée pour ces sections. Elle a permis de constater que dans ce nouveau cadre réglementaire les contraintes redevenaient admissibles.

Cette approche particulière a été validée par le Maître d'œuvre et le Maître d'ouvrage.

En outre le béton contractuel constituant la structure est un B65.

Les essais effectués sur site ont mis en évidence que la résistance réelle de ce béton correspondait à un B80.

Ces deux considérations ont finalement permis de valider l'ensemble de l'état de contrainte de la structure.

CONCLUSION

La réalisation des études de cet ouvrage exceptionnel, tant par les formes que par le comportement, a nécessité de très importants investissements en moyens informatiques et humains dans le domaine des calculs de structure comme dans celui de la conception des plans d'exécution.

Ces études ont permis la production de 120 notes de calculs et de 1 500 plans d'exécution, ce qui est hors du commun pour un ouvrage de cette dimension.

L'ouvrage terminé présente un aspect en harmonie avec sa qualité architecturale. L'Entreprise a réalisé un excellent travail dans des conditions qui parfois ne laissaient place à aucune marge de manœuvre. Elle a su fabriquer une structure dont la qualité est à la hauteur des exigences élevées de l'Architecte. □

P43- Six barres Ø 32 inclinées.
P44- Six barres Ø 32 inclinées.

P43- Six inclined bars of dia. 32 mm.
P44- Six inclined bars of dia. 32 mm.

LES ACTEURS

MAÎTRE D'OUVRAGE : Agence pour l'Aménagement de la Vallée du Bouregreg (AAVB)*

ARCHITECTES DU PROJET GLOBAL D'AMÉNAGEMENT : Bernard Reichen & Philippe Robert

MAÎTRE D'ŒUVRE/ARCHITECTE DU FRANCHISSEMENT : Cabinet Marc Mimram

ENTREPRISE : Société Générale des Travaux du Maroc (SGTM)

BUREAU D'ÉTUDES : EGIS JMI

PRÉCONTRAÎNTE, APPAREILS D'APPUI, JOINTS DE CHAUSSÉE, MÉTHODES (PARTIEL) : Freyssinet

ABSTRACT

HASSAN II BRIDGE OVER WADI BOUREGREG IN RABAT (MOROCCO)

EGIS JMI: MICHEL DUVIARD, BENJAMIN LUSK, ARNOLD LEDAN

The Hassan II Bridge is one of the bridges linking, above the Bouregreg estuary, about 2 km from the Atlantic Ocean, the cities of Rabat – capital of Morocco – and Salé.

On 18 May 2011, it was inaugurated by King Mohammed VI, together with the Rabat-Salé tramway, which passes over it. Hassan II Bridge is part of a vast project for development of Bouregreg Valley and is one of the first major achievements of this project initiated by the King. □

EL PUENTE HASSAN II SOBRE EL RÍO BU REGREG EN RABAT (MARRUECOS)

EGIS JMI: MICHEL DUVIARD, BENJAMIN LUSK, ARNOLD LEDAN

El puente Hassan II es uno de los puentes que comunican, por encima del estuario del Bu Regreg, aproximadamente a 2 kilómetros del océano Atlántico, las ciudades de Rabat capital de Marruecos y Salé.

El 18 de mayo de 2011, el rey Mohammed VI inauguró este puente y el tranvía de Rabat Salé, del que es uno de los lugares de paso. El puente Hassan II se inscribe en un vasto proyecto de desarrollo para la ordenación del valle del Bu Regreg y forma parte de las primeras grandes realizaciones de este proyecto iniciado por el rey. □

RÉPERTOIRE DES FOURNISSEURS

MATERIEL DE TERRASSEMENT



Ammann France - ZI Les Petites Haies
31/33, rue de Valenton - 94046 Cretail Cedex
Tél. 01 45 17 08 88 - Fax 01 45 17 08 90
Email : info.af@ammann-group.com
www.ammann-group.com



BOBCAT/BPV - B.P.3 - 27320 NONANCOURT
N° Vert Indigo
0 825 08 43 81



FRANCE
PLUS DE 650 Machines et
700 Équipements en TP, PL,
Lavage et Manutention
T : 00 33 10 3 23 04 00 68
F : 00 33 10 3 23 68 53 80
Mail : sodineg@wanadoo.fr
DEPOTS 02 ET 74

■ CHARGEUSE SUR PNEUMATIQUES

BOBCAT EUROPE
J. Huysmanslaan 59 B
1651 Lot - Belgique
Tél. 00 32 2 371 68 11
Fax 00 32 2 371 69 00

**VOLVO
CONSTRUCTION EQUIPMENT -
EUROPE SAS**
37, avenue Georges Politzer - BP 117
78192 Trappes Cedex
Tél. 01 30 69 28 28
Fax 01 30 69 83 39
www.volvoce.com

■ MINI-PELLE

**VOLVO
CONSTRUCTION EQUIPMENT -
EUROPE SAS**
37, avenue Georges Politzer - BP 117
78192 Trappes Cedex
Tél. 01 30 69 28 28
Fax 01 30 69 83 39
www.volvoce.com

■ NIVELEUSE AUTOMOTRICE

**VOLVO
CONSTRUCTION EQUIPMENT -
EUROPE SAS**
37, avenue Georges Politzer - BP 117
78192 Trappes Cedex
Tél. 01 30 69 28 28
Fax 01 30 69 83 39
www.volvoce.com

■ PELLE HYDRAULIQUE SUR CHENILLES

**VOLVO
CONSTRUCTION EQUIPMENT -
EUROPE SAS**
37, avenue Georges Politzer - BP 117
78192 Trappes Cedex
Tél. 01 30 69 28 28
Fax 01 30 69 83 39
www.volvoce.com

■ ÉQUIPEMENTS POUR ENGIN DE TERRASSEMENT

ONE - TP.COM
1 Place du 8 Mai 1945
60119 Neuville Bosc
Tél. 01 30 37 06 26
Fax 01 34 40 01 44

MATERIEL POUR LA PRODUCTION D'AIR COMPRIME ET TRAVAUX D'ABATTAGE

■ MARTEAU BRISE-ROCHE HYDRAULIQUE

**ATLAS COPCO FORAGE
ET DÉMOLITION SA**
ZI du Vert Galant - 2, av. de l'Éguillette
BP 7181 - Saint-Ouen-l'Aumône
95056 Cergy-Pontoise Cedex
Tél. 01 39 09 32 22
Fax 01 39 09 32 49

■ PELLE HYDRAULIQUE SUR PNEUMATIQUES

**VOLVO
CONSTRUCTION EQUIPMENT -
EUROPE SAS**
37, avenue Georges Politzer - BP 117
78192 Trappes Cedex
Tél. 01 30 69 28 28
Fax 01 30 69 83 39
www.volvoce.com

■ TOMBEREAU AUTOMOTEUR ARTICULÉ

**VOLVO
CONSTRUCTION EQUIPMENT -
EUROPE SAS**
37, avenue Georges Politzer - BP 117
78192 Trappes Cedex
Tél. 01 30 69 28 28
Fax 01 30 69 83 39
www.volvoce.com

■ CHARGEUSE PELLEUSE (BACKHOE LOADER)

**VOLVO
CONSTRUCTION EQUIPMENT -
EUROPE SAS**
37, avenue Georges Politzer - BP 117
78192 Trappes Cedex
Tél. 01 30 69 28 28
Fax 01 30 69 83 39
www.volvoce.com

MATERIEL DE LEVAGE ET DE MANUTENTION



Coffrages et Etaisements
PERI S.A.S.
Z.I. Nord - 34/36, rue des Frères Lumière
77109 Meaux cedex
Tél. : 01 64 35 24 40 - Fax : 01 64 35 24 50
peri.sas@peri.fr
www.peri.fr

MATERIEL POUR LA CONSTRUCTION ET L'ENTRETIEN DES ROUTES



Ammann France - ZI Les Petites Haies
31/33, rue de Valenton - 94046 Cretail Cedex
Tél. 01 45 17 08 88 - Fax 01 45 17 08 90
Email : info.af@ammann-group.com
www.ammann-group.com



2, avenue du Général de Gaulle
91170 VIRY CHATILLON
Tél. : 01 69 57 86 00 - Fax : 01 69 96 26 60
www.bomag.com



WIRTGEN FRANCE
WIRTGEN
Fraiseuses sur roues et sur chenilles
Recycleurs à froid / Stabilisatrices de sol
Machines à coffrage glissant / Mineurs de surface
Outils au carbure Betek/Sitek
VÖGELE
Finisseurs sur pneus et sur chenilles / Alimentateurs
HAMM
Rouleaux tandem vibrants
Compacteurs à pneus
Compacteurs monocylindre vibrants
KLEEMANN
Installations de concassage mobiles et fixes / cribles
Distributeur exclusif pour la France des épandeurs
de liants pulvérulents
STREUMASTER série SW
WIRTGEN FRANCE
BP 31633 - 7, rue Marc Seguin
95696 Goussainville Cedex
Tél. : 01 30 18 95 95 - Fax : 01 30 18 15 49
E-mail : contact@wirtgen.fr
www.wirtgen.fr

