

# Travaux

n° 813

- Remplacement de la suspension du pont d'Aquitaine

- Réparation du pont de Cognet

- Elargir sous trafic autoroutier des viaducs à poutres précontraintes

- Réhabilitation du quai de Rio Tinto (Espagne) et du pont de Floirac

- Deux restaurations d'ouvrages de montagne

- Eglise Saint-Joseph du Havre. Un exemple de restauration à l'identique

- Albi : rénovation du musée Toulouse-Lautrec

- Restructuration d'un immeuble parisien

- Versailles : travaux dans la Galerie des Glaces

## Réhabilitation d'ouvrages

# Sommaire

**Travaux**  
numéro 813

novembre 2004

## Réhabilitation d'ouvrages



Notre couverture

**Réhabilitation  
de la Galerie  
des Glaces à Versailles**

© Fr. Poche

### DIRECTEUR DE LA PUBLICATION

Roland Girardot

### RÉDACTION

Roland Girardot et André Colson  
3, rue de Berri - 75008 Paris  
Tél. : (33) 01 44 13 31 83  
thonierh@fnpt.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) : 170 € TTC  
Etranger (11 numéros) : 210 €  
Etudiants (11 numéros) : 60 €  
Prix du numéro : 20 € (+ 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

Daniel Tardy

1

## actualités

6

## matériels

15

## PRÉFACE

Claude Bois

17

◆ Le remplacement de la suspension du pont d'Aquitaine  
- *Replacing the Aquitaine bridge suspension system*

*Divers auteurs*

18

◆ La réparation du pont de Cognet après l'effondrement d'un tympan de l'ouvrage  
- *Repair of Cognet Bridge after the collapse of a structure spandrel*

*J.-L. Genevois, J.-P. Zurdo, M. Monier*

36

◆ Elargir sous trafic autoroutier des viaducs à poutres précontraintes : plus de 10 ans d'expériences  
- *Widening prestressed-beam viaducts under motorway traffic : more than ten years' experience*

*J. Morand, H. Rossignol, P. Trouillet*

43

◆ Conservation du patrimoine. Réhabilitation du quai de Rio Tinto (Espagne) et du pont de Floirac  
- *Preservation of the cultural heritage. Renovation of Rio Tinto Quay (Spain) and Floirac Bridge*

*T. Palomares, P. Ladret, C. Lopez, Ch. Schmitt, E. de Pablo*

52

◆ Deux restaurations d'ouvrages de montagne par l'utilisation de BSI®-Ceracem  
- *Two projects for restoration of civil engineering structures in mountainous areas through the use of BSI®-Ceracem*

*B. Monod, A. de Meyrignac, Fr. Aluni-Pierelli, A. Champenois, R.-G. Salé*

58

◆ L'église Saint-Joseph du Havre. Un exemple de restauration à l'identique  
- *Saint-Joseph du Havre church. An example of restoration to the original condition*

*A. Legros*

61



# Sommaire

novembre 2004

## Réhabilitation d'ouvrages

Dans les prochains numéros

- Ponts
- International
- Environnement
- Travaux souterrains
- Sols et fondations
- Terrassements
- Eau
- Recherche et innovation



◆ Rénovation du musée Toulouse-Lautrec d'Albi  
- *Renovation of Toulouse-Lautrec Museum in Albi*  
S. Monleau, Fr. Weyland, D. Mazzieri

64



◆ Restructuration d'un immeuble parisien  
- *Restructuring of a Paris building*  
P. Genes, Fr. Alexandre, M. Novarin, A. Simon

68



◆ Travaux dans la galerie des Glaces. Versailles :  
1678 - 1684 / 2004 - 2007  
- *Work in the Hall of Mirrors. Versailles : 1678 - 1684 / 2004 - 2007*  
P. Palem

71

répertoire  
des fournisseurs

79

### ABONNEMENT TRAVAUX

Encart après p. 48

### INDEX DES ANNONCEURS

ARTEM.....	11	ICE .....	42
ATC BTP.....	8	PRO BTP .....	3È DE COUVERTURE
CAN .....	10	RINCENT BTP SERVICES.....	2
CNETP .....	12	SADE .....	4
COLBOND GEOSYNTHETICS.....	34	SECO RAIL RTS.....	9
DEMATHIEU & BARD .....	65	SEVA FIBRAFLEX / SAINT-GOBAIN.....	6
ENTE FIERA DI VERONA .....	7	SOLETANCHE BACHY .....	4
GTM BÂTIMENT.....	2È DE COUVERTURE	STRRES .....	42
HUNNEBECK FRANCE.....	15	VINCI .....	4È DE COUVERTURE

Comme toute œuvre humaine, les ouvrages d'art vieillissent et se dégradent avec le temps ; ils peuvent aussi comporter des défauts d'origine qui font que dès leur mise en service ou peu d'années après, ils deviennent inaptes à remplir la fonction pour laquelle on les a construits.

Ce sont les éléments les plus coûteux des infrastructures dont ils font partie (réseaