

Travaux

n° 827

- Le 6^e pont sur la Seine à Rouen
- Le nouveau pont ferroviaire sur la Garonne à Bordeaux
- Le 2^e pont SNCF sur la Seine. Ligne Ermont – Saint-Lazare
- Le pont de Puget-Theniers sur le Var
- Le pont de Masan en Corée du Sud
- Le viaduc de la Maine sur l'A11 à Angers
- Le viaduc de la Sioule sur l'A89
- Le viaduc de Meaux. Du sous-bandage au-dessus de la Marne à la réception

Ponts

Sommaire

février 2006

Ponts

Dans les prochains numéros

Le Havre

Port 2000

International

Environnement

Réhabilitation

Énergies

renouvelables

SIAAP

Travaux

souterrains

Réseaux



◆ Autoroute A11. Contournement Nord d'Angers.
Le viaduc de la Maine
- *A11 motorway. Bypass north of Angers. The Maine viaduct*

G. Dumoulin, P. Charlon

62



◆ Le viaduc de la Sioule. Un ouvrage exceptionnel et un chantier symbole pour Sogea Construction
- *The Sioule viaduct. An exceptional structure and a symbolic project for Sogea Construction*

Fr. Batifoulier, J.-M. Benazech, Fr. Duchâtel, J. Mathiot

68



◆ Le viaduc de Meaux. Du sous-bandage au-dessus de la Marne à la réception
- *The Meaux viaduct. From sub-binding above the Marne to acceptance inspection*

M. Placidi, E. Mercier, B. Mikaelian, J.-Y. Sablon

74

**répertoire
des fournisseurs**

87

ABONNEMENT TRAVAUX

Encart après p. 48

INDEX DES ANNONCEURS

AMMANN	4	INTERMAT	4È DE COUVERTURE
CNETP	16	MILLS	11
DEMATHIEU & BARD	4	PRO BTP	2È DE COUVERTURE
ENERPAC ACTUANT France	15	SOLETANCHE BACHY	2
HUNNEBECK France.....	2	SYGMAT.....	8
ICE	12		

sommaire

Travaux
numéro 827

février 2006

Ponts



Notre couverture

Viaduc de la LGV
sur la Moselle

© Cabinet Alain Spielmann

DIRECTEUR DE LA PUBLICATION

Patrick Bernasconi

RÉDACTION

André Colson et Mona Mottot
3, rue de Berri - 75008 Paris
Tél. : (33) 01 44 13 31 83 - colsona@fnntp.fr
Tél. : (33) 01 44 13 31 03 - mottotm@fnntp.fr

SECRÉTAIRE DE RÉDACTION

Françoise Godart
Tél. : (33) 02 41 18 11 41
Fax : (33) 02 41 18 11 51
francoise.godart@wanadoo.fr

VENTES ET ABONNEMENTS

Agnès Petolon
10, rue Clément Marot - 75008 Paris
Tél. : (33) 01 40 73 80 05
revuetravaux@wanadoo.fr

France (11 numéros) : 190 € TTC
Etranger (11 numéros) : 240 €
Etudiants (11 numéros) : 75 €
Prix du numéro : 25 € (+ frais de port)

MAQUETTE

T2B & H
8/10, rue Saint-Bernard - 75011 Paris
Tél. : (33) 01 44 64 84 20

PUBLICITÉ

Régie Publicité Industrielle
Martin Fabre
61, bd de Picpus - 75012 Paris
Tél. : (33) 01 44 74 86 36

Imprimerie Chirat
Saint-Just la Pendue (Loire)

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 S.A.
3, rue de Berri - 75008 Paris
Commission paritaire n° 0106 T 80259

éditorial

Patrick Bernasconi

1

actualités

6

**recherche
et innovation**

12

**techniques
et matériaux**

15

matériels

19

PRÉFACE

Alain Spielmann

20

◆ Le 6^e pont sur la Seine à Rouen
- *The sixth bridge over the Seine in Rouen*

L. Dufau, M. Novarin, Cl. Servant, Th. Thibaux

22

◆ Le nouveau pont ferroviaire sur la Garonne à Bordeaux
- *The new rail bridge over the Garonne in Bordeaux*

Br. Flourens, Fr. Achard, P. Charlon, Ph. Ramondenc

28

◆ Le 2^e pont SNCF sur la Seine. Ligne Ermont – Saint-Lazare
- *SNCF Ermont – Saint-Lazare line. Long-span bridge over the Seine river*

J.-P. Albrecht, R. Bondi, M. Bustamante, P. Mallet

38

◆ La construction du nouveau pont de Puget-Theniers sur le Var
- *Construction of the new Puget-Theniers bridge over the Var*

Divers auteurs

45

◆ Un pont haubané au pays du Matin calme. Le pont de Masan (Corée du Sud)
- *A cable-stayed bridge in the Land of Morning Calm. Masan Bridge (South Korea)*

L. Marracci, J.-P. Viallon

53



Ré-unir

À la mémoire de Josette Colin, Jean-Luc Dufresne, Charles Lavigne, Jean Muller.

Les travaux sont une source d'inspiration pour la conception. Ils sont la vérité construite de la pensée du/des concepteurs.

Il faut élargir la conception.

L'expertise s'affaiblit et parfois même *s'effondre*.

Alors que, de la Renaissance au début du XX^e siècle, la culture du bon goût et le sens de l'universel étaient l'apanage des *hommes de l'art* et des maîtres d'œuvre, à la fin des années 1930, il y a rupture. Dans les années 1970 un archi-

tecte qui dessinait des ponts était une curiosité, voire une plaisanterie. Un architecte devait s'occuper de bâtiments.

Les ingénieurs ou les entreprises considéraient alors avec recul l'architecte qui approchait les domaines du génie civil et il est vrai que la quasi-totalité du corps des architectes ne s'intéressait pas du tout aux ouvrages d'art. Ingénieurs et architectes travaillaient dans l'isolement, bien convaincus de la suffisance de leur savoir-faire. Pourtant le résultat de l'expérience du travail commun fut immédiatement reconnu. L'esthétique, la beauté et la qualité des ponts construits en ont été améliorées. Les apports d'un esprit neuf et d'un regard renouvelé ouvraient sur la façon moderne de concevoir.

Suite à cette expérience positive, l'approche dans la conception des ouvrages s'est progressivement étendue, et la fibre des ponts qui aujourd'hui fait travailler ensemble ingénieurs et architectes fait vibrer heureusement les hommes au-delà des corporations.

Les approches croisées, entre architectes, ingénieurs et entrepreneurs, commencées localement en région parisienne à la fin des années soixante se sont étendues à la France entière en quantité et en qualité et ont souvent servi d'exemples dans d'autres pays qui s'en sont inspirés. Inversement architectes, ingénieurs et entrepreneurs de tous les pays sont venus en France voir les nouveaux ouvrages

construits. Quelques-uns même à présent y demeurent et y travaillent.

Le développement des concours de *conception-construction* est un exemple en France de cette évolution de travailler et à l'échelle de l'Europe on peut noter utilement que les deux domaines *bâtiments et travaux publics* se retrouvent unifiés dans le seul domaine de la *construction*.

La taille très importante des constructions modernes et la capacité industrielle de construire massivement en grand ont

posé le problème de l'échelle des constructions, des rapports de proportions entre ce qui se fait, ce qui existe, ce qui vit. Conséquemment est apparu le problème du rapport entre les produits neufs, actuels, et la ville et les paysages trop souvent menacés, pollués, détruits.

Les difficiles et subtiles questions de l'insertion dans un paysage, de l'adaptation aux sites, de la nécessaire protection des villes et de la préservation des patrimoines anciens et historiques, combinées à la perte de capacité dans l'expertise, ont contraint les maîtres d'ouvrage les plus lucides à élargir les champs de la réflexion, et à solliciter de nouvelles compétences regroupées en équipes. Les constructeurs doivent y être associés.

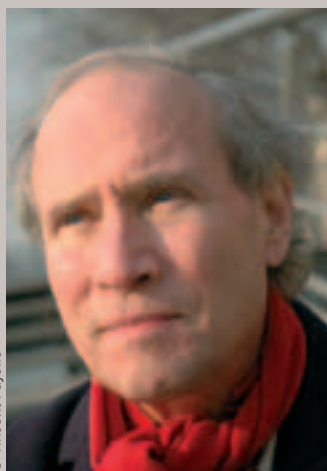
La pratique et les travaux ont trop longtemps été sous-estimés.

L'Architecte en chef ou l'Ingénieur en chef, se concentrant principalement sur la conception et laissant à d'autres *l'exécution*, a montré ses limites.

La création vient aussi de la pratique des travaux : celui qui sait construire peut créer.

Le domaine de la construction est un champ vaste ouvert à la création.

Il est souhaitable que les entreprises, grandes et petites, y participent plus activement sans toutefois réduire ou supprimer



© Vincent Fayolle

■ **ALAIN SPIELMANN**
Architecte

les tissus artisanaux encore existants où des savoirs vitaux perdurent. En respectant et en soutenant les savoir-faire anciens il sera bénéfique aux entreprises de se regrouper pour aider les artisans et les petites unités à résister à la pression économique impitoyable de ces temps, basée sur une rentabilité immédiate, sans tenir compte des moyen et long termes. Se regrouper est une nécessité pour la création et le maintien même de notre cadre de vie. C'est une nécessité pour les entreprises de se renforcer pour résister à leurs rachats potentiels et pour leur permettre de conserver et de développer leur identité propre.

La construction est le domaine du positif et son harmonie doit se vérifier à toutes ses phases dès sa conception jusqu'à sa réalisation.

Unir les différents métiers renforce les pôles de la création.

Savoir **ré-unir** les hommes *dans la vie* est un talent à encourager. Il est bien plus facile de réunir des matériels et des engins sur un chantier que de regrouper des hommes pour faire une *réunion*.

Savoir faire émerger les talents, additionner les connaissances, s'oublier dans des œuvres communes, avancer ensemble dans un même mouvement pour résoudre harmonieusement les questions souvent difficiles qui nous sont posées en terme de construction et émouvoir ce siècle naissant, voilà quelques objectifs sans doute à notre portée.

Souhaiter en ce début d'année 2006 que le monde des travaux soit beaucoup mieux connu et mieux associé aux phases de la conception doit être dit avec vigueur.

Dans la construction le génie doit être *civil*.

Franchissement de la Grande Ravine – Île de la Réunion



Le 6^e pont sur la Seine

La ville de Rouen, capitale historique de la Haute-Normandie, située près de l'estuaire de la Seine, a décidé la construction d'un nouveau pont en aval du centre-ville pour renforcer la connexion des réseaux routiers nord et sud, de manière à maintenir l'accès aux navires de grande taille et aux voiliers. Un pont-levant avec une travée centrale de 119,25 m de longueur a été retenu.

L'article décrit la conception et la construction des fondations de grande dimension supportant les deux pylônes et devant résister aux chocs éventuels de bateaux.

Une étude comparative entre plusieurs méthodes possibles est exposée et discutée.

Une utilisation extensive de petits éléments préfabriqués, clavés ensemble, et de systèmes de levage lourd synchronisés ont permis aux entreprises de mettre en œuvre une solution très économique et de qualité.

■ SITUATION GÉOGRAPHIQUE DU PROJET

La ville de Rouen, est desservie par plusieurs voies autoroutières ou routières qui franchissent la Seine en empruntant les cinq ponts existants du centre-ville.

Ce nouvel ouvrage, en cours de construction, situé en aval du pont Guillaume le Conquérant et du centre-ville permettra le raccordement de l'autoroute A13 avec l'autoroute A150 vers Dieppe et Le Havre à l'ouest de l'agglomération sans interférer avec le trafic local.

La Ville souhaitait maintenir l'accès des bateaux de croisière jusqu'au cœur de la cité et également celui des grands voiliers dont la manifestation spectaculaire, appelée "Armada", rassemble tous les 4 ans à Rouen plusieurs millions de visiteurs.

■ SOLUTIONS ENVISAGÉES

Après études comparatives des trois solutions possibles de franchissement, à savoir :

◆ tunnel ; pont fixe ; pont levant.

Le choix du mode de franchissement qui a été long et difficile s'est porté sur celui du pont levant.

En effet, la décision de construire un pont levant résulte d'un compromis : beaucoup moins coûteux qu'un tunnel, tant en investissement qu'en fonctionnement, il permet de conserver la possibilité d'accueillir des navires de grand gabarit au centre-ville, contrairement au pont fixe à gabarit fluvial. Le

pont fixe à gabarit maritime était, pour sa part, inadapté à un milieu urbain.

■ DESCRIPTION DE L'OUVRAGE

D'une longueur totale de 669 m en incluant les viaducs d'accès nord (145 m) et sud (404 m), le pont franchit la Seine à l'aide d'une travée levante de 119,25 m de portée, ce qui, compte tenu du biais de l'ouvrage (78 grades) laisse une ouverture droite de 86 m de large pour le trafic fluvial. Le tirant d'air en position basse est de 7 m, au-dessus des plus hautes eaux navigables (PHEN) et de 55 m en position haute afin de livrer passage aux navires de croisière, à ceux de la Marine Nationale et aux plus grands voiliers.

Le tablier est constitué de deux travées métalliques indépendantes, pesant chacune 1 230 t qui sont suspendues par un ensemble de câbles et poulies au sommet de deux pylônes en béton (photo 1).

Chaque pylône se dédouble en deux fûts qui reposent sur un socle ovale en béton armé d'environ 35 m de longueur et 20 m de largeur, lui-même encastré dans un ensemble de 18 pieux en béton de 1800 mm de diamètre. Le volume interne du socle, dont la majeure partie est située sous le niveau de la Seine, est occupé par la salle des treuils et divers locaux techniques.

Le choc de bateau défini au projet est de 40 MN longitudinal et 20 MN transversal et il s'exerce à 7 m au-dessus de l'eau (PHEN). Pour éviter d'appliquer directement cet effort frontal aux pylônes et entraîner ainsi des déplacements inacceptables, les socles et pylônes sont protégés par des gabions en béton armé de 20 m de diamètre et 15 m de hauteur posés directement sur le fond de la Seine. L'énergie du choc est reprise par déplacement de la structure sur le fond.

Le fond de la Seine est constitué en partie supérieure d'une couche de 3 à 5 m d'alluvions sablo-graveleuses puis d'un horizon calcaire ou marno-calcaire.

■ MÉTHODES DE CONSTRUCTION DES FONDATIONS

Solutions envisagées à l'appel d'offres

Le dossier d'appel d'offres suggérait de préfabriquer les six structures (deux socles + quatre ga-

Photo 1
Maquette du pont
levant de Rouen
Model of the Rouen
lift bridge



à Rouen

bions) sur le quai existant à proximité immédiate de l'ouvrage et de les mettre en place à l'aide d'une grue flottante de 3000 t de capacité. Après pose en fond de Seine, les pieux étaient forés à travers 18 réservations prévues dans le radier.

En phase chantier, pour des raisons de sécurité, les gabions de protection amont et aval devaient être réalisés avant de travailler à l'intérieur du socle.

Solutions étudiées par le groupement d'entreprises

Solution n° 1 - Batardeaux en palplanches

Pour construire les deux socles et les quatre gabions de protection, six batardeaux sont nécessaires et représentent un tonnage de palplanches supérieur à 1700 t donc un coût très important. Le volume intérieur des socles étant totalement occupé par des murs en béton ou des locaux techniques, il est délicat de disposer un grand nombre de butons entre les parois extérieures.

Solution n° 2 - Construction en cale sèche et remorquage

Cette solution a été étudiée en utilisant la Forme 7 du Havre (cale sèche) et en remorquant chacune des six structures du Havre à Rouen en remontant la Seine.

Les calculs ont montré une instabilité notoire des socles et gabions en flottaison, nécessitant de réduire l'épaisseur des murs en 1^{re} phase, puis de les compléter après échouage.

D'autre part cette méthode impose de régler soigneusement le terrain en place pour assurer la verticabilité du socle.

Enfin, le forage des pieux ne débute qu'après échouage et donc très tardivement dans le planning.

Solution n° 3 - Construction sur ponton

Cette solution, utilisée pour certains tunnels immergés, consiste à fabriquer successivement les six éléments sur un ponton puis à immerger ce dernier pour mettre chaque structure en flottaison. Ici également les contraintes de délai et de coût sont importantes et n'ont pu être satisfaites.

Solution n° 4 - Préfabrication sur quai et pose à la grue flottante

La solution suggérée à l'appel d'offres a été écartée car d'une part le quai existant datant du XIX^e siècle devait être renforcé pour supporter le poids des structures, d'autre part le faible nombre de grues pouvant réaliser l'opération et surtout la contrain-

te de démarrage des pieux après pose des structures compromettaient le respect du programme.

Solution retenue: préfabrication et descente par véringage

Principe

Construire chaque structure (gabions ou socles) au sommet des pieux, au-dessus de l'eau, par assemblage de sous-éléments en béton, puis descendre l'ensemble au moyen d'un système de levage synchronisé.

Avantages:

- ◆ anticiper au maximum la phase de forage des pieux;
- ◆ diminuer drastiquement les moyens de levage et les moyens nautiques;
- ◆ gagner en précision d'exécution;
- ◆ minimiser le matériel spécifique (structures provisoires, palplanches, etc.);
- ◆ minimiser les aléas liés à la réalisation des appuis en Seine.



Photo 2
Pont de Normandie - Viaduc nord.
Construction des fondations

Normandy Bridge - Northern viaduct.
Construction of the foundations

L'expérience du pont de Normandie

L'entreprise avait eu à résoudre un problème similaire une douzaine d'années auparavant en aval de Rouen lors de la construction du pont de Normandie (photo 2).

Les fondations du viaduc d'accès nord étaient constituées de semelles cylindriques en béton armé posées sur un groupe de quatre à cinq pieux de

Louis Dufau
INGÉNIEUR PRINCIPAL
Eiffage TP

Marco Novarin
INGÉNIEUR D'ÉTUDES
Eiffage TP

Claude Servant
DIRECTEUR SCIENTIFIQUE
Eiffage TP

Thierry Thibaux
DIRECTION TECHNIQUE
Eiffage TP

Photo 3
Pont de Normandie.
Vérinage des semelles
de piles
Normandy Bridge.
Jacking pier foundation
slabs



1,50 m de diamètre. Les moyens de levage disponibles étant limités à 20 t et ce, quelques heures par nuit, il fut donc décidé de préfabriquer entièrement la semelle en tête de chaque pieu par assemblage puis de la descendre par vérinage. A partir "d'éléments" installés individuellement sur un tube, on constituait l'ensemble de la semelle. Le poids modeste de la structure (200 t) rendait l'opération possible à l'aide d'un groupe de barres Dywidag Ø 36 (photo 3).

Cette méthode qui avait donné entière satisfaction s'est révélée extrêmement économe en moyens spécifiques.

Pour le pont levant de Rouen, il fut décidé de transposer la méthode en utilisant un système de levage hydraulique synchronisé, comme décrit plus loin.

Construction des socles

Leur construction se déroule selon le phasage suivant :

- ◆ forage et bétonnage des pieux Ø 1800 (longueur 22 m environ) à partir d'une estacade d'environ 30 ml de longueur permettant l'accès de grues terrestres sur chenilles ;

- ◆ le fond du socle en béton armé est divisé en 19 éléments préfabriqués de poids unitaire inférieur à 20 t et d'environ 20 cm d'épaisseur (photo 4). Une partie d'entre eux est accrochée en tête des pieux définitifs qui ont été forés au préalable. La manutention est assurée par une grue à tour de 20 t de capacité.

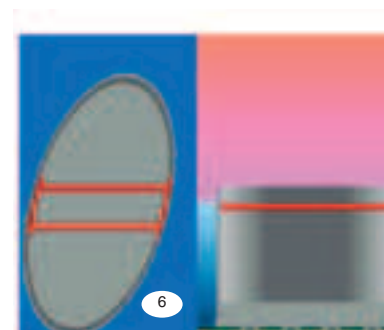
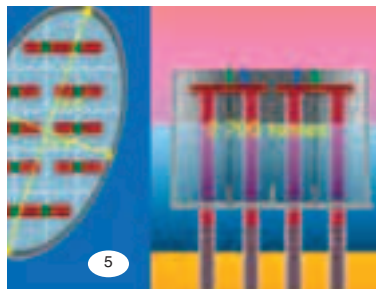
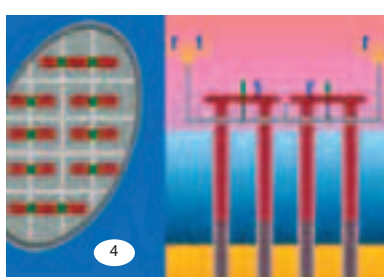
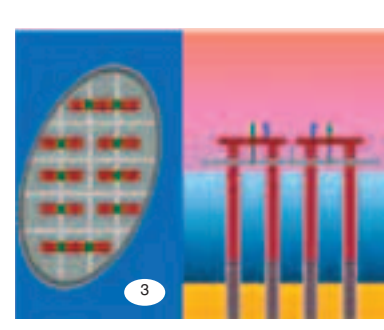
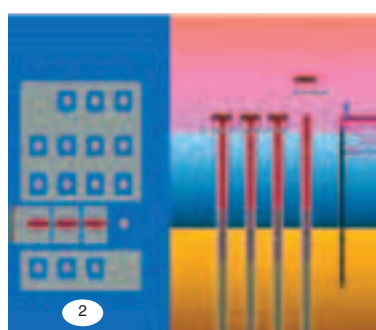
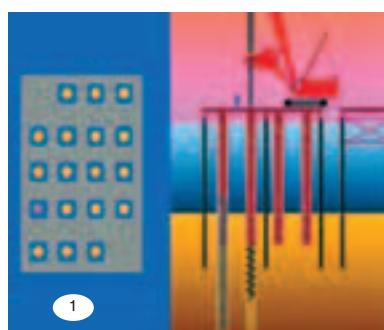
Chaque élément est porté par trois barres Dywidag Ø 36 fixées à la verticale en dessous d'une charpente de pose.

Photo 4
Socle. Assemblage
des éléments
préfabriqués
*Base. Assembling
prefabricated
elements*



Figures 1 à 6
Phasage.

- 1) Réalisation des pieux.
- 2) Mise en place des éléments préfabriqués.
- 3) Clavage, coulage des poutres de renfort et mise en place des vérins.
- 4) Réalisation des voiles en coffrage glissant.
- 5) Descente avec les vérins VSL.
- 6) Clavage, vidange et aménagement intérieur



Scheduling. 1) Pile construction. 2) Installation of prefabricated elements. 3) Keying, pouring of reinforcement girders and installing jacks. 4) Construction of shear walls in sliding formwork. 5) Lowering with the VSL jacks. 6) Keying, drainage and interior fittings

La charpente soutenant chaque élément préfabriqué en béton est munie de réglages pour tenir compte des défauts d'implantation ou de verticalité du pieu.

Après pose des éléments complémentaires et réglage, on procède au clavage de l'ensemble.

◆ avant de poursuivre la construction, on procède à l'installation de 10 vérins hydrauliques VSL type levage lourd (330 t de capacité chacun) et leur mise en tension pour reprendre la charge totale ;

◆ le radier est alors renforcé par une couche supplémentaire de béton de 30 cm puis par des éléments raidisseurs de 1,10 m de hauteur. Pour faciliter le coffrage de la base des murs extérieurs verticaux, les éléments raidisseurs sont interrompus environ 30 cm avant leur jonction avec les murs ;

◆ ces murs extérieurs (épaisseur 0,50 m) sont exécutés à l'aide de la méthode du coffrage glissant, qui a permis de réaliser 16 m de hauteur en 5 jours (travail en continu en trois postes des équipes chantier). Cette solution qui minimise les délais permet d'obtenir une bonne étanchéité en évitant des reprises horizontales entre levées (figures 1 à 6).

On peut alors procéder à la descente synchronisée de la structure (2 700 t) jusqu'à la cote théorique demandée à l'aide de 10 vérins avaleurs de câble de 330 t de capacité chacun réparti en six groupes. La descente est interrompue 30 cm environ avant le contact du fond. Un intérêt majeur de la méthode est que le fond du fleuve n'a pas besoin d'être nivelé avec précision et que l'opération est réversible en cas de difficulté. Bien entendu aucun moyen nautique (remorqueur, ancrages, etc.) n'est nécessaire ce qui n'entraîne aucune interruption du trafic fluvial.

Après vérification de l'horizontalité du socle, l'espace annulaire entre les pieux et le fond du socle est comblé par un béton immergé.

Le fond est renforcé par le coulage d'un radier en béton armé immergé de 2 m de hauteur.

Après vidange du socle (les pieux travaillent alors en traction sous la poussée d'Archimède), le radier définitif est exécuté à sec sur une hauteur de 3 m (photo 5).

Construction des gabions de protection de protection

Bien que les gabions de protection qui sont au nombre de quatre (un en amont et un en aval de chaque pile dont ils assureront la protection des socles contre les chocs de bateaux) reposent directement sur le fond de la Seine sans fondations profondes sur pieux, la même technique de construction a été utilisée.

Le phasage des travaux, pour chaque gabion, est alors le suivant.

Une grue mobile installée sur ponton flottant procède au battage de sept tubes provisoires en acier de 1,40 m de diamètre jusqu'au calcaire sain. Le



Photo 5
Socle après vidange
Base after drainage



Photo 6
Gabions de protection.
Assemblage des "pétales" en béton armé
*Protective gabions.
Assembly of the reinforced concrete "petals"*

tube central est utilisé pour l'assemblage du fond, les six autres recevront l'équipement hydraulique de descente.

Chaque tube reçoit un élément préfabriqué en béton armé, relié à ses voisins par des dalles intermédiaires (photo 6).

Après assemblage et réglage au-dessus de l'eau, on réalise les jonctions et les renforcements destinés à rigidifier le radier. Les murs cylindriques de 15 m de hauteur et 1 m d'épaisseur sont réalisés en coffrage glissant. Leur épaisseur importante (1 m) est destinée à reprendre le choc de bateau de 4 000 t défini au projet (photo 7).

Une fois terminé, le gabion, d'un poids total de 3 200 t, est alors descendu à l'aide de six ensembles de deux vérins hydrauliques de 330 t de capacité

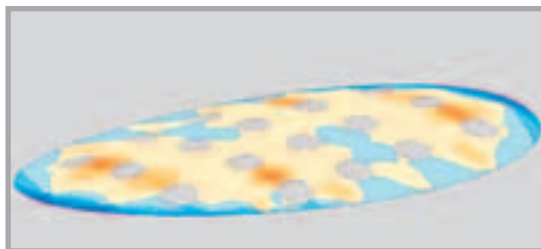
Photo 7
Gabion prêt
pour descente
Gabion ready
for lowering



Photo 8
Vérins de descente VSL :
330 t unitaire
VSL lowering jacks :
330 tonnes unit weight



Photo 9
Radier du gabion :
déformée
pendant le vérinage
Gabion foundation raft :
deformation during jacking



► unitaire installés au sommet des tubes (photo 8). Pendant cette phase, chaque tube dont la longueur libre est de plus de 16 m supporte une charge d'environ 550 t. Il a été procédé au préalable à la vérification de la qualité de l'encastrement dans le sol par traction horizontale entre deux tubes et mesure de la déformation correspondante, ce qui ne fut pas nécessaire pour les socles. Contrairement aux socles la descente est menée jusqu'au contact avec le fond de la Seine. A no-

ter que la possibilité de remonter la structure avec les vérins a été utilisée, des dépôts importants de sable ayant été constatés sur l'un des gabions. Après pose les tubes provisoires sont retirés, les orifices du fond bouchés puis l'ensemble du volume intérieur des gabions est rempli de gravier.

■ SYNCHRONISATION DU SYSTÈME HYDRAULIQUE DE DESCENTE

Socles

Comme indiqué plus haut, les socles supportant les pylônes sont descendus par dix vérins de levage disposés en six groupes. Le fond étant relativement souple et la charge engendrée par les murs verticaux très importante, un calcul fin (photo 9) du comportement du radier a été mené, ce qui a entraîné des consignes strictes sur le pilotage en déplacement des groupes de vérins (écart maximum : 5 mm).

Gabions

Le regroupement des 12 vérins en trois groupes indépendants, donc suivant un schéma isostatique ne nécessitait pas de restrictions aussi sévères. La descente s'est effectuée sans valeurs restrictives sur les allongements relatifs des câbles.

■ CONCLUSION (photo 10)

L'assemblage d'éléments préfabriqués en tête de pieux est une technique souvent utilisée pour la construction de quais ou estacades. Lorsqu'on ajou-



Photo 10
Vue générale socles et gabions
General view of bases and gabions

te à cette technique la descente synchronisée par vérins hydrauliques, on obtient une solution rapide et économe en matériels spécifiques pour la construction de piles de ponts, quais ou structures en eau profonde capable de rivaliser avec les solutions basées sur l'utilisation de caissons préfabriqués à sec et amenés par flottaison.

La technique de construction adoptée par l'entreprise pour la réalisation des socles et des gabions de protection offre donc des garanties réelles, en terme de respect du délai et des tolérances d'exécution.

LES PRINCIPAUX INTERVENANTS

Maitre d'ouvrage

Ministère de l'Équipement des Transports et du Logement

Maitre d'œuvre

DDE 76

Maitre d'œuvre de conception

Arcadis/Eurodim/Michel Virlogeux/S.E.R.F./ Cabinet d'architectes Aymeric Zublena

Constructeur

Groupement d'entreprises: Quille (mandataire) Eiffage TP - Eiffel - Victor Buyck SC

Lot 1 – Génie civil

Quille - Eiffage TP

Lot 2 – Charpente Métallique

Eiffel - Victor Buyck SC

Lot 3 – Mécanisme

Eiffel - Victor Buyck SC

ABSTRACT

The sixth bridge over the Seine in Rouen

L. Dufau, M. Novarin, Cl. Servant, Th. Thibaux

The city of Rouen, historic capital of Upper Normandy, located near the Seine estuary, decided to build a new bridge downstream of the city centre to reinforce the connection between the north and south road networks, so as to maintain access for large ships and sail boats. A lift bridge with a centre span 119,25 m long was chosen.

The article describes the design and construction of the large-size foundations which support the two towers and which must be able to withstand any impacts with boats.

A comparative study of several possible methods is outlined and discussed.

Through extensive use of small prefabricated elements, keyed together, and synchronised heavy lifting systems, the contractors were able to implement a very economical solution of high quality.

RESUMEN ESPAÑOL

El VI puente sobre el río Sena en Ruán

L. Dufau, M. Novarin, Cl. Servant y Th. Thibaux

La ciudad de Ruán, capital histórica de Alta Normandía, ubicada a proximidad del estuario del río Sena, tomó la decisión de construir un nuevo puente situado aguas abajo del casco urbano para reforzar la conexión de las redes viales norte y sur, con objeto de mantener el acceso a los buques de gran dimensión y a los veleros. Un puente ascensor con un vano central de 119,25 m de longitud fue seleccionado.

En el presente artículo se describe el establecimiento del concepto y la construcción de los cimientos de gran dimensión que soportan las dos torres y que deben resistir a los eventuales impactos acaecidos por buques.

Un estudio comparativo entre varios métodos posibles figura mencionado y debatido.

Una utilización extensiva de pequeños elementos prefabricados, enclavados conjuntamente, así como sistemas pesados de elevación sincronizados han per-

mitido a las empresas poner en aplicación una solución sumamente económica y de calidad.

Le nouveau pont ferroviaire

Réseau Ferré de France a confié, dans le cadre d'un concours de conception-réalisation, le projet du pont ferroviaire de Bordeaux à un groupement comprenant Eiffage TP (mandataire), les ingénieries SNCF (IGOA) et Greisch, les architectes Duval et De Giacinto, Eiffel et Spie Fondations.

Le tablier est un triple caisson métallique à six travées (de l'ordre de 77 m); il supporte quatre voies ferrées portées par des hourdis à poutrelles enrobées reliant les caissons. Il s'appuie sur une pile culée à terre fondée sur pieux, cinq piles en rivière sur fondations semi-profondes (batardeaux et béton de remplissage) et un portique en béton armé en extrémité rive gauche fondé sur pieux. Cet ouvrage remplacera la passerelle métallique existante qui supporte deux voies et qui a subi les outrages du temps.

■ UNE OPÉRATION DE DÉSATURATION MAJEURE POUR LA MODERNISATION DU RÉSEAU FERROVIAIRE TRANSEUROPEËN - LA PROBLÉMATIQUE

Le nœud ferroviaire de Bordeaux est un point stratégique du réseau ferré européen compte tenu, d'une part de sa situation sur le corridor ferroviaire atlantique (Benelux/Grande-Bretagne - France - Péninsule ibérique), d'autre part de sa fonction de point d'origine ou de destination des deux lignes transversales (Bordeaux - Lyon et Bordeaux - Marseille) qui permettent de rejoindre le corridor ferroviaire rhodanien. Le rôle de la gare de Bordeaux Saint-Jean (2^e gare de voyageurs de province) en matière de correspondances et l'importance des chantiers de fret (Hourcade, Bassens...) participent également au caractère stratégique de ce point.

La situation actuelle

La Garonne est franchie au nord immédiat de la gare de Bordeaux Saint-Jean, par une passerelle métallique à deux voies construite en 1860. La section de ligne à deux voies entre la gare Saint-

Jean et la bifurcation de Cenon, sur laquelle transitent en moyenne chaque jour 250 circulations, est saturée: Il n'est plus possible d'offrir aux activités fret, voyageurs grandes lignes ou TER les nouveaux sillons qu'elles demandent.

Le projet

Les partenaires intéressés par l'amélioration du réseau ferroviaire - l'État, la Région Aquitaine, la Communauté Urbaine de Bordeaux, le Conseil général de la Gironde, RFF et la SNCF - ont décidé de mettre à quatre voies la section d'une longueur de 4 km environ qui va de la gare de Bordeaux Saint-Jean à la bifurcation de Cenon. Cette réalisation permettra d'y faire passer plus de 400 trains par jour, à l'horizon 2015.

Pour ce faire, un nouveau pont ferroviaire sur la Garonne avec ses viaducs d'accès sera construit. Cet ouvrage à quatre voies sera situé entre la passerelle métallique existante et le pont routier Saint-Jean (figure 1).

En effet, la passerelle actuelle construite en 1860 par la Compagnie de matériels de chemins de fer ne sera plus apte à court terme à un usage ferroviaire. Il convient de rappeler que Gustave Eiffel, à l'époque jeune ingénieur dans cette Compagnie, en a dirigé la construction. Ses appuis sont constitués par des viroles en fonte, d'un diamètre extérieur de 3,60 m, foncées à l'air comprimé dans les alluvions de la Garonne et remplies de béton de chaux. Son tablier en fer puddlé connaît depuis plusieurs années des problèmes de "fatigue", principalement au niveau des longerons. Elle souffre également de corrosion liée à l'empilage des nombreuses tôles et cornières. Enfin, pour assurer la stabilité des appuis lors des freinages des trains il a fallu bloquer les déplacements longitudinaux des appareils d'appui et réduire la vitesse des trains. Le nouveau pont sera prolongé de part et d'autre de la Garonne par des viaducs d'accès qui conduiront à un franchissement d'une longueur de 770 m environ.

RFF a décidé de conserver la maîtrise d'ouvrage du nouveau pont ferroviaire sur la Garonne. La dévolution des travaux a donné lieu à un concours conception-réalisation organisé par RFF en 2004-2005. Cinq groupements ont concouru, à savoir:

- ◆ Eiffage TP (mandataire), SNCF, BE Greisch, Jean-Pierre Duval, Jean De Giacinto, Spie Fondations, Eiffel;
- ◆ Razel (mandataire), Ingérop, Deseuze et Zirk, Billfinger Berger, ETPO, Richard Ducros;

Figure 1
Situation
du projet

Project
location



sur la Garonne à Bordeaux



Figure 2
Vue architecturale de l'ouvrage
Architectural view of the structure

- ◆ Bouygues TP France (mandataire), Systra, Strates Selarl (Berlottier), Presspali France, DV Construction, Baudin Châteauneuf;
- ◆ Campenon Bernard (mandataire), Arcadis ESG, Alain Spielman, EMCC, Dodin, Sogea SO, Costruzioni Cimolai Armando;
- ◆ GTM génie civil (mandataire), Marc Mimram, Jean Muller International, GTM génie civil et services, Fayat, Joseph Paris, Victor Buyck.

Les projets présentés étaient très différents et intéressants. Une exposition sera d'ailleurs organisée en mars et avril 2006 afin de les présenter au public.

Le jury a désigné comme lauréat le groupement conduit par Eiffage et a classé second ex-æquo les groupements conduits respectivement par Bouygues TP France et Campenon Bernard.

La personne responsable du marché a suivi les propositions du jury.

Le marché a donc été notifié au groupement Eiffage TP le 17 novembre 2005.

Le phasage des travaux et le calendrier prévisionnel

Les déplacements de réseaux et la libération des emprises de chantier en rive droite ont été réalisés au deuxième semestre 2005, ainsi que les transplantations des pieds des deux espèces végétales protégées qui se trouvaient au droit du futur ouvrage.

Le nouveau pont sur la Garonne sera circulé par des trains commerciaux à partir de la fin du week-end du 1^{er} mai 2008. La dépose en conservation de la passerelle existante devrait intervenir pendant le deuxième semestre 2008. La mise à quatre voies entre la Benaugue et la gare de Bordeaux Saint-Jean, qui nécessite la refonte complète de l'entrée nord de la gare de Bordeaux, sera opérationnelle début 2010.