METALLIANCE

ZI de la Saule - BP 111
71304 Montceau Cedex
Tél. 03 85 57 01 34
Fax 03 85 57 88 73

■ MACHINE POUR LA STABILISATION ET LE RECYCLAGE DE CHAUSSÉES

RABAUD

Bellevue - 85110 Sainte-Cécile
Tél. : 02 51 48 51 58
Fax 02 51 40 22 97
www.rabaud.com
info@rabaud.com

MATERIEL TOPOGRAPHIQUE - LASER - GUIDAGE D'ENGIN

■ TRAVAUX SOUTERRAINS



**AUSCULTATIONS
Automatiques**
Tél. 01 41 42 06 30
Fax 01 41 42 06 31
www.miretopo.com

■ LEVÉE BATHYMÉTRIQUE



Bureau d'Etude
Bathymétrie - Topographie
Suivi de travaux & Suivi d'Ouvrages
Tél : 06 67 79 05 16 - 06 99 48 45 27
www.bathys.fr - contact@bathys.fr

CE GUIDE RENSEIGNE SUR LES PRODUCTIONS DES FOURNISSEURS DE MATÉRIEL, ÉQUIPEMENT OU SERVICES. SI VOUS DÉSIREZ ÊTRE RÉPERTORIÉS DANS CES RUBRIQUES, ADRESSEZ-VOUS À : RÉGIE PUBLICITÉ INDUSTRIELLE - 9, BD MENDÈS FRANCE - 77600 BUSSY-SAINT-GEORGES - TÉL. : 01 60 94 22 20 - TARIF : 100 € HT PAR LIGNE ET PAR RUBRIQUE OU 230 € HT LE CM COLONNE POUR UNE ANNÉE DE PARUTION.

MATERIEL DE CONCASSAGE - BROYAGE - CRIBLAGE



metso
Concassage, broyage, criblage, manutention
Matériels et installations fixes et mobiles
Installations de recyclage
Transporteurs et accessoires
Pièces d'usure et de rechange
Produits anti-usure, blindages, capotages
Pompes
(Nordberg-Svedala-Trellex-Lindemann)
Metso Minerals (France)
41, rue de la République - 71009 Mâcon Cedex
Tél. : 03 85 39 62 00 - Fax : 03 85 39 62 49
www.metso.com

■ POSTE D'ÉGOUTTAGE DES SABLES AVEC TRAITEMENT DES EAUX DE LAVAGE

SOTRES

Parc Européen des entreprises
BP 80072 - Rue Richard Wagner
63200 RIOM
Tél. 04 73 15 36 00
Fax 04 73 15 36 20

■ INSTALLATIONS MOBILES DE CONCASSAGE-CRIBLAGE

GRAVEL

1 Chemin de Villers à Combault
94420 Le Plessis Trevisse
Tél. 01 45 94 59 53
Fax 01 45 94 59 83

MATERIEL FLOTTANT ET MATERIEL DE PLONGÉE POUR TRAVAUX FLUVIAUX ET MARITIMES

■ PONTON MÉTALLIQUE DÉMONTABLE

LEDUC T.P

1, rue de Folenrue
27202 VERNON cedex
Tél. 02 32 51 74 97
Fax 02 32 51 57 18

MATERIEL DE SONDRAGE, FORAGE, FONDATIONS SPECIALES ET INJECTION



G-OCTOPUS
www.g-octopus.com
Tél. : +33 01 47 32 48 30

■ DÉSABLEUR DE BOUES

SOTRES

Parc Européen des entreprises
BP 80072 - Rue Richard Wagner
63200 RIOM
Tél. 04 73 15 36 00
Fax 04 73 15 36 20

■ SONDEUSE DE RECONNAISSANCE ET FOREUSE EN ROTATION

ATLAS COPCO FORAGE ET DÉMOLITION SA

ZI du Vert Galant
2, av. de l'Eguillette - BP 7181
Saint-Ouen-l'Aumône
95056 Cergy-Pontoise Cedex
Tél. 01 39 09 32 22
Fax 01 39 09 32 49