La mise à quatre voies entre la bifurcation de Cenon et la Benaugue sera mise en service pour l'arrivée de la ligne à grande vitesse Sud Europe Atlantique prévue en 2013.

Les coûts et les financements

Le coût prévisionnel de réalisation de la mise à quatre voies entre La Benaugue et Bordeaux Saint-Jean a été arrêté à 198 millions d'euros aux conditions économiques de juin 2002. Les ouvrages d'art représentent plus de la moitié de ce budget. Le montant du marché du nouveau pont ferroviaire sur la Garonne est d'environ 50 millions d'euros aux conditions économiques de janvier 2005.

La clé de financement arrêtée par les partenaires pour la mise à 4 voies entre La Benaugue et Bordeaux Saint-Jean est la suivante :

- ◆ RFF: 33,47 %;
- ◆ État: 21,77 %;
- ◆ Région Aquitaine: 18,23 %;
- ◆ Europe: 10,00 %;
- ◆ Communauté Urbaine de Bordeaux: 9,27 %;
- ◆ Département de la Gironde: 7,26 %.

La participation élevée de RFF résulte principalement du coût de remplacement à l'identique de la passerelle existante à deux voies qu'il s'avère indispensable de remplacer à court terme.

L'Etat et la Région Aquitaine ont retenu cette opération au XII^e contrat de plan. Le département de la Gironde et la Communauté Urbaine de Bordeaux ont décidé de cofinancer cette opération majeure compte tenu de son impact sur le développement de l'agglomération bordelaise et du département de la Gironde. L'Europe subventionne l'opération au titre du réseau transeuropéen de fret ferroviaire.

■ LA CONCEPTION-RÉALISATION

Le groupement Concepteur – Réalisateur et son organisation

Le jury, présidé par le président de Réseau Ferré de France, et composé des grands acteurs régionaux, du représentant de l'Etat et des partenaires du projet, a choisi au cours de l'ultime commission du 20 mai 2005 le projet (figure 2) du groupement constitué par :

Bruno Flourens



CHEF DU SERVICE
DES PROJETS
D'INVESTISSEMENT
DE LA DIRECTION
RÉGIONALE AQUITAINE
POITOU CHARENTE
Réseau Ferré de France

Françoise Achard



CHARGÉE DE PROJET
POUR LA SUPPRESSION
DU BOUCHON
FERROVIAIRE
DE BORDEAUX
Réseau Ferré de France

Patrick Charlon



DIRECTEUR
DU DÉPARTEMENT
OUVRAGE D'ART
ET DE LA DIVISION
PRÉCONTRAINTE
Eiffage TP

Philippe Ramondenc



CHEF DU DÉPARTEMENT
OUVRAGE D'ART
DE LA DIRECTION
DE L'INGÉNIERIE
SNCF (IGOA)

Figure 3
Organisation
du groupement
*Organisation
of the consortium*

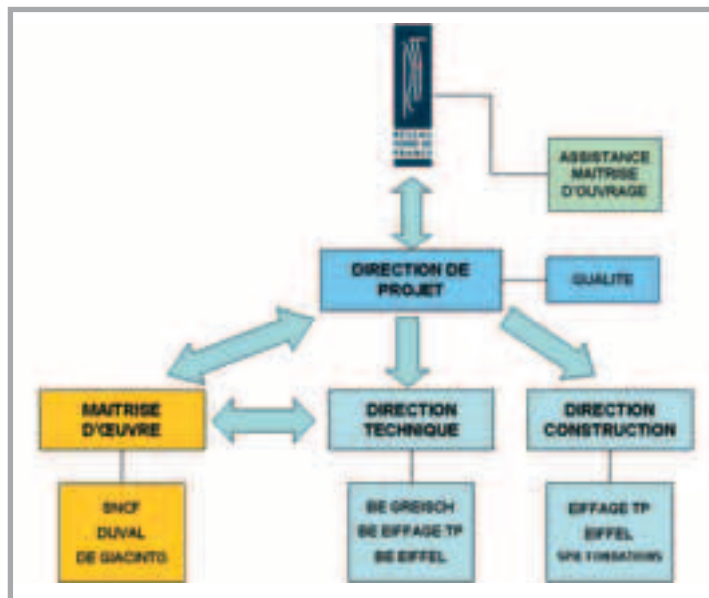


Figure 4
Elevation de l'ouvrage
Elevation view of the structure



Figure 5
Le projet en rive gauche,
côté gare Saint-jean
*The project on the left bank,
on the Saint-Jean station side*



- ◆ le mandataire Eiffage TP, qui a déjà réalisé en concession le viaduc de Millau, en conception-réalisation le viaduc de Jaulny (LGV Est), et qui réalise actuellement en concession la liaison ferroviaire Perpignan-Figueras ;
- ◆ la direction de l'ingénierie de la SNCF (IGOA) et le bureau d'études Greisch (Liège) ;
- ◆ les architectes Jean-Pierre Duval (Nîmes) et Jean De Giacinto (Bordeaux) ;
- ◆ la société Eiffel ;
- ◆ la société Spie Fondations.

L'organisation et le fonctionnement du groupement sont schématisés sur la figure 3. Pour les phases de conception et réalisation, le groupement assure sa propre maîtrise d'œuvre vis-à-vis de RFF qui s'est adjoint par ailleurs un assistant maître d'ouvrage (Setec TPI et Terrasol). Le marché a été notifié le 17 novembre 2005 ; la phase projet a été achevée fin décembre 2005 et les installations de chantier ont débuté le 1^{er} décembre 2005.

Le parti architectural (figure 4)

Les architectes du projet ont dû intégrer le site urbain du projet et tenir compte des importantes transformations prévues dans le quartier de la gare Saint-Jean (figure 5).

Le nouveau pont à quatre voies doit remplacer la passerelle existante à deux voies et assurer la jonction entre les faisceaux de voies situés rive gauche (côté gare Saint-Jean) et en rive droite, tout en franchissant des voies routières très circulées.

Au cœur de ce site urbain complexe, les architectes ont souhaité inscrire l'ouvrage dans la logique des ponts bordelais qui l'entourent, ce que traduit ainsi Jean-Pierre Duval : "Nous avons fait le pari de l'intégrer dans la continuité des ponts (routiers) bordelais sur la Garonne, pont d'Aquitaine, pont de pierre, pont Mitterrand et bien entendu pont Saint Jean, lequel sera très proche du futur ouvrage. De même, il a fallu affirmer l'horizontalité et la continuité de lecture. Ainsi le voyageur découvrira aisément la ville depuis le train, il n'y aura pas d'écran entre lui et l'horizon".

Il a fallu également insister sur la continuité existante avec les viaducs d'accès. Pour gérer les raccordements de chaque côté du fleuve, la superposition de l'ouvrage et de ses accès s'imposait : "en l'accrochant aux berges, il ne donnera pas l'image d'un ouvrage isolé".

En résumé les architectes ont eu pour objectifs principaux :

- ◆ affirmer l'horizontalité et la continuité de lecture ;
- ◆ se référer aux images des ponts bordelais ;
- ◆ poser le tablier légèrement sur ses appuis ;
- ◆ gérer les raccordements.

Une mise en lumière du pont est prévue en phase finale ; celle-ci mettra en valeur les piles et le plan d'eau. La silhouette nocturne du pont marquera ainsi l'entrée sud de la ville.

La conception technique

(figures 6, 7 et 8)

La conception du nouveau pont ferroviaire sur la Garonne, la nouvelle "passerelle" ou tout au moins sa remplaçante, résulte d'une triple ambition : en faire un ouvrage d'art en aussi parfaite harmonie avec sa ville que sait l'être le pont de Pierre – le premier d'entre ses ponts –, construire une structure qui utilise au mieux les matériaux du XXI^e siècle et en particulier l'acier, et enfin et surtout, en se servant de ces deux premiers éléments, permettre au chemin de fer d'entrer dans Bordeaux par un ouvrage qui fasse de ce dernier un véritable acteur dans l'économie nationale et régionale.

Pour ce faire, ses concepteurs l'ont voulu simple au sens où la simplicité, si elle est l'aboutissement d'une réflexion qui conduit à l'efficacité après avoir éliminé le superficiel, devient la garantie de la beauté et de la pérennité, tout en préservant l'économie.

Les ambitions techniques du projet

Le paragraphe précédent évoque le contexte urbain complexe dans lequel doit s'intégrer l'ouvrage. Il doit mettre en valeur les rives du fleuve et non les

masquer. Il doit permettre de lire de façon évidente le raccordement avec les viaducs d'accès. C'est l'un des ancrages forts du projet.

Par ailleurs, l'objet du franchissement est un pont-rail. Afin d'assurer la stabilité de la voie et donc la sécurité des circulations ferroviaires, il doit être quasiment indéformable, tant verticalement qu'horizontalement. Cette exigence est d'autant plus forte que l'ouvrage porte des appareils de voie permettant d'améliorer l'accès à la gare Saint-Jean et permettre aussi l'arrivée du TGV Aquitaine.

Il a donc fallu, afin de sécuriser le projet, dimensionner le tablier du pont avec des critères plus restrictifs que ceux prévus par le référentiel. Par exemple, la flèche verticale du tablier considérée sous le passage des circulations ferroviaires est 3,5 fois inférieure, à charges équivalentes, à la déformation qu'aurait permis le règlement routier.

Quant au déplacement longitudinal de l'ouvrage sous freinage des convois, il doit rester inférieur à 5 mm, sous l'action d'efforts horizontaux dont la valeur atteint 700 t dans le cas présent. Ce sont les piles du pont qui doivent permettre le respect de cette exigence, qui dimensionne dès lors les fondations.

Par ailleurs, l'ouvrage doit rester simple, gage de sa tenue dans le temps : son aptitude à l'usage ferroviaire est calculée pour 100 ans minimum.

Enfin, la réalisation du projet a pour ambition de ne pas créer de perturbation, ni sur l'exploitation fluviale, ni sur les circulations routières, ni enfin, sur les circulations ferroviaires.

Dans ce contexte la conception s'est articulée autour de cinq thèmes :

- ◆ obtenir un tablier à la fois robuste et fin ;
- ◆ concevoir des piles rigides ;
- ◆ supprimer une pile dans le lit du fleuve ;
- ◆ faciliter la construction de la partie de l'ouvrage sur la rive gauche ;
- ◆ permettre un accès aisé en tout point pour la maintenance.

Concevoir un tablier à la fois robuste et fin

La conception du tablier s'appuie sur la volonté d'obtenir une image la plus légère et la plus linéaire possible permettant de se raccorder sur les ouvrages d'accès.

D'une part, la structure doit dégager par-dessous les gabarits de circulation aussi bien sur la voie sur berge, en rive gauche, que sur la Garonne, au droit de la passe navigable, pour permettre le passage des tronçons de l'Airbus A380. Ces contraintes déterminent la position du sous-poutre du tablier.

D'autre part, par-dessus, la continuité des rives des viaducs d'accès étant une ligne directrice structurante de l'intention technique et architecturale, il a été décidé d'en profiter pour utiliser au maximum l'espace utile à la structure résistante dont la ligne supérieure a été remontée jusqu'à l'alignement des garde-corps des estacades.

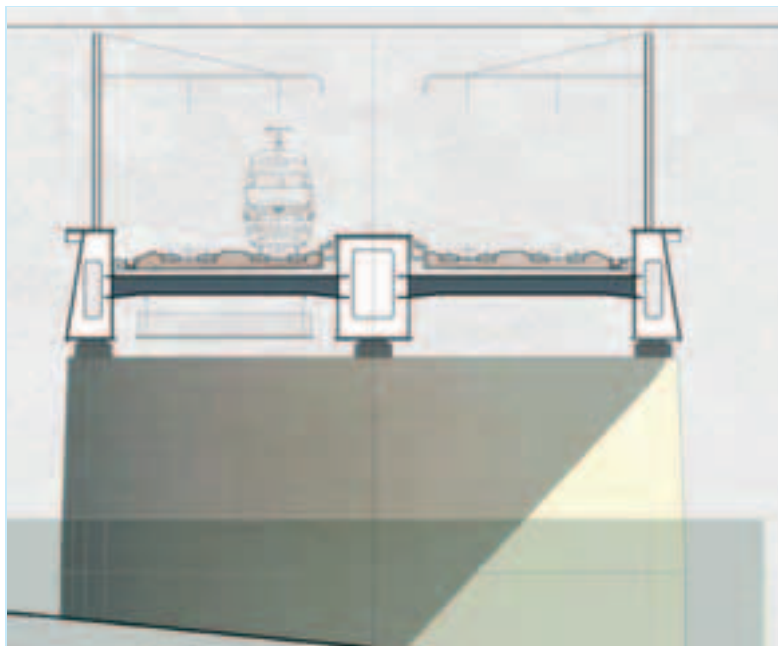


Figure 6
Section transversale du tablier
Cross section of the deck

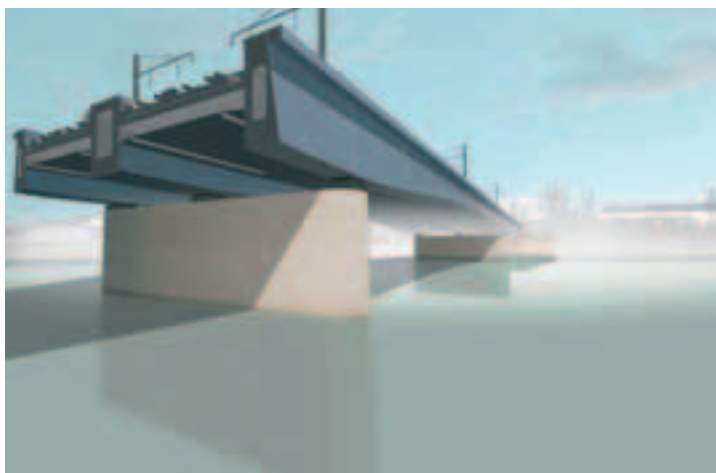


Figure 7
Piles et tablier
Piers and deck

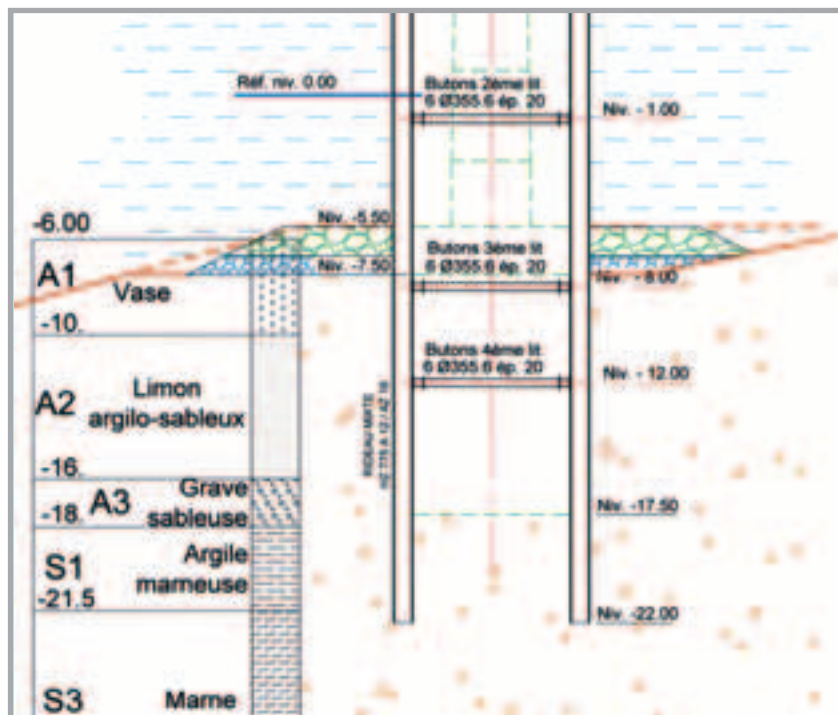


Figure 8
Conception des appuis en rivière
Design of supports in the river



Dès lors, la rigidité verticale de la structure est apportée par trois poutres-caissons, de hauteur variable : deux latérales et une centrale. Le rôle de la poutre centrale est fondamental, puisqu'elle supporte à elle seule plus de 60 % des charges de poids mort et des circulations ferroviaires. Grâce à l'utilisation optimale du volume disponible, ces trois caissons peuvent apporter à l'ouvrage toute la rigidité nécessaire pour recevoir les charges ferroviaires.

Entre ces poutres, des éléments transversaux, régulièrement espacés, supportent la dalle en béton. Pourquoi une dalle en béton ? Car elle présente trois avantages particuliers :

- ◆ la réduction du bruit : le béton est un filtre naturel des vibrations ; il évite ainsi les émissions acoustiques au niveau des caissons métalliques. C'est un avantage considérable pour un ouvrage urbain qui doit porter des voies ferrées ;
- ◆ un meilleur vieillissement de la structure : la dalle joue un rôle de répartition homogène des efforts amenés par les trains sur l'ossature métallique du tablier, elle réduit les concentrations de contraintes et réduit l'endommagement en fatigue de la structure ;
- ◆ elle permet une pose de voie ballastée, garante de conditions d'entretien optimales pour la voie et les appareils de voie.

Concevoir des piles rigides (figure 8)

La conception des piles découle de la volonté d'homogénéité des dimensions sur l'ensemble du franchissement piles nautiques et piles à terre. Ainsi, tous les appuis seront visuellement identiques.

La forme et la largeur des fûts découlent directement des études hydrauliques :

- ◆ la largeur a été calibrée pour ne pas générer d'obstacle inadmissible à l'écoulement ;
- ◆ le projet prévoit un fût unique, allongé et arrondi aux abouts pour permettre une meilleure pénétration dans le courant.

Les fûts sont renforcés aux extrémités, ainsi qu'en zone centrale pour pouvoir supporter les chocs de bateaux. Ces renforts sont situés par ailleurs à l'aplomb des trois poutres-caissons et conduisent directement les efforts qu'elles apportent, vers les fondations. La présence de sols vasards dans le fond de la Garonne a conduit à ancrer les fondations dans les couches de terrain plus résistantes, situées sous les formations alluviales.

Par ailleurs, pour satisfaire, d'une part la transmission des efforts verticaux apportés par le tablier, d'autre part le blocage des efforts horizontaux de freinage/démarrage, les fondations ont été voulues massives. Cette conception présente deux avantages :

- ◆ par leur taille, elles sont monolithiques et se comportent comme des ensembles totalement indéformables. La surface au sol est importante, tant verticalement qu'horizontalement et permet

de solliciter faiblement le terrain pour la reprise des efforts, beaucoup plus faiblement que sous les fondations de la passerelle actuelle malgré un poids de la structure de cette dernière beaucoup plus léger ;

- ◆ les niveaux de fondations, complétant la rigidité, rendent l'ouvrage insensible aux éventuels affouillements du fond du fleuve.

Supprimer une pile dans le fleuve

Le concours lancé par Réseau Ferré de France (RFF) prévoyait l'implantation d'une pile à proximité immédiate de la berge en rive gauche. Le projet en prévoit la suppression pour les raisons suivantes :

- ◆ architecturalement, elle induit une irrégularité dans la perception du franchissement, qui est apparue inacceptable, par la rupture de l'équilibre général de l'ouvrage qu'elle induit ;
- ◆ d'un point de vue hydraulique, elle constitue un obstacle à l'écoulement du fleuve, notamment à proximité de la digue, zone fortement perturbée d'après les résultats des études hydrauliques. Sa suppression améliore la tenue, dans le temps, de la protection de la berge et en limite les travaux d'entretien ;
- ◆ elle constitue, au moins en phase travaux, un obstacle à l'écoulement du flux du collecteur Ø 1600 de la Communauté Urbaine de Bordeaux (CUB), qui se déverse, sur la berge de la rive gauche, dans l'axe du pont.

Limiter l'impact des travaux sur les piles

A terre, tant en rive gauche qu'en rive droite, la forme des fûts est identique à celle des piles dans le lit de la Garonne, pour prolonger l'homogénéité du traitement architectural.

Pour les piles à terre, la conception sur massifs, telle qu'elle avait été développée pour les appuis dans la Garonne, n'a pas été retenue. Trois raisons ont milité pour cette modification :

- ◆ premièrement, sur les deux rives, des collecteurs de gros diamètre, stratégiques pour la ville, passent sous les appuis. Le système de fondation doit être capable de les porter ;
- ◆ en deuxième lieu, deux voies routières fortement circulées encadrent les travaux. Il s'agit de la voie sur berge et de la bretelle d'accès au pont Saint-Jean. Il est donc nécessaire de limiter la surface au sol impactée par les travaux, afin de ne pas créer de perturbation sur les flux routiers de la zone ;
- ◆ enfin, les travées du pont sont moins importantes, les efforts horizontaux de freinage/démarrage également. Des fondations profondes, légèrement plus flexibles que celles retenues en rivière sont envisageables.

Ainsi, les appuis à terre seront fondés sur :

- ◆ douze pieux pour la pile PC1, située en rive droite. Ces pieux pontent le collecteur de la station de pompage Antoine Jourde ;
- ◆ six pieux pour chacune des piles PC7 et PC8 rive

LES PRINCIPALES QUANTITÉS

- Excavation pour fondations : 13 000 m³
- Palplanches et profilés pour batardeaux : 2 200 t
- Liernes et butons pour batardeaux : 400 t
- Enrochements : 20 000 t
- Pieux forés (Ø 1 500 et Ø 1 800) : 600 ml
- Béton : 20 000 m³
- Armatures pour béton armé : 1 200 t
- Charpente métallique : 7 000 t
- Étanchéité du tablier : 5 000 m²

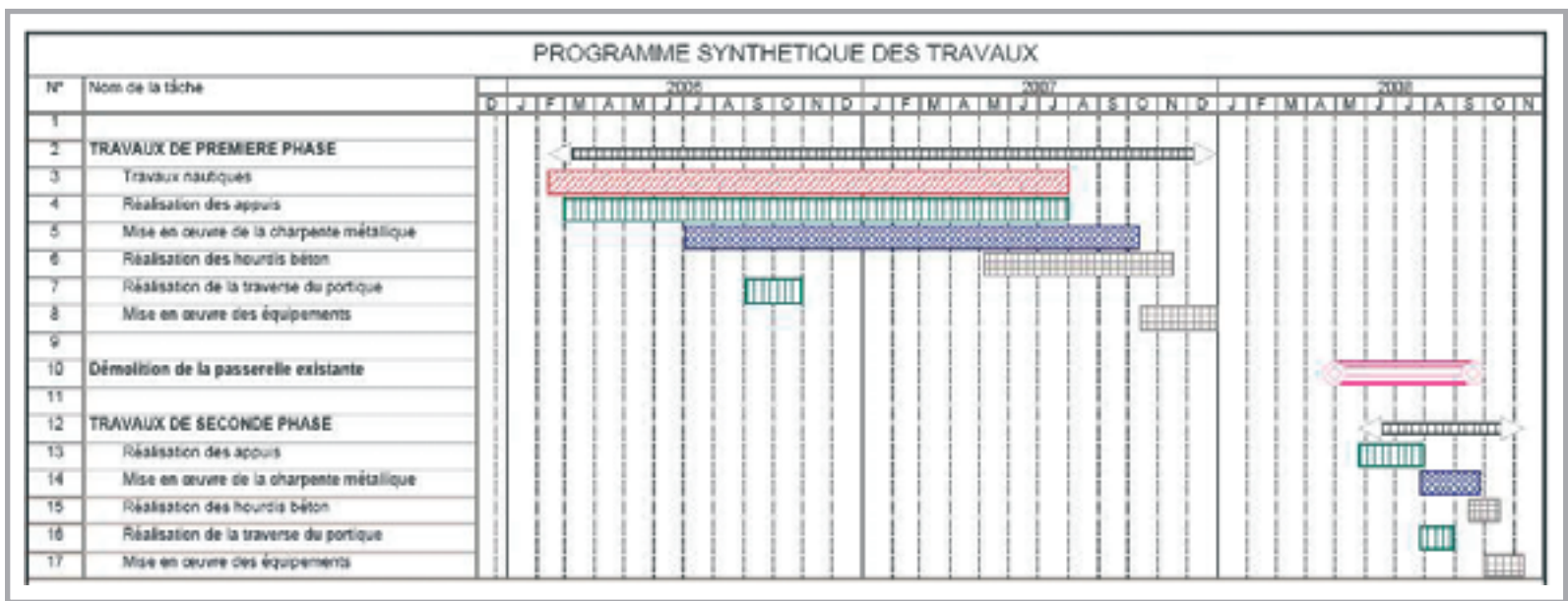


Figure 9
Programme des travaux
Work schedule

gauche, axés sous les fûts. Pour ces deux derniers appuis, c'est la constitution de la dernière travée du pont, en forme de U renversé, en béton armé, qui permet d'assurer la stabilité de la zone vis-à-vis des efforts de freinage/démarrage des circulations, tout en limitant les fondations des appuis à une file de pieux sous chacun d'entre eux. Ainsi, les travaux occupent une surface au sol limitée, sans interférence avec la voie sur berge et la bretelle d'accès au pont Saint-Jean.

Faciliter les accès pour l'entretien

Enfin, le dernier axe de l'approche qui a présidé à la conception de l'ouvrage a consisté à permettre un accès aisé en tout point pour l'inspection et l'entretien, en particulier la remise en peinture :

- ◆ par les pistes latérales, on chemine tout le long de l'ouvrage et on accède aux trappes de visite des poutres-caissons latérales, pour leur inspection. Ces trappes, au nombre de quatre par caisson, sont étanches ;
- ◆ par les accès sur la poutre-caisson centrale, distants au maximum de 25 m, on chemine sur une piste centrale, qui permet de rejoindre les quatre trappes de visite du caisson ;
- ◆ des nacelles de visite motorisées (une par côté) permettent de circuler sous l'ouvrage, d'inspecter les faces extérieures du tablier et de monter sur les piles, tout en se faisant discrètes en position de repli ;
- ◆ l'intérieur des caissons est visitable et équipé d'échelons et de barres de maintien pour le franchissement des tôles faisant obstacle à la progression. L'aptitude des caissons à être visités apparaît fondamentale, pour un ouvrage de cette envergure et est garante d'opérations de surveillance et d'entretien aussi bien complètes que faciles. A signaler que ces caissons sont déshumidifiés pour éviter toute corrosion.

Le planning

Comme le montre la figure 9, le chantier se déroule en trois phases :

- ◆ réalisation de l'ouvrage, sauf une partie de raccordement sur le viaduc de Paludate sur la zone P6, Pc7, Pc8 : 24 mois ;



Photo 1
Essai de battage
en rivière
Pile driving test
in the river

- ◆ interruption du chantier pour travaux d'équipements et de raccordements avec les voies sur chaque rive ; basculement de la circulation ferroviaire de la passerelle existante sur l'ouvrage neuf ; démolition de la passerelle existante ;
- ◆ fin de l'ouvrage en rive gauche et équipements, mise à quatre voies.

Les travaux préparatoires

Ils ont été les suivants :

- ◆ campagne de sol complémentaire à terre pour la réalisation des pieux sur Pc1, Pc7 et Pc8 ;
- ◆ essai de battage des profilés et palplanches en Garonne pour conforter le matériel et la faisabilité des batardeaux : piles P4 et P6 (photo 1) ;
- ◆ repérage et transplantation des essences à protéger sur les rives, réalisés avec le Conservatoire botanique d'Aquitaine ;
- ◆ lancement des modèles hydrauliques (P3 et P6) en laboratoire dans le but de définir les protections

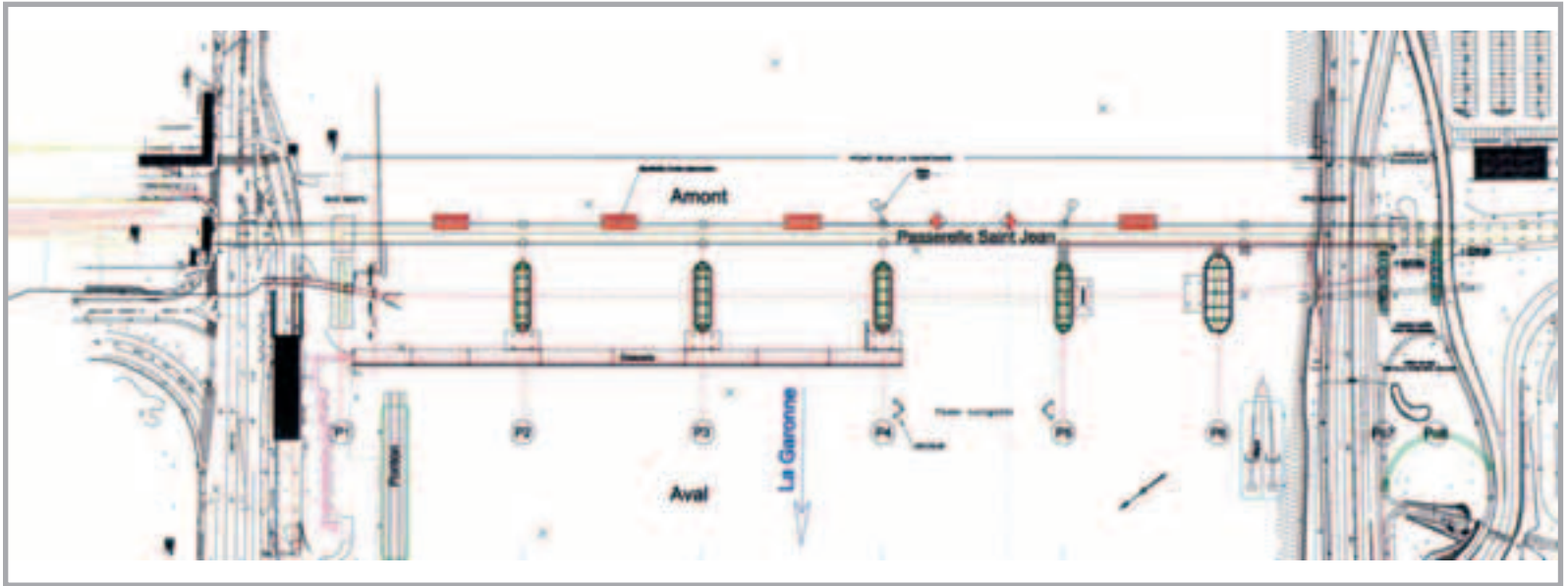


Figure 10
Installations de chantier
Construction plant

des piles et berges, par des enrochements. Cette étude hydraulique est réalisée par la Compagnie Nationale du Rhône (CNR).

L'organisation générale du chantier et les travaux de génie civil

Elle est dictée par un double objectif :

- ◆ sécuriser le planning: le premier délai de 24 mois correspondant au basculement de la circulation ferroviaire sur l'ouvrage neuf est très court;
- ◆ respecter l'environnement extérieur; les contraintes sont fortes :

- respect de la flore protégée sur les rives,
- passage des convois fluviaux transportant des éléments de l'Airbus A380,
- site urbain (bruit, circulation...),
- voies rapides traversées (rive gauche),
- surveillance permanente de la passerelle existante en service et très fragilisée (piles et charpente),
- travail auprès, voir au contact, de voies ferroviaires en service.

Par ailleurs, le site de construction est soumis à un marnage très important : 5,00 m constatés en décembre 2005, pouvant atteindre 8,00 m.

Les installations sont illustrées sur figure 10.

L'installation principale se trouve en rive droite :

- ◆ bureaux et cantonnements;
- ◆ préfabrication et assemblage des éléments de hourdis;
- ◆ ponton de préparation des travées pour mise en place ultérieure à la bigue.

L'installation rive gauche permet la réalisation des piles P5 et P6 (approvisionnement des bétons par tuyauterie longeant la passerelle existante), du portique Pc7 et Pc8 et la mise en place de la travée mixte P6/Pc7.

Les batardeaux sont réalisés en site nautique ainsi que leur terrassement (piles P2 à P6); les travaux de génie civil sont réalisés à partir d'une estacade générale pour les piles P2, P3, P4 et de deux petites estacades indépendantes pour les piles P5 et P6.

Le phasage des travaux en rivière inclus une contrainte de mètre-couple à ne pas dépasser vis-à-vis des écoulements de la Garonne.

Les enrochements seront mis en place soit en site nautique, soit à partir de l'estacade principale.

Les pieux forés tubés sur les rives sont de diamètre 1500 ou 1800 mm.

Les piles sont réalisées de façon classique avec des banches et coffrages spéciaux aux abouts; elles comprennent une fausse levée, deux levées et un chevêtre. Les bétons sont pompés et distribués par mâts de bétonnage.

Le hourdis entre caissons est approvisionné par les portiques (figure 11) à partir de P1; le complément de ferrailage est réalisé sur place; le béton est pompé.

Les travaux de charpente métallique

Caractéristiques de l'ouvrage

Les deux caissons latéraux ont une hauteur variant de 2,77 m en travée et sur appuis d'extrémité, jusqu'à 4,5 m sur appuis. L'âme extérieure de ces caissons (côté opposé aux voies) est inclinée, avec un fruit constant, ce qui induit une variation de semelle inférieure dans les zones à hauteur variable. Le caisson central a une hauteur variant de 2,57 m à 4,30 m et il est de forme rectangulaire.

Au droit de chaque pièce de pont, un diaphragme transversal permet d'attacher les pièces de pont sur le caisson, et de raidir ce dernier en torsion. Ces diaphragmes sont percés de trous de visite et

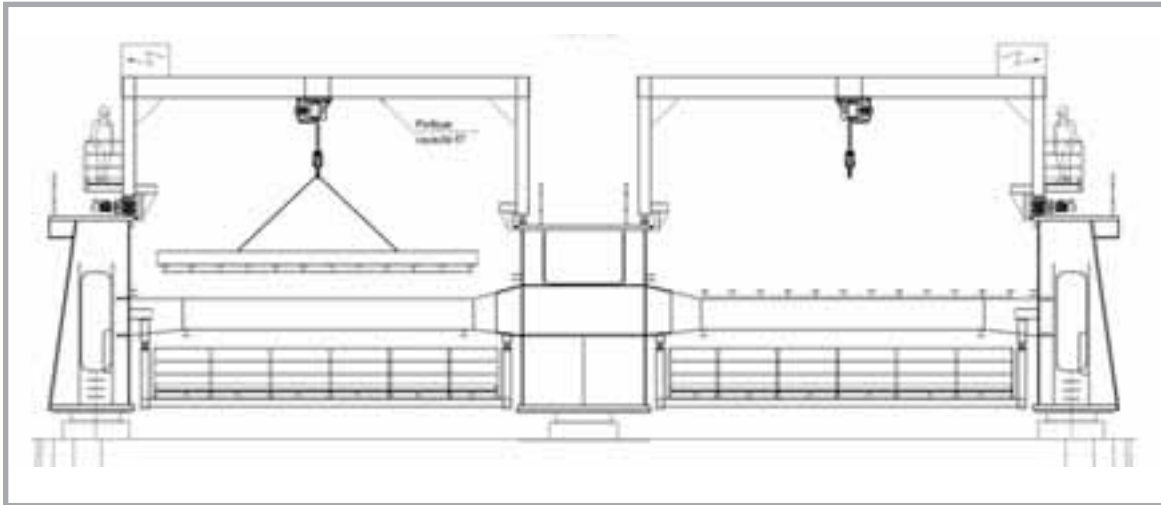


Figure 11
Portique de pose
Laying portal
structure

équipés de système d'échelons pour faciliter la circulation à l'intérieur. Dans le caisson central les pièces de pont sont prolongées à l'intérieur du caisson, afin de favoriser l'encastrement de la pièce de pont sur le caisson.

Les pièces de pont assurent le report des charges verticales du plancher vers les caissons supports, elles sont disposées environ tous les 3,5 m. Elles comportent une partie de hauteur constante et s'épaississent aux encastremets sur les caissons. Les moignons de hauteur et de largeur variable seront soudés sur les caissons. La variation de hauteur permet de loger sous les pièces de pont, sans dépasser l'intrados de la poutre, deux profilés HEB 140. Ces profilés constituent les rails de roulement de la passerelle de visite.

Aciers de l'ouvrage

Les aciers de construction utilisés pour l'ossature métallique de l'ouvrage seront de nuance :

- ◆ $8 \leq e \leq 30 \Rightarrow$ S355K2G3 ou S355N pour le raidissage des caissons ;
- ◆ $e \geq 80 \Rightarrow$ S355N ou S355M pour les caissons ;
- ◆ $e < 80 \Rightarrow$ S355NL ou S355ML pour les caissons ;
- ◆ $e \geq 50 \Rightarrow$ S460M pour les caissons ;
- ◆ $e < 50 \Rightarrow$ S460ML pour les caissons.

La connexion du béton participant sur l'ossature est réalisée par goujons nuance S 275 J2G3 Re Mini 350 MPa suivant NF E 25-140.

Protection anticorrosion

Le système de protection anticorrosion est de type C4 ANV (certification ACQPA).

Le complexe anticorrosion est constitué de trois couches dont la première est de type "riche en zinc".

En atelier :

- ◆ grenailage DS 3 et application des couches primaire et intermédiaire ;
- ◆ réservations au droit des joints de chantier.

Sur chantier :

- ◆ reconstitution des couches d'atelier au droit des joints soudés ;
- ◆ application de la couche de finition.

L'intérieur des caissons sera recouvert d'une couche de primaire et le traitement hygrométrique de l'air intérieur des trois caissons sera assuré par des déshumidificateurs placés à chaque extrémité (deux par caisson).

Mise sur appuis

Une platine en acier thermomécanique sera pré scellée sur les dés d'appui ; sur cette platine sera soudée une contre-platine lors de la mise sur appuis.

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

Fabrication

L'ensemble des fabrications est exécuté dans l'usine Eiffel de Lauterbourg.

Les caissons fabriqués dans l'usine sont découpés en tronçons de longueur variant entre 12 et 21 m, le poids de ces caissons n'excédant pas 90 t. Ces caissons sont ensuite peints dans le hall de peinture, puis assemblés à l'extérieur de l'usine de façon à obtenir des éléments de 32 à 40 m d'un poids maxi de 180 t.

Chaque poutre est contrôlée individuellement et fait l'objet de l'émission en D.A.O. d'une fiche de relevé indiquant les valeurs géométriques théoriques et réelles. Cette méthodologie remplace le montage à blanc.

Transport

Les tronçons de 32 à 40 m et d'un poids de 180 t sont transportés par voie fluvio-maritime jusqu'à l'ouvrage à construire.

Le chargement des bateaux fluvio-maritimes se fait avec le portique du port de Lauterbourg situé sur le Rhin.



Le premier tronçon côté rive gauche ainsi que les tronçons au-dessus de la rocade côté rive gauche sont transportés par la route. Leur longueur n'excède pas 17 m et leur poids 90 t.

Les pièces de pont sont elles aussi transportées de l'usine de Lauterbourg jusqu'à la zone de chantier par la route.

Montage

Les travaux de montage sont effectués depuis la Garonne avec deux grues flottantes et depuis des plates-formes sur les rives :

- ◆ une plate-forme côté rive droite sera aménagée pour installer une grue télescopique de 500 t et pour stocker des containers et des bungalows ;
- ◆ une autre plate-forme côté rive gauche sera aménagée pour le pré-assemblage des poutres au-dessus de la rocade et pour l'installation d'une grue chenilles.

Les dispositifs et le phasage de montage ont été particulièrement étudiés afin de s'affranchir de l'utilisation de palées en rivière risquant d'entraver le trafic fluvial.

Les pièces de pont sont soudées sur les caissons principaux au fur et à mesure du montage de ces derniers. Elles sont approvisionnées côté rive droite et montées au niveau du tablier avec une grue à tour. Elles sont ensuite mises en place et soudées à leur emplacement définitif par deux portiques roulant sur les caissons principaux (figure 11).

Les poutrelles enrobées sont assemblées et pré-équipées des armatures transversales inférieures et des dalles de coffrages (type Masterpanel) puis posées à l'avancement avec les mêmes portiques. Elles sont boulonnées sur les pièces de pont.

Le montage respecte le phasage décrit suivant :

◆ **Phase 1** : arrivée des tronçons de la poutre aval et de la poutre centrale.

Déchargement avec une grue télescopique sur la plate-forme côté rive gauche, puis raboutage des éléments.

Arrivée et montage de la grue chenilles.

Mise en place des poutres au-dessus de la rocade sur la pile PC7 et sur une palée avec une coupure de circulation totale pendant 2 heures, deux nuits d'affilées.

Montage et boulonnage des entretoises en maintenant la circulation sur une voie par sens pendant 2 semaines.

◆ **Phase 2** : installation de chantier.

Arrivée des premiers bateaux contenant les travées PC1-P2 et P2-P3 au port de Bordeaux, puis déchargement avec la grue flottante du port sur deux pontons pour reconstituer des poutres d'environ 77 m. Réglage et soudage des joints sur les pontons, puis reprise de la peinture.

◆ **Phase 3** : arrivée des trois poutres du premier tronçon côté rive droite.

Mise en place des poutres sur la pile PC1 et sur une palée avec une grue télescopique.

◆ **Phase 4** : arrivée sur le site des deux grues flottantes pour la mise en place.

Poussage du ponton avec les trois poutres de la première travée jusqu'à la zone de chantier puis amarrage du ponton côté rive droite.

Mise en place des trois éléments avec les deux grues flottantes.

Même intervention pour le deuxième ponton avec les trois poutres de la deuxième travée.

Réglage et soudage des joints de poutres.

Début de la mise en place et du soudage des entretoises.

◆ **Phase 5** : arrivée des deux bateaux contenant les travées P3-P4 et P4-P5.

Déchargement des tronçons sur deux pontons pour reconstituer des tronçons d'environ 77 m.

Réglage et soudage des joints sur les pontons, puis reprise de la peinture.

◆ **Phase 6** : arrivée sur le site des deux grues flottantes pour la mise en place.

Poussage du ponton avec les trois poutres de la première travée jusqu'à la zone de chantier puis amarrage du ponton côté rive droite.

Mise en place des trois éléments avec les deux grues flottantes.

Même intervention pour le deuxième ponton avec les trois poutres de la deuxième travée.

Réglage et soudage des joints de poutres.

Mise en place et soudage des entretoises.

◆ **Phase 7** : arrivée des deux bateaux contenant les travées P5-P6 et P6-P7.

Déchargement des tronçons sur deux pontons pour reconstituer des tronçons d'environ 77 m.

Réglage et soudage des joints sur les pontons, puis reprise de la peinture.

◆ **Phase 8** : arrivée sur le site des deux grues flottantes pour la mise en place.

Poussage du ponton avec les trois poutres de la première travée jusqu'à la zone de chantier puis amarrage du ponton côté rive droite.

Mise en place des trois éléments avec les deux grues flottantes.

Même intervention pour le deuxième ponton avec les trois poutres de la deuxième travée.

Réglage et soudage des joints de poutres.

Fin de la mise en place et du soudage des entretoises.

◆ **Phase 9** : mise en place et boulonnage des poutrelles enrobées.

◆ **Phase 10** : après la démolition de la culée de l'ancien ouvrage côté rive gauche.

Arrivée des deux tronçons de la poutre amont sur la plate-forme.

Déchargement avec une grue télescopique sur la plate-forme, puis raboutage des éléments.

Mise en place de la poutre au-dessus de la rocade avec une grue télescopique en coupure de circulation totale une nuit pendant 2 heures.

Montage et boulonnage des entretoises en basculant la circulation sur une demi-rocade les nuits durant 5 heures pendant 2 semaines.

■ CONCLUSION

La construction d'un nouveau pont ferroviaire sur la Garonne représente un symbole fort de la modernisation du réseau ferroviaire et sa portée dépasse le cadre régional. En effet, l'augmentation de capacité ouvre la porte à l'amélioration des liaisons régionales entre Bordeaux et les principales villes d'Aquitaine et contribue à offrir les conditions techniques du développement du fret ferroviaire transeuropéen. Ainsi, la mise à quatre voies de la section comprise entre la gare de Bordeaux Saint-Jean et la bifurcation de Cenon constitue un élément majeur pour le développement du trafic ferroviaire sur l'arc atlantique. Cette réalisation s'inscrit dans le projet de réalisation de la ligne à grande vitesse entre Tours et Bordeaux, qui permettra de relier Paris et Bordeaux en 2h10 à l'horizon 2016.

LES PRINCIPAUX INTERVENANTS

Maitre d'ouvrage

Réseau Ferré de France (RFF)

Assistant maître d'ouvrage

Setec TPI et Terrasol

Groupe d'entreprises et maîtrise d'œuvre

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

ABSTRACT

The new rail bridge over the Garonne in Bordeaux

Br. Flourens, Fr. Achard, P. Charlon, Ph. Ramondenc

Réseau Ferré de France has entrusted, using the design and build procedure, the realization of the new Railway Bridge of Bordeaux to a joint venture composed by Eiffage TP (leader), SNCF (IGOA) and Greisch engineering departments, Duval and De Giacinto architects, Eiffel and Spie Fondations.

The deck is a three box-girder covering six spans (about seventy seven meters long each). Its four railways are supported by two composite slabs (concrete and steel beams) located between the girders.

The deck is laying over a pile-abutment supported by foundations piles, five piles located in river supported by half depth foundations and a reinforced concrete frame founded over foundations piles.

This bridge will substitute the existing metallic one, which is only supporting two railways and has been exposed to time's injuries.

RESUMEN ESPAÑOL

El nuevo puente ferroviario sobre el río Garona en Burdeos

Br. Flourens, Fr. Achard, P. Charlon y Ph. Ramondenc

Réseau Ferré de France ha encargado, en el marco de un concurso de diseño-realización, el proyecto del puente ferroviario de Burdeos a una agrupación que incluye a Eiffage TP (mandatario), las oficinas de ingeniería de la SNCF (IGOA) y Greisch, los arquitectos Duval y De Giacinto, Eiffel y Spie Fondations. El tablero es un triple cajón metálico con seis vanos (de aproximadamente 77 m), y soporta cuatro vías férreas portadas por bovedillas con viguetas de hormigón que unen a los cajones. El tablero se apoya sobre un estribo de puente en tierra con cimentaciones sobre pilotes, cinco pilas en corriente de agua sobre cimentaciones semi-profundas (ataguías y betún de llenado) y un pórtico de hormigón armado en el extremo izquierdo de orilla con cimentaciones sobre pilotes.

Esta estructura habrá de sustituir a la

pasarela metálica existente que soporta dos carriles y que ha sufrido los daños del tiempo.

Le 2^e pont SNCF sur la Saint-Lazare

Le réseau ferré du secteur nord-ouest d'Ile-de-France ne correspondant plus à la densité de sa population, la SNCF et Réseau Ferré de France ont décidé d'en modifier la desserte actuelle, en créant deux nouvelles voies entre les gares du Stade et d'Argenteuil.

Cet aménagement doit permettre :

- ◆ d'accompagner les évolutions démographiques de la zone ;
- ◆ favoriser une plus grande utilisation des transports en commun ;
- ◆ décharger le réseau en supprimant les points durs d'exploitation, notamment à Ermont ;
- ◆ développer l'offre en créant une liaison cadencée en 10 minutes aux heures de pointe.

Ce projet impliquait la mise en place d'un passage dénivelé et d'un nouveau franchissement de la Seine (figure 1).

LE PROJET ET SES CONTRAINTES

Les voies de la ligne Paris - Mantes franchissent actuellement la Seine par un ouvrage constitué d'un tablier métallique à poutres latérales en treillis type Warren (photo 1), complété en rive droite, côté Argenteuil, par un deuxième tablier à poutrelles enrobées qui enjambe la RN 311 située le long de la berge.

Le projet d'aménagement de la ligne avait pour but de permettre le doublement du premier pont SNCF par un ensemble d'ouvrages comportant deux nouvelles voies (photo 2).

Il s'agit en fait d'une succession de trois ouvrages distincts :

- ◆ côté Paris, un portique en béton armé d'une ouverture de 5,9 m pour franchir l'une des voies ferrées desservant le port de Gennevilliers ;
- ◆ un quadripoutres mixte continu de cinq travées et d'une longueur totale de 194,46 m pour le franchissement de la Seine ;
- ◆ côté Argenteuil, un tablier à poutrelles enrobées d'une portée de 28,75 m franchissant la RN 311. Compte tenu du contexte géotechnique, tous les appuis devaient reposer sur fondations profondes. Les ouvrages ont été réalisés en tenant compte de plusieurs impératifs :

- ◆ l'obligation de construire le nouvel ouvrage tout contre l'ancien en conservant l'axe des appuis ;
- ◆ les risques de crues fréquentes de la Seine, une navigation fluviale intense à maintenir, des emprises de travaux exigües, et les avis de la batellerie pour de nombreuses interventions ;
- ◆ la présence de lignes ferroviaires et d'une RN 311 très circulées, de réseaux gaz et eau sous haute pression, d'une fibre optique en fond de Seine ;
- ◆ une couverture d'alluvions compressibles sur horizons de marno-calcaires avec passes indurées et de gypses, ces derniers étant redoutés pour leurs dissolutions et les circulations fréquentes dont ils sont le siège ;
- ◆ enfin, un fond de rivière très encombré par les restes de démolitions et de reconstructions du pont existant pour faits de guerres.

LES APPUIS A TERRE

Culée côté Paris

La réalisation de la culée et des remblais contigus sur sols compressibles et à proximité immédiate des voies SNCF sous trafic intense a nécessité :

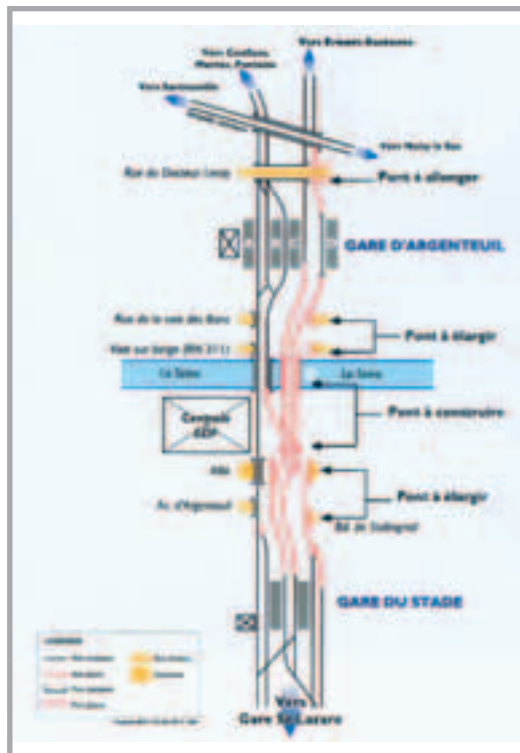
- ◆ la mise en œuvre de 4 000 ml de drains verticaux pour accélérer la consolidation des terrains avant l'exécution des remblais ;
- ◆ l'installation d'un blindage le long des voies afin d'ériger la plate-forme d'exécution des drains et de lançage de la charpente du futur tablier ; soit environ 350 m² de berlinoise ;
- ◆ le fonçage d'un rideau de palplanches le long de la culée existante pour limiter les tassements négatifs engendrés par la consolidation ;
- ◆ la mise en œuvre à l'arrière de la culée à construire d'un rideau discontinu de palplanches pour pallier tout phénomène de grand glissement avec risque de cisaillement des pieux.

Culée côté Argenteuil

Confinée entre la Seine et la RN 311, la construction de cette culée a nécessité la réalisation d'un quai en palplanches pour élargir la plate-forme de travail et faciliter l'accès du matériel d'exécution des pieux.

La présence d'une conduite de gaz sous très haute pression, enterrée à faible profondeur sur la berge côté Argenteuil, a obligé à bétonner une dalle de protection pour éviter tout impact des engins de l'atelier de pieux.

Figure 1
Le projet d'aménagement de la ligne Ermont - Saint-Lazare avec les nouveaux ouvrages
The development project for the Ermont - Saint-Lazare line with the new engineering structures



Seine. Ligne Ermont –

Jean-Paul Albrecht

DIRECTEUR DES MÉTHODES

Bec

Richard Bondi

DIRECTEUR DU PROJET

Chagnaud Construction

Michel Bustamante

DOCTEUR INGÉNIEUR

LCPC

Pierre Mallet

DIRECTEUR DES TRAVAUX

Bec

■ LA CONCEPTION DES APPUIS EN RIVIÈRE

La solution du marché et la solution aménagée

Les piles en rivière prévues au marché, P1, P2, P3 et P4, étaient constituées par des fûts béton armé de 2,6 x 13,4 m et d'une hauteur de 14 m. Leurs fûts reposaient sur une semelle de 2,5 m d'épaisseur et de 7,5 x 17,4 m, réalisée à l'intérieur d'un batardeau en palplanches PU32 de 18,4 m et dont l'étanchéité était assurée par un bouchon en béton hydraulique de 5 m d'épaisseur. Les fondations étaient constituées par sept pieux Ø 1500 capables de reprendre les charges amenées par le tablier et les chocs de bateaux. Soit pour ces derniers: 15 MN en choc frontal et 2 MN en choc latéral.

Compte tenu des impératifs imposés par le contexte géotechnique, la présence d'un ouvrage ancien et de l'importance des moyens à mettre en œuvre pour réaliser des pieux de Ø 1500, le LCPC a proposé une variante avec micropieux à très haute portance. Celle-ci a été finalement retenue et mise en œuvre avec succès.

Le contexte géologique

Les fondations de l'ouvrage ont intéressé l'horizon de marnes et caillasses, riches en passages gypseux mais aussi très indurés et dans lequel venaient s'ancrer les pieux. Bien connus en région parisienne, ces terrains présentent des risques de décompressions, de dissolutions ou même de karsts et sont le siège de circulations intenses [Réf. 1]. Dans ces conditions, la réalisation de pieux de forts diamètres sous boue bentonitique pouvait s'avérer délicate, à proximité immédiate des anciennes fondations du pont SNCF existant.

Rappel sur le contexte historique et les conditions d'exécution

Le pont SNCF existant, construit sous le Second Empire sur ordre de Haussmann à partir de 1852, a fait l'objet de sévères destructions lors de la guerre de 1870 et lors des opérations de la dernière guerre, en 1940 et 1944. Sa reconstruction, de 1945 à 1949, a nécessité la mise en place d'un ouvrage provisoire implanté au droit de l'ouvrage de doublement

Pour toutes ces raisons, le fond de Seine s'est trouvé être encombré par des matériaux des démolitions (blocs de bétons, éléments de structures métalliques, etc.) ainsi que par les pieux bois des ouvrages provisoires ayant permis les reconstructions successives.

Malgré une opération de nettoyage du fond de Seine prévue au marché, le risque d'obstacles laissé en place restait réel (notamment pour ce qui concernait les pieux bois dont l'extraction est souvent imparfaite) et susceptible de gêner le fonçage des chemises et le forage.

Au niveau de la réalisation donc, la solution pieux



Photo 1
Vue générale du premier pont SNCF avec son tablier reconstruit après 1945

General view of the first rail bridge with its deck rebuilt after 1945



Photo 2
Vue générale de l'ouvrage en cours de construction

General view of the structure undergoing construction

Figure 2
Emprise des batardeaux montrant la solution pieux et micropieux (cas du prédimensionnement avec 32 micropieux)

Area covered by the cofferdams showing the pile and micropile solution (case of preliminary sizing with 32 micropiles)

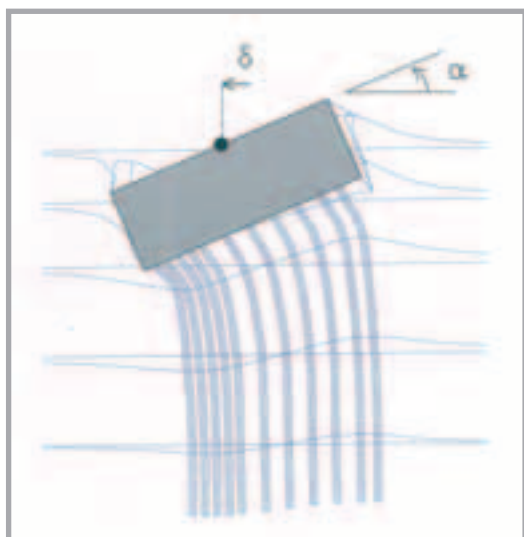
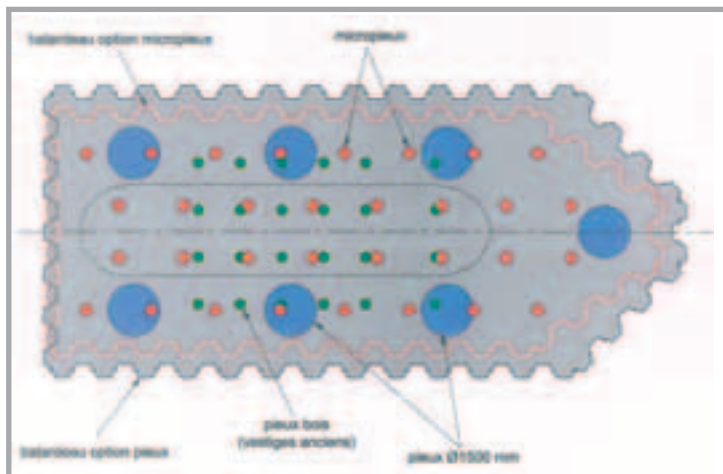


Figure 3
Déformée de la semelle avec 28 micropieux (modélisation 3-D)

Deformation of the foundation slab with 28 micropiles (3-D modelling)



Figure 4
Micropieu d'essai avec ses niveaux d'extensomètres amovibles pour la mesure des efforts

Test micropile with its removable extensometer levels for measuring forces



Ø 1500 de 23 m confectionnés à partir d'une plate-forme située 12 m au-dessus de l'arase comportaient de nombreuses contraintes :

- ◆ nécessité d'installer une grue d'au moins 1 MN sur le batardeau et cela sans pouvoir empiéter sur le gabarit fluvial autorisé ;
- ◆ problèmes liés à l'amenée de cette même grue et de son transfert d'une pile à l'autre ;
- ◆ transfert des boues de forage et évacuation des déblais ;
- ◆ approvisionnements divers (tubes, armatures, béton, etc.) ;
- ◆ opérations de levage tout contre l'ouvrage existant, sous trafic intense.

La variante avec micropieux

Celle-ci a consisté à remplacer les pieux Ø 1500 par des micropieux à très haute portance, capables de reprendre chacun 3,7 MN aux ELU rares (figure 2). Les avantages de cette solution étaient les suivants :

- ◆ réduction de l'emprise de la semelle ;
- ◆ diminution de l'épaisseur du bouchon à 1,5 m et, par voie de conséquence, de la longueur des palplanches ;
- ◆ utilisation de matériel de forage léger, adapté au travail sur une plate-forme de 100 m² ;
- ◆ réduction des transferts d'approvisionnements et d'évacuations ;
- ◆ élimination des risques de soutirage et de décompression des sols sous les fondations du pont haussmannien avec suppression de tout trépanage pour passer les horizons très indurés ;
- ◆ possibilité de déplacer un micropieu en cas de rencontre d'obstacle en profondeur ;
- ◆ possibilité de confortement par injection des vides et des horizons décomprimés.

Le dimensionnement des micropieux

Les calculs de prédimensionnement effectués par le LCPC conduisaient à la mise en place de 32 micropieux de 22 m. La difficulté du calcul résidait essentiellement dans l'estimation des déplacements de la pile sous les chocs de bateau : soit respectivement 15 MN et 2 MN pour le choc frontal et latéral. Il importait de s'assurer que la raideur de la fondation était suffisante pour éviter que le nouveau pont ne percute l'ancien en cas de choc, distants de 5 cm l'un de l'autre.

L'étude de ce problème a été faite en trois temps :

- ◆ par une première étude de prédimensionnement du comportement sous effort latéral d'une fondation fictive de même raideur ;
- ◆ une modélisation en 2-D à l'aide du logiciel PLAXIS ;
- ◆ une modélisation en 3-D à partir du logiciel CESAR-LCPC (figure 3).

Les valeurs des déplacements respectifs de la pile sous le choc frontal de 15 MN valaient : 86 mm, 55 mm et 24 mm.

Le micropieu d'essai (figure 4)

Le niveau de performance des micropieux exigeait d'être validé par un essai de chargement préalable statique, en vraie grandeur. Le micropieu d'essai a été installé en rive gauche, côté Paris, obligeant à neutraliser les 12 premiers mètres de sols absents en Seine au droit des piles. Les caractéristiques de ce micropieu étaient les suivantes :

- 1) tubage permanent de Ø 450 mm sur la hauteur de scellement neutralisée ;
- 2) forage en Ø 250 mm au tricône et sous coulis dilué ;

- 3) armature tube acier 180 mm, épaisseur 27,5 mm, nuance 80 daN (photo 3);
- 4) scellement en mode IRS à partir de 21 manchettes;
- 5) deux passes d'injection au coulis dosé à C/E = 2,2;
- 6) longueur totale dans le sol L = 36,2 m.

Instrumenté d'un train d'extensomètres amovibles type LCPC sur toute la hauteur du scellement, le micropieu a été mis en charge après un délai de repos de 29 jours

L'interprétation des mesures a donné les résultats suivants (figure 5 a, b, c):

- ◆ charge maximale d'épreuve appliquée $Q_{Max} = 5,6$ MN, sans que soit atteinte la charge limite conventionnelle vis-à-vis du sol Q_u ; il est très probable que cette dernière, compte tenu de la réserve de portance encore mobilisable, notamment en partie basse du scellement, pouvait approcher 10 MN;
- ◆ frottements unitaires q_s : 100 kPa dans les remblais et alluvions, et 90 kPa dans les sables de Beauchamp scellés en mode IGU; plus de 410 kPa dans les marnes et caillasses avec un scellement en mode IRS.

L'ensemble des conclusions tirées de l'essai de chargement préalable et des observations faites lors de la confection du micropieu a permis d'optimiser le dimensionnement mais aussi les opérations de forage et d'injection. Au vu des excellentes performances obtenues, le nombre de micropieux par pile a été ramené de 32 à 28, avec trois longueurs caractéristiques sous la semelle de 16 m, 18 m et 22,5 m [Réf. 2].

■ LA RÉALISATION DES APPUIS EN RIVIÈRE

Les accès

En raison de l'utilisation permanente de moyens fluviaux et pour éviter de recourir aux quais du port de Gennevilliers, une rampe d'accès avec quai d'embarquement a été aménagée en rive gauche.

Les ducs d'Albe

La construction de l'ouvrage a été réalisée sans interruption de la navigation sur la Seine, en alternant les passes navigables en fonction des travaux en cours. La protection des aires de travail a nécessité l'installation de ducs d'Albe de forte capacité.

Constitués de trois tubes acier $\varnothing 1500$ de 20 m et dûment contreventés, ces ouvrages de défense ont été assemblés sur la berge, acheminés par ponton, puis mis en place par vibrofonçage. Les chevêtres de contreventement ont été déposés en fond de Seine pour être utilisés comme guide pour le fonçage des tubes puis relevé à l'aide de grues sur



Photo 3
Armature des micropieux; tube acier 180 mm e = 27,5 mm

Micropile reinforcement; 180 mm steel tube 27,5 mm thick

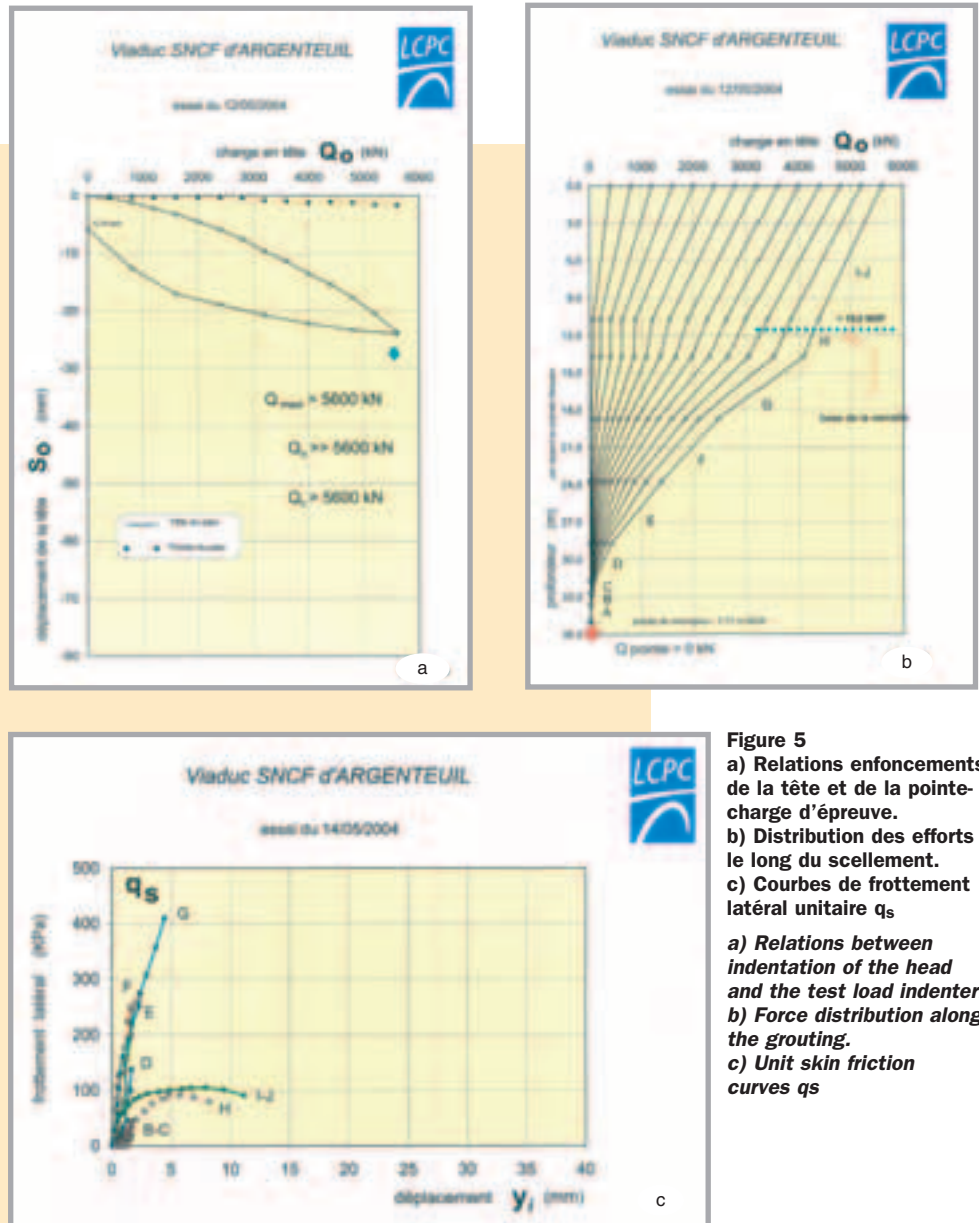


Figure 5
a) Relations enfoncements de la tête et de la pointe-charge d'épreuve.
b) Distribution des efforts le long du scellement.
c) Courbes de frottement latéral unitaire q_s
a) Relations between indentation of the head and the test load indenter.
b) Force distribution along the grouting.
c) Unit skin friction curves q_s

Photo 4
Mise en œuvre
des ducs d'Albe
Installing dolphins



ponton pour être soudés en position définitive (photo 4).

Les batardeaux

Leur réalisation a été précédée par une campagne de curage du fond de Seine avec arrachage des pieux en bois.

Les batardeaux qui délimitaient une emprise de quelque 100 m², ont été réalisés à l'aide de palplanches PU 32 de 17,4 m, dimensionnées pour reprendre 7,5 m de poussée d'eau. La mise en fiche, l'enclenchement et le vibrofonçage ont été faits au vibrofonçeur haute fréquence, à moment d'inertie variable (photo 5).

La mise en œuvre de chaque enceinte en palplanches, complétée par ses liernes et butons et la phase de terrassement du fond du batardeau, a été réalisée en 25 jours.

Les micropieux définitifs

Le forage a été effectué en Ø 270 mm à l'aide d'une foreuse de 25 t et cela à partir d'une plate-forme installée sur les batardeaux (photos 6 et 7). La centrale d'injection était installée sur ponton. Les micropieux ont été réalisés à raison de 1,5 micropieu par jour.

Pour permettre de localiser les zones décomprimées ou avec vides, l'ensemble des opérations de forage et de scellement a fait l'objet de l'enregistrement des paramètres caractéristiques [Réf. 3]. Sur les piles P3 et P4, situées les plus proches d'Argenteuil, l'importance des vides et des décompressions était tel qu'il a été nécessaire de recourir à leur gavage préalable avant de pouvoir procéder aux injections de scellement en mode IRS. Les produits de remplissage utilisés étaient des mortiers et bétons à dosages appropriés.

Chaque pile a fait l'objet d'un essai d'arrachement sur un micropieu définitif instrumenté (photo 8). La charge d'épreuve maximale valait 1,2 fois la charge aux ELS. Les résultats obtenus ont confirmé la bonne tenue des quatre micropieux testés et permis de valider les résultats de l'essai préalable quant aux frottements mobilisés [Réf. 4].

Le bouchon hydraulique

Après la réalisation des micropieux sur l'une des piles et le transfert du platelage sur la pile suivante, le batardeau était curé pour éliminer les résurgences de coulis. Compte tenu de la faible épaisseur du bouchon limitée à 1,5 m, un maximum d'attention a été apportée au réglage de la cote du fond de fouille. La mise en œuvre des 150 m³ de béton nécessaires a été faite à partir de pompes installées sur berge et sur pontons. Une équipe de quatre plongeurs assurait la bonne exécution du bouchon. (photo 9).

Photo 5
Opération de vibrofonçage
des palplanches
pour la constitution
des batardeaux
Operation of sheet pile
driving by vibration to form
the cofferdams



Photo 7
Outil spécial utilisé pour le forage
en Ø 270 mm dans les marno-calcaires
Special tool used for boring to dia. 270 mm
in marly-calcareous rocks



Photo 6
Forage à partir de la plate-forme installée sur batardeau
Boring from the platform set up on cofferdam

LES PRINCIPALES QUANTITÉS

Béton: 7 000 m³
 Pieux Ø 1200: 750 ml
 Micropieux: 2200 ml
 Armatures: 800 t
 Palplanches: 700 t
 Charpente métallique: 1 000 t
 Profilé HEB 1000: 170 t



Photo 8
Essai de traction en fond de batardeau sur un micropieu définitif
Tensile tests at the cofferdam bottom on a permanent micropile

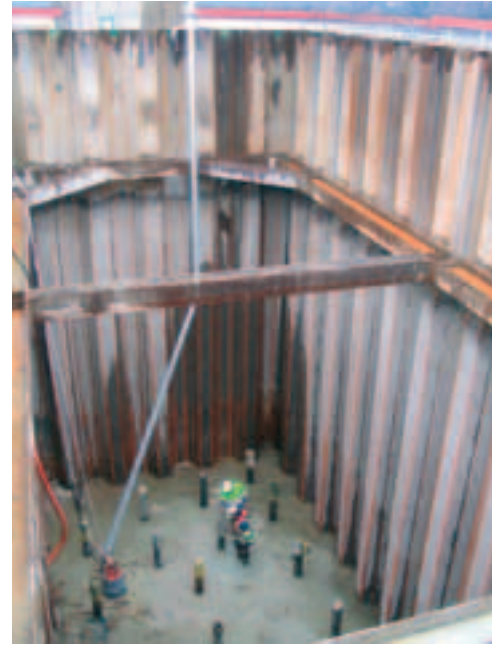


Photo 9
Epaissement et nettoyage du batardeau de pile
Draining and cleaning the pier cofferdam

L'élévation des piles

Après l'épuisement des enceintes et l'exécution de la semelle BA de 2,5 m d'épaisseur, la construction des piles a été faite en trois phases :

- ◆ levée n° 1 de 6 m pour 224 m³ de béton coulé sous le butonnage intérieur ;
- ◆ levée n° 2 de 4 m pour 156 m³ de béton mis en place après transfert du butonnage sur la première levée ;
- ◆ levée n° 3 de 4,6 m pour 190 m³ de béton correspondant au chevêtre de tête.

La mise en œuvre du béton a nécessité de recourir à plusieurs pompes : une première sur berge et les deux de reprise sur ponton (photo 10).

La jonction avec la pile existante

Afin d'assurer le monolithisme des piles des deux ouvrages, le vide entre les deux fûts a été comblé en préservant un joint de 5 cm permettant d'isoler mécaniquement les deux appuis en cas de choc de bateau. La partie inférieure de l'élément de jonction, jusqu'à l'arase supérieure du batardeau, a été réalisée en éléments préfabriqués sur mesure et mis en œuvre par plongeurs. La partie supérieure hors d'eau était coffrée.

LE TABLIER DU PONT SUR LA SEINE

Conception générale

Le tablier de franchissement de la Seine est un tablier mixte quadripoutres entretoisé, surmonté d'un hourdis en béton armé et d'une épaisseur de 25 à 30 cm. Les portées, respectivement égales à 32,5 m, 43,22 m, 43,12 m, 43,18 m et 32,50 m, correspondent aux travées du pont haussmannien.

Montage et lancement de la charpente

Les 1000 t de charpente métallique ont été fabriquées en atelier à Autun, et transportées sur site par convoi exceptionnel. Le déchargement et la mise en place des éléments de poutres ont nécessité une grue de 200 t. L'assemblage a été exécuté par soudure à l'aide du procédé Intershield. Le lancement, exécuté en trois opérations, a été fait par poussage, à l'aide de grues automotrices et chaises de roulement sur les appuis (photo 11).



Photo 10
Bétonnage de l'une des piles du nouveau pont
Concreting one of the piers of the new bridge



Photo 11
Phase de poussage des poutres métalliques du pont sur la Seine, à partir de la rive côté Paris
Phase of pushing the steel girders of the bridge over the Seine, from the Paris side bank

Le hourdis

Le hourdis a été réalisé en deux étapes. Une première où la partie centrale était exécutée à l'aide de prédalles collaborantes et une deuxième phase, où l'encorbellement était coulé en place à l'aide d'un équipement coffrant. La mise en place des dalles a été faite en 5 jours à l'aide d'une grue de 45 t montée sur ponton ; la dalle de compression étant bétonnée par plots de 11,18 m. L'encorbellement a suivi le bétonnage des dalles avec un décalage de 5 jours, à raison d'un plot de 11,8 m par jour.

LE TABLIER DE L'OUVRAGE SUR LA RN 311

Cet ouvrage comportait 18 profilés HEB 1000 de 29,3 m, lesquels ont été acheminés depuis le Luxembourg par train jusqu'au port de Gennevilliers, pour être amenés ensuite par route à pied d'œuvre. Les opérations de pose se sont déroulées sur quatre nuits. Les rives du tablier, conçues en coques préfabriquées, ont été posées lors du montage des profilés.

BIBLIOGRAPHIE

[Ref. 1] - Cadilhac M., Pouploz B., Toulemont M. - Fondations d'ouvrage d'art en site karstique. Le viaduc de l'autoroute A 15. Bulletin de liaison des Ponts et Chaussées, n° 87, janv.-févr. 1977, p. 45-52.