■ POMPES À BOUES

ATLAS COPCO FORAGE ET DÉMOLITION SA

ZI du Vert Galant
2, av. de l'Eguillette - BP 7181
Saint-Ouen-l'Aumône
95056 Cergy-Pontoise Cedex
Tél. 01 39 09 32 22
Fax 01 39 09 32 49

■ PRESSE D'INJECTION

ATLAS COPCO FORAGE ET DÉMOLITION SA

ZI du Vert Galant
2, av. de l'Eguillette - BP 7181
Saint-Ouen-l'Aumône
95056 Cergy-Pontoise Cedex
Tél. 01 39 09 32 22
Fax 01 39 09 32 49

MATERIEL SPECIAL POUR LA POSE DE CANALISATIONS



MARAIIS
Marais Contracting Services
1, rue Pierre et Marie Curie
49430 DURTAL
Tél : 02 41 96 16 99 - Fax : 02 41 96 16 99
Email : info@marais.com - Web : www.marais.com

■ TRANCHEUSE

MARAIIS CONTRACTING SERVICES

1, rue Pierre et Marie Curie
ZA "Les portes d'Anjou" - BP 20
49430 DURTAL
Tél. 02 41 96 16 90
Fax 02 41 96 16 99

MATERIEL POUR TRAVAUX SOUTERRAINS



ATLAS COPCO FORAGE ET DÉMOLITION S.A.S.
Z.I. du Vert Galant - 2, avenue de l'Eguillette
B.P. 7181 - Saint-Ouen-l'Aumône
95056 Cergy-Pontoise cedex
Atlas Copco
Tél. : 33 (0) 1 39 09 32 22
Fax : 33 (0) 1 39 09 32 49
www.atlascopco.fr



Ducrocq
Ingénierie Process
ZA Ecoles 42190 MONTREUIL-SUR-LOIRE
Tél : 03 21 99 02 60 - Fax : 03 21 99 02 60
E-mail : ducrocq.industrie@wanadoo.fr
Site Internet : www.ducrocq.ingenierie-process.com

METALLIANCE

ZI de la Saule
BP 111
71304 Montceau Cedex
Tél. 03 85 57 01 34
Fax 03 85 57 88 73

■ BERLINE

PATRY SA

24, rue du 8 mai 1945
95340 Persan
Tél. 01 39 37 45 45
Fax 01 39 37 45 44
www.patry.fr

TECHNICRIBLE

Zone industrielle
81150 LAGRAVE
Tél. 05 63 81 41 57
Fax 05 63 81 41 56

■ LOCOTRACTEUR DE MANŒUVRE

PATRY SA

24, rue du 8 mai 1945
95340 Persan
Tél. 01 39 37 45 45
Fax 01 39 37 45 44
www.patry.fr

■ MACHINE D'ATTAQUE PONCTUELLE À FRAISE (RADIALE-TANGENTIELLE)

METALLIANCE

ZI de la Saule
BP 111
71304 Montceau Cedex
Tél. 03 85 57 01 34
Fax 03 85 57 88 73

■ ENGIN DE BOULONNAGE

ATLAS COPCO FORAGE ET DÉMOLITION SA

ZI du Vert Galant
2, av. de l'Eguillette
BP 7181 Saint-Ouen-l'Aumône
95056 Cergy-Pontoise Cedex
Tél. 01 39 09 32 22
Fax 01 39 09 32 49

■ ENGIN DE FORATION

ATLAS COPCO FORAGE ET DÉMOLITION SA

ZI du Vert Galant
2, av. de l'Eguillette
BP 7181 Saint-Ouen-l'Aumône
95056 Cergy-Pontoise Cedex
Tél. 01 39 09 32 22
Fax 01 39 09 32 49

MATERIEL POUR TRAITEMENT DE LA TERRE



Lhoist France
Une société du Groupe Lhoist
105, Rue de l'Inde - 75004 Paris Cedex 04
Tel. : +33 (0)1 42 45 20 00 - Fax : +33 (0)1 42 45 80 14
www.lhoist.com

BUREAU ETUDES



25 agences en France
RINCENBTP
8 agences à l'International
www.rincenbtp.fr
Tél. +33 (1) 60 87 21 25
direction.technique@rincenbtp.fr