[Réf. 2] - Bustamante M., Bourgeois E., Gianeselli L., De Justo J.-L. - The foundations of the 2nd railway bridge of Argenteuil, Proc. of the 16th Intern. Conf. on SM & Geot. Engin., Osaka, 2005.

[Ref. 3] - Mascles S. - Relevé des paramètres d'injections des scellements des micropieux. 2^e pont d'Argenteuil. Rapport interne du LCPC. Octobre 2005.

[Ref. 4] - Bustamante M., Doix B. - Une méthode pour le calcul des tirants et des micropieux injectés. Bulletin de liaison des Ponts et Chaussées, n° 140, nov.-déc., p. 75-92.

LES PRINCIPAUX INTERVENANTS

Maitre d'ouvrage

RFF

Maitre d'ouvrage délégué

SNCF ION - Direction des opérations nouvelles

Maitre d'œuvre général

SNCF - Centre d'ingénierie Nord Paris

Maitre d'œuvre travaux

SNCF - Etablissement proche banlieue

Maitre d'œuvre étude

SNCF - Pole régional ingénierie IGOA

Entreprises

- Chagnaud Construction (mandataire), groupe DGC
- Bec (groupe Fayat)
- LCPC et MB Fondations : conseil fondations
- ACCMA : charpente métallique
- Franki (groupe Fayat) : pieux
- Sotraisol (groupe Fayat) : micropieux
- SND : travaux fluviaux

ABSTRACT

SNCF Ermont – Saint-Lazare line. Long-span bridge over the Seine river

J.-P. Albrecht, R. Bondi, M. Bustamante, P. Mallet

The long-span bridge over the Seine river was built in order to create two extra lanes on the SNCF line linking Ermont to Saint-Lazare. This structure was built in an area with multiples constraints. The most important ones were linked to the work over the lanes in use (Seine and RN 311), to the proximity of networks (gas and high pressure water, optical fibre) and to the work against an existing structure in use combined with an unfavourable geological context (compressive soil on top and melted gypsum into substratum) Furthermore, this structure combines several techniques :

- techniques of soil treatment (vertical drains pipes, stiff inclusion in order to protect the foundations),
- techniques of deep foundations with an important innovation regarding the placement under the piles of micropiles with a very high bearing capacity,
- techniques of fluvial works,
- techniques of deck with a mixed deck: 4 beams deck on the Seine river and a deck with coated girder on the National road.

RESUMEN ESPAÑOL

El segundo puente SNCF sobre el río Sena. Línea Ermont – Saint-Lazare

J.-P. Albrecht, R. Bondi, M. Bustamante y P. Mallet

El viaducto sobre el río Sena fue realizado para crear dos carriles suplementarios en la línea SNCF que pone en comunicación Ermont con Saint-Lazare. Esta obra fue construida en un emplazamiento que presenta múltiples tensiones entre las cuales, las más importantes corresponden a los imperativos relacionados con el trabajo por encima de las vías en servicio (Sena y carretera nacional RN 311) y en las cercanías de redes (gas y agua de alta presión, fibra óptica) así como las limitaciones vinculadas con el trabajo contra una estructura ya existente en servicio combinada con un contexto geológico poco favorable (suelo compresible en

superficie y disolución de yeso en el substrato).

Esta obra también combina a numerosas técnicas. Diversas técnicas de tratamiento de suelo (drenes verticales, inclusiones rígidas par proteger las cimentaciones); diversas técnicas de cimientos profundos con una innovación importante relativa a la implantación bajos las pilas de micropilotes de muy elevada capacidad de carga; diversas técnicas de trabajos fluviales; así como diversas técnicas de ejecución de tablero, con un tablero mixto compuesto por cuatro vigas sobre el río Sena y un tablero con viguetas de hormigón sobre la carretera nacional.

La construction du nouveau pont de Puget-Theniers sur le Var

Le nouveau pont sur le Var à Puget Théniers, dans les Alpes-Maritimes, présente plusieurs particularités. Tout d'abord par sa structure puisqu'il s'agit d'un pont à haubans dissymétrique à deux travées, dont une travée principale de 66 m haubanée franchissant le fleuve et une travée arrière de 16 m prolongée par une culée contrepoids; mais aussi par sa conception, puisque l'ouvrage situé dans une région sismique comporte un point fixe formé par sa culée contrepoids rigidement ancrée au rocher; original aussi par la nature de ses haubans constitués de torons multicouches, enfin et surtout par sa méthode de construction puisque, pour s'affranchir des risques de crues du Var, cet ouvrage a été préfabriqué sur la rive droite du fleuve puis mis en place par rotation suivant une procédure originale et particulièrement osée. Cet article décrit ses caractéristiques, ses particularités et sa méthode de construction.

Luc Amoros
CHEF DU SERVICE MÉTHODES
Razel

Jean-Pierre Commun
CHEF DU SERVICE ÉTUDES
DE STRUCTURES
Razel

Michel Mome
DIRECTEUR DU CHANTIER
Razel

Michel Placidi
DIRECTEUR TECHNIQUE
Razel

Bertrand Monod
CHEF DU SERVICE
INFRASTRUCTURES ROUTES
Conseil Général des Alpes-Maritimes

Denis Davi
INGÉNIEUR
Setra

Philippe Vion
INGÉNIEUR
Setra

Laurent Barbier
ARCHITECTE

■ LE CONTEXTE GÉNÉRAL ET LES PRINCIPALES CONTRAINTES DU SITE

Le nouveau pont sur le Var à Puget-Théniers, dont la construction s'est achevée au mois de mai 2005 remplacera bientôt le vieux pont du Brouchier, datant de 1888 et qui constituait jusqu'à présent le seul point de franchissement du Var au niveau de la ville de Puget-Théniers, à quelque 60 km au nord-ouest de Nice. Comportant une voie unique de circulation et un trottoir en porte-à-faux, cet ouvrage vétuste et très étroit (photo 1) n'était depuis longtemps plus adapté au trafic. En 1999, le Conseil général des Alpes-Maritimes a donc décidé de réaliser un nouvel ouvrage de franchissement du Var à deux voies de circulation et deux larges trottoirs sur la commune de Puget-Théniers, permettant plus largement de relier la vallée de la Tinée à celle de l'Estéron. Le souhait du maître d'ouvrage était de construire une structure marquante qui s'intègre bien dans le site et qui constitue un ouvrage esthétique à l'entrée du département, tout en privilégiant la simplicité des formes et un coût raisonnable.

Outre ces contraintes esthétique et économique, les concepteurs devaient prendre en considération deux contraintes naturelles fortes : d'une part, comme en témoignent les dégâts importants occasionnés lors de la crue de 1994 (photo 2), le Var est un fleuve torrentiel qui se caractérise par des débordements violents en période de crues. Par conséquent, le cahier des charges stipulait que le futur pont ne devrait posséder aucun appui en ri-



Photo 1
Vue de l'ancien pont sur le Var
View of the former bridge over the Var

vière et que son tablier serait aussi mince que possible afin de pouvoir dégager un gabarit suffisant vis-à-vis des crues centennales. D'autre part, la commune de Puget-Théniers se situant en zone de moyenne sismicité, l'ouvrage a dû être dimensionné pour résister à un tremblement de terre correspondant à une accélération nominale de 3 m/s², soit environ un tiers de la force d'apesanteur prise en horizontal.

■ LES CARACTÉRISTIQUES PRINCIPALES DE L'OUVRAGE

L'étude préliminaire et le dossier de POA réalisés par le Setra, en collaboration avec l'architecte Laurent Barbier, ont conduit à retenir pour la concep-

Photo 2
Dégâts causés par la crue de 1994
Damage caused by the 1994 flood



Figure 1
Coupe longitudinale
Longitudinal section

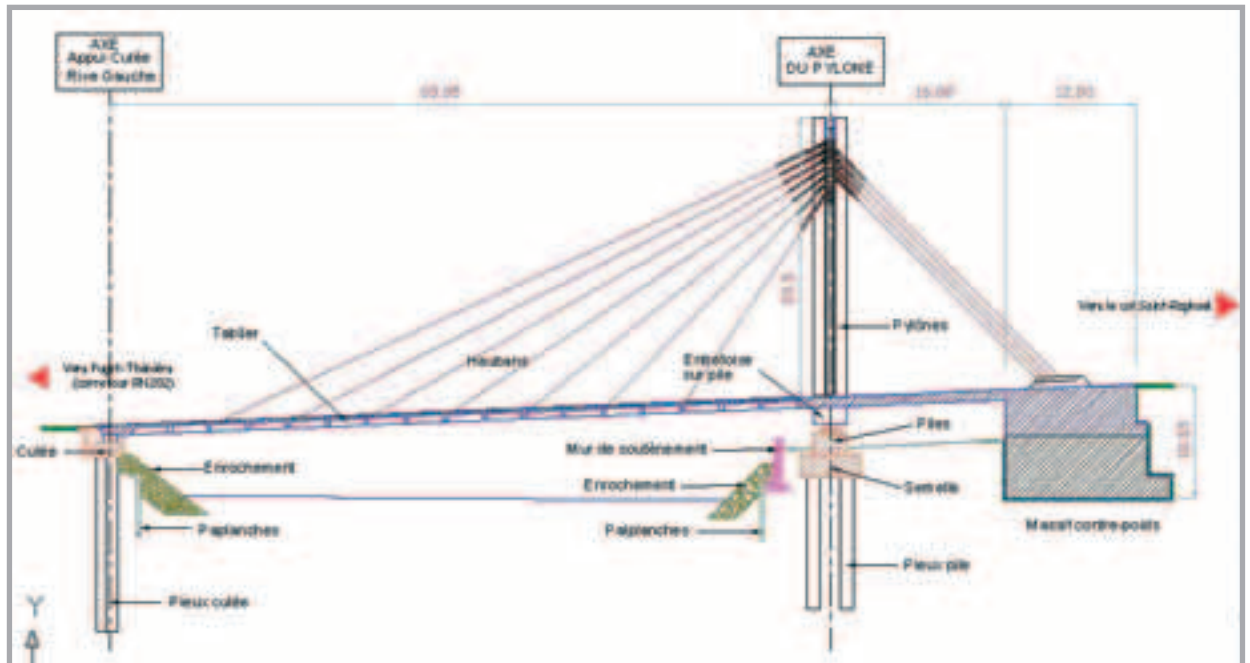
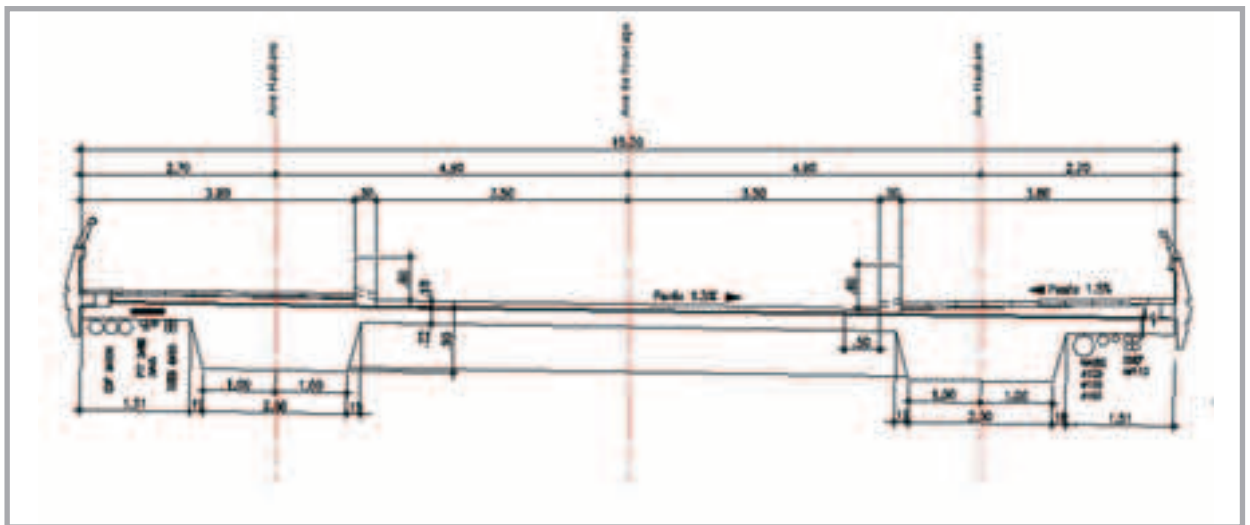


Figure 2
Coupe transversale du tablier
Cross section of the deck



► tion de l'ouvrage, un pont à haubans dissymétriques, à tablier en béton précontraint avec deux mâts de pylône verticaux.

D'un poids total d'environ 4 300 t, le nouveau pont sur le Var de Puget-Théniers présente une longueur totale de 94,50 m répartie en une travée principale de 66,50 m franchissant le Var et une travée arrière de 16 m prolongée par un massif contre-poids scellé dans le rocher (figure 1). Deux nappes parallèles de sept haubans disposés en semi-éventail supportent la travée principale et s'ancrent en partie supérieure dans les deux mâts du pylône de hauteur de 25,50 m.

Les efforts sont transmis à la culée contre-poids via deux nappes parallèles de quatre haubans de retenue eux aussi parallèles.

Le tablier, constitué d'une dalle de 22 cm d'épaisseur supportée par deux poutres longitudinales (dans lesquelles viennent s'ancrent les haubans) et par des entretoises espacées de 3,60 m, porte un

profil en travers comprenant deux voies de circulation de 3,50 m et deux larges trottoirs de 3,80 m (figure 2). Le béton utilisé pour le tablier et les pylônes est un béton à haute résistance (B60) tandis que celui des appuis a des caractéristiques plus classiques (B35 pour la pile et les culées, B30 pour les pieux).

■ LES ÉTAPES DE LA CONSTRUCTION

Principe général

Afin de s'affranchir des risques liés aux crues intempêtes du Var durant la construction et de leurs incidences sur le planning de l'opération, l'entreprise Razel, associée à l'entreprise Carillon (devenue depuis l'entreprise Cari), lauréates de l'appel d'offres, a proposé de construire l'ouvrage sur un

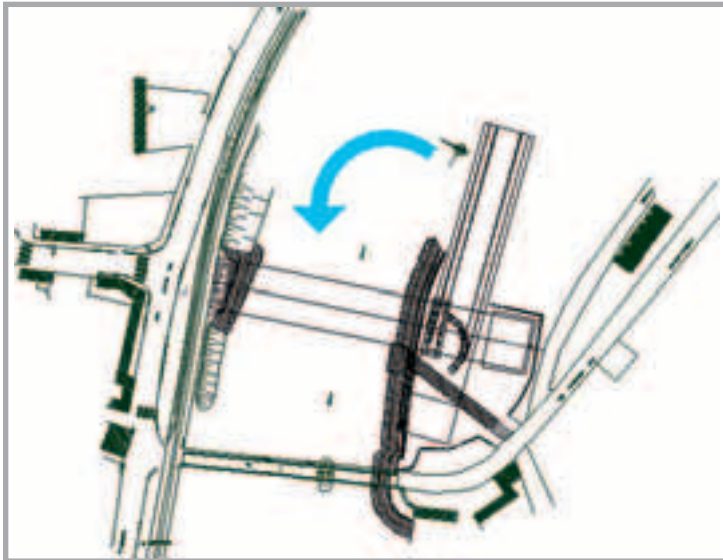


Figure 3
Principe de mise en place par rotation de l'ouvrage (vue de dessus)
Principle of structure placing by slewing (plan view)

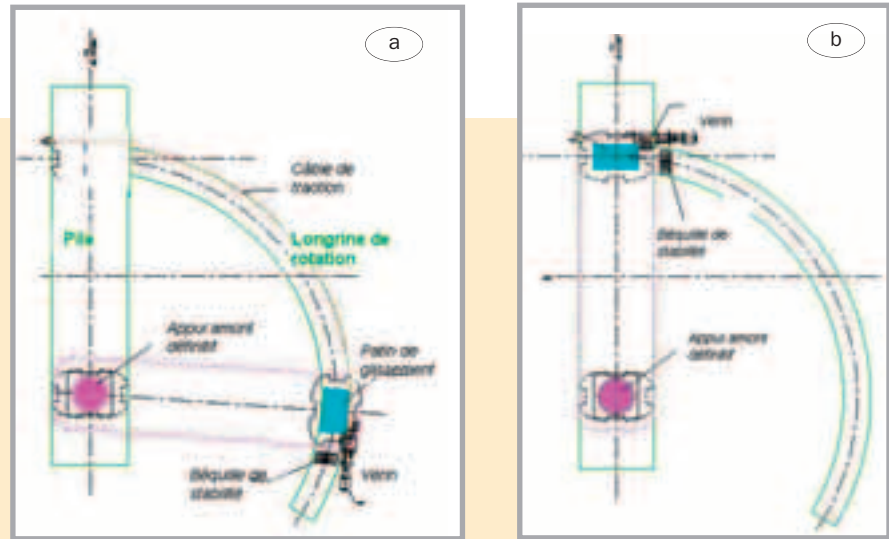


Figure 4
Rotation de l'ouvrage par glissement de l'appui aval sur la longrine provisoire (vue de dessus). a) Avant rotation. b) Après rotation
Slewing the structure by sliding from the downstream support onto the temporary stringer (plan view). a) Before slewing - b) After slewing

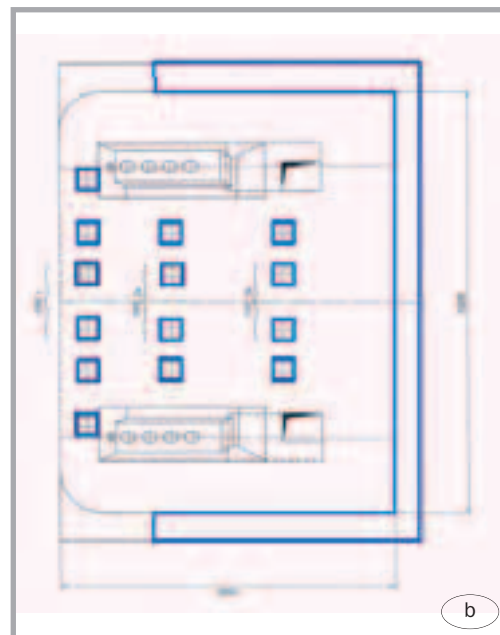
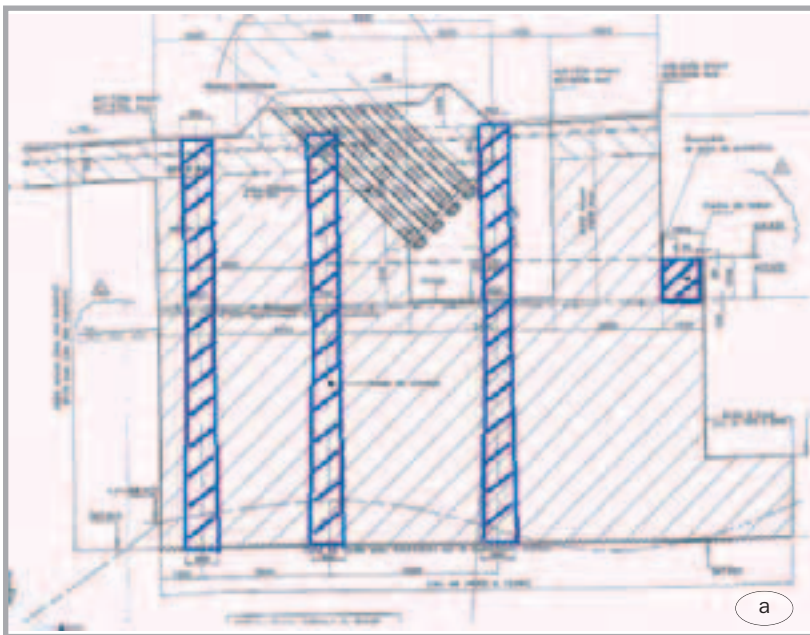


Figure 5
Solidarisation du massif contre-poids par cheminées tronconiques verticales et ceinture périphérique.
a) Coupe longitudinale.
b) Vue de dessus
Friction-type connection of the counterweight foundation block by vertical tapered chimneys and peripheral belt.
a) Longitudinal section -
b) Plan view

cintre général appuyé au sol, parallèlement au fleuve, puis de l'amener, quasi-achevé, dans sa position définitive par une rotation de 90° autour d'un axe vertical passant par un des pieds du pylône (figure 3).

Cette méthode de construction a nécessité quelques adaptations par rapport au projet initial du Setra : d'une part, une longrine de rotation provisoire en béton armé a été réalisée pour permettre le glissement de l'appui aval depuis sa position initiale jusqu'à sa position finale sur pile (figures 4a et 4 b).

D'autre part, compte tenu de la nécessité d'ancrage au rocher de cette culée constituant le point

fixe du fait du séisme et du niveau de ce rocher, le massif contre-poids a été scindé en deux parties : une partie mobile pivotant avec l'ouvrage et servant à contrebalancer son poids propre pendant la phase de rotation, et une partie fixe construite à son emplacement définitif, servant à équilibrer les surcharges d'exploitation et à ancrer correctement l'ouvrage dans le substratum rocheux en cas de séisme.

La solidarisation des deux parties du massif, une fois la rotation effectuée, est réalisée par l'intermédiaire d'une part de quatorze cheminées tronconiques verticales et d'une ceinture périphérique de connexion en béton armé (figures 5a et 5b).

Photo 3
Travaux de terrassement généraux et de battage des palplanches (septembre 2002)

General earthworks and sheet pile driving (September 2002)



Photo 4
Positionnement de l'entretoise sous pylône sur la longrine circulaire avant la rotation et détail de la couronne de guidage de l'appareil d'appui fixe servant de pivot

Positioning the cross tie under a tower on the circular stringer before slewing, and detail of the ring guiding the fixed support device serving as a pivot



Photo 5
Culée rive droite. Partie inférieure fixe. Ferrailage et réservations pour les cheminées de solidarisation (mai 2004)

Right bank abutment - Fixed lower part. Reinforcements and grout pockets for the friction-type connection chimneys (May 2004)



► La réalisation des appuis

La construction de l'ouvrage a débuté en septembre 2002 par les travaux de terrassement généraux, la pose des palplanches de protection des berges du Var au niveau de l'implantation du futur pont (photo 3), et la réalisation des pieux de la pile sous pylône, de la longrine de rotation et de la culée rive gauche.

Ces pieux, d'un diamètre de 1,20 m et d'une lon-

gueur de 12 à 16 m, sont au nombre de 12 pour la pile, 4 pour la culée rive gauche et 6 sous la longrine de rotation. Les pieux de la pile et de la culée sont entourés d'une gaine métallique définitive et présentent une densité de ferrailage importante atteignant jusqu'à 150 kg/m³ et visant à leur conférer un bon comportement sous séisme.

Au niveau de la pile, l'entretoise sous pylône repose d'un côté sur son appareil d'appui glissant définitif équipé d'une couronne de guidage métallique pour la phase de rotation et de l'autre sur la longrine de rotation par l'intermédiaire de patins de glissement en acier inox (photo 4). La longrine, qui sera démolie une fois la rotation effectuée, est encastrée dans la pile.

La construction de la partie inférieure fixe de la culée contre-poids en rive droite a nécessité d'important travaux de fouille et de terrassement pour atteindre le niveau sain du rocher. Le bétonnage a été réalisé en trois phases successives en prenant soin garder des réservations pour les cheminées verticales tronconiques de solidarisation avec la partie supérieure (photo 5).

La partie supérieure mobile de la culée rive droite a été construite sur cintre et sur lit de sable afin de faciliter sa mise en mouvement lors de la phase de rotation. L'alignement des tubes de réservation pour l'ancrage des haubans de retenue et le positionnement des réservations des parties supérieures des cheminées tronconiques de solidarisation, qui devront se superposer parfaitement avec celles de la partie inférieure, ont nécessité une attention toute particulière (photos 6a et 6b).

La construction du tablier sur cintre parallèlement au Var

Le tablier a été réalisé sur cintre sur la rive droite du Var. Le cintre a servi au coffrage de la travée arrière et des deux poutres longitudinales précontraintes de la travée principale. Les entretoises en béton armé ont été préfabriquées sur site, de même que les prédalles coffrantes qui ont servi au coffrage de la partie supérieure du hourdis central (photos 7a et 7b).

La réalisation du pylône et des boîtes d'ancrage

Les deux mâts du pylône ont été réalisés au moyen de coffrages grimpants à l'aide d'un outil coffrant spécial par levées successives de 4 m, alternativement sur un mât puis l'autre (photo 8). Les parties inférieures des mâts ainsi que les nœuds de connexion avec l'entretoise sous pylône sont des zones de concentration extrêmement importante d'efforts sous les sollicitations sismiques. En conséquence, ces zones ont fait l'objet d'un ferrailage particulièrement contraignant et dense, conformément aux dispositions constructives pres-



a

Photo 6
Culé rive droite.
Partie supérieure mobile.
a) Coffrage et ferrailage
(mai 2004). b) Décoffrage
septembre 2004

Right bank abutment.
Movable upper part.
a) Formwork and reinforce-
ments (May 2004) -
b) Formwork removal in
September 2004

Aciers en atente
de la ceinture
de solidarisation
périphérique



b



Photo 7
Construction du tablier sur centrage. a) Vue générale du centrage et plaques d'ancrage de la précontrainte.
b) Entretoises et prédalles préfabriquées en sous-face du tablier

Construction of the deck on centring. a) General view of the centring and prestressing anchor plates -
b) Prefabricated cross ties and shuttering floor slabs on the underside of the deck



Photo 9
Boîtes d'ancrage métalliques des haubans
Steel anchorage boxes for stay cables

crites par les règles parasismiques en vigueur [2]. Les boîtes d'ancrage supérieures métalliques pré-assemblées en usine, de 6,00 m par 3,60 m, sont encastrées dans le béton en tête des mâts au moyen de goujons (photo 9). Toutes les faces, à l'exception de celles en contact direct avec le béton, ont fait l'objet d'un traitement anticorrosion par peinture époxy.

La mise en place et la mise en tension des haubans

Les haubans sont constitués de câbles à torons multicouches (TMC) réalisés par l'entreprise Baudin-Chateauneuf agissant ici en qualité de sous-traitant. Ces câbles sont constitués de fils élémentaires enroulés en hélice autour d'un fil d'âme, en plusieurs couches successives alternativement dans un sens puis l'autre (photo 10). La protection contre la corrosion est assurée d'une part par un remplissage à la cire pétrolière des interstices entre les câbles, et d'autre part par une gaine périphérique en polyéthylène haute densité extrudée autour du câble lors de sa fabrication. Les haubans de la travée principale présentent un diamètre de 93 mm pour une charge de rupture de 619 t tandis que les haubans de retenue en travée



Photo 8
Construction des mâts du pylône.
Vue d'ensemble et accès
aux plates-formes de travail
Construction of tower masts.
Overall view and access to the work
platforms



Photo 10
Fabrication des haubans TMC
Manufacture of TMC stay cables



Photo 11
Mise en tension des haubans avant rotation
depuis la sous-face du tablier

*Stay cable tensioning before slewing
from the underside of the deck*

Photo 12
La rotation
de l'ouvrage
*Slewing
the structure*



Photo 13
Dispositif de rotation.
Vue générale.
*Slewing system.
General view*



arrière sont réalisés à l'aide d'unités plus fortes (114 mm de diamètre et charge de rupture de 992 t). Notons, enfin, que les haubans sont équipés de divers dispositifs spécifiques : tubes anti-vandalisme en partie inférieure et dispositifs absorbeurs de vibrations en élastomère au niveau des ancrages contre les effets du vent et des séismes. Les haubans sont fabriqués en usine et livrés sur le chantier entièrement équipés de leur protection définitive. Aussitôt après leur déroulement sur le tablier et leur mise en place, une première mise en tension des haubans s'est effectuée avant la rotation depuis la sous-face des poutres longitudinales du tablier au moyen de vérins (photo 11). La mise en tension s'est effectuée de façon alternée entre les haubans de la travée principale et les haubans de retenue afin de réduire au maximum les efforts de flexion dans les mâts du pylône et jusqu'à obtenir un léger décollement entre le tablier et les cintres. Une paire de haubans supplémentaires provisoires a par ailleurs été tendue entre les têtes de mâts et l'about du tablier afin de prendre en charge cette extrémité du tablier, celle-là même qui viendra prendre appui sur la culée rive gauche après la rotation.

La rotation du pont (photos 12 et 13)

Avant la rotation, l'ouvrage avait été préalablement soigneusement pesé, méticuleusement équilibré et puis lesté au moyen de contrepoids en béton jusqu'à obtenir une réaction d'appui de 220 t sur la béquille arrière de stabilisation correspondant à un moment de déséquilibre choisi vers l'arrière de 440 tm. Des pesées d'une grande précision ont alors été réalisées afin de s'assurer que les descentes de charges étaient bien réparties sur les trois appuis, l'appui amont servant de pivot, l'appui aval équipé de patins néoprène/téflon glissant sur la longrine de rotation, et la béquille arrière de stabilisation excentrée de deux mètres par rapport à l'axe des appuis principaux servant de pilote pour assurer et garantir le parfait équilibre durant tout le mouvement de rotation.

La rotation a été réalisée au moyen d'un câble de traction filant le long de la longrine circulaire et d'un vérin d'une force de 120 t. Le vérin ayant une course de 25 cm en continu, il a suffi d'activer son mouvement 60 fois pour permettre à l'ouvrage de 4 300 t d'effectuer sa rotation de 90°. La rotation a été réalisée sous couverture météo afin de s'assurer que la vitesse du vent ne dépasserait pas 50 km/h durant cette phase sensible du chantier. Le 13 novembre 2004 au matin, sous un soleil radieux et par un temps exceptionnellement clément, s'est effectuée l'opération de rotation de l'ouvrage, en présence des principaux élus de toute la région et devant près de trois mille spectateurs, habitant pour la plupart les deux rives du Var et venus assister à la phase la plus spectaculaire de la

construction du nouveau pont de Puget-Thénières. Quatre heures ont suffi pour réaliser cette mise en place. La très grande qualité et le soin apportés à la réalisation de l'ouvrage ont permis un déroulement absolument parfait de cette opération de rotation.

L'achèvement de l'ouvrage

Une fois l'ouvrage dans sa position finale, restaient les dernières "finitions" à réaliser... D'un point de vue mécanique, les colonnes et la ceinture de solidarisation du massif contrepoids de la culée rive droite ont été ferrillées et bétonnées. En rive gauche, une butée parasismique en béton armé de dimensions en plan 1,75 m par 1,20 m et de 70 cm de hauteur a été ajoutée pour bloquer le débattement latéral du tablier sous séisme (photo 14). La béquille arrière a été démontée, la longrine de rotation démolie et l'appui aval sous pylône a été placé sur son appareil d'appui à pot glissant définitif. Enfin, la paire de haubans provisoires a été détendue et on a procédé au réglage définitif des haubans depuis la boîte d'ancrage métallique en tête de mâts (photo 15), à l'exception de la première paire en travée accessible depuis la rive à proximité de la pile et des haubans de retenue tendus depuis le bas.

En ce qui concerne les superstructures et les équipements de l'ouvrage, on a procédé à la mise en place des garde-corps, à la réalisation de la chape d'étanchéité et des enrobés, et au dallage des trottoirs. Les pylônes ont par ailleurs été équipés de paratonnerres et des spots d'éclairage des haubans ont été installés en tête de mâts et au niveau des plots d'ancrage dans le tablier afin de souligner la silhouette de l'ouvrage en perception nocturne (photos 16a 16b et 16c).

CONCLUSIONS

Les travaux de construction du nouveau pont sur le Var à Puget-Thénières se sont achevés en mai 2005 après une durée d'environ deux ans. Le chantier s'est déroulé dans d'excellentes conditions, notamment de qualité pour l'ouvrage, et à la plus grande satisfaction de tous, prouvant que les choix qui avaient été faits étaient les bons. Le montant total de l'opération s'élève à un peu plus de 6 millions d'euros auxquels viennent s'ajouter 3 millions d'euros pour les aménagements paysagers connexes (aménagement du carrefour, rétablissement du passage à niveau du chemin de fer de Provence, création d'un espace de promenade sous le pont et aménagement de la rive droite du Var). Les visions lointaines ou à proximité directe de l'ouvrage, de même que son appropriation immédiate par la population semblent correspondre parfaitement aux objectifs initiaux fixés par la maîtrise d'ouvrage de



Photo 14
Butée parasismique de blocage latéral en culée rive gauche

Lateral blocking earthquake-resistant wing wall on the left bank abutment



Photo 15
Réglage définitif des haubans depuis les têtes de mâts

Final adjustment of the stay cables from the mast heads



Photo 16
Pose des superstructures et équipements.
a) Dallage des trottoirs.
b) Réserve pour spot d'éclairage dans les plots d'ancrage des haubans.
c) Spots d'éclairage des haubans de retenue

Laying superstructure and equipment. a) Footpath slabbing. b) Grout pocket for spotlight in the stay cable anchorage blocks. c) Spotlights for restraining stay cables

a



b



c

► construire un ouvrage à la fois marquant esthétiquement et s'intégrant parfaitement bien dans le site de Puget-Théniers. Cette réussite témoigne d'un partenariat particulièrement bien réussi entre la collectivité territoriale du Conseil général des Alpes-Maritimes, les services centraux de l'Etat représentés par le Setra, le cabinet d'architecte et les entreprises Razel et Cari (photos 17 et 18).

Références

[1] Le projet du nouveau pont sur le Var à Puget-Théniers - P. Vion - *Bulletin Ouvrages d'art* n° 48, avril 2005 - Setra/CTOA.

[2] Ponts courants en zone sismique - *Guide de conception* Setra - SNCF.

Crédit photos :

- Albert Laurens (DDE 06 - Subdivision de Puget-Théniers) : photo 2.

- Philippe Julien (Setra) : figures 1, 2 et 4.

- Razel/Cari : figures 3 et 5, photos 1 et 12.

- Denis Davi (Setra) et Philippe Vion (Setra) : photos 3 à 18.



Photo 17
Vue de l'ouvrage terminé...
General view of the completed structure



Photo 18
Vue rapprochée de l'ouvrage
Close-up view of the structure

ABSTRACT

Construction of the new Puget-Théniers bridge over the Var

Various authors

The new bridge over the Var at Puget Théniers, in the Alpes-Maritimes region, has several special features. First of all its structure, because this is an asymmetric cable-stayed bridge with two spans, including a cable-stayed 66-metre main span crossing the river and a 16-metre rear span extended by a counterweight abutment; but also its design, because the bridge, located in a seismic region, includes a fixed point formed by its counterweight abutment rigidly anchored to the rock. It is original, too, through the nature of its stay cables consisting of multi-layer tendons, and finally, above all, through its construction method, because, to overcome the risks of flooding of the Var, this structure was prefabricated on the right bank of the river and then put in place by slewing in accordance with an original and extremely bold procedure. This article describes its characteristics, its special features and its construction method.

RESUMEN ESPAÑOL

La construcción del nuevo puente de Puget-Théniers sobre el río Var

Autores diversos

El nuevo puente sobre el río Var en Puget Théniers, en los Alpes-Marítimos, presenta distintas particularidades. En primer lugar, debido a su estructura ya que se trate de un puente atirantado asimétrico de dos vanos, cuyo vano principal de 66 m atirantado franquea el río y un vano trasero de 16 m prolongado por un estribo contrapeso; pero también debido a su diseño, ya que la obra ubicada en una región sísmica consta de un punto fijo formado por su estribo contrapeso rigidamente anclado en la roca; así como original debido al género de sus péndolas constituidas por cordones multicapas, finalmente y sobre todo mediante su método de construcción ya que, para evitar los riesgos de avenidas del río Var, esta obra fue fabricada previamente en la orilla derecha del río y puesta en su sitio por rotación acorde a un proce-

dimiento interesante y particularmente audaz. En el presente artículo se describe sus características, sus particularidades y su método de construcción.

Un pont haubané au pays du Matin calme

Le pont de Masan en Corée du Sud

L'opération du pont de Masan porte sur le financement, la conception, la construction, l'exploitation et la maintenance de l'ouvrage pendant 30 ans.

Situé en Corée du Sud, au sud du pays près de la ville de Pusan, deuxième pôle industriel du pays, le futur pont de Masan permettra de franchir la baie de Masan. Il a une longueur totale de 1 750 m se décomposant en un pont haubané de longueur totale 740 m avec une travée centrale de 400 m et deux viaducs d'accès de 410 m et 550 m de longueur. Cet ouvrage comporte 2 x 2 voies.

Il s'agit de la première application par un investisseur étranger de la loi coréenne sur les partenariats publics privés (PPP). L'originalité du financement de cette opération associe une subvention d'Etat à un financement privé international.

Les études d'avant-projet sommaire ont démarré en 2001 et se sont poursuivies en 2002. Les études d'avant-projet détaillé et d'exécution se sont déroulées en 2003 et 2004.

Les travaux, signés par Bouygues TP en joint venture avec le coréen Hyundai Engineering Corp, ont commencé pendant l'été 2004 et dureront 4 ans, l'ouverture de l'ouvrage étant prévue mi-2008 (photos 1 et 2).



Photo 1
Vue virtuelle de l'ouvrage
terminé depuis l'aval

*Virtual view of the completed
structure from downstream*



Photo 2
Vue générale du site en avril 2005
General view of the site in April 2005

■ PRÉSENTATION DU PROJET

Description générale et quantités

L'ouvrage comporte un ouvrage principal haubané avec une travée centrale de 400 m et deux travées de rive de 170 m. Le viaduc d'accès ouest, de 410 m de longueur, se compose de trois tra-

vées de longueur 130 m, 150 m et 130 m. Le viaduc d'accès Est, de 550 m de longueur, comporte huit travées : six travées courantes de 70 m et deux travées de rive de 65 m. Ces trois ouvrages ont des tabliers mixtes acier-béton (photo 3).

Les quantités principales à mettre en œuvre sont les suivantes :

◆ béton de fondations : pieux : 30 000 m³;



Photo 3
 Vue virtuelle de l'ouvrage terminé depuis l'amont
Virtual view of the completed structure from upstream

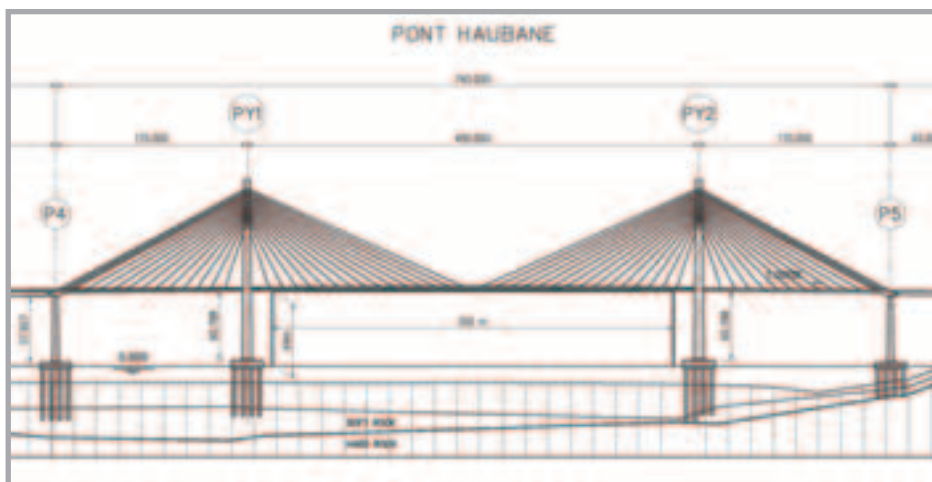


Figure 1
 Elévation longitudinale du pont haubané
Longitudinal elevation view of the cable-stayed bridge

Figure 2
 Elévation longitudinale de l'accès ouest
Longitudinal elevation view of the western approach



- ◆ béton de semelles, piles et pylônes : 70 000 m³;
- ◆ béton de tablier : 13 000 m³;
- ◆ aciers passifs : 20 000 t;
- ◆ charpente métallique : 15 000 t;
- ◆ haubans : 1 100 t (figures 1, 2 et 3).

Règlements et hypothèses principaux

Ce sont les règlements coréens qui sont appliqués en priorité. Ils sont très fortement inspirés des règles américaines AASHTO.

Hypothèses spécifiques

Trois cas de charge importants sont à prendre en compte :

◆ **choc de bateaux** : il faut considérer un bateau de 30 000 t de déplacement à la vitesse de cinq nœuds. Les règles AASHTO (1991) sont appliquées. Elles sont basées sur une analyse de probabilités avec une fréquence annuelle admissible de dommage de 10⁻³. Les calculs ont abouti aux efforts suivants :

- pylônes : choc frontal de 50 MN et choc latéral de 25 MN,

- piles adjacentes aux pylônes : choc frontal de 10 MN et choc latéral de 5 MN;

◆ **séisme** : le spectre d'accélération a un palier à 0,154 g;

◆ **vent** : la vitesse de référence (à 10 m moyennée sur 10 minutes) est prise égale à 40 m/s.

Le séisme et le vent font l'objet plus avant d'un développement spécifique dans la partie "Analyse de points particuliers" du présent article.

Le pont haubané

Les fondations

La hauteur d'eau dans la baie de Masan est en moyenne de 16 m et la géologie type du fond marin est la suivante :

◆ argile silteuse molle sur une épaisseur moyenne de 16 à 17 m;

◆ sables et graves compactes sur une épaisseur de 2 à 8 m;

◆ sol résiduel (rocher complètement altéré) sur une épaisseur de 0 à 12 m;

◆ rocher de type éruptif de qualité variable (granitoïde).

Le contexte général est très tectonisé.

Les fondations des deux pylônes sont chacune constituées par 28 pieux forés tubés de 3 m de diamètre et d'une longueur moyenne de 50 m, et par une semelle de 29,1 m x 51,6 m x 8 m d'épaisseur. Les pieux sont ancrés dans le rocher de moyenne qualité (soft rock).

Les pylônes

Les deux pylônes ont une forme en H comportant une entretoise en béton précontraint au niveau du

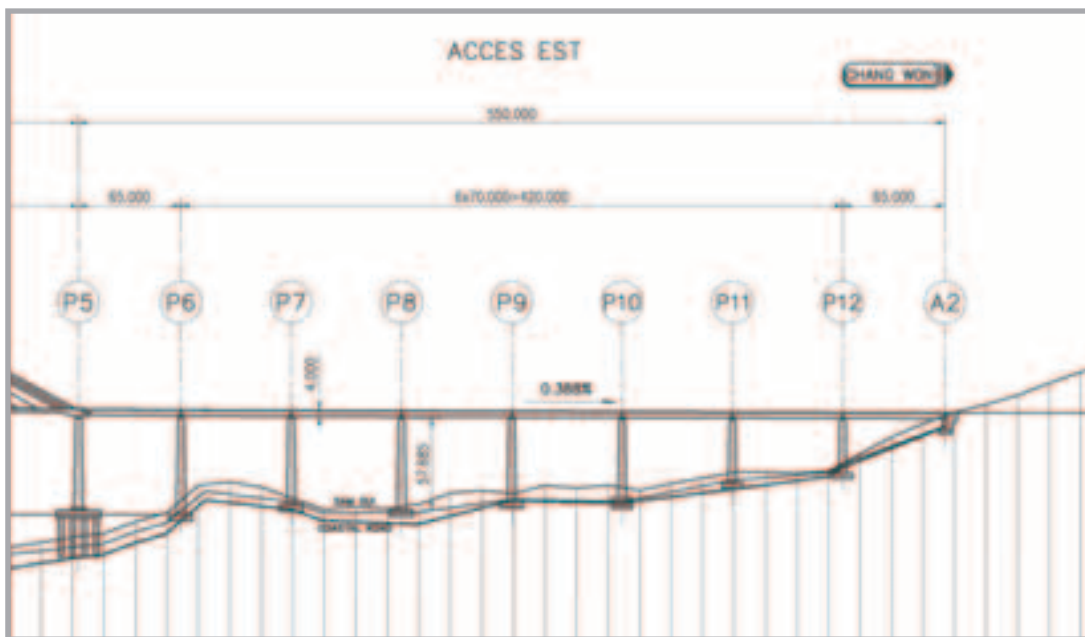


Figure 3
Elévation longitudinale de l'accès est

Longitudinal elevation view of the eastern approach

tablier et trois butons métalliques articulés dans le plan vertical, en partie haute du pylône (figure 4).

Les piles de retenue

Les deux piles de rive du pont haubané sont fondées chacune sur 16 pieux de diamètre 3 m. Chacune des piles est précontrainte par 2 x 15 câbles 12 T 15 et le tablier est cloué sur ces deux piles par quatre câbles 12 T 15 pour P4 et quatre câbles 31 T 15 pour P5.

Le tablier

Il est constitué par un bipoutre mixte, comportant deux poutres latérales métalliques longitudinales de 2,15 m de hauteur avec un hourdis béton de 30 cm d'épaisseur. Le tablier comporte des entretoises métalliques tous les 4,15 m qui ont une hauteur de 1,85 m.

Les haubans

Le haubannage est constitué par quatre nappes de haubans par pylône disposés en semi-harpe. Chaque nappe comporte 15 haubans qui sont ancrés au niveau du tablier, tous les 12,45 m, dans une poutre transversale spécifique ayant l'inclinaison du hauban et dépassant de l'emprise du tablier. Au niveau des pylônes, les haubans sont ancrés dans une structure métallique noyée dans le béton. Les haubans sont de type PWS, c'est-à-dire à fils parallèles de diamètre 7 mm, et comportent un nombre de fils variant entre 121 et 337 (figure 5).

Les viaducs d'accès

Fondations et piles

Les fondations sont de type superficiel pour la plupart sauf pour deux appuis côté ouest qui ont des fondations profondes (pieux de 3 m de diamètre). Chaque file d'appui comporte un seul fût avec un chevêtre élargi en tête.

Tablier du viaduc d'accès ouest

Le tablier est constitué par un caisson fermé mixte acier-béton à hauteur variable (10 m sur appui

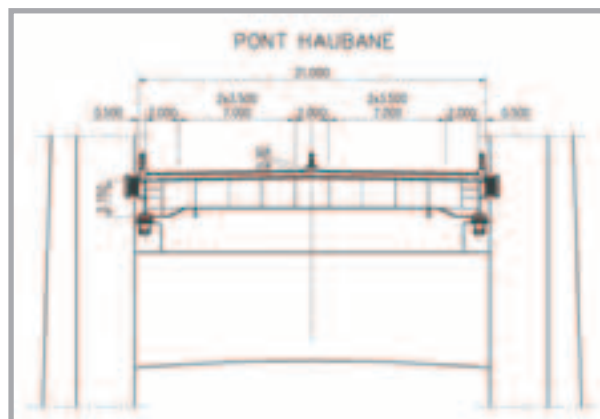


Figure 5
Coupe transversale du tablier du pont haubané

Cross section of the cable-stayed bridge deck

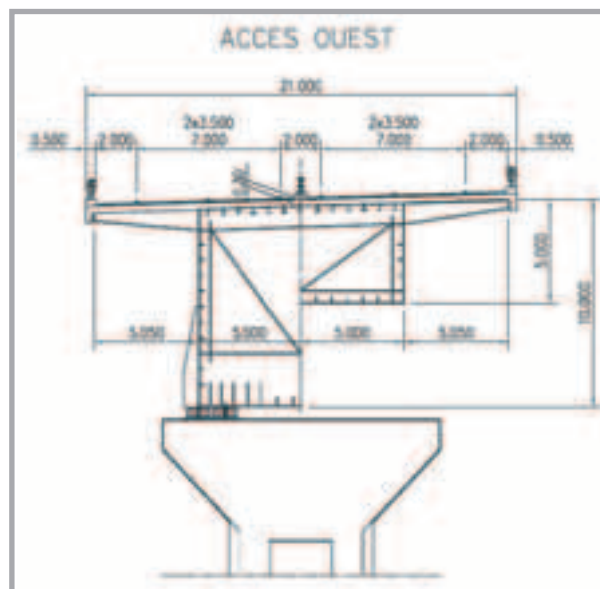


Figure 6
Coupe transversale du tablier de l'accès ouest

Cross section of the western approach deck

et 5 m en travée). Les encorbellements, de 5 m de portée, comportent des entretoises métalliques tous les 3 m. La dalle béton supérieure a une épaisseur de 30 cm (figure 6).

Tablier du viaduc d'accès Est

Le tablier est constitué par un caisson ouvert mixte acier-béton à hauteur constante de 4 m. Les encorbellements, de 5 m de portée, comportent des entretoises métalliques tous les 3 m. La dal-

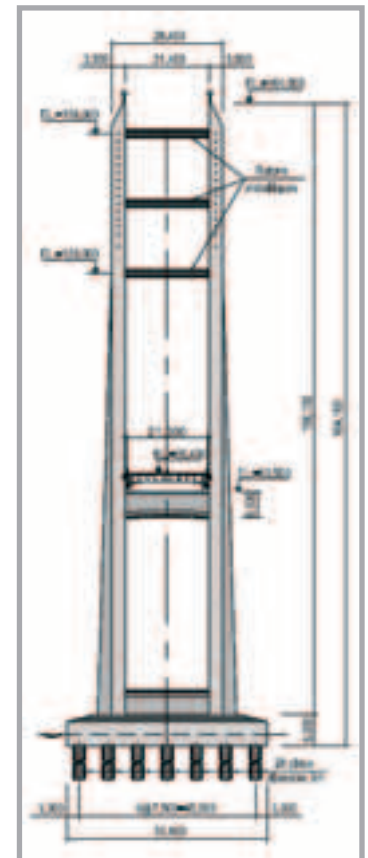


Figure 4
Elévation du pylône
Elevation view of the tower

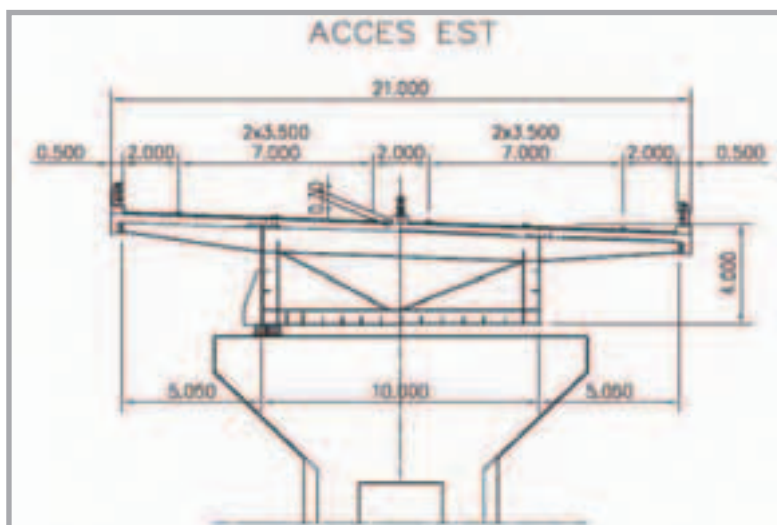


Figure 7
Coupe transversale
du tablier de l'accès est
*Cross section
of the eastern approach
deck*

Photo 4
Outil de forage pour les pieux
de diamètre 3 m
*Boring tool for piles
of diameter 3 m*



Photo 5
Equipements en tête de pieu
diamètre 3 m
*Pile head equipment
of diameter 3 m*



Photo 6
Levage de coque préfabriquée : phase 1, départ
de la zone de préfabrication
*Lifting a prefabricated shell : phase 1, leaving
the prefabrication area*

► le béton supérieure a une épaisseur de 30 cm (figure 7).
Il faut noter que les tabliers des deux viaducs d'accès reposent, côté ouvrage principal, sur des consoles situées en prolongement du tablier de l'ouvrage principal. Cette disposition permet d'éviter la présence de piles-culées toujours délicates au niveau aménagement en partie supérieure. D'autre part, ce principe mobilise la réaction d'appui venant des viaducs d'accès en tant que lest au niveau des deux piles de retenue P4 et P5 du pont haubané.



Photo 7
Levage de coque préfabriquée : phase 2, transport
sur site
*Lifting a prefabricated shell : phase 2, transport
to site*



Photo 8
Levage de coque préfabriquée : phase 3,
arrivée sur site
Lifting a prefabricated shell : phase 3, arrival on site

Les méthodes d'exécution

Fondations

Les fondations sont réalisées à partir de deux estacades provisoires disposées le long du futur tracé de l'ouvrage. Des coques préfabriquées de poids unitaires 700 t sont utilisées pour coffrer les semelles en mer (photos 4 à 10).

Pylônes et piles

Un coffrage glissant est utilisé pour construire les 120 premiers mètres des pylônes (photo 11), et ensuite, au niveau des zones d'ancrage des haubans, un coffrage grimpant sera mis en œuvre. Toutes les piles des deux viaducs d'accès seront réalisées à l'aide d'un coffrage grimpant.

Tabliers

Le tablier du pont haubané sera presque entièrement préfabriqué avec des voussoirs métalliques de 12,45 m de longueur levés depuis une barge à l'aide d'une grue disposée sur le tablier. Ensuite, des dalles béton préfabriquées seront posées sur l'ossature métallique et clavées entre elles avant mise en place de la paire de haubans correspondante (photos 12 et 13).
La partie métallique du tablier du viaduc d'accès



Photo 9
 Levage de coque préfabriquée: phase 4, début de pose de la coque
Lifting a prefabricated shell: phase 4, start of shell laying



Photo 10
 Levage de coque préfabriquée: phase 5, coque en place
Lifting a prefabricated shell: phase 5, shell in place

ouest sera posée par travées entières à la grue et le hourdis béton sera coulé en place (photo 14). La partie métallique du tablier du viaduc d'accès Est sera mise en place par poussage à partir de la culée et le hourdis béton sera coulé en place.

ANALYSE DE POINTS PARTICULIERS

L'analyse sismique

Le pont de Masan est situé dans une zone de sismicité moyenne.

Accélération spectrale

L'application des règlements coréens a permis de définir les spectres suivants (tableau I). Les spectres pour les deux types de sols et pour un amortissement de 5 % sont représentés sur la figure 8.

Principes de modélisation

La réponse de l'ouvrage à l'excitation sismique est obtenue au moyen d'un modèle aux éléments finis élastique linéaire tridimensionnel. Le pro-



Photo 11
 Coffrage glissant sur le pylône PY1
Sliding formwork on PY1 tower



Photo 12
 Vue virtuelle de la mise en place du premier tronçon de tablier haubané
Virtual view of placing of the first section of cable-stayed deck



Photo 14
 Vue virtuelle de la mise en place d'une travée complète du tablier ouest à l'aide d'une grue flottante
Virtual view of placing of a complete span of the western deck using a floating crane

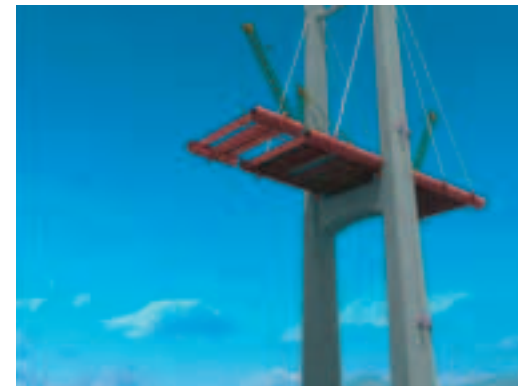


Photo 13
 Vue virtuelle de la mise en place d'un tronçon métallique courant de tablier haubané
Virtual view of placing of a steel section of the cable-stayed deck

	Soil Profile Type	Ground coefficient S
P1, P2, P5 to A13	II	1.2
P3 to PY2	III	1.5

Tableau I
 Définition du spectre sismique, coefficients de sol
Definition of the seismic spectrum, soil coefficients

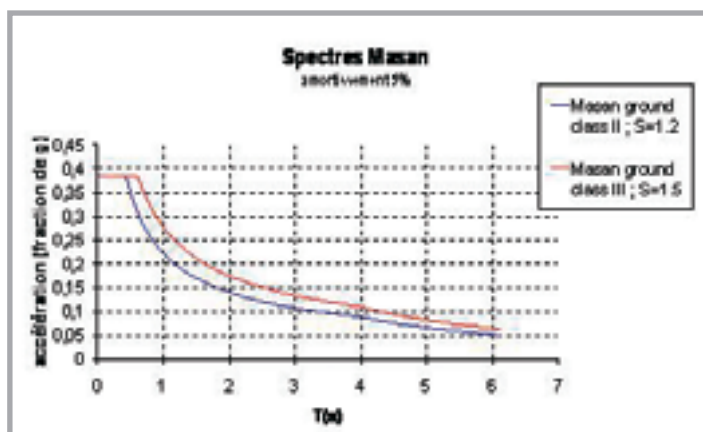


Figure 8
 Spectre sismique pour les deux types de sol
Seismic spectrum for the two types of soil



Figure 9
Modélisation des semelles souples des piles P4 et P5
Modelling the flexible foundation slabs of piers P4 and P5

gramme utilisé est HERCULE (développé par Socotec).

Les configurations étudiées sont :

- ◆ la configuration de service ;
- ◆ deux configurations de construction :

- configuration 1 : la configuration de fléau la plus pénalisante (après pose des onzièmes voussoirs),
- configuration 2 : la phase précédent le clavage de la travée centrale (tous les voussoirs sont posés, les clavages côté travées d'accès sont effectués).

Les modèles de la configuration de service et de la configuration de construction n° 2 comprennent les trois viaducs (viaduc principal, viaducs d'accès Est et ouest), de la pile P1 à la culée A13, reliés entre eux au niveau des joints cantilever, au travers desquels seuls les efforts verticaux et transversaux et les moments de torsion sont transmis. La modélisation pour ces configurations de l'ensemble des trois ouvrages garantit :

- ◆ la prise en compte de raideurs et amortissements corrects aux interfaces entre viaducs d'accès et viaduc principal ;
- ◆ la définition correcte des modes, prenant en compte les interactions entre les viaducs d'accès et le viaduc principal ;
- ◆ l'évaluation correcte des efforts dans les piles P4 et P5 qui sont excitées à la fois par le viaduc principal et par les viaducs d'accès.

Le modèle prend également en compte la courbure en plan des viaducs d'accès (rayon de 1000 m pour l'approche ouest, 700 m pour l'approche Est). La direction longitudinale de séisme correspond à l'axe longitudinal du viaduc principal. La réponse est calculée par application séparée des accélérations spectrales selon les deux directions horizontales, puis par application des combinaisons de Newmark :

$$\begin{aligned} &1.0 E_x + 0.3 E_y \\ &0.3 E_x + 1.0 E_y \end{aligned}$$

Conformément aux règles coréennes, le séisme vertical n'est pas pris en compte.

Appareils d'appui

Les tabliers des viaducs d'accès (à l'exception des joints cantilever et des culées) sont appuyés sur des appuis élastomères à fort amortissement (HDRB = high damping rubber bearings), qui présentent, du point de vue sismique, le double intérêt de constituer à la fois un ressort et un amortisseur. Le comportement en ressort permet d'augmenter la période propre de la structure, donc de diminuer sa réponse. Le comportement amortisseur, dissipateur d'énergie, diminue également les sollicitations dans la structure.

Les HDRB utilisés pour ce projet génèrent un amortissement de 22,5 %.

Le tablier haubané est bloqué longitudinalement sur le pylône 1.

En service, il est libre longitudinalement sur le pylône 2, en particulier vis-à-vis des variations linéaires

de vitesse "faible" (< 1 mm/s). Par contre, Le tablier est bloqué longitudinalement sur le pylône 2 sous l'effet de sollicitations "rapides" au moyen de bloqueurs (LUD = "lock up devices") permettant de répartir sur les deux pylônes l'effort longitudinal généré par l'excitation du tablier du viaduc principal.

Semelles souples sur P4 - P5

Les appuis P4 et P5 sont fortement sollicités au séisme, ayant notamment à reprendre les charges horizontales issues à la fois des viaducs d'accès et du viaduc principal, d'où des moments d'axe longitudinal importants appliqués à la fondation.

Le nombre de pieux est déterminé par le critère de portance en service, et leur disposition par les conditions d'entraxe minimum entre pieux.

Le concept retenu pour ces appuis consiste à utiliser des semelles souples, qui transmettent les efforts de la pile aux pieux par flexion de la semelle et non par des bielles comme cela est le cas dans les semelles rigides habituellement conçues. Ceci présente les avantages suivants :

- ◆ gain sur les quantités de béton, les semelles souples étant plus minces que les semelles rigides ;
- ◆ lissage des efforts dans les pieux : la comparaison entre la répartition des sollicitations dans les pieux sous efforts/moments unitaires appliqués en tête semelle, entre une configuration avec semelle souple et une configuration en semelle rigide montre que le fonctionnement en semelle souple a tendance à "lisser" les efforts entre les pieux : rechargement des pieux "centraux", qui se situent dans une zone de transmission des efforts en bielle, et déchargement des pieux périphériques. Ce fonctionnement est donc intéressant dans le cas de semelles sollicitées au séisme. Dans notre cas, ce fonctionnement permet notamment d'éviter la mise en traction des pieux de rive de la fondation. Les semelles des piles P4 et P5 sont modélisées de la façon suivante : le pied de pile est relié aux têtes de pieux au moyen de poutres dont la rigidité représente :
 - ◆ une partie rigide, correspondant à une zone de fonctionnement en bielles, dans la zone où les efforts sont transmis directement de la zone comprimée du fût de pile aux têtes de pieux par l'intermédiaire de bielles (figure 9) ;
 - ◆ une partie "souple", dont la rigidité correspond à la rigidité en flexion de la semelle.

Les calculs fissurés au grand déplacement

La modélisation correcte du comportement des pylônes, éléments élancés soumis à d'importants efforts de compression ainsi qu'à des efforts transversaux significatifs, nécessite la prise en compte des phénomènes suivants :

- ◆ non linéarité géométrique, i.e. calcul en grands déplacements ;

		Coefficient de traînée	Coefficient de portance	Coefficient de moment	Dérivée traînée	Dérivée portance	Dérivée moment
Modèles numériques	Bi-poutre non profilé	0.208	-0.335	0.0019	-0.161	4.053	0.111
	Profilage : fairings + poutres long	0.173	0.054	-0.016	0.206	10.973	0.829
	Profilage : windnose+ élarg. semelle inf	0.139	-0.242	-0.009	-0.034	7.001	0.65

Tableau II
Essai au vent sur modèle numérique, tableau des coefficients aéroélastiques stationnaires pour les trois configurations étudiées

Wind test on computer model, table of stationary aeroelastic factors for the three configurations studied

◆ non linéarité des matériaux, d'une part du fait de la non linéarité de la loi de comportement du béton en compression, d'autre part du fait de la prise en compte de la fissuration des sections de béton du pylône, entraînant une modification des caractéristiques mécaniques des sections ;

◆ prise en compte des forces de rappel horizontales exercées par les haubans sur le pylône lorsque celui-ci dévie de sa position horizontale. Cet effet est favorable vis-à-vis des sollicitations dans le pylône ;

◆ prise en compte du fluage du béton sous l'effet des charges permanentes. Ce phénomène peut être sensible du fait de l'inclinaison sur la verticale de la fibre neutre des jambes dans le plan transversal sur les moitiés de leur hauteur ;

◆ nécessité de prendre en compte le caractère fortement hyperstatique du pylône : les jambes du pylône sont reliées dans le plan transversal par trois butons métalliques supérieurs et une entretoise en béton précontraint sous le tablier ;

◆ modélisation de la structure en 3D (chargement de vent turbulent générant le cas de flexion déviée). Les logiciels de calcul disponibles, ne permettent pas de répondre de façon appropriée aux problèmes posés ci-dessus.

Deux logiciels internes de Bouygues TP se rapprochent des caractéristiques requises, sans répondre complètement au problème :

◆ le logiciel PONT, utilisé pour le calcul phasé des tabliers en béton précontraint, intègre la possibilité de calculs en grands déplacements géométriques, les lois de comportement non linéaires du béton en compression et le fluage du béton. Ce logiciel, basé sur la méthode des déplacements, permet en outre l'étude de structures fortement hyperstatiques. Ce logiciel ne prend pas en compte l'effet de la fissuration des sections (le ferrailage des sections de BA ne peut être introduit dans le calcul), la précontrainte permettant de s'affranchir de cet effet dans les ponts précontraints calculés par ce logiciel ;

◆ le logiciel STABI 3D, utilisé pour la justification des piles de grande hauteur, intègre le calcul en grands déplacements géométriques, les lois de comportement non linéaires du béton en compression ainsi que la prise en compte de la fissuration (il intègre le ferrailage des sections) et le fluage du béton. Ce logiciel, basé sur la méthode des

forces ne permet pas, par contre, l'étude de structures fortement hyperstatiques.

Un nouveau logiciel (STABYL) a donc été développé utilisant les fonctionnalités de STABI 3D, mais basé sur la méthode des déplacements, et établi à partir des algorithmes de PONT et STABI 3D.

Le vent

Hypothèses principales

La vitesse de vent à considérer est la suivante : $V_{10} = 40$ m/s, moyenne sur 10 minutes, à une hauteur de 10 m, pour une période de retour de 100 ans.

Cette vitesse correspond à 60 m/s au niveau du tablier (altitude de 60 m).

Essais sur modèle numérique 2 D

Ces essais ont été réalisés par le bureau d'études danois Cowi avec le programme DVM FLOW de simulation aérodynamique.

Ils nous ont permis de tester, en 2D, plusieurs aménagements de la section transversale en vue d'améliorer son comportement au vent. D'autre part, ces essais ont permis de déterminer les coefficients aérodynamiques stationnaires (coefficients de traînée, portance et moment ainsi que leurs dérivés). Les résultats suivants ont été obtenus :

- ◆ vitesse critique de stabilité au flottement :
 - type 1 : section origine sans aucun aménagement : 50 m/s,
 - type 2 : section profilée avec des déflecteurs horizontaux en rive et deux poutres longitudinales disposées entre les deux poutres maîtresses : 64 m/s,
 - type 3 : section profilée avec des déflecteurs arrondis en rive et des élargissements de 1,50 m des semelles inférieures des deux poutres maîtresses : 84 m/s.

La vitesse critique minimum recherchée de stabilité au flottement a été prise égale à 78 m/s ce qui correspond à un coefficient de sécurité de 1,3 (normes japonaises) par rapport à la vitesse de base du vent au niveau du tablier (60 m/s) ;

◆ coefficients aéroélasticités stationnaires.
Nous avons rassemblé ci-dessous les coefficients obtenus pour les trois configurations explicitées dans le paragraphe ci-dessus (tableau II) : nous constatons que la section type 3 est plus efficace que la section type 2 en ce qui concerne le coeffi-

		COEFFICIENT DE TRAÎNÉE	COEFFICIENT DE PORTANCE	COEFFICIENT DE MOMENT	DÉRIVÉE TRAÎNÉE	DÉRIVÉE PORTANCE	DÉRIVÉE MOMENT
MODÈLE NUMÉRIQUE	PROFILAGE : WINDNOSE + ELARG SEMELLE INF	0.139	-0.242	-0.009	-0.034	7.001	0.65
ESSAIS SUR MAQUETTE	PROFILAGE : WINDNOSE + ELARG SEMELLE INF	0.14	-0.07	0.01	-1.29	5.732	-0.86

Tableau III
Coefficients aéroélastiques et dérivés, comparaison modèle numérique et essais sur maquette
Aeroelastic factors and derivatives, comparison of computer model and tests on mock-up

Photo 15
Essai au vent, maquette d'un tronçon de tablier
Wind test, model of a deck section



- ◆ la section du tablier à l'échelle 1/50;
- ◆ le pylône seul à l'échelle 1/100;
- ◆ l'ensemble du pont à l'échelle 1/200 en considérant trois configurations :
 - configuration 1 : le fléau seul juste avant liaison avec la pile de retenue,
 - configuration 2 : le tablier juste avant la réalisation du clavage central,
 - configuration 3 : le tablier complet en service normal.

Essai sur tronçon de tablier à l'échelle 1/50 (section model) (photo 15)

Photo 16
Essai au vent, maquette du pylône seul
Wind test, model of the tower only



- Ces essais ont eu pour objet :
- ◆ la vérification de la stabilité aérodynamique du tablier pour différentes vitesses de vent;
 - ◆ l'aménagement de la section pour améliorer la stabilité;
 - ◆ la détermination des coefficients aérodynamiques stationnaires;
 - ◆ l'étude du détachement tourbillonnaire sous vitesse lente;
 - ◆ la détermination de la vitesse critique de stabilité en flottement.

Nous avons rassemblé dans le tableau III les résultats obtenus pour les coefficients aérostationnaires et leurs dérivés et nous avons comparé les valeurs avec celles obtenues à l'aide de la modélisation numérique.

- Nous pouvons faire les constatations suivantes :
- ◆ très bonne correspondance sur le coefficient de traînée : 0,139 calculé pour 0,140 mesuré;
 - ◆ forte réduction du coefficient de portance : - 0,242 calculé pour - 0,07 mesuré;
 - ◆ bonne correspondance sur la dérivée de portance : 7,001 calculé pour 5,732 mesuré.

Essais sur pylône seul (1/100) et ensemble du pont (1/200)

Photo 17
Essai au vent, maquette de l'ouvrage complet
Wind test, model of the complete structure



- Les essais sur le pylône seul et sur l'ensemble du pont (photos 16 et 17) ont eu pour principal objet :
- ◆ étude du comportement au vent du pylône isolé;
 - ◆ comportement de l'ouvrage au vent pendant les phases critiques de construction;
 - ◆ avec les aménagements prévus de la section transversale, analyse aéroélastique afin de voir la stabilité de l'ouvrage jusqu'à des vitesses très supérieures à la vitesse de référence.
- Les essais sur le pylône seul et sur l'ensemble du pont ont donné les résultats principaux suivants :

► coefficient de traînée et la dérivée de portance qui sont les deux coefficients primordiaux. Pour la section type 3, il a été trouvé un détachement vertical tourbillonnaire de 50 mm d'amplitude de ce qui est admissible.

Essais sur maquette

Ces essais ont été réalisés dans la soufflerie atmosphérique du laboratoire de Hyundai à Séoul. Les différents modèles considérés ont été les suivants :



Photo 18
 Vue d'ensemble
 du chantier
 (décembre 2005)
 avec le coffrage
 glissant sur PY1
 et les estacades
 provisoires

*Overall view
 of the project
 (December 2005)
 with the sliding
 formwork on PY1
 and the temporary
 breakwaters*

◆ pylône seul: sous vent turbulent (buffeting), avec une vitesse de référence de 42,4 m/s au niveau du tablier, on a observé un déplacement maximal du pylône de 14 cm ;

◆ pont en service: pour une vitesse de référence de 60,6 m/s au niveau du tablier et une incidence de 0 degré, un déplacement vertical de 62 cm et horizontal de 5 cm ont été constatés pour le tablier ;

◆ pont en construction: avant clavage arrière. Pour une vitesse de référence de 42,4 m/s au niveau du tablier et une incidence de 0 degré, un déplacement vertical de 200 cm et horizontal de 22 cm ont été constatés pour le tablier avec une accélération de 0,13 g inférieure à l'accélération admissible de 0,20 g ;

◆ pont en construction: avant clavage central. Pour une vitesse de référence de 42,4 m/s au niveau du tablier et une incidence de 0 degré, un déplacement vertical de 41 cm et horizontal de 28 cm ont été constatés pour le tablier avec une accélération de 0,09 g inférieure à l'accélération admissible de 0,20 g.

■ CONCLUSION

A fin 2005, les études d'exécution sont terminées. Les pieux et semelles de tous les appuis ont été coulés et le coffrage glissant a démarré pour le pylône PY1 (photo 18).

ABSTRACT

A cable-stayed bridge in the Land of Morning Calm. Masan Bridge (South Korea)

L. Marracchi, J.-P. Viallon

The Masan Bridge project covers the funding, design, construction, operation and maintenance of the structure for 30 years.

Located in the southern part of South Korea, near the city of Pusan, the second largest industrial centre in the country, the future Masan Bridge will provide a crossing over Masan Bay. It has a total length of 1750 m, breaking down into a cable-stayed bridge of total length 740 m with a 400-metre centre span and two approach viaducts of lengths 410 m and 550 m. This bridge is two-lane dual-carriageway.

It is the first application by a foreign investor of the Korean law on Public Private Partnerships (PPP). The originality of the funding for this project is to combine a government subsidy with international private funding.

Preliminary design engineering began in 2001 and continued in 2002. Initial and detailed design engineering took place in 2003 and 2004.

The works, signed by Bouygues TP in a joint venture with the Korean firm Hyundai Engineering Corp, began in the summer of 2004 and will last four years, with the bridge scheduled to be opened by mid-2008.

RESUMEN ESPAÑOL

Un puente atirantado en el país de la Mañana calma. El puente de Masan (Corea del Sur)

L. Marracchi y J.-P. Viallon

La operación del puente de Masan se refiere a la financiación, el establecimiento del concepto, la construcción, la explotación y la conservación de la obra durante 30 años.

Ubicado en Corea del Sur, en el sur del país en las cercanías de la ciudad de Pusan, segundo polo industrial del país, el futuro puente de Masan permitirá el franqueo de la bahía de Masan. Este puente de una longitud total de 1750 metros corresponde a un puente atirantado de una longitud total de 740 metros con un vano central de 400

metros y dos viaductos de acceso de 410 metros y 550 metros de longitud. Esta estructura consta 2 x 2 carriles de tráfico.

Se trata de la primera aplicación por un inversor extranjero de la ley coreana relativa a las asociaciones públicas privadas (APP). La originalidad de la financiación de esta operación combina una subvención del Estado con una financiación privada internacional.

Los estudios de anteproyecto sumario dieron comienzo en 2001 y se prosiguieron en 2002. Los estudios de anteproyecto detallado y de ejecución se han desarrollado en 2003 y 2004.

Los trabajos, ejecutados por Bouygues TP en joint-venture con la empresa coreana Hyundai Engineering Corp, han dado comienzo durante la primavera de 2004 y tendrán un plazo de 4 años, la inauguración de la obra se ha contemplado para mediados de 2008.

Autoroute A11 – Contournement Le viaduc de la Maine

Le viaduc de la Maine permet à l'autoroute A11, et plus particulièrement à son contournement nord d'Angers, de franchir la Maine.

Le tablier est un bipoutre mixte acier/béton de 21 ml de largeur et de 525 ml de longueur. Il repose sur deux culées et huit piles, dont deux implantées en rivière. Les fondations sont des pieux tubés forés. Les piles ont fait l'objet d'une recherche architecturale élaborée. Le tablier métallique est poussé d'un seul côté avec un avant-bec et le hourdis béton est coulé à l'aide de deux équipes mobiles spécifiques par plots de 12 ml qui doivent en particulier épouser la très forte courbure de l'ouvrage (790 m de rayon).