CATHIE ASSOCIATES
www.cathie-associates.com
Tél. : +33 1 47 32 48 30

MATERIEL DE PRODUCTION, DE TRANSFORMATION ET DE DISTRIBUTION DE L'ENERGIE

SDMO INDUSTRIE

12 Bis, rue de la Villeneuve BP 241
29272 Brest cedex
Tél. 02 98 41 41 41
Fax 02 98 41 13 10

MATÉRIEL POUR LES TRAVAUX PUBLICS

CHOISISSEZ VOS RUBRIQUES ET SOYEZ PRÉSENT PENDANT 1 AN DANS TOUS LES NUMÉROS DE TRAVAUX. POUR TOUT CONTACT, APPELEZ : RÉGIE PUBLICITÉ INDUSTRIELLE, 9, BD MENDÈS FRANCE - 77600 BUSSY-SAINT-GEORGES - XAVIER BERTRAND - TÉL. : 01 60 94 22 20

MATÉRIEL D'ALIMENTATION EN EAU ET D'ÉPUISEMENT

- POMPE À DIAPHRAGME
- POMPE BASSE PRESSION POUR EAUX CHARGÉES
- POMPE HAUTE PRESSION, LAVAGE, LANÇAGE
- ALIMENTATION GRANDE HAUTEUR
- POMPE POUR RABATTEMENT DE NAPPE
- POMPE SUBMERSIBLE

MATÉRIEL DE BATTAGE ET D'ARRACHAGE

- MARTEAU
- MOUTON
- VIBRATEUR DE FONÇAGE ET D'ARRACHAGE

MATÉRIEL POUR LA PRODUCTION D'AIR COMPRIMÉ ET TRAVAUX D'ABATTAGE

- CHARIOT DE FORAGE (WAGON DRILL)
- COMPRESSEUR À VIS SUR ROUES - INSONORISÉ
- ELECTRO-COMPRESSEUR, SEMI-FIXE - INSONORISÉ
- MARTEAU BRISE-ROCHE HYDRAULIQUE
- PINCE ET CISAILLE DE DÉMOLITION

MATÉRIEL DE TERRASSEMENT

- CHARGEUSE SUR CHENILLES
- CHARGEUSE SUR PNEUMATIQUES
- CHARGEUSE PELLEUSE (BACKHOE LEADER)
- DÉCAPEUSE AUTOMOTRICE AVEC OU SANS AUTOCHARGEUR (MOTORSCRAPER)
- MINI-PELLE
- MOTO-BASCULEUR
- NIVELEUSE AUTOMOTRICE
- PELLE À CÂBLES SUR CHENILLES
- PELLE HYDRAULIQUE SUR PNEUMATIQUES
- PELLE SPÉCIALE AVANCEMENT AU PAS
- TOMBREAU AUTOMOTEUR À CHÂSSIS RIGIDE
- TOMBREAU AUTOMOTEUR ARTICULÉ
- TRACTEUR INDUSTRIEL ET FORESTIER 4 X 4
- TRACTEUR SUR CHENILLES (BOUTEUR, BULLDOZER)
- TRACTEUR SUR PNEUMATIQUES

MATÉRIEL DE TRANSPORT ROUTIER

- CAMIONNETTE TOUTS CHEMINS 4 X 4 < 3,5 T
- CAMION TOUTS CHEMINS 4 X 4 > 3,5 T
- CAMION TOUTS CHEMINS 6 X 4 - 6 X 6 - 8 X 6
- REMORQUE POUR TRANSPORT D'ENGINS
- SEMI-REMORQUE À BENNE
- SEMI-REMORQUE POUR TRANSPORT D'ENGINS
- VÉHICULE TRACTEUR DE SEMI-REMORQUE 4 X 4
- VÉHICULE TRACTEUR DE SEMI-REMORQUE 6 X 4 - 6 X 6

MATÉRIEL DE LEVAGE ET DE MANUTENTION

- ASCENSEUR MIXTE (MATÉRIAUX ET PERSONNEL)
- CHARIOT ÉLÉVATEUR DE CHANTIER À PORTÉE FIXE
- CHARIOT ÉLÉVATEUR DE CHANTIER À PORTÉE VARIABLE

- ELÉVATEUR HYDRAULIQUE À NACELLE
- GRUE AUTOMOTRICE SUR PNEUMATIQUES
- GRUE AUXILIAIRE DE VÉHICULE
- GRUE ROUTIÈRE
- GRUE SUR CHENILLES
- GRUE À TOUR (MONTAGE PAR ÉLÉMENTS)
- GRUE À TOUR (DÉPLIAGE AUTOMONTABLE)
- PLATE-FORME ÉLÉVATRICE