Figure 1
Autoroute A11. Contournement Nord d'Angers
A11 motorway. The bypass north of Angers

Photo 1
Le bipoutre
en cours de réalisation
The double girder
undergoing construction



■ PRÉSENTATION DU PROJET CNA

Situation du viaduc de la Maine (figure 1)

La section Nantes – Angers de l'autoroute A11 a été concédée à la société Cofiroute par décret du 6 mars 1974. Le tronçon concédé se décompose en trois parties :

- ◆ le tronçon Nantes – Angers Ouest, réalisé par Cofiroute, a été mis en service en 1980 ;
 - ◆ le tronçon La Maine – RN 23 (rocade nord), réalisé par l'Etat, a été mis en service en 1987 et sera intégré à la concession Cofiroute lors du bouclage du contournement nord ;
 - ◆ le tronçon manquant, objet des travaux actuels, contournant l'agglomération angevine par le nord, dont la mise en service est prévue au 31 août 2008. Une nouvelle DUP, en date du 30 avril 1998, a été prorogée en mai 2003 jusqu'en avril 2010. En 2001, suite à la concertation Berlottier présidée par le préfet Bérard visant à améliorer l'intégration du contournement, le projet a été défini dans sa configuration actuelle. En juillet 2004 l'avenant 11 au contrat de Cofiroute, signé par le ministre de l'Équipement, définit le projet et son calendrier.
- La section neuve, entre Troussebouc et la Maine (demi-échangeur de la voie sur berges) s'étend sur 14,3 km. Elle comprend quatre échangeurs dont trois libres de péage, une tranchée couverte de 1700 m au droit d'Avrillé et d'Angers, un viaduc de 532 m sur la Maine, un viaduc de 115 m au-dessus de l'échangeur de la RD 106 et 15 ouvrages d'art courants.
- Le viaduc de la Maine se trouve à l'extrémité Est du contournement nord d'Angers, dans une partie d'autoroute actuellement construite en 2 x 2

Nord d'Angers

Gilles Dumoulin

DIRECTEUR DE PROJET
Socaso



Patrick Charlon

DIRECTEUR
DU DÉPARTEMENT
OUVRAGE D'ART
ET DE LA DIVISION
PRÉCONTRAÎTE
Eiffage TP

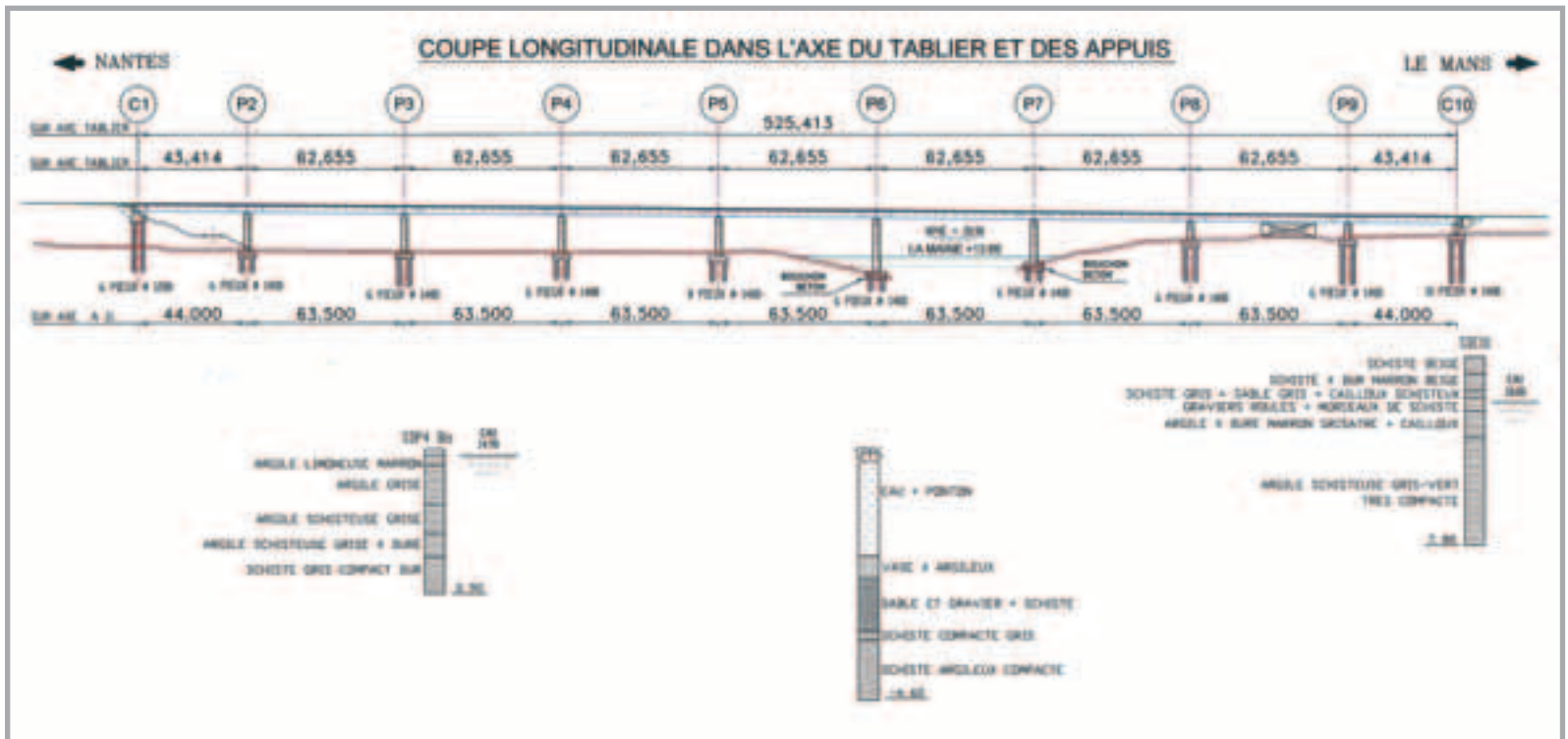


Figure 2
Coupe longitudinale dans l'axe
du tablier et des appuis

*Longitudinal section on the centreline
of the deck and the supports*

voies mais prévue élargissable à 2 x 3 voies en 2020. Dans la phase actuelle, le viaduc construit avec un tablier de 20,90 m de largeur permet le passage des 2 x 2 voies. Cet ouvrage sera doublé par un second viaduc lors du passage à 2 x 3 voies chacun de ces ouvrages recevra alors la circulation dans un seul sens.

Ce contournement permettra, lors de son ouverture, de délester partiellement le trafic de 65 000 véh./j empruntant actuellement les voies sur berges qui assurent la continuité de l'autoroute A11 en passant dans le centre d'Angers.

Le montant global de ce projet est de 450 M€ supporté à 95 % par Cofiroute et à 5 % par les collectivités locales.

■ PRÉSENTATION DE L'OUVRAGE

L'ouvrage est un mono tablier mixte acier-béton à pièces de pont avec encorbellements (photo 1); il comprend deux culées C1 et C10 et huit piles dont deux situées en rivière (P6 et P7).

L'ouvrage est situé en zone inondable. Les portées dans l'axe de l'ouvrage sont : 43,41 m, 7 x 62,66 m, 43,41 m (figure 2).

Le rayon de courbure en plan est très faible : 790 m.

■ LES INSTALLATIONS DE CHANTIER (figure 3)

En arrière de la culée C1 se situe le banc d'assemblage et de poussage de la charpente métallique; sa longueur est de 200 m et sa largeur varie de 40 m à 50 m. Il est arasé au niveau supérieur du mur de front. Ses aménagements suivent la cour-

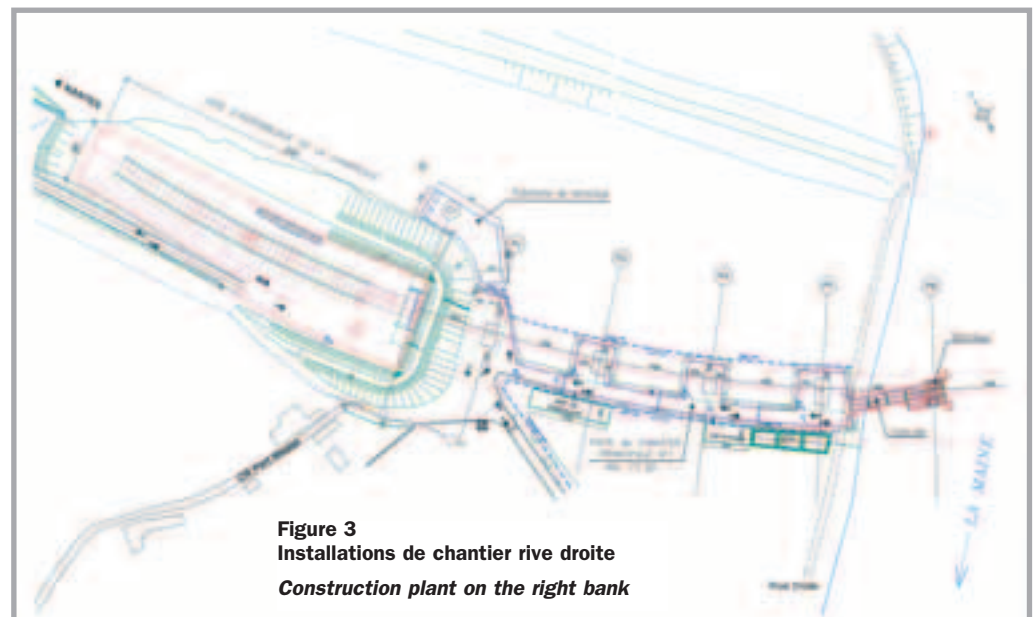


Figure 3
Installations de chantier rive droite
Construction plant on the right bank

Photo 2
Estacade
rive droite
*Breakwater
on the right bank*

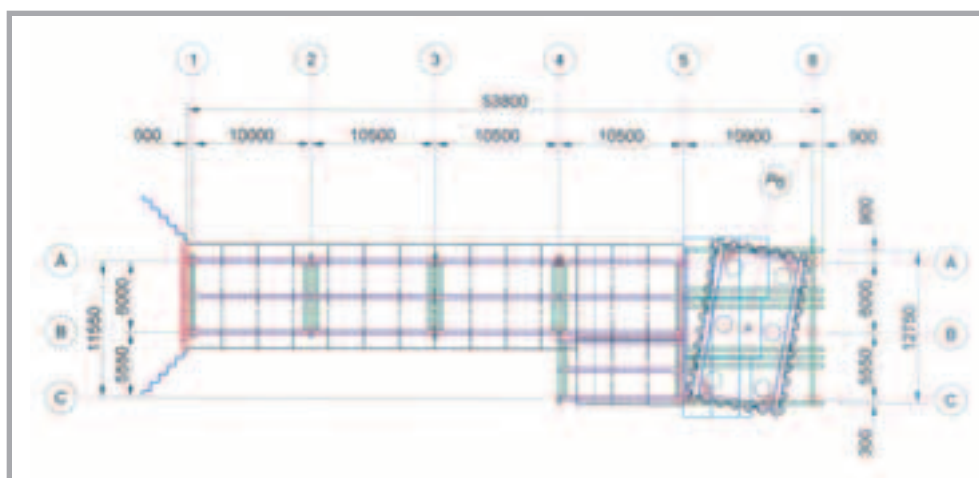


Figure 4
Estacade
rive droite
*Breakwater
on the right bank*



bure du tablier. Les tronçons de charpente sont approvisionnés par une piste parallèle au banc, les semis opérant ensuite par marche avant/marche arrière.

Une piste principale surélevée d'environ 2,00 m par rapport au niveau du TN, permet de s'affranchir, dans une certaine proportion, des crues pour la réalisation des piles P2 à P6.

Le niveau de la nappe étant très haut, les piles P3, P4, P5 ont été réalisées à l'abri de batardeaux de palplanches (type PU12).

La pile P6 en rivière est réalisée à l'abri d'un batardeau (palplanche type PU22) relié à la piste principale par une estacade de 53 ml de longueur (photo 2 et figure 4). Sa largeur varie de 8,70 m à 12,80 m. Le batardeau de la pile P6 est recouvert d'un plateau amovible permettant la réalisation des pieux en reculant. Ce batardeau a été battu depuis l'estacade. Les pieux supports d'estacade ont été battus à l'avancement à partir de la partie d'estacade déjà réalisée.

La pile P7 et ses fondations sur pieux sont réalisées selon le même principe.

Un bouchon en béton immergé d'épaisseur 1,50 m a été coulé en P6. Son épaisseur est de 2,00 m en P7. Des connecteurs sont prévus entre le béton immergé et les gaines métalliques des pieux.

Les fouilles de la pile P8 sont talutées ; l'installation de préfabrication des paillasse de ferrailage du tablier se situe dans la zone de cette pile. Un

blindage a été mis en œuvre pour la pile P9, en bordure de la voie rapide existante, en circulation.

En rive droite, les contraintes urbaines de circulation ont nécessité des travaux d'accès importants et ont un impact très lourd sur les phasages de réalisation de certains travaux (pile P9, tablier, dossier d'exploitation avec la DDE).

■ LES FONDATIONS

Le tableau récapitulatif (tableau I) décrit les fondations sur pieux retenues.

Les pieux sont forés tubés à sec et ancrés dans le schiste dur (photo 3).

Les pieux C1, P6, P7 sont chemisés en définitif. Le terrain côté C1 a été préchargé par le remblai définitif de l'autoroute et a été consolidé pendant environ 3 mois avant réalisation des pieux. La culée est réalisée sur un remblai de 17 m de hauteur. Côté C10, un remblai de consolidation d'une hauteur de 8,35 m a été mis en œuvre, après réalisation de 340 drains verticaux (maille : 2 m x 2 m ; longueur : 18 m ; type : drains plats cannelés en PEHD de 5 cm de largeur + géotextile).

La stabilisation est obtenue au bout de 6 mois, pour un tassement de l'ordre de 45 cm.

La réalisation des six pieux d'une semelle s'effectue sur une durée variant de 3 à 4 jours ; le recèpage par la méthode de l'éclateur est réalisé en 3 jours.

■ LES PILES

Elles ont fait l'objet d'une recherche architecturale poussée tant pour le fût que pour le chevêtre (photos 4 et 5). L'aspect architectural est donné par des matrices polymères (Soceco/Reckli). Le fût des piles est coffré en une seule levée (hauteur 8,90 m). Le coffrage du chevêtre a dû faire l'objet d'une étude très spécifique compte tenu de sa complexité géométrique ; il en va de même du phasage de son ferrailage.

A titre indicatif, les durées de réalisation sont les suivantes :

- ◆ réalisation des semelles + fausses levées : ferrailage + coffrage + bétonnage : 2 semaines ;
- ◆ réalisation du fût de pile : hauteur 8,90 ml (ferrailage + coffrage + bétonnage + décoffrage) : 1,5 semaine ;
- ◆ réalisation du chevêtre de pile : hauteur 5,50 ml (ferrailage + coffrage + bétonnage + décoffrage) : 2,5 semaines.

L'ensemble des piles est réalisé à l'aide de grues automotrices de 30 à 50 t et d'une grue à chenilles de 45 t ; le bétonnage se fait à la pompe. Les fûts de piles sont pleins.

La pile P5 joue le rôle de point fixe pour le tablier et son ferrailage est particulièrement conséquent

LES PRINCIPALES QUANTITÉS

- Pieux Ø 1200 et Ø 1400 : 744 ml
- Bétons de structure : 7 500 m³
- Aciers HA : 1 350 t
- Charpente métallique : 2 700 t
- Surface du tablier : 11 025 m²

	Dia. (mm)	Nb	longueur
C1	1200	6	19,40 m
P2	1400	6	6,20 m
P3	1400	6	11,15 m
P4	1400	6	7,60 m
P5	1400	8	7,60 m
P6	1400	6	6,20 m
P7	1400	6	6,23 m
P8	1400	6	13,85 m
P9	1400	6	15,60 m
C10	1400	10	16,60 m
		66 u	

Tableau I
Récapitulatif des pieux
du viaduc de la Maine
*Summary of piles
on the Maine viaduct*



Photo 3
Pieux pile P8
P8 pier piles

et inhabituel (semelle : 183 kg/m³; fût de pile : 160 kg/m³; chevêtre : 200 kg/m³).
La répartition des appareils d'appui est reportée dans le tableau II.

LA CHARPENTE MÉTALLIQUE

(figure 5)

La hauteur des poutres est de 2,60 m ; l'espace-ment des pièces de pont est de 4,00 m. Compte tenu de la largeur du tablier (20,90 m) les encorbellements sont de 5,30 m.

Aciers utilisés

Les nuances des aciers laminés utilisés pour la construction de l'ossature métallique sont les suivantes :

- ◆ S 355 K2 G3 pour les tôles d'épaisseur inférieure ou égale à 30 mm ;
 - ◆ S 355 N pour les tôles comprises entre 30 et 80 mm ;
 - ◆ S 355 NL pour les tôles supérieures à 80 mm.
- Les tôles sont d'épaisseur constante et les connecteurs seront des goujons Nelson en acier S 235 J2G3 avec Re mini 350 MPa.
Les aciers sont approvisionnés auprès d'une usine certifiée "NF Aciers". Ils sont prégrénaillés en laminoirs.



Photo 4
Coffrage et ferrailage d'un chevêtre
*Formwork and reinforcement
for a joist*

	Poutre 1 Intérieur OA	Poutre 2 Extérieur OA
Culée C1	PNA 400 - Multidirectionnel	PNE 400 - Unidirectionnel
Pile P2	PNA 1250 - Multidirectionnel	PNE 1250 - Unidirectionnel
Pile P3	PNA 1250 - Multidirectionnel	PNE 1250 - Unidirectionnel
Pile P4	PNA 1250 - Multidirectionnel	PNA 1250 - Unidirectionnel
Pile P5	PNET 1250 - unidirectionnel	PNE 1250 - Fixe
Pile P6	PNA 1250 - Multidirectionnel	PNA 1250 - Unidirectionnel
Pile P7	PNA 1250 - Multidirectionnel	PNA 1250 - Unidirectionnel
Pile P8	PNA 1250 - Multidirectionnel	PNA 1250 - Unidirectionnel
Pile P9	PNA 1250 - Multidirectionnel	PNA 1250 - Unidirectionnel
Culée C10	PNA 400 - Multidirectionnel	PNA 400 - Unidirectionnel

Tableau II
Répartition des appareils
d'appui
*Distribution of support
systems*



Photo 5
Vue d'ensemble des piles
en rive droite
*General view of the piers
on the right bank*

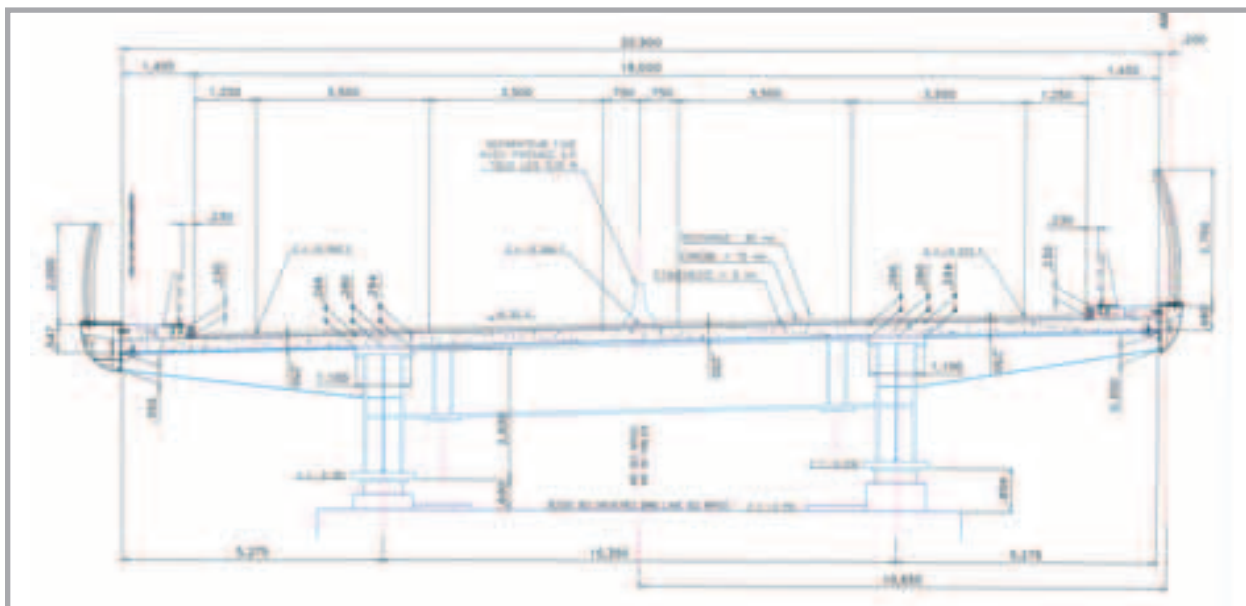


Figure 5
Coupe transversale
sur piles
*Cross section
on piers*

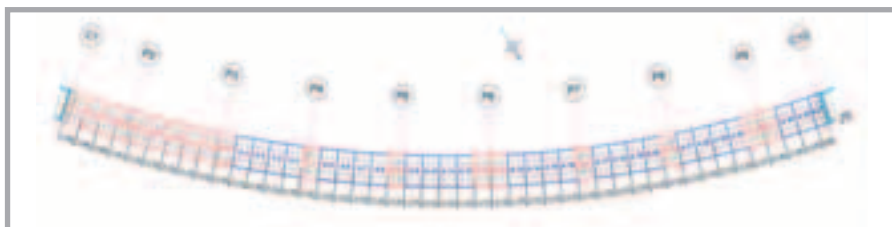


Figure 6
Découpage du hourdis en plots de bétonnage
Cutting the slab into concreting blocks

Figure 7
Equipage mobile. Coupe transversale
Mobile rig. Cross section

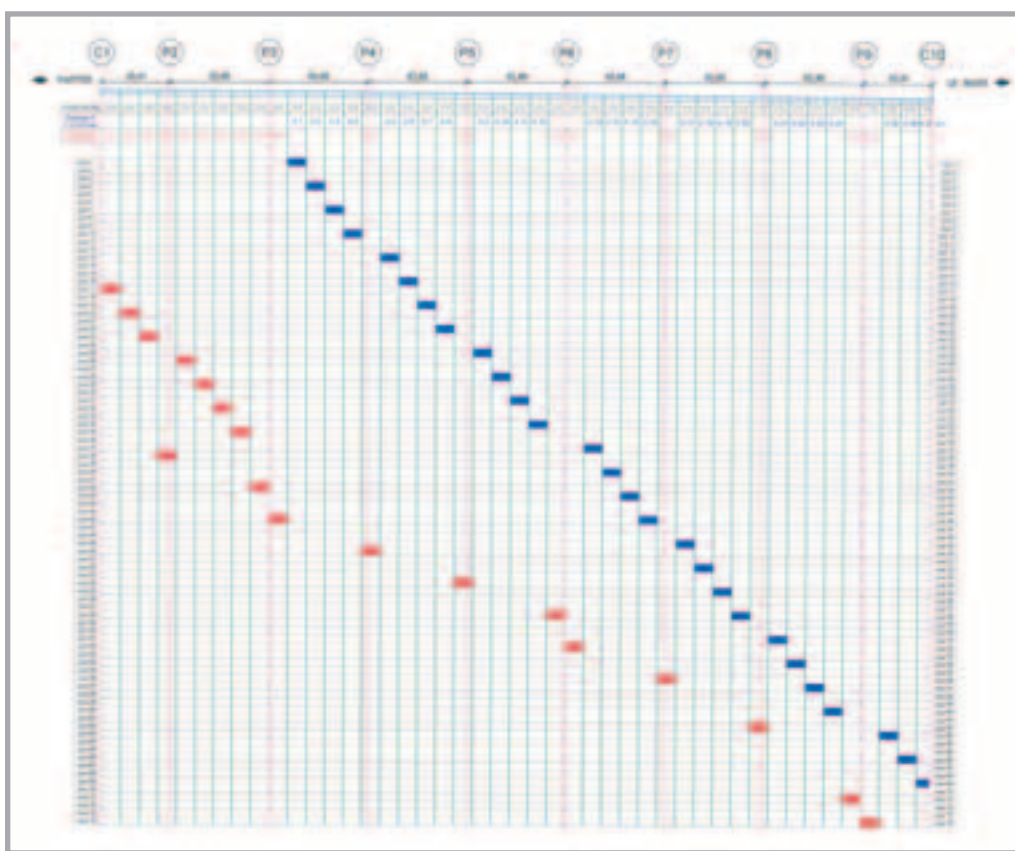
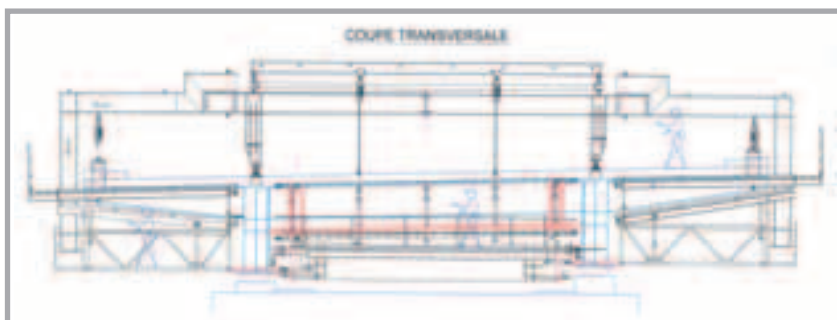


Figure 8
Planning prévisionnel de coulage des plots
Projected work schedule for pouring the blocks

Fabrication en atelier

La fabrication des poutres est réalisée dans l'usine Eiffel de Lauterbourg. Celle des pièces de pont et des consoles dans l'usine Eiffel de Maizières-Les-Metz. L'ensemble de l'ossature représente 48 éléments de poutres, 135 pièces de pont et 270 consoles. En atelier, les soudures principales sont réalisées en automatique - Procédé fil-flux. Les soudures des raidisseurs sont réalisées en semi-automatique avec fil fourré sous gaz. Sur le chantier, toutes les soudures sont réalisées en semi-automatique avec fil fourré sans gaz.

Transport

Les poutres principales sont acheminées par convois routiers exceptionnels de Lauterbourg à Angers. La durée d'un voyage est de 4 jours. Les longueurs varient de 20,20 m à 26,50 m. Le poids unitaire d'un élément de poutre varie de 32 à 62 t.

Protection anticorrosion

Le système de peinture est un système agréé A.C.Q.P.A trois couches C3ANV 566 dont l'épaisseur nominale est de 200 microns. Les deux premières couches, sauf réservations chantier, sont appliquées en atelier. Les retouches au droit des joints de chantier et la finition de la travée au-dessus de l'autoroute sont réalisées avant lancement. La finition est appliquée après bétonnage de la dalle.

Assemblage sur site

Les éléments de poutres transportés sont posés sur des appuis posés sur l'aire de lancement et nivelés suivant le profil en long. Les pièces de pont sont intercalées entre les poutres. Toutes ces pièces sont réglées avant soudage. Après contrôle de la géométrie et des jeux de soudage, les soudures sont réalisées par des soudeurs qualifiés suivant les normes à respecter. Les soudures sont contrôlées aux ultrasons et par magnétoscopie.

LE HOURDIS BÉTON DU TABLIER

Le hourdis en béton armé est coulé toute largeur par plots de longueur moyenne de 11,80 m (figure 6), à l'aide de deux équipages mobiles (figure 7). Les équipages ont fait l'objet d'une mise au point précise et détaillée du fait de la complexité du projet :

- ◆ grande largeur bétonnée (21 ml) ;
 - ◆ très faible rayon de courbure en plan de l'ouvrage ;
 - ◆ pièces de pont tous les 4,00 m, y compris sur les encorbellements du tablier ;
 - ◆ très fort ratio d'aciers HA (250 kg/m³) et stabilité transversale des paillasse de ferrailage.
- Le béton est un C35/45 (XF1 CEM II/A 42,5 PM). Les paillasse d'aciers HA sont préfabriquées au sol dans la zone de la pile P8, hissées à l'aide d'une grue automotrice de 200 t sur des rouleurs posés sur les poutres métalliques, et transportées par roulement jusqu'au plot d'utilisation. Les plots sont coulés à la pompe, selon un phasage décrit sur le planning prévisionnel ci-contre (figure 8).

Le gabarit de circulation sur la voie rapide ne permettant pas les déplacements de coffrage et de ferrailage en toute sécurité vis-à-vis de l'utilisateur, certaines opérations de réalisation du tablier seront effectuées de nuit sous coupure et à l'aide de déviations routières dans certains cas ; il est à noter que la voie rapide intercepte l'ouvrage de façon très biaisée et intéresse de ce fait plusieurs plots du tablier.

■ LES ÉQUIPEMENTS

Le dévers constant de 2,5 % conduit les eaux de surface dans une seule corniche caniveau ; des écrans antibruit (hauteur 2,00 m ou 2,70 m) sont fixés sur les rives du tablier.

L'étanchéité est de type Viaplast avec couche de protection en béton bitumineux de 2,5 cm.

Deux trottoirs de 1,45 m portent les fourreaux des concessionnaires et les BN4.

La couche de roulement en béton bitumineux a une épaisseur de 5,5 cm.

Dans une première phase d'utilisation, l'ouvrage est circulé dans les deux sens séparés par un séparateur central en béton.

Il est prévu de doubler l'ouvrage dans le futur ; l'ouvrage actuel passera alors à 3 voies dans le même sens de circulation et les superstructures seront aménagées différemment ; l'ouvrage a été calculé dans les deux configurations.

Les joints de chaussée sont de type WP 400.

LES PRINCIPAUX INTERVENANTS

Maitre d'ouvrage

Cofiroute

Maitre d'œuvre et entreprise générale

Socaso et SCAO

Architecte

Cabinet Lavigne

Bureau d'études du maître d'œuvre

BIEP

Groupement titulaire du marché

Eiffage TP (mandataire), Eiffel

Principaux sous-traitants

- Batardeaux et estacades : Leduc
- Pieux : Botte TP
- Bétons : Unibéton
- Aciers HA : EMCA
- Coffrages : Ersem
- Appareils d'appui : Etic
- Etanchéité : Eurovia

ABSTRACT

A11 motorway – Bypass north of Angers. The Maine viaduct

G. Dumoulin, P. Charlon

The Maine viaduct carries the A11 motorway, and more specifically its bypass north of Angers, over the Maine.

The deck is a composite steel/concrete double girder 21 linear metres wide and 525 metres long. It rests on two abutments and eight piers, two of which are set up in the river. The foundations are bored tubed piles. The piers underwent sophisticated architectural research. The steel deck is pushed from one side with a launching nose and the concrete slab is poured by two special mobile rigs in 12-metre blocks which must, in particular, follow the very large curve of the structure (radius of 790 m).

RESUMEN ESPAÑOL

Autopista A11 – Variante Norte de Angers. El viaducto del Maine

G. Dumoulin y P. Charlon

El viaducto del Maine permite a la autopista A11, y con mayor particularidad a su variante Norte de Angers, el franqueo del río Maine.

El tablero es de doble viga mixto acero/hormigón de 21 m de longitud y de 525 m de longitud y se funda en dos estribos y ocho pilas, dos de las cuales se encuentran implantadas en el río. Las cimentaciones corresponden a pilotes entubados perforados. Las pilas han sido objeto de una investigación arquitectónica elaborada. El tablero metálico se desplaza por un lado único con un tamar y la bovedilla de hormigón está colada por medio de dos equipos móviles específicos por pilotes de 12 m que, en particularidad, deben adoptar la curvatura sumamente pronunciada de la obra (790 m de radio).

Le viaduc de la Sioule

Un ouvrage exceptionnel pour Sogea Construction

À la hauteur de Pontgibaud (Puy-de-Dôme), à une vingtaine de kilomètres à l'ouest de Clermont-Ferrand, Sogea Construction (groupe VINCI) a achevé à la fin 2005 la réalisation du viaduc de la Sioule, sur l'A89, le plus important ouvrage d'art en béton précontraint construit en France ces dernières années. Réalisé dans des conditions exigeantes de climat, d'environnement et de délai, ce grand chantier a été pour Sogea l'occasion de mettre en œuvre et de valider, au moment où elles étaient déployées dans l'ensemble de l'entreprise, sa démarche sécurité, son approche environnementale et une formule inédite de formation et de recrutement, trois axes clés de sa politique de développement durable.

LE GRAND OUVRAGE DE L'A89

Le viaduc de la Sioule établit la continuité de la section de 52 km de l'A89 reliant désormais le diffuseur Saint-Julien-Puy-Lavèze – Sancy à l'échangeur avec l'A71 à la hauteur de Combronde, au nord de Clermont-Ferrand. Surplombant la rivière d'une hauteur de 135 m au point le plus haut, son tablier (990 m de long sur 19 m de large) est construit en encorbellements successifs (avec une portée maximale entre piles de 192,50 m) et supporté par sept piles (de P1 à P7) et deux culées (C0 et C8). Les piles extérieures, à simple fût, P1, P2, P6 et P7 sont hautes respectivement de 14, 49, 70 et 31 m et sont fondées sur semelle superficielle. Les piles centrales P3, P4 et P5 (82, 119 et 135 m) sont des ouvrages à double fût, renforcés par une embase monumentale de 40 m ; elles sont fondées sur quatre puits marocains de 5 m de diamètre profonds de 18,50 m surmontés d'une semelle carrée de 4 m d'épaisseur et de 20 m de côté.



Jour J en vue : les grues ont été démontées. Sur l'ouvrage, les travaux de revêtement peuvent commencer. Ils seront réalisés en quatre jours seulement par l'agence Eurovia (groupe VINCI) de Clermont-Ferrand

D-Day in sight: the cranes have been dismantled. On the structure, the surfacing work can begin. It will be performed in just four days by the Clermont-Ferrand branch of Eurovia (VINCI group)

Au-dessus de la Sioule, on n'entendra plus le duo insolite que composaient le piaulement de la buse et le treuil des grues. Une fois réalisés les essais de charge de l'ouvrage, le 23 novembre 2005, après 36 mois de travaux, les opérations de repli se sont rapidement enchaînées en vue d'un démontage des installations prévu le 12 décembre pour faire place aux terrassiers. Après la démolition et l'évacuation des bétons d'installation et le remblaiement des plates-formes au pied des piles, il ne restait plus à ceux-ci qu'à "retrousser" les voiries, dont l'aménagement avait constitué la première étape du chantier à l'automne 2002, à évacuer les déblais et à remettre en place la terre stockée à l'entrée de la plate-forme principale de la pile P4, où étaient regroupées toutes les installations de chantier : centrale à béton, laboratoire, conteneurs à déchets, aires de stockage, atelier de ferrailage et de mécanique, bureaux, etc. Si les conditions climatiques s'y sont prêtées, l'ultime page du chantier aura donc été tournée avant l'arrivée des premières neiges, et la petite vallée du Parc naturel des volcans d'Auvergne aura été rendue à ses hôtes de toujours – chevreuils et promeneurs ou cueilleurs de champignons sur les ver-

sants, pêcheurs de truites et loutres sur les berges de la rivière – avant que ne commence, au début 2006, le va-et-vient des véhicules sur les 990 m du viaduc, à quelque 150 m de hauteur. Approché et peu à peu découvert dans toute son étendue depuis le hameau de Peschadoires, l'ouvrage confirme ce que voici maintenant plus de trois ans seuls les données chiffrées et les dessins d'architecte laissaient préfigurer : un ouvrage exceptionnel aux lignes allégées par un traitement des trois piles les plus hautes (P3, P4 et P5) en double fût et un tablier à hauteur variable aux lignes extrêmement tendues grâce à l'allongement des portées jusqu'à 192,50 m.

"C'est un bel ouvrage dont la construction s'est révélée exigeante en raison des contraintes climatiques (en hiver, la température descend à - 20 °C) et environnementales, et où la réussite technique ne pouvait pas être dissociée de la réussite humaine. Pourquoi ne pas le dire, c'est aussi mon plus beau chantier, reconnaît François Batifoulier, le directeur du chantier. On a fait tout ce qu'on a pu pour qu'il se passe bien et au final on a tenu les délais, il n'y a pas eu de dégâts ni d'accident grave, et le client est content."

et un chantier symbole

■ LA FACE CACHÉE DU CHANTIER

Pour Sogea, ce chantier phare représentait aussi un enjeu particulier comme vitrine de ses performances techniques et des savoir-faire managériaux (politique de prévention-sécurité, de recrutement et de formation, approche environnementale) qui fondent sa politique de développement durable. Dès l'amont, un très important travail a donc été entrepris pour que les outils offrent davantage de confort de travail aux compagnons et favorisent une meilleure productivité, un plan de respect de l'environnement (PRE) était établi pour préserver ce site vierge classé Znieff (zone naturelle d'intérêt écologique faunistique et floristique) de type 1, et le "passeport pour l'emploi" (PPE), dispositif créé par Sogea pour former et recruter des jeunes sans qualification, était mis en place, ainsi que les procédures de "La sécurité d'abord!", la démarche sécurité de Sogea.

"À côté du travail quotidien, tout ce qui a été fait dans ces différents domaines et qui est un peu resté la face cachée du chantier, va resservir dans le futur, poursuit François Batifoulier, et c'est sans doute là son vrai bilan."