MATÉRIEL POUR LA CONSTRUCTION ET L'ENTRETIEN DES ROUTES

- ALIMENTATEUR DE FINISSEUR
- BALAYEUSE PORTÉE OU SEMI-PORTÉE
- BALAYEUSE RAMASSEUSE AUTOMOTRICE
- BALAYEUSE TRACTÉE
- CITERNE MOBILE DE STOCKAGE ET DE CHAUFFAGE DES LIANTS
- COMPACTEUR AUTOMOTEUR À PIEDS DAMEURS
- COMPACTEUR AUTOMOTEUR À PNEUS
- COMPACTEUR AUTOMOTEUR MIXTE
- COMPACTEUR STATIQUE AUTOMOTEUR TANDEM
- COMPACTEUR VIBRANT AUTOMOBILE, MONOCYLINDRE VIBRANT - LISSE ET PIEDS DAMEURS - LIGNE MOTRICE À 2 PNEUS
- COMPACTEUR VIBRANT AUTOMOTEUR TANDEM - 1 ET 2 CYLINDRES VIBRANTS
- COMPACTEUR VIBRANT, GUIDAGE À MAIN ET DUPLEX
- COMPACTEUR VIBRANT TRACTÉ, MONOCYLINDRE, LISSE OU PIEDS DAMEURS
- DÉPOUSSIÉREUR À TISSU FILTRANT
- DÉPOUSSIÉREUR À VOIE HUMIDE
- DOSEUR À PULVÉRULENTS
- ÉPANDEUR LATÉRAL (ÉLARGISSEUR DE ROUTE)
- FINISSEUR
- FRAISEUSE AUTOMOTRICE ET RETRAITEMENT DE CHAUSSÉES
- GRAVILLONNEUR AUTOMOTEUR
- GRAVILLONNEUR PORTÉ
- MACHINE À COULIS BITUMINEUX À FROID
- MACHINE POUR FABRICATION DE BORDURES ET CANIVEAUX
- MALAXEUR CONTINU À FROID
- MALAXEUR DISCONTINU D'ENROBAGE
- MATÉRIEL DE RÉPANDAGE ET GRAVILLONNAGE INTÉGRÉ
- PILONNEUSE
- PLAQUE VIBRANTE
- PULVÉRISATEUR MÉLANGEUR (RETRAIEMENT DE CHAUSSÉE)
- RÉPANDEUR DOSEUR DE PULVÉRULENTS
- RÉPANDEUSE DE LIANTS (ÉQUIPEMENT)
- SABLEUSE-SALEUSE
- SÉCHEUR
- TAMBOUR SÉCHEUR AVEC TAMBOUR ENROBEUR SÉPARÉ
- TAMBOUR SÉCHEUR ENROBEUR À CONTRE COURANT
- TAMBOUR SÉCHEUR ENROBEUR À FLUX PARALLÈLES
- TAMBOUR SÉCHEUR ENROBEUR À ENROBAGE SÉPARÉ DOUBLE TAMBOUR CONCENTRIQUE
- TRÉMIE DE STOCKAGE D'ENROBÉS
- TRÉMIE DE STOCKAGE DE PRODUITS STABILISÉS
- TRÉMIE PRÉDOSEUSE À GRANULATS
- VIBREUSE SURFACEUSE DE BÉTON À COFFRAGE GLISSANT (SLIP FORM PAVER)

MATÉRIEL DE CONCASSAGE - BROYAGE - CRIBLAGE

- ALIMENTATEUR À MOUVEMENT ALTERNATIF
- ALIMENTATEUR À TABLIER MÉTALLIQUE
- ALIMENTATEUR VIBRANT
- BROYEUR À BARRES
- BROYEUR À PERCUSSION À AXE VERTICAL
- BROYEUR À PERCUSSION À MARTEAUX
- CONCASSEUR À MÂCHOIRES
- CONCASSEUR À PERCUSSION À BATTOIRS
- CONCASSEUR À TAMBOUR DE FRAPPE
- CONCASSEUR GIRATOIRE (PRIMAIRE, SECONDAIRE)
- CONCASSEUR GIRATOIRE (SECONDAIRE, TERTIAIRE)
- CONCASSEUR MOBILE SUR CHENILLES
- CRIBLE VIBRANT
- DÉCANTEUR ÉGOUTTEUR À AUBES
- DÉTECTEUR DE MÉTAUX
- LAVEUR DÉBOURBEUR
- MALAXEUR À TAMBOUR
- POSTE D'ÉGOUTTAGE DES SABLES AVEC TRAITEMENT DES EAUX DE LAVAGE
- SÉPARATEUR EXTRACTEUR MAGNÉTIQUE
- TRANSPORTEUR, CRIBLEUR MOBILE À COURROIE (SAUTERELLE-CRIBLEUSE)
- TRANSPORTEUR MOBILE À COURROIE (SAUTERELLE)

MATÉRIEL POUR LA FABRICATION, LE TRANSPORT ET LA MISE EN PLACE DES BÉTONS, MORTIERS ET ENDUITS

- AUTOBÉTONNIÈRE
- BÉTONNIÈRE
- BÉTONNIÈRE PORTÉE (TRUCK MIXER)
- CENTRALE MOBILE ET SEMI-MOBILE
- COFFRAGE (BANCHE)
- DESSACHEUSE AUTOMATIQUE
- DRAGLINE
- ECHAFAUDAGE AUTO-ÉLÉVATEUR
- MACHINE À PROJETER LE BÉTON
- MALAXEUR À AXES HORIZONTAUX
- MALAXEUR À AXE VERTICAL
- POMPE À BÉTON DE CHANTIER
- POMPE À BÉTON SUR PORTEUR
- SIDE-BOOM : VOIR TRACTEUR SUR CHENILLES, POSEUR DE CANALISATIONS
- TAPIS DISTRIBUTEUR DE BÉTON
- TRANSPORTEUR À AIR COMPRIMÉ
- TRÉMIE AGITATRICE À BÉTON SIMPLE
- TRÉMIE AGITATRICE À BÉTON RELEVABLE

MATÉRIEL DE PRODUCTION, DE TRANSFORMATION ET DE DISTRIBUTION DE L'ÉNERGIE

- GROUPE ÉLECTROGÈNE À MOTEUR DIESEL
- POSTE MOBILE DE LIVRAISON TYPE EXTÉRIEUR
- POSTE MOBILE DE TRANSFORMATION TYPE EXTÉRIEUR
- TRANSFORMATEUR TRIPHASÉ POUR CABINE

BARAQUEMENTS

- BARAQUEMENT MÉTALLIQUE DÉMONTABLE
- BARAQUEMENT MOBILE DE CHANTIER

MATÉRIEL FLOTTANT ET MATÉRIEL DE PLONGÉE POUR TRAVAUX FLUVIAUX ET MARITIMES

- CHALAND MÉTALLIQUE AUTOMOTEUR
- DRAGUE À CUILLÈRE (DIPPER-DREDGE)
- DRAGUE À GODETS, STATIONNAIRE
- DRAGUE SUCEUSE PORTEUSE
- DRAGUE SUCEUSE REFOULEUSE STATIONNAIRE AVEC DÉSAGRÉGATEUR
- MOTO-PROPULSEUR AMOVIBLE
- PONTON MÉTALLIQUE DÉMONTABLE
- PONTON DE SERVITUDE
- REMORQUEUR

MATÉRIEL DE SONDAGE, FORAGE, FONDATIONS SPÉCIALES ET INJECTION

- BENNE POUR PAROIS MOULÉES
- DÉSABLEUR POUR BOUES
- FOREUSE TARIÈRE SUR PORTEUR
- FOREUSE TARIÈRE (MONTAGE SUR GRUE)
- FOREUSE TARIÈRE POUR POSE DE POTEAUX
- POMPE À BOUES
- POMPE POUR JET-GROUTING
- PRESSE D'INJECTION
- SONDEUSE DE RECONNAISSANCE ET FOREUSE EN ROTATION

MATÉRIEL SPÉCIAL POUR LA POSE DE CANALISATION

- CINTREUSE HYDRAULIQUE
- CLAMP INTÉRIEUR AVEC AVANCE AUTOMATIQUE
- FONCEUR À PERCUSSION, FUSÉE
- FONDOIR À BRAI
- FORAGE DIRIGÉ (INSTALLATION)
- FOREUSE HORIZONTALE À TARIÈRE
- GROUPE AUTONOME DE SOUDAGE
- MANDRIN DE CINTRAGE
- REMORQUE PORTE-TOURET
- TRACTEUR SUR CHENILLES POSEUR DE CANALISATIONS (PIPETAYER - SIDE-BOOM)
- TRANCHEUSE
- TREUIL À CABESTAN