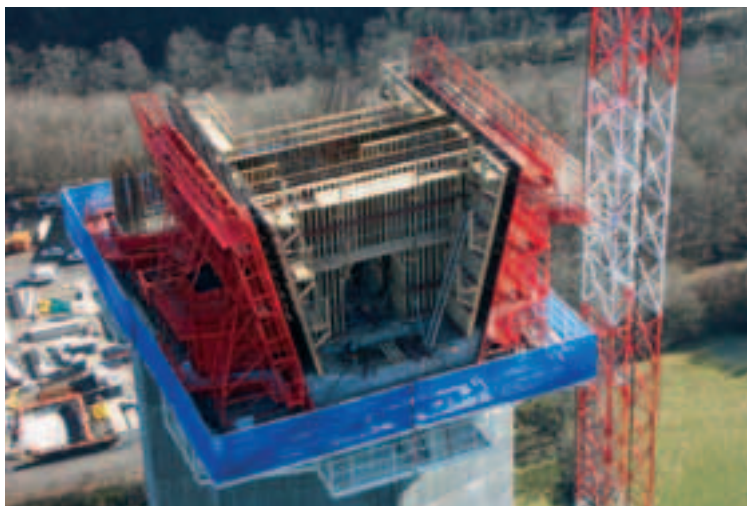
Riche d'enseignements pour l'avenir, le chantier de la Sioule a bénéficié de l'expérience des précédentes réalisations de l'entreprise, et très directement de la construction du viaduc du Chadon, sur l'A89, réalisé par Dodin entre 2000 et 2002 à Gimel-les-Cascades (Corrèze), un ouvrage techniquement différent avec son tablier métallique poussé, mais lui aussi supporté par des piles de grande hauteur (90 m). Tout droit venu de ce chantier, l'encadrement du viaduc de la Sioule a d'emblée souhaité tirer profit de cette expérience pour faire mieux, et la réflexion menée de façon collégiale avec le service Méthodes de Dodin et associant le conseiller prévention de l'entreprise ainsi que les fournisseurs d'outils s'est traduite par de nombreuses avancées techniques.

■ UNE LEVÉE DE 4 ML TOUS LES JOURS SUR LES PILES À DOUBLE FÛT

"Les coffrages semi-grimpants utilisés dans la réalisation des piles ont été améliorés, explique Julien Mathiot, conducteur de travaux. Chacun d'eux était composé de deux demi-éléments permettant de coffrer et de décoffrer rapidement. L'équipement de l'outil avec deux niveaux de tiges de

coffrage a aussi contribué à simplifier et accélérer les manœuvres. En terme de rendement, ces outils ont permis aux équipes (cinq personnes par pile) d'atteindre la cadence d'une levée de 4 m tous les deux jours. Le rythme d'une journée a pu être tenu en travail posté sur les piles à double fût. Chaque bétonnage représentait un volume de béton de 62 m³ qui supposait 20 rotations de camion toupie. Pour gagner du temps sur les piles de grande hauteur, deux bennes étaient utilisées."

"Ces coffrages comme les équipages mobiles employés pour la construction des fléaux ont par ailleurs été équipés de passerelles plus spacieuses que d'ordinaire (les compagnons y passent huit heures par jour), avec des garde-corps de 2,50 m, alors que la réglementation n'impose qu'une hauteur de 1,10 m, et des filets destinés à protéger aussi bien du vent et des intempéries que du vertige", ajoute Francis Duchâtel, le conseiller prévention de Dodin.



Une fois réalisé le hourdis inférieur, les coffrages des âmes des voussoirs sur piles (VSP) étaient mis en place – une opération visiblement complexe, repensée en profondeur au stade des études, pour un meilleur enchaînement des phases

Once the lower slab has been executed, the formwork for the webs of segments on piers was set up – a visibly complex operation, redesigned in-depth at the design engineering stage, for improved sequencing of the phases

Au moment des études, la réflexion en terme de productivité a été plus particulièrement poussée pour la réalisation des grands voussoirs sur pile (VSP), des ouvrages de dimensions impressionnantes (10 m de haut, 18 m de large, 19 m de long) représentant un volume de 800 m³ de béton, dont deux culminaient à plus de 100 m de hauteur. Traditionnellement construits en trois phases – hourdis inférieur, âmes puis hourdis supérieur –, ils ont été réalisés ici en cinq phases, les âmes étant exécutées par moitiés dans le sens de la longueur. Principaux avantages de cette innovation : une moindre complexité de ferrailage pour les âmes, beaucoup plus de facilité dans les transferts d'outils à la grue, qui n'avait pas à manœuvrer à l'aveugle

François Batifoulier

DIRECTEUR DU CHANTIER

Dodin

Jean-Marie Benazech

RESPONSABLE

QUALITÉ-ENVIRONNEMENT

Dodin

Francis Duchâtel

CONSEILLER PRÉVENTION

Dodin

Julien Mathiot

CONDUCTEUR DE TRAVAUX

Dodin

En tête de pile, outil et plate-forme frontale d'un VSP avant réalisation du hourdis supérieur

At the pier head, sectional formwork and front platform of a segment on pier before execution of the upper slab



Au fur et à mesure de la réalisation du tablier, dont la hauteur varie de 10 m au niveau des piles à 5,50 m au niveau de la clé, les équipes adaptaient la géométrie de l'équipage mobile

As the deck was constructed, at heights ranging from 10 metres at the pier level to 5.50 metres at the keystone level, the teams adapted the mobile rig geometry



► sous les encorbellements, mais surtout un passage supprimant tout point bloquant.

"Sur un temps de réalisation prévu de quatre mois et demi à cinq mois pour les VSP à double fût, le gain de temps a été de trois semaines, précise Julien Mathiot. Et avec l'expérience, le dernier grand VSP, celui de P5, a même pu être réalisé, certes en travail posté, en seulement trois mois..."

■ DE 3,50 M EN 3,50 M AU-DESSUS DU VIDE

La pile et son VSP étant achevés pouvait commencer le chantier dans les airs qu'est la réalisation des fléaux en encorbellement. Suspendus au-dessus du vide, les équipages mobiles progressent de part et d'autre de la pile afin d'équilibrer les charges, tandis qu'une précontrainte installée au fur et à

mesure (câbles 19 T 15 fournis par Freyssinet) assure l'assemblage des voussoirs. Emportés par ces impressionnantes structures d'acier toujours plus loin du point d'appui qu'est la pile, les équipes ont construit le tablier voussoir après voussoir par pas de 3,50 m au rythme d'une paire tous les quatre jours, puis, logique de cycle aidant, tous les trois jours. Et quand les fléaux se faisaient face, à une distance de 2,50 m seulement, il ne restait plus qu'à les immobiliser en les brêlant l'un sur l'autre et à les claver.

"Le sixième et dernier clavage, celui des fléaux 4 et 5, juste au-dessus de la Sioule, a eu lieu le 27 juin 2005, se souvient Julien Mathiot. Ce n'était pas la fin du chantier, parce qu'il restait encore beaucoup de travail – la précontrainte de continuité à installer dans le caisson du tablier; les superstructures destinées aux équipements de sécurité de l'ouvrage; la réalisation de l'étanchéité et des revêtements des chaussées; les marquages; les joints de chaussées; etc. –, pourtant pour les hommes du béton que nous sommes, l'entrée en scène de ces autres métiers symbolisait un peu la fin du voyage – et surtout le moment où ont été démontés et redescendus les deux derniers équipages mobiles, des outils de 90 t uniques et extraordinaires qui suscitent un sentiment très spécial sur les chantiers d'ouvrages en encorbellement."

■ UNE EAU VIVE VENUE DES PENTES DU MONT-DORE

Ce même 27 juin et pendant toute la durée de la construction de la travée qui la surplombe, la Sioule faisait l'objet d'une surveillance renforcée, la fréquence des prélèvements passant d'un rythme trimestriel à un rythme hebdomadaire.

"La préservation de la qualité de l'eau de cette rivière de première catégorie (un cours d'eau fréquenté par la truite fario) a été le souci permanent du chantier", indique Jean-Marie Benazech, le responsable qualité-environnement du chantier (Dodin). Afin de protéger cette eau vive venue des pentes du Mont-Dore, des écrans de protection avaient été installés sur les berges et deux barrages flottants aménagés en aval du chantier pour retenir les matières flottantes et parer à toute pollution accidentelle. Sur les versants et au niveau des plates-formes, des systèmes d'assainissement avaient en outre été aménagés pour capter et drainer les eaux vers des bacs de décantation et des filtres avant qu'elles ne soient rejetées dans la nature.

"Dès le stade de l'appel d'offres, rappelle Jean-Marie Benazech, l'attention des entreprises a été attirée par le maître d'ouvrage sur l'importance accordée à la préservation de ce site pendant les travaux et à sa remise en état à la fin du chantier." Dans l'aménagement des emprises, cela a conduit à réduire

au maximum la surface des plates-formes, sauf pour P4, et à n'ouvrir que d'étroites pistes pour la circulation des engins. De ces installations, il ne restera pas grand-chose après le passage des terrassiers : sur le versant est, une piste remise au gabarit initial et revêtue à neuf raccordée au chemin de randonnée du puy du Moufle, et depuis la route départementale 418, une voie et son aire de retournement pour l'accès éventuel des services du concessionnaire à P4.

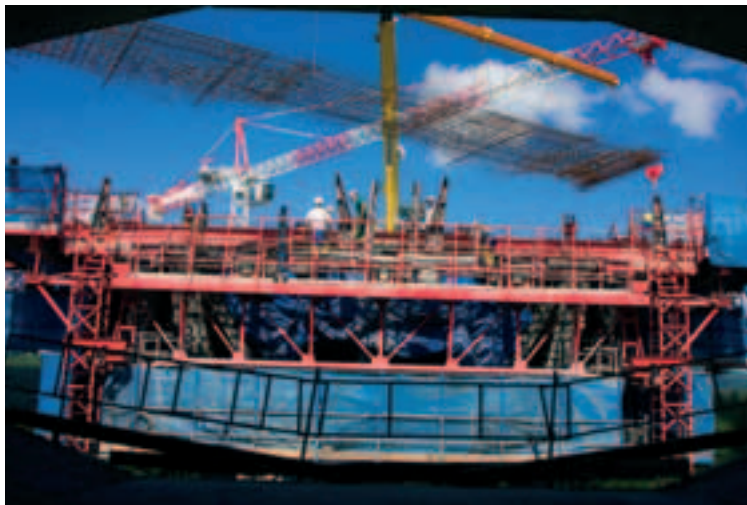
L'effacement des traces et la reconquête du site par la nature sont-ils l'ultime aboutissement de la démarche environnementale du chantier ?

"Pas uniquement, rectifie Jean-Marie Benazech, d'une part parce que l'ensemble des fiches de suivi mensuel et des fiches de procédure environnementale établies dans le cadre du PRE, toutes les analyses de l'eau, tous les bordereaux de suivi des déchets industriels, etc., qui établissent la traçabilité sur ce point sont conservés, mais aussi parce que les bonnes pratiques mises en œuvre ici sont appelées à faire école. C'est d'ores et déjà le cas sur tous les chantiers de TP France (la division travaux publics de Sogea) avec les conteneurs à bac de récupération utilisés pour le stockage des huiles de décoffrage et des huiles de cure, qui ont permis d'éviter tout déversement intempestif sur les plates-formes. Ce sera peut-être aussi le cas du système de tri que nous avons mis en place pour la récupération des DIS (huiles, chiffons et matériaux souillés, cartouches de graisse, etc.) sur les plates-formes. Mais l'environnement, conclut Jean-Marie Benazech, c'est comme la qualité, ce sont les gens, sur le terrain, qui la font. Chez Dodin, qui a été en janvier 2003 la première des entreprises de génie civil de Sogea certifiée ISO 14001, c'est une culture qui s'enracine peu à peu, et elle a certainement été favorisée ici par la qualité exceptionnelle de l'environnement."

■ PASSEPORT POUR L'EMPLOI : UNE FORMULE CHOC POUR UN IDÉE DE BON SENS

Le bénéfice des actions poursuivies avec persévérance, c'est aussi ce qui ressort de l'application, expérimentale au démarrage, du "passerport pour l'emploi" à ce chantier. À sa création, en 2001, c'est une formule choc pour une idée de bon sens : en résumé, ce dispositif consiste à offrir à des jeunes sans travail et sans qualification une possibilité d'apprendre un métier, de bénéficier d'une première expérience validée par un titre reconnu par l'AFPA, le certificat de compétence professionnelle (CCP), et quand tout se passe bien un emploi dans l'entreprise. Pour cette dernière, c'est un moyen de faire face aux difficultés de recrutement de main-d'œuvre.

Seuls, Sogea ne pouvait pas le faire, et les services



Ferrailage du hourdis supérieur d'un voussoir sur l'équipage mobile. Cadence d'avancée : une paire de voussoirs tous les trois jours en fin de chantier

Reinforcement of the upper slab of a segment on the mobile rig. Rate of progress : one pair of segments every three days at the end of the project



Des trois hivers, tous rigoureux, celui de 2005 a été le plus long. Pendant les périodes d'intempéries, l'ouvrage a continuellement été déneigé, pour que les travaux puissent reprendre au moindre redoux, car les opérations de bétonnage étaient possibles jusqu'à une température de - 5 °C, grâce au calorifugeage des coffrages

Of the three winters, all very harsh, the 2005 winter was the longest. During periods of bad weather conditions, the structure was continually cleared of snow, so that work could resume at the slightest thawing, because concreting operations were possible at temperatures as low as - 5 °C, thanks to thermal insulation of the formwork

publics de l'emploi, AFPA et ANPE, non plus. La difficulté – et la réussite – de la formule a été de rassembler autour d'une table ces différents partenaires – auxquels s'est joint le conseil régional d'Auvergne – et de les faire collaborer.

C'est aussi une démarche qui a étroitement associé l'encadrement et le personnel du chantier, forcément très impliqué dans l'insertion des jeunes recrutées sur le chantier, en contribuant à y "réveiller l'esprit du compagnonnage". Sélectionnés au départ par l'AFPA de Clermont-Ferrand, les candidats, âgés en moyenne de 27 ans, suivaient une première session de 15 jours qui leur permettait de comprendre ce qu'est un chantier de génie civil, ses grands modes opératoires et l'importance d'aspects comme la sécurité, avant d'être formés au coffrage puis intégrés au chantier.

"À la Sioule, dont l'effectif en pointe atteignait 150 personnes, trois sessions se sont succédé et 37 jeunes ont été embauchés, dont 32 sont aujourd'hui

Modifié pour cette opération spéciale, l'équipage mobile met en place les coffrages de clé, l'ultime phase de réalisation d'une travée

Modified for this special project, the mobile rig puts in place the keystone formwork, the final phase in the construction of a span



À proximité immédiate de la rivière, sur un chemin fréquenté par les randonneurs et les pêcheurs, l'embase de P5 a fait l'objet d'un aménagement particulier en recevant un fort remblai de terre forestière destiné à être enherbé, soutenu par un parement de pierres Mezzoloffeld

In the immediate vicinity of the river, on a path taken by hikers and fishermen, the base of P5 was specially arranged, receiving a large forest earth backfill designed to be planted in grass, supported by a Mezzoloffeld stone facing

LES PRINCIPALES QUANTITÉS

- 50 000 m³ de béton
- 8 000 t d'acier
- 1 200 t de précontrainte
- 36 mois de délai
- 47 M€ (HT)



d'hui sur les autres grands chantiers de l'entreprise, indique la direction des ressources humaines. C'est donc une réussite, due autant à la formule qu'à la mobilisation du chantier. Et elle ne s'est pas cantonnée au chantier du viaduc, car le PPE a essaimé chez TP France et de là un peu partout. À la fin 2005, 420 jeunes (sur 450 au départ) ont été embauchés grâce à ce dispositif, et il réussit si bien que le groupe VINCI a décidé de le généraliser dans la totalité de sa division construction et ses autres pôles de métiers (concessions, énergies, routes). Quelque chose semble donc s'être débloqué, et aujourd'hui la formation est devenue une préoccupation de premier plan, à l'égal de la sécurité."

■ INTÉGRER LA SÉCURITÉ À L'ORGANISATION ET À L'ÉTAT D'ESPRIT DU CHANTIER

"La volonté est la clé de tout progrès", acquiesce Francis Duchâtel, qui a vécu en 2003 la mise en place chez Dodin des différents volets de "La Sécurité d'abord!" : participation à la réunion de préparation de lancement des travaux (et donc possibilité de faire valoir un point de vue "prévention" dans l'établissement du cahier des charges des outils ou dans leur choix), et, sur les chantiers, institution du quart d'heure sécurité hebdomadaire, rituel institué chaque lundi matin pour les équipes de la Sioule; visite mensuelle du directeur de travaux; remontée des presque-accidents; établissement des non-négociables; confrontations à partir de vidéos tournées en situation et organisation de formations ciblées sur des aspects propres au chantier (conduite d'engin, élingage, réalisation des fléaux, etc.). "Après une phase initiale de réticence face à ces



Bon pour le service! Mercredi 23 novembre 2005, à l'issue des essais en charge du viaduc, les derniers semi-remorques s'en vont

Ready for service! On Wednesday 23 November 2005, following testing of the viaduct under load, the last semi-trailers go away

nouvelles contraintes, mais grâce aux efforts de l'encadrement qui a travaillé sans relâche à éliminer les risques, à communiquer et à faire passer le message en impliquant tout le monde, y compris les sous-traitants, la sécurité s'est intégrée dans l'organisation et l'état d'esprit du chantier."

LES PRINCIPAUX INTERVENANTS

Maitre d'ouvrage

Autoroutes du Sud de la France (ASF)

Architecte

Berdj Mikaelian

Maitre d'œuvre

Setec TPI/Secoa

Entreprises

Campenon Bernard TP (mandataire) et Dodin (en participation avec Campenon Bernard Régions, agence de Grenoble)

- Terrassements et soutènements: Deschiron, Quintoli
- Précontrainte: Freyssinet
- Fondations: Cofex Régions (blindage), SOD (creusement)
- Armatures: Welbond
- Béton: BCP, SATM, Contrôle béton ABC

Bureau d'études

Jean Muller International Structures

Bureau méthodes

Dodin

ABSTRACT

**The Sioule viaduct.
An exceptional structure
and a symbolic project
for Sogea Construction**

*Fr. Batifoulier, J.-M. Benazech,
Fr. Duchâtel, J. Mathiot*

At the level of Pontgibaud (Puy-de-Dôme region), about twenty kilometres west of Clermont-Ferrand, Sogea Construction (VINCI group) completed at end 2005 the construction of the Sioule viaduct, on the A89 motorway, the largest prestressed concrete engineering structure built in France in recent years. Carried out in demanding climate, environment and time conditions, this major project was an opportunity for Sogea to apply and validate, at a time when they were being deployed throughout the firm, its safety policy, its environmental approach and a novel training and recruitment formula, three key features of its sustainable development policy.

RESUMEN ESPAÑOL

**El viaducto del Sioule.
Una obra extraordinaria
y una construcción símbolo
para Sogea Construction**

*Fr. Batifoulier, J.-M. Benazech,
Fr. Duchâtel y J. Mathiot*

A la altura de Pontgibaud (departamento de Puy-de-Dôme), a unos veinte kilómetros por el oeste de Clermont-Ferrand, Sogea Construction (grupo VINCI) ha finalizado a finales de 2005 la realización del viaducto del Sioule, en la autopista A89, la obra de fábrica de hormigón pretensado más importante construida en Francia durante estos últimos años. Ejecutado según condiciones climáticas rigurosas, así como de entorno y de plazo. Esta gran obra fue para Sogea la ocasión de poner en aplicación y convalidar, en el momento en que estaban desplegadas en el conjunto de la empresa, su modelo de seguridad, su enfoque medioambiental y una fórmula inédita de formación y de contratación, tres orientaciones clave de su política de desarrollo sostenible.

Le viaduc de Meaux

Du sous-bandage au-dessus

Le viaduc de Meaux, ouvrage innovant, d'une longueur de 1 200 m franchit la Marne au sud de Meaux, en Seine-et-Marne. La travée la plus importante au-dessus de la Marne est renforcée par une structure précontrainte dénommée sous-bandage. Cet article, après un bref rappel du contexte, explique la conception de cette structure particulière en termes d'études et de méthodes. Ensuite, le propos détaille la mise en œuvre des étaçons et de la précontrainte. Les travaux étant terminés depuis fin 2004, la dernière partie rend compte des travaux de finition et des épreuves, avant de conclure sur les principales difficultés rencontrées sur ce chantier. Enfin, l'architecte fait un bilan de la réussite esthétique de l'ouvrage.

■ LE VIADUC DE LA DÉVIATION SUD-OUEST DE MEAUX

La ville de Meaux, située à 50 km à l'est de Paris, est soumise à un fort trafic de transit. Les conditions de circulation y sont donc difficiles aux heures de pointe. Un projet de grand contournement par l'ouest a donc vu le jour, financé par l'Etat, la région Ile-de-France, le département de Seine-et-Marne et la Ville de Meaux. La déviation sud-ouest, en est la partie sous maîtrise d'ouvrage Etat.

Ce tronçon de 6 km, se débranche de l'autoroute A140 au sud de Meaux pour relier l'ouest de la ville. Le projet franchit une brèche importante constituée par la vallée de la Marne, milieu naturel et zone d'inondation. La solution retenue a été la construction d'un viaduc exceptionnel de 1 200 m de long.

Compte tenu de ses caractéristiques particulières et du calendrier propice du projet, la Direction des Routes a décidé d'utiliser la procédure de l'appel d'offres sur performance. L'objectif était de solliciter l'innovation de la part des entreprises. C'est donc un ouvrage particulièrement innovant qui a été choisi. L'innovation réside dans la structure des âmes de l'ouvrage, dites âmes "plano-tubu-

laires", mais également dans la structure de la travée au-dessus de la Marne : le sous-bandage (figure 1).

■ LE FRANCHISSEMENT DE LA MARNE

Conception de la travée

Dans le cahier des charges de l'appel d'offres sur performances, il était bien spécifié qu'aucun appui définitif de la structure ne devait se trouver dans le lit de la Marne, de façon à laisser l'éventuelle possibilité aux Services de la Navigation de la rendre un jour navigable.

Dans ces conditions, la largeur de la rivière qui devait être laissée libre de tout appui au droit de la trace du viaduc et les gabarits de passage à laisser de part et d'autre des berges sur chaque rive, conduisaient à une portée minimale au-dessus de la Marne d'environ 93 m. Par contre, cette contrainte interdisant tout appui dans le lit de la Marne n'était pas applicable en cours de travaux dans la mesure où la Marne n'est pas aujourd'hui navigable (figure 2).

Dès les premières analyses du dossier, et pour les raisons que nous avons explicitées dans un précédent article relatant la genèse de cette opération et la phase conception préliminaire (cf. *Travaux* n° 793, janvier 2003), nous avons effectué un certain nombre de choix que nous avons qualifiés de fondamentaux. Nous avons notamment retenu pour cette structure en partie courante, des portées moyennes de l'ordre de 55,00 m, une hauteur de poutre constante de 4,50 m, un tablier unique avec une section transversale en caisson monocellulaire avec bracons intérieurs et extérieurs en forme de W, et une méthode de construction du tablier par poussage. Il était dès lors très difficile de conserver ces dispositions pour la travée sur la Marne, compte tenu de la portée de 93,00 m quasiment imposée en valeur minimale tout du moins.

Dès lors, au cours des études de conception, plusieurs solutions ont été envisagées. Parmi celles-ci, nous avons notamment étudié la possibilité de traiter le problème de la travée sur la Marne par une grande travée spécifique. Différentiée du reste de la structure, elle se présentait sous la forme d'une travée de 93,00 m de portée, de hauteur variant paraboliquement, encadrée de deux travées adjacentes, d'environ 74 m de portée, assurant la transition avec les travées courantes. Les deux

Figure 1
Vue générale
du contournement
de Meaux
*General view
of the Meaux bypass*



de la Marne à la réception

Michel Placidi
DIRECTEUR TECHNIQUE
Razel TM

Eric Mercier
DIRECTEUR DE TRAVAUX
Razel

Berdj Mikaelian
ARCHITECTE

Jean-Yves Sablon
INGÉNIEUR PRINCIPAL
Setec TPI (anciennement DDE 77/SAGI/ETNOA2)

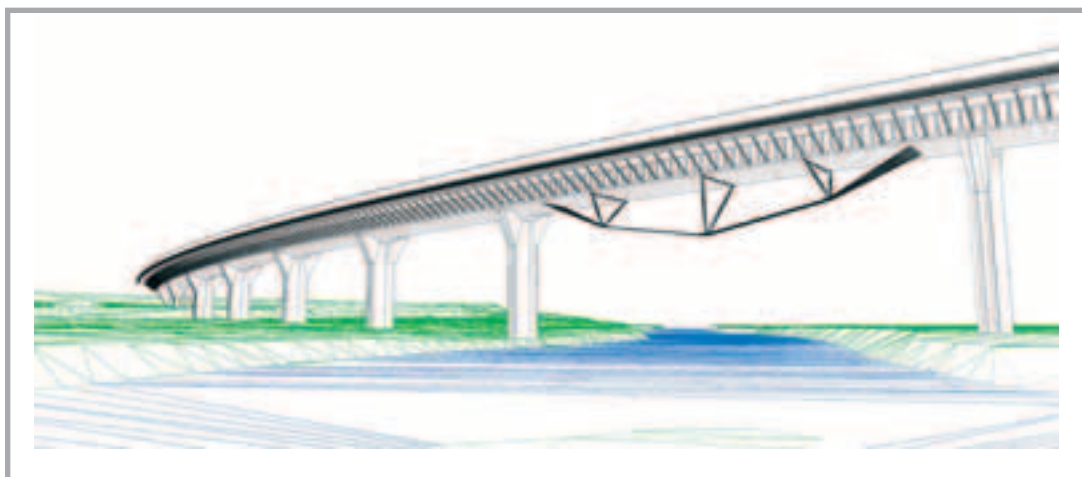


Figure 2
Esquisse du sous-bandage
de la travée sur la Marne

*Sketch of sub-binding
on the span over the Marne*

fléaux constituant cette grande travée auraient alors été construits en encorbellement de façon classique et traditionnelle en coulant en place des voussoirs en équipages mobiles.

Cette solution, qui structurellement était parfaitement viable, logique et justifiée, présentait toutefois deux inconvénients majeurs, un lié à l'organisation même du chantier et à la méthodologie de construction, l'autre lié aux choix architecturaux.

En effet, sur le plan constructif, elle conduisait à dissocier la réalisation de ces deux fléaux du reste de l'ouvrage et à considérer alors l'ensemble du chantier comme quatre chantiers séparés et distincts : deux chantiers de ponts poussés, un à chaque extrémité de l'ouvrage, pour réaliser les deux parties latérales de l'ouvrage de hauteur constante et les deux autres correspondant aux deux fléaux construits en encorbellement à partir des deux piles en rive de la Marne. Au lieu d'un chantier de tablier unique, monolithe, valable pour la réalisation de l'ensemble de l'ouvrage, on se retrouvait avec quatre chantiers séparés et distincts, qui pouvaient, certes, être traités comme deux fois deux chantiers se succédant, mais qui nécessitaient néanmoins des transferts d'installation longs et coûteux.

D'autre part, sur le plan esthétique et architectural, ces deux fléaux de hauteur variable, flanqués au beau milieu de la ligne pure et continue de la poutre de hauteur constante qui franchissait d'un trait toute la vallée, risquaient de rompre l'harmonie générale de l'ensemble du tablier voulue par l'architecte, nuisant à l'esprit de sérénité recherché avec un tablier de hauteur constante sur toute la longueur de la brèche.

Nous avons donc finalement abandonné cette solution et avons recherché le moyen de nous af-

franchir de cette portée de 93,00 m avec une structure compatible avec une poutre de hauteur constante.

La possibilité de disposer, en phase provisoire, d'un appui intermédiaire dans la Marne, nous a très vite orientés vers une solution consistant à placer une palée provisoire sensiblement au milieu de cette grande travée, ce qui permettait de ramener aux environs d'une cinquantaine de mètres les portées de ces deux travées, en phase provisoire de construction, et donc de conserver la méthode du poussage pour franchir la Marne. Dès lors, le tablier pouvait être réalisé suivant un seul et unique procédé, par poussage depuis une seule de ses extrémités.

L'objectif devenait alors de trouver le moyen d'augmenter sensiblement la capacité de résistance en flexion de la poutre au droit de cette travée. Le moyen le plus simple et le plus efficace pour y parvenir consistait à accroître le bras de levier des câbles de précontrainte en augmentant leur bras de levier, deux solutions se présentaient :

- ◆ soit augmenter leur bras de levier au-dessus de la poutre pour accroître la capacité de cette dernière à résister aux moments négatifs sur appuis ; cela consistait à sortir les câbles de précontrainte au droit des piles jouxtant la Marne, sous forme de haubans, ou bien sous forme de précontrainte extradossée ;

- ◆ soit augmenter leur bras de levier au-dessous de la poutre pour accroître la capacité de cette dernière à résister aux moments positifs en milieu de travée : ce qui consistait à sortir les câbles de précontrainte en travée sous forme de sous-bandage. Des considérations à la fois techniques, structurelles et architecturales nous ont très vite conduits à abandonner les solutions d'excentrement des câbles au-dessus du tablier, qu'il s'agisse de hau-

Figure 3
Représentation
en image de synthèse
de la travée
sur la Marne

*Composite image
illustrating the span
over the Marne*



Photo 1
L'avant-bec
franchissant la travée
sur la Marne

*The launching nose
crossing the span
over the Marne*



► banage ou de précontrainte extradossée et donc à nous orienter vers une solution de sous-bandage formé de câbles de précontrainte excentrés par des poinçons métalliques disposés sous le tablier, à la fois plus efficaces, plus faciles à monter et esthétiquement beaucoup plus discrets notamment pour les usagers circulant sur l'ouvrage. Cette travée de franchissement de la Marne se présente donc comme une poutre de hauteur constante, la même que sur tout le reste de l'ouvrage en partie courante, c'est-à-dire 4,50 m, avec les mêmes bracons extérieurs et un aspect rigoureusement identique aux autres parties de l'ouvrage, la seule différence étant la présence des câbles de précontrainte du sous-bandage. Il s'agit de six câbles de type 27 T 15 de classe S 1860, placés à l'intérieur d'une gaine en PEHD de couleur noire et injectés à la cire pétrolière. Ces six câbles sont ancrés au droit des piles P7 et P8 de part et d'autre de la Marne, dans des entretoises inférieures massives destinées à permettre la diffusion des efforts engendrés à l'ensemble de la section du tablier. Ils ont un tracé longitudinal polygonal à quatre faces. Ils sont déviés par trois poinçons intermédiaires, un poinçon central excentrant les câbles de 10 m sous l'intrados du tablier et deux poinçons latéraux excentrant les câbles de 6 m sous l'intrados du tablier. Le poinçon central est vertical alors que les poinçons latéraux sont inclinés, suivant des pentes sensiblement rayonnantes par rapport au tracé po-

lygonal du câblage. Ces poinçons ont transversalement la forme de V, les câbles passant sous la pointe inférieure du V. Ils sont constitués de profilés métalliques soudés. Ils sont fixés sur la sous-face du tablier par l'intermédiaire de platines métalliques disposées au droit des âmes du caisson. Les six câbles 27 T 15 sont regroupés et parallèles entre les poinçons latéraux et le poinçon central et sont épanouis transversalement entre les poinçons latéraux et les piles adjacentes, de façon à faciliter l'ancrage des câbles dans les entretoises inférieures du tablier au droit des piles P7 et P8 (figure 3).

Méthode de construction de l'ouvrage

Comme nous l'avons indiqué dans le précédent article (cf. *Travaux* n° 793, janvier 2003) décrivant cet ouvrage, le tablier a été entièrement réalisé par la méthode de poussage, depuis son aire de préfabrication située à son extrémité Est, en arrière de la culée C22.

Préfabriquée par tronçons successifs de longueurs comprises entre 22 et 29 m, la structure est mise en place par poussages au fur et à mesure que les différents tronçons sont construits.

L'aire de préfabrication, d'une longueur totale légèrement supérieure à une centaine de mètres, comporte quatre zones successives de travail :

- ◆ la zone 1, située la plus en arrière, sur laquelle sont placés, réglés et soudés entre eux et aux éléments précédents les tronçons d'âmes planotubulaires arrivant directement de l'usine de construction métallique ;
 - ◆ la zone 2, ensuite, sur laquelle sont ferrailés puis bétonnés le hourdis inférieur ainsi que la nervure centrale intérieure du hourdis supérieur reliant et solidarissant entre eux les bracons intérieurs du caisson ;
 - ◆ la zone 3, sur laquelle sont mis en place les bracons extérieurs et où est ferrailée et bétonnée la dalle de hourdis supérieur, dont les armatures sont posées par cages préfabriquées de toute largeur, c'est-à-dire 31,10 m à l'aide d'un palonnier spécial ;
 - ◆ la zone 4, enfin, dans laquelle sont mis en tension les câbles de précontrainte intérieure longitudinale et transversale, certains équipements de l'ouvrage et sur laquelle la dernière couche de peinture des âmes planotubulaires est appliquée.
- Le cycle atteint par le chantier pour réaliser un tel tronçon de 29 m de longueur, représentant une surface de tablier de 900 m², avec plus de 80 t d'armatures passives et 500 m³ de béton, a été de façon courante de quatre jours.
- Le tablier, ainsi préfabriqué en 44 tronçons successifs a été mis en place par poussage en descendant suivant la pente longitudinale de 2,1 %, glissant par l'intermédiaire de patins en néoprène



Photo 2
Mise en place d'un poinçon latéral
Setting up a side truss post



Photo 3
Fixation du poinçon central
Fastening the centre truss post

téflon sur des platines en acier inoxydable poli disposées en tête de chaque pile.

Le franchissement de la travée sur la Marne, compte tenu de sa grande portée de 93 m, posait un problème particulier pour le poussage par rapport aux travées courantes de portées 55 m environ. Comme indiqué précédemment, la possibilité qui nous était laissée de pouvoir placer au centre de la rivière une palée provisoire d'appui divisant la portée de cette travée sensiblement par deux, nous a permis de réaliser cette partie d'ouvrage de la même façon que le reste de la structure, c'est-à-dire par poussage avec le même avant-bec de 40 m de longueur (photo 1).

Cette palée provisoire est constituée de quatre profilés métalliques HEM 1000 disposés deux par deux, entretoisés au moyen de profilés métalliques et de barres de précontrainte. Sa stabilité est assurée par un haubanage avant et arrière formé de câbles de type 7 T 15 ancrés à la base des piles adjacentes. En tête, cette palée provisoire comporte des selles de glissement comparables aux selles disposées sur les piles courantes, destinées à permettre le glissement du tablier lors de sa mise en place par poussage.

Ainsi, grâce à cette palée provisoire, le franchissement de la Marne a pu s'effectuer par poussage dans les mêmes conditions et de la même façon que les franchissements des autres travées de moindre portée.

Une fois l'ouvrage amené dans sa position finale, sa mise en configuration définitive a consisté à mettre en place les câbles de sous-bandage permettant alors de démonter la palée provisoire.

La mise en place des poinçons s'est effectuée à l'aide de deux grues mobiles, les trois poinçons étant hissés, positionnés et réglés avant d'être fixés en sous-face du tablier au moyen de boulons HR, sachant qu'une fois les six câbles 27 T 15 tendus, leur appui sous le tablier est assuré uniquement par la poussée au vide exercée par la déviation qu'ils imposent aux câbles. La géométrie de ces poinçons a fait l'objet d'une étude très précise en 3D pour tenir compte de la poussée centripète des



Photo 5
Mise en place des câbles du sous-bandage : vue depuis la sous-face du tablier
Laying the sub-binding cables : view from the underside of the deck

câbles du fait de la courbure en plan de l'ouvrage. Outre leur géométrie en forme de V, avec selles de déviation des câbles à la pointe inférieure du V, les poinçons comportent en partie supérieure un tirant métallique fermant le V de façon à éviter de mettre en traction le hourdis inférieur du tablier du fait de la forte inclinaison des bracons du V, une des deux platines d'appui en sous-face du tablier étant glissante pour permettre le libre allongement de ce tirant sous la poussée des câbles (photos 2 et 3). Pour faciliter la mise en place des six câbles 27 T 15 et leur mise en tension, on a placé une barre centrale bloquant les poinçons entre eux et reprenant les différentiels de tension entre les deux côtés de chaque selle de déviation.

Une étude précise a permis de définir la procédure de mise en tension progressive de ces câbles de façon à ne pas trop solliciter les poinçons et leurs platines d'appui en sous-face du tablier (photos 4 et 5).

Comme prévu par les calculs, lors de la mise en



Photo 4
Mise en place des câbles du sous-bandage : vue depuis le sol
Laying the sub-binding cables : view from the ground



Photo 6
Travée sur la Marne
après mise en place
du sous-bandage
*Span over the Marne
after laying
the sub-binding*



tension des câbles du sous-bandage, le tablier s'est décollé naturellement de la palée provisoire d'environ 3 cm, ce qui a permis de la démonter sans difficulté (photo 6).