MATÉRIEL POUR TRAVAUX SOUTERRAINS

- BERLINE
- CHARGEUSE À ACTION CONTINUE, À BRAS DE RAMASSAGE OU GODET
- CHARGEUSE SUR PNEUMATIQUES CHARGE ET ROULE, ARTICULÉE MOTEUR DIESEL
- ENGIN DE BOULONNAGE
- ENGIN DE FORATION
- ERECTEUR DE CINTRE
- FOREUSE ALÉSEUSE
- LOCOTRACTEUR DIESEL
- LOCOTRACTEUR ÉLECTRIQUE
- MACHINE D'ATTAQUE PONCTUELLE À FRAISE (RADIALE-TANGENTIELLE)
- MICROTUNNELIER
- ROBOT DE BÉTONNAGE
- TOMBREAU AUTOMOTEUR POUR TRAVAUX SOUTERRAINS
- TRANSPORTEUR MALAXEUR
- TRÉMIE DE STOCKAGE DE DÉBLAIS
- TUNNELIER
- WAGON AUTOREMPLISSEUR ENCASTRABLE



■ RÉALISATION D'ÉLÉMENTS MÉTALLIQUES POUR OUVRAGES D'ART

- Viaduc de Millau
- Pont Massena (Paris)
- Pont d'Ondres (A63)
- Pont de Custine (54)
- Pont de Schengen (Luxembourg - Allemagne)
- Passerelle Bercy-Tolbiac (Paris)
- Pont-Canal sur l'Elbe (Magdeburg, Allemagne)

■ UNE RÉPONSE INDUSTRIELLE À TOUS VOS PROJETS

- Méthodes
- Oxycoupage / Plasma
- Mécano-soudage
- Traitement thermique
- Capacité de levage jusqu'à 120 tonnes indivisibles
- Traitement de surface
- Usinage
- Contrôles

Usine Marie-Alice Mandry - BP 46 - Z.I. du Port de Rech
F-57430 SARRALBE - www.sotralentz.com

Tél. +33 (0)3 87 98 79 00 - Fax +33 (0)3 87 98 79 07 - secofab@sotralentz.com



SECOFAB
SOTRALENTZ METAL INDUSTRIES



■ DE LA CONCEPTION À LA FABRICATION : DES SOLUTIONS INDUSTRIELLES ADAPTÉES À VOS BESOINS

- Treillis soudés optimisés et spéciaux (façonnés, optimisés...)
- Cages d'armatures de voussoirs de tunnels et de ponts
- Assemblage de treillis spéciaux
- Treillis coffrants et cages coffrantes

■ NOS RÉFÉRENCES

- Viaduc de Compiègne
- Viaduc de la Bresle (A29)
- Centre Pompidou-Metz
- Tour Oxygène (Lyon)
- Tunnel A86 SOCATOP
- Hôpital de Bougoin Jallieu...

■ SOTRALENTZ CONSTRUCTION, C'EST AUSSI :

Des produits sur stock : treillis soudés «ADETS», couronnes, ronds à béton, écarteurs de treillis soudés, treillis soudés bricolage, rouleaux / panneaux carreleur.

3 rue de Bettwiller - B.P. 90027 - F-67320 DRULINGEN - www.sotralentz.com
Tél. +33 (0)3 88 01 64 00 - Fax +33 (0)3 88 01 64 01 - construction@sotralentz.com



SOTRALENTZ
CONSTRUCTION



Une glisse parfaite



NOUVEAU: Des joints de chaussée silencieux!



Joint de dilatation MAURER XW1

Des joints de chaussée monoprofilés à faible émission sonore.

- Ondulés pour réduire le bruit, améliorer le confort de conduite et permettre une pose juste affleurante
- Jusqu'à 100 mm de longueur dilatable
- Sans entretien, autonettoyables
- Etanches grâce à leur profilé monobloc breveté
- Résistants à la corrosion: Modèle hybride sur demande
- Economiques: Pose simple et absence d'entretien
- Protégés contre les dommages causés par les chasse-neige
- Contrôlés selon les TL/TP FÜ

Notre offre de produits

- Joints de dilatation MAURER
- Appuis structuraux MAURER
- Dispositifs parasismiques MAURER
- Amortisseurs MAURER
- Monitoring MAURER