Méthode de calcul de la travée sous-bandée

L'étude de la travée sous-bandée sur la Marne a été effectuée à l'aide d'un calcul en trois dimensions effectué au moyen du programme ST1 du Setra. Les câbles 27 T 15 du sous-bandage ont été modélisés sous forme de barres articulées au droit de chaque poinçon. La mise en tension de ces câbles s'effectue par un refroidissement adéquat de ces barres en prenant en compte le module de déformation et le coefficient de dilatation thermique de l'acier. Ceci permet d'obtenir avec une précision optimale les variations de contraintes sous surcharges variables d'exploitation ainsi que sous les variations thermiques appliquées à la structure. Par assimilation à des câbles extérieurs utilisés dans le cas d'ouvrages à précontrainte extradossée, la tension des câbles 27 T 15 du sous-bandage a été limitée à $0,65 F_{rg}$, c'est-à-dire à une valeur intermédiaire entre la valeur prise en compte dans le cas de câbles de précontrainte extérieure et celle prise en compte dans le cas de haubans. En effet, dans le cas présent de sous-bandage, la géométrie des câbles et leur inclinaison par rapport à la fibre neutre de la poutre du tablier ne laisse pas craindre de surtension due à une quelconque déformation de la structure. Par ailleurs, un gradient thermique réduit pour les câbles a été pris en compte dans les calculs, compte tenu du fait que ces derniers se trouvent sous le tablier, protégés à l'ombre et non soumis à l'agression directe des rayons du soleil. Enfin, une étude spécifique a été effectuée pour évaluer les éventuels effets que pourraient avoir sur la structure sous-bandée les phénomènes de fatigue (étude du convoi de fatigue qui ne génère que des variations de contraintes extrêmement faibles).

MISE EN PLACE DE LA STRUCTURE

Travaux préparatoires

Pose platine

La pose des platines d'ancrage des poinçons s'est effectuée sur l'aire de préfabrication du tablier : les platines de 1,30 m x 1,30 m ont été disposées directement sur les contreplaqués en contact avec les plats de glissement des longrines de lançage, puis le ferrailage et le bétonnage ont précédé le lançage des tronçons correspondants. Le premier objectif recherché à la pose des platines

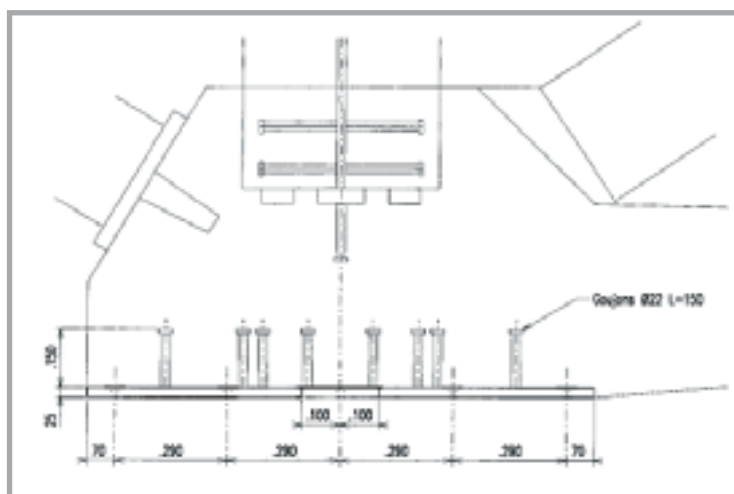


Figure 4
Connexion de la platine
au gousset sous l'APT
*Connection of the plate
to the gusset
under the flat tubular
core*



Photo 7
Platine de liaison
avec le tablier et butée
*Connecting plate with the deck
and wing wall*

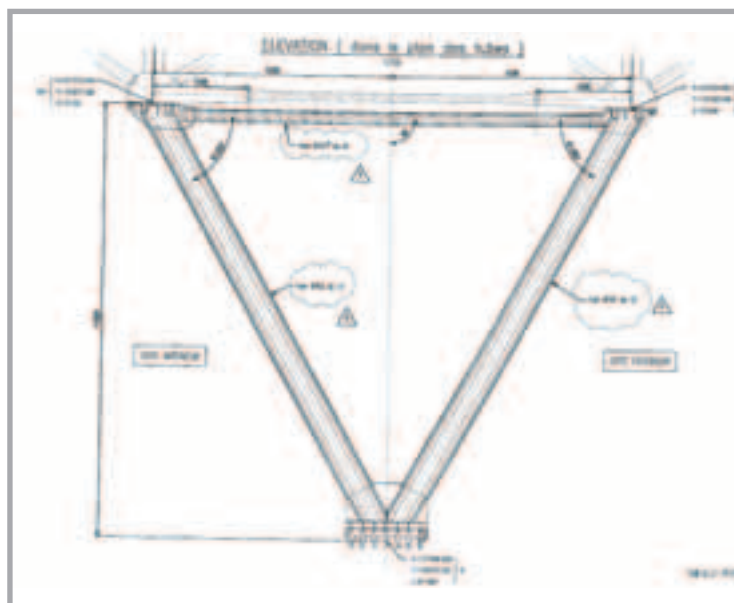


Figure 5
Géométrie
du poinçon central
*Geometry of the centre
truss post*

était de garantir la continuité de la surface de glissement en sous-face du tablier au droit des âmes. La qualité du bétonnage était également un objectif majeur afin de garantir une bonne diffusion des efforts dans ces parties d'ouvrage fortement ferrillées. La connexion des platines au béton est assurée par goujons Nelson (photo 7 et figure 4).

Relevés topographiques préliminaires

A la sortie du banc de préfabrication, un relevé topographique a permis de déterminer les positions absolues des platines dans l'espace, ainsi que les positions relatives des platines constituant une paire pour chaque poinçon.

L'analyse géométrique a ainsi conditionné le réglage théorique des platines d'appui par rapport à l'axe des tubes, l'objectif étant de caler correctement les points de passage de la précontrainte de sous-bandage.

Montage des poinçons et réglage

Assemblage en usine

L'assemblage en usine a été réalisé de telle sorte à minimiser les travaux sur site, l'environnement étant moins favorable pour des assemblages de qualité (figure 5).

Chaque poinçon a été constitué de la manière suivante en usine :

- ◆ fabrication des sous-ensembles platines + goussets;
- ◆ fabrication du sous-ensemble selle de déviation;
- ◆ montage à blanc avec tubes de liaison, à plat, l'ensemble constituant un poinçon complet;
- ◆ vérification de l'orientation des platines d'appui et du point d'épure de passage des câbles de sous-bandage;
- ◆ soudures;
- ◆ contrôles et mise en œuvre du complexe anticorrosion (photo 8 et figure 6).

A ce stade, le retrait dû aux soudures s'est traduit par des déformations des platines d'appuis rendant ces dernières non planes. Cette sujétion, conjuguée aux tolérances inévitables de fabrication, a conduit à l'utilisation d'un mortier fin de remplissage des vides entre platine et contre-platine noyées dans le béton.

Assemblage des éléments sur site

Arrivé sur site, chaque poinçon était reconstitué complètement "à plat" grâce aux gabarits utilisés en usine. Par poinçon, le raboutage d'un tube $\phi 762$ et l'assemblage de la traverse $\phi 323.9$ constituaient les seules opérations de soudage à réaliser in situ. Un contrôle topographique préalable venait valider l'assemblage soudé avant la mise en position des poinçons.

Aux opérations de soudage, se succédaient les opérations de contrôle par US et les compléments et retouches de la protection anticorrosion.



Photo 8
Préparation et assemblage au sol

Preparation and assembly on the ground

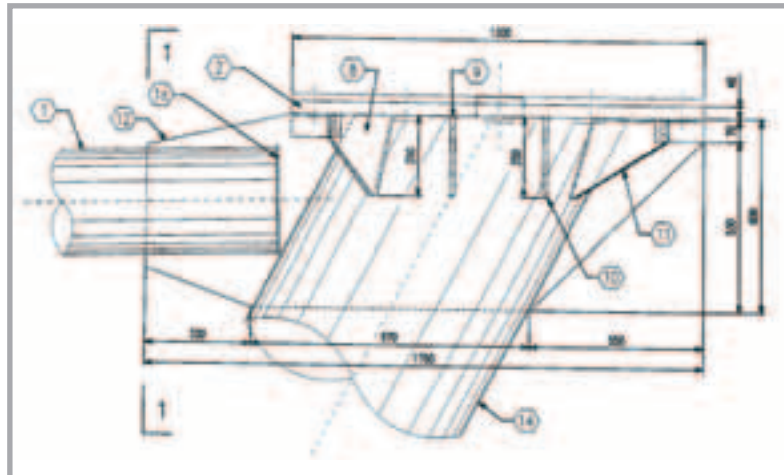


Figure 6
Platine supérieure du sous-bandage

Upper plate of the sub-binding

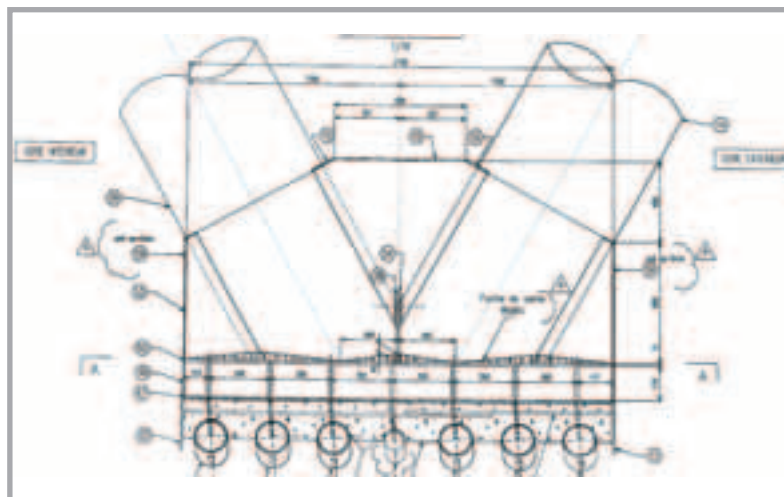


Figure 7
Détail de la selle déviateur

Detail of the deviator saddle

Enfin, il restait à réaliser le bétonnage des selles de déviation: mise en position du poinçon à l'envers, avec la surface libre de la zone à bétonner en face supérieure; mise en place d'un microbéton B45; retournement de la pièce le lendemain (figure 7 et photo 9).

Pose des éléments

Chaque poinçon était acheminé à plat jusque sur le pont provisoire situé sous l'ouvrage, permettant de réaliser les travaux de pose en sous-œuvre du tablier.

A l'aide de deux grues mobiles, la pièce était basculée et mise en position jusqu'à 3 m de l'accostage. Une seule grue mobile permettait de réaliser l'assemblage final :

- ◆ présentation du poinçon en position finale et réglage théorique (par géomètre) en tenant compte des déformations à venir (mise en tension du " tendeur et des câbles);
- ◆ vérification de la bonne rentrée des pions de ci-



Photo 9
Préparation au sol

Preparation on the ground

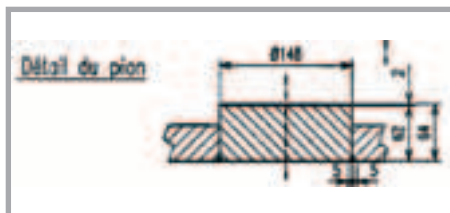


Figure 8
Détail du pion de cisaillement
Detail of the shear pin

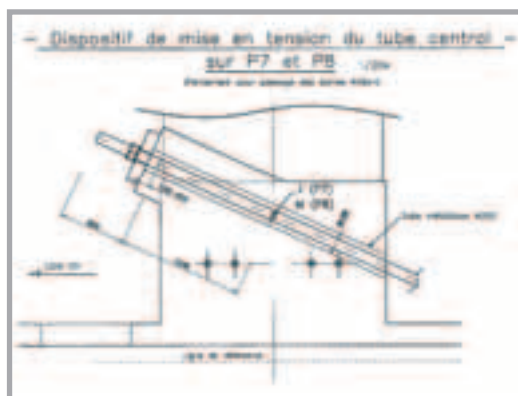


Figure 9
Dispositif de mise en tension du tendeur
Tensioner tensioning device



Photo 12
Barre Macalloy préparée
Prepared Macalloy bar



Photo 10
Montage poinçon central
Erecting the centre truss post



Photo 11
Pose de l'étauçon P8 à la grue
Placing the P8 prop by crane

saillement dans les platines d'ancrage (rentrée mini = 18 mm) (figure 8);

- ◆ mise en place de gabarit périphérique à la platine d'ancrage;
- ◆ descente d'un mètre du poinçon;
- ◆ mise en œuvre du mortier fin de remplissage ($f_{c28} = 55$ MPa, plastique, maniabilité 1 h 30) en fonction des gabarits;
- ◆ présentation finale et réglage du poinçon, assemblage par boulonnage à la platine; mise en place de suspentes provisoires entre le poinçon et le hourdis inférieur du tablier;
- ◆ repli de la grue.

Les trois poinçons étant en position, il restait à installer une liaison mécanique longitudinale constituée par une barre de 97 mm type Macalloy AT. Ce tendeur ancré dans les voussoirs sur piles P7 et P8 devait avoir une longueur "bloquée" entre poinçon; les liaisons par ridoir entre barres élémen-

taires de 12 m ont permis de réaliser cette opération (figure 9 et photos 10 et 11).

La mise en tension du tendeur était un préalable à toute opération de précontrainte; en effet, ce dernier était en mesure de reprendre tout effort tangentiel au niveau des selles de déviation. A partir de cet instant, les suspentes provisoires pouvaient être démontées.

Mise en œuvre de la précontrainte

Mise en place de la précontrainte

Après la mise en place de la structure et son réglage géométrique, l'entreprise a procédé à la pose des gaines de précontrainte. Ces gaines sont de type PEHD PE 80 PN 10 NF 114 GR 4 en partie courante et de type PEHD PE 100 PN 16 NF 114 GR 4 en partie déviée, et bénéficiant de la marque NF. Leur diamètre extérieur est de 140 mm.

La difficulté était de mettre en place ces gaines PEHD sous l'ouvrage, sur une longueur de 100 m en passant par des tubes déviateurs. En outre, ces gaines sont constituées d'éléments raboutés par soudage et donc susceptibles de se rompre au niveau des joints sous l'effet d'une traction trop importante. Par conséquent, l'entreprise a procédé à des essais en atelier afin de tester la mise en œuvre (photo 12).

La procédure retenue et validée par la maîtrise d'œuvre est donc la suivante :

- ◆ assemblage des gaines sur toute leur longueur à l'intérieur du caisson du tablier, du côté de P7. A ce stade, les contrôles sont réalisés, dont la vérification de l'absence de corps étranger dans la gaine, et le meulage des bourrelets de soudure pour des raisons esthétiques et d'enfilage. La trompette côté P7 est mise en place par vissage avant l'enfilage;
- ◆ installation de deux câbles pour chacun des six câbles, depuis une nacelle située sur le pont provisoire. La première câblette sert à tracter la gaine et la seconde fait office de support du conduit;
- ◆ tractage du conduit à l'aide de la câblette;
- ◆ une fois en place, la gaine est coupée à longueur côté P8 et la trompette est raccordée par un manchon électrosoudable.



Photo 13
Mise en place
des gaines PEHD
Placing HD
polyethylene ducts



Photo 14
Enfilage des torons
depuis l'intérieur
du caisson
Inserting tendons
from the inside
of the box girder

Cette opération s'est déroulée sans difficulté. Des interventions localisées ont été nécessaires pour faciliter le passage des gaines à travers les déviateurs.

Après cette étape, les torons ont été enfilés par poussage. En cas de difficulté, la maîtrise d'œuvre avait demandé une procédure particulière de mise en œuvre du faisceau complet (photo 13).

Mise en tension du tendeur

Le tendeur décrit plus haut, a nécessité une mise en tension par palier et suivant un phasage particulier. En effet, il fallait démonter les câbles de fixation des poinçons utilisés lors du montage et contrôler la position des selles. La mise en tension est simultanée entre les deux extrémités pour des raisons de symétrie. Les vérins extra plats utilisés étaient de type Enerpac CLP 1602, développant 161,9 t à 700 bars. La procédure était la suivante :

- ◆ montée à 50 t, par palier de 10 t et démontage des fixations des poinçons ;
- ◆ montée à 130 t, par palier de 10 t avec un contrôle continu des déplacements (tolérance de ± 10 mm) et blocage sur écrou définitif ;
- ◆ détente des vérins à 100 t et reprise à 130 t par palier de 10 t avant de bloquer à nouveau l'écrou. La dernière étape a permis de s'assurer d'obtenir un effort à l'ancrage de 130 t en réduisant les effets de serrage de l'écrou.

Mise en tension de la précontrainte

Afin de limiter les déplacements des poinçons et d'assurer un équilibrage des efforts dans le sous-bandage, la mise en tension a été réalisée symétriquement (actif-actif). En outre, un phasage transversal a été respecté :

- ◆ mise en tension à 50 % du câble n° 3 (numérotation de 1 à 6 transversalement) ;
- ◆ mise en tension à 100 % du câble n° 4 (symétrique du câble n° 3) ;
- ◆ mise en tension à 100 % du câble n° 2, puis n° 5, puis n° 1 et n° 6 ;



Photo 15
Vue du sous-bandage
depuis la pile P8
View of sub-binding
from pier P8

- ◆ complément de mise en tension à 100 % du câble n° 3 (photo 14).

Lors des phases de mise en tension, outre les contrôles habituels de pression et d'allongement, l'entreprise a contrôlé les déplacements des poinçons par mesures topographiques (mise en place de mini-prisme au niveau de chaque selle déviatrice) (photo 15).

Injection à la cire

Lors de l'analyse de la mise au point du marché, et par anticipation de l'application de la circulaire de mars 2001 sur la protection de la précontrainte extérieure, il a été décidé de rendre la précontrainte du sous-bandage démontable. Par conséquent, l'injection a été réalisée par un produit souple, la cire pétrolière en l'occurrence, et des surlongueurs de câbles ont été conservées aux ancrages pour permettre la détension.

Avant de réaliser l'injection, l'entreprise a procédé à des tests d'étanchéité des gaines. Ces tests ont été réalisés à l'air, sous une pression de 4 à 5 bars, pendant 5 minutes. Ils ont permis de détecter des fuites au niveau des capots de protec-

Photo 16
Injection à la cire
et tube rallonge
de démontage

*Wax injection
and extension pipe
for dismantling*



Photo 17
Traitement
de la sortie des câbles

*Cable outlet
treatment*



tion. Après modification des capots, initialement trop souple au niveau du contact, les essais ont été renouvelés. Des fuites ont alors été détectées au niveau des ancrages côté P8, probablement dans les manchons électrosoudables. Après étanchéification, et un nouveau test, l'injection pouvait démarrer.

Compte tenu de la période, en novembre, la maîtrise d'œuvre a demandé à l'entreprise de prendre des précautions pour réduire les chocs thermiques dans les gaines et éviter la formation de bouchon dans la gaine par refroidissement. Un système de soufflage d'air chaud a donc été mis en place la veille de l'injection.

La cire pétrolière a été approvisionnée sur le chantier par camion citerne de 20 m³ (cuve à 110 °C environ). Le flexible a été raccordé au point d'injection sur le capot côté VSP7. En effet, l'injection n'a pas été faite depuis le point bas, pour des raisons de sécurité (manipulation en hauteur), ce qui n'est pas contre-indiqué avec un produit souple. L'injection s'est faite sans difficulté, très rapidement pour un câble de 100 m. La pression en sortie de pompe a été contrôlée lors de l'injection, et maintenue pendant quelques instants après fermeture du conduit (photos 16 et 17).

■ LES ÉPREUVES ET LA FIN DES TRAVAUX

Démontage de la palée

Pour permettre les opérations de montage du sous-bandage, le haubannage de la palée provisoire devait être démonté. En effet, la position des câbles gênait le travail des grues.

Cependant, avec les variations thermiques, les déplacements du tablier auraient pu conduire au flambement de la palée provisoire, non maintenu par son haubannage. En fin de poussage, la descente de charge en tête de la palée était de 1 850 t.

Ainsi, pour permettre la détension des haubans de la palée, une procédure particulière a été établie : détension toron par toron, côté par côté (deux torons côté P7, puis deux torons côté P8, etc.). Pendant cette opération, les déplacements de la tête de pile étaient contrôlés, la valeur limite étant de ± 2 cm longitudinalement.

En outre, il a été décidé de bloquer la tête de la palée au tablier, afin de contrôler les déplacements de la tête de palée. Pratiquement, des vérins ont été placés sur les dés de vérinage de la palée, afin de créer un point fixe. Un repère a été placé entre le tablier et la palée pour contrôler les éventuels déplacements relatifs.

Lors de la mise en tension du sous-bandage, le tablier s'est soulevé de quelques millimètres de plus que l'allongement de la palée. Ceci a permis d'effectuer le démontage de la palée provisoire.

L'entreprise a d'abord procédé au démontage du contreventement des parties supérieures, puis dépose des poutres de cette partie, et ainsi de suite par module. Une fois les superstructures déposées, et le repli du pont provisoire, les tubes métalliques ont été recépés à 2 m sous le TN du fond de la Marne, depuis une barge. Cette opération délicate a nécessité l'intervention de scaphandriers pour venir découper le tube de diamètre 800 mm par l'intérieur.

Validation du modèle de calcul : les épreuves

Conformément au fascicule 61 Titre II, les épreuves de charges ont été réalisées sur l'ouvrage. Compte tenu du grand nombre de travées (22) et des valeurs faibles des flèches attendues, le programme de chargement a été simplifié. En effet, les flèches mesurées étaient estimées à 5 mm pour les travées courantes, et de 15 mm pour la travée sous-bandée. Les chargements suivants ont été réalisés :

- ◆ charges centrées pour chacune des travées, afin de déterminer les flèches maximales ;
- ◆ charges au droit d'une pile, pour 1 pile sur 3 ;
- ◆ charges centrées et par demi-chaussée sur la travée sous-bandée au-dessus de la Marne.

A chaque chargement, la flèche au droit des âmes

a été mesurée, en travée et sur pile. Après comparaison de différentes méthodes de mesure, la méthode topographique a été retenue car elle permettait d'assurer la meilleure précision (1/10^e de millimètre).

Le tableau I montre la très bonne corrélation entre mesures et prévisions.

■ CONCLUSIONS

Difficultés rencontrées au niveau du chantier

La réalisation d'un ouvrage de cette ampleur et innovant ne peut pas se dérouler sans soucis de chantier, mais au final, aucun problème majeur n'a été rencontré.

Les fondations

Contrairement aux habitudes, les travaux de fondations spéciales se sont parfaitement déroulés. Les méthodes employées étaient bien adaptées à la géologie du site : tubage provisoire en tête, excavation au buckett et maintien des parois à la boue bentonitique. On peut cependant noter que la variante de l'entreprise pour le recépage par le système Recepieu n'a pas donné satisfaction. Cette méthode utilisant une réaction de gonflement d'un produit d'injection doit créer un plan de rupture au niveau du recépage. Compte tenu du diamètre (1,80 m) et probablement de la présence d'obstacles (tubes d'auscultation, armatures gainées...), il était très difficile d'extraire la partie supérieure. Par conséquent, c'est la méthode classique qui a été utilisée.

Les piles

Le chantier de pile n'a pas connu d'incident majeur. En période de froid, une protection était installée sur le coffrage pour réchauffer le béton et assurer une prise satisfaisante. Par conséquent, nous n'avons pas constaté de fissuration dans les fûts.

Pour les chevêtres, la conception nécessitait la mise en œuvre de précontrainte transversale en tête, dans la forme en V. Cette précontrainte est constituée de six câbles 19 T 15S pour certaines piles et quatre câbles 19 T 15S et deux câbles 12 T 15S pour les autres. Compte tenu du rayon de courbure faible (3,5 m), un gainage rigide a été mis en œuvre sur toute la longueur du câble, soit 11 m. Deux difficultés ont été rencontrées : l'une liée à la conception et la seconde à une erreur de chantier.

Effectivement, la disposition fortement courbée du câble pouvait laisser craindre des pertes par frottement importantes, cumulées à des rentrées d'ancrage induisant une baisse de l'effort significative dans un câble court. La maîtrise d'œuvre a demandé

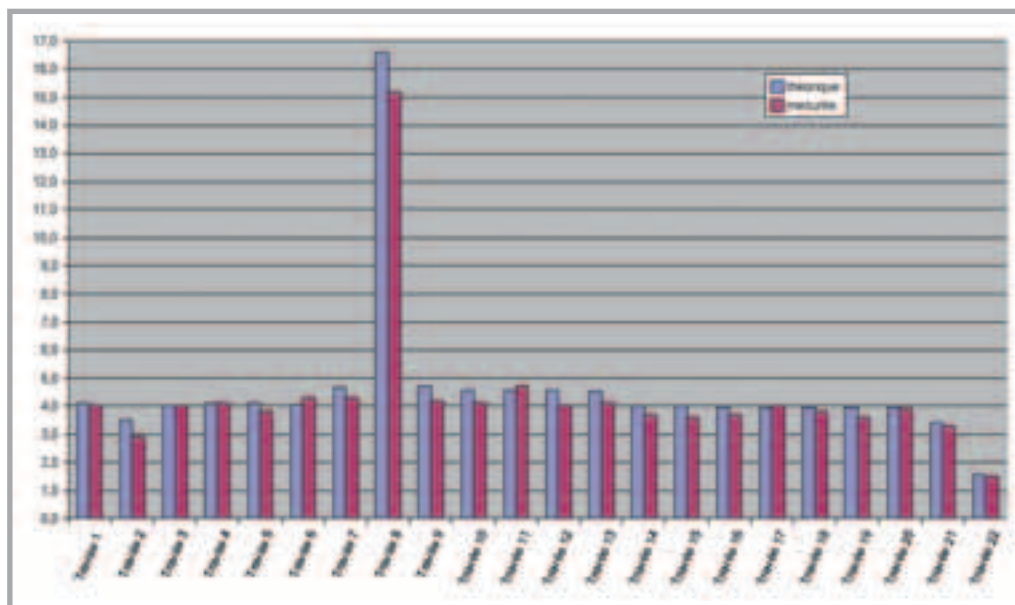


Tableau I
Comparaison des mesures de flèches théoriques et mesurées lors des épreuves

Comparison of theoretical deflection values and values measured during testing

la mesure du coefficient de transmission (niveau 1 par l'entreprise et niveau 2 par le LREP pour le compte de la maîtrise d'œuvre). Ces mesures ont donné un coefficient de transmission inférieur au coefficient de calcul, pourtant calculé conformément au règlement. Il a donc été décidé de procéder à un traitement des gaines pour améliorer le coefficient de transmission. Plusieurs solutions ont été testées :

- ◆ brossage de l'intérieur pour éliminer la rouille résiduelle et nettoyage (par chiffon maintenu à un câble);
- ◆ huilage avec le produit de protection des torons;
- ◆ cirage des torons avec de la cire pétrolière utilisée pour l'injection;
- ◆ enfilage du câble constitué et non toron par toron;
- ◆ combinaison des solutions précédentes.

A chaque essai, un coefficient de transmission était réalisé. Le cirage des câbles, contrairement à une analyse a priori, augmente les frottements. La solution la plus efficace est le nettoyage des gaines par brossage combiné à un huilage. Ces méthodes ont permis de respecter les coefficients de transmission de la note de calcul. Des contrôles ont été réalisés sur d'autres chevêtres, montrant l'efficacité du procédé.

Sur les trois piles P17, P18 et P19, des gaines pour des câbles 12 T 15S ont été mises en œuvre au lieu de deux câbles 19 T 15S. La maîtrise d'œuvre s'est aperçue de cette erreur avant l'enfilage, mais après le bétonnage. Il était donc possible de ne mettre en œuvre que 100 torons sur les 114 prévus. Diverses solutions ont été envisagées :

- ◆ surtension des torons au-delà de 0,8 F_{prg} (solution non réglementaire);
- ◆ traitement thermique afin de modifier la répartition de la force de précontrainte dans le chevêtre et de l'augmenter à l'endroit de la plus forte traction du béton;

Photo 18
Gaine bouchée,
vue après hydro-
démolition
*Plugged duct, view
after hydrodemolition*



- ◆ amélioration du coefficient de transmission en réduisant les pertes (voir ci-dessus);
- ◆ enfilage de 21 torons dans les gaines 19 T 15S et utilisation d'un bloc 27 T 15S, et enfilage de 13 torons dans les gaines 12 T 15S et utilisation d'un bloc 19 T 15S;
- ◆ remplacer les torons T 15S par des torons compactés, permettant un gain de l'ordre de 10 %;
- ◆ ajouter une poutre tirant pour reprendre les efforts ou démolition du chevêtre.

La première solution, non réglementaire, n'a pas été retenue. Le traitement thermique était une solution théoriquement fiable, mais dont la réalisation rencontrait de nombreuses difficultés (mode de réchauffage, travail en hauteur, mesure de la température...). L'amélioration du coefficient de transmission ne permettait pas de compenser les torons manquants, et l'enfilage de torons supplémentaires se heurtait à la résistance du chevêtre aux ancrages et dans les déviations. C'est donc la solution du toron compacté qui a été retenue.

Ces torons ont une section plus importante pour un diamètre plus faible grâce au surtreffilage qui permet de réduire les vides. Ils sont habituellement utilisés pour le levage. Comme la contrainte garantie à la rupture est plus faible, le gain est de 10 % uniquement. Administrativement, ces torons étant peu utilisés en ouvrage d'art, ils ne bénéficient pas d'agrément de la CIP. Il a donc été demandé un agrément spécifique au chantier pour les torons et son ancrage. Une fois la procédure validée, les torons ont été mis en tension et injectés classiquement, après validation du coefficient de transmission.

La réalisation du tablier

La précontrainte longitudinale a aussi connu un incident. Lors du bétonnage, un manchon de rabotage de gaine mal emboîté s'est déboîté, et la gaine a été remplie de béton sur environ 1,50 m. Une

fois la zone localisée, l'entreprise a essayé d'ouvrir la zone au marteau piqueur, mais devant la résistance élevée du béton et la densité des aciers, une autre méthode devait être étudiée. L'entreprise a fait intervenir un sous-traitant pour hydrodémolir le béton. Cette solution très efficace, mais coûteuse, a permis de dégager la zone sans endommager le ferrailage, ni la gaine vide. Ainsi, la gaine a été rabotée, les câbles enfilés et la zone bétonnée, avant la mise en tension (photo 18).

Le dernier poussage

La dernière phase de poussage consistait à déplacer une structure de 1 200 m, pesant 54 000 tonnes, en descente. Cette phase délicate a fait l'objet d'une attention toute particulière au niveau du système de freinage, élément essentiel du dispositif. En effet, l'ouvrage était retenu par un bloc freinant sur des longrines en béton et relié au tablier par des barres de précontrainte. Les mesures de l'effort de freinage avaient été réalisées sur les poussages précédents (efforts aux vérins, tests d'arrêts...). Lors de cette phase, le tablier quittait les longrines de poussage.

En fin de poussage, l'ouvrage s'est arrêté correctement à la position théorique. Cependant, quelque temps après la fin du poussage, le tablier a continué à avancer par pas de 1 à 2 cm, pour finalement se mettre en butée sur le massif de la culée. Devant cette situation, les blocages sur les piles fixes prévus d'être mis en place le lendemain ont été activés rapidement. Une solution complémentaire a été recherchée. Il a été convenu de mettre en place des câbles de précontrainte (quatre câbles 19 T 15S) ancrés sur le VSC22 d'un côté et sur des réservations de longrines de poussage de l'autre côté.

Ce "ressort" placé à l'arrière a permis d'annuler l'effet de la pente sur l'ouvrage. En effet, avec les variations thermiques et la pente, l'ouvrage se déplaçait vers le point bas par effet de reptation. Les déplacements observés sur les piles fixes ont permis de constater que l'ouvrage avait progressé de quelques centimètres vers C22, le point haut.

Une analyse du dysfonctionnement a été effectuée à la demande de la maîtrise d'œuvre mais aucune cause principale n'a pu être identifiée. La masse exceptionnelle déplacée, en descente, a mis en évidence des problèmes normalement négligeables sur des ouvrages poussés, plus classiques.

Tout d'abord, le grand nombre de piles (21), relativement hautes (de 20 à 35 m), a joué comme une succession de ressort, oscillant avec des fréquences différentes. Cumulé à l'effet cliquet des selles de glissement (mouvement vers le point bas uniquement au-delà d'un certain effort de rupture du frottement), le déplacement du tablier doit se faire différemment entre les différentes sections du tablier, au même instant. Ceci est complété par l'effort de retenue créé par le système de freinage. Le



**Vue de l'ouvrage
terminé**
*View of the completed
structure*

mouvement du tablier ne doit donc pas être uniforme, à un instant donné. Ce comportement doit créer des ondes de compression longitudinale dans le tablier, ce qui peut expliquer le déplacement par à coup du viaduc lors des dernières phases. Dans ces conditions, le comportement des freins n'était pas adapté aux efforts engendrés. Cette hypothèse nécessiterait une étude plus approfondie en modélisant les effets dynamiques lors du poussage, afin de pouvoir être confirmée.

L'opération suivante a été la mise sur appuis définitifs. Cette opération a commencé par les piles fixes, puis en remontant vers C22. Par palier, les câbles étaient détendus afin de reporter les efforts sur les piles progressivement. En outre, les appareils d'appui étant glissants (sauf les piles fixes P9 à P12), et horizontaux, aucun effort ne devait être transmis à ces piles. Lors de cette opération, la position du tablier a été contrôlée fréquemment et aucun déplacement, autre que de dilatation, n'a été constaté sur l'ouvrage.

Cette dernière étape du poussage n'a donc eu aucune conséquence sur l'ouvrage en service, si ce n'est une modification des corbeaux des murs garde-grève de 3 cm.

■ LE RÉSULTAT ESTHÉTIQUE

L'étude architecturale du viaduc de Meaux poursuivait un double objectif :

- ◆ l'insertion dans le site d'un ouvrage d'une longueur de 1100 m environ, au tracé en courbe conti-

nue et surplombant le terrain naturel à une hauteur moyenne de 30 m ;

- ◆ la mise en valeur d'une structure innovante.

Cet ouvrage s'inscrit dans la vallée de la Marne, traversée par une voie ferrée importante, les canaux de Chalifert et de l'Ourcq, eux-mêmes bordés par des rideaux d'arbres. L'occupation humaine ne se manifeste que par quelques bâtiments d'activité.

Le site ne présentant aucun caractère urbain, l'étude architecturale a été orientée sur la recherche de la simplicité des formes et l'élégance de la silhouette de l'ouvrage.

Aussi, les options fondamentales suivantes ont-elles été adoptées :

- ◆ tablier unique, ce qui évitait les piles doubles requises par une solution à deux tabliers indépendants ;

- ◆ tablier de hauteur constante, donc des travées de longueurs moyennes, car aucun obstacle construit ne justifiait le recours à des travées de grande dimension.

Toutefois, le franchissement de la Marne imposait une travée d'environ 100 m. Afin de conserver la hauteur constante du tablier, cette travée comporte un sous-bandage, contribuant ainsi à marquer visuellement ce point particulier.

La section courante du tablier induit la réalisation de piles de géométrie identique. Celles-ci comportent de ce fait, un fût vertical s'évasant en tête pour recevoir les appareils d'appui, les variations de hauteur étant absorbées uniquement par le fût vertical.



► L'innovation essentielle du viaduc de Meaux porte sur la structure mixte du tablier d'une largeur de 31 m, comportant d'une part, des hourdis inférieur et supérieur en béton reliés par des âmes métalliques "plano-tubulaires" verticales, l'ensemble formant caisson, et d'autre part, des bracons métalliques tubulaires soulageant des encorbellements de grande dimension.

L'espacement des bracons est de 3,105 m : cette dimension constitue le module de base déterminant les longueurs de toutes les travées du viaduc et lui assurant ainsi une cohérence d'ensemble.

Cette structure est mise en valeur par une polychromie utilisant deux teintes contrastées : un vert clair pour les poutres "plano-tubulaires" sur lequel se détachent les bracons d'un bleu soutenu. Grâce à la courbure générale de l'ouvrage, ces bracons créent une surface virtuelle mettant en "vibration" ces deux couleurs et assurent la mise en valeur recherchée pour cette structure innovante.

LES PRINCIPAUX INTERVENANTS

Maitre d'ouvrage

Etat - Direction départementale de l'Équipement de Seine-et-Marne

Maitre d'œuvre

Direction départementale de l'Équipement de Seine-et-Marne, SAGI

Entreprises

- Razel (mandataire)
- Sotamec (sous-traitant métallique sous-bandage)
- Spie Précontrainte (sous-traitant précontrainte)

ABSTRACT

The Meaux viaduct. From sub-binding above the Marne to acceptance inspection

M. Placidi, E. Mercier, B. Mikaelian, J.-Y. Sablon

The Meaux viaduct, an innovative structure 1 200 metres long, crosses over the Marne south of Meaux, in the Seine-et-Marne region. The largest span above the Marne is reinforced by a prestressed structure called sub-binding. This article, after giving a brief reminder of the context, explains the design of this particular structure in terms of engineering and methods. Then, the paper details the placing of props and prestressing. The work being completed since the end of 2004, the last part reports on the finishing work and tests, before concluding with the main difficulties faced on this project. Finally, the architect makes an assessment of the aesthetic success of the structure.

RESUMEN ESPAÑOL

El viaducto de Meaux. Desde el "sous-bandage" por encima del río Marne hasta la recepción

M. Placidi, E. Mercier, B. Mikaelian y J.-Y. Sablon

El viaducto de Meaux, constituye una obra innovadora, de una longitud de 1 200 metros y que franquea el río Marne al sur de Meaux, en el departamento de Seine-et-Marne. El vano más importante por encima de río Marne se ha reforzado por una estructura pretensada que recibe la denominación de "sous-bandage". Este artículo, después de un resumen compendiado del contexto, explica el establecimiento de concepto de esta estructura particular en términos de estudios y de métodos. A continuación, se menciona con mayor detalle la implementación de los soportes y de la parte pretensada. Dado que las obras han terminado desde finales de 2004, la última parte informa acerca de los trabajos de acabado y de las pruebas, antes de concluir sobre las principales dificultades con que se ha tropezado en esta obra. Finalmente, el arquitecto levanta un balance del éxito estético de la obra.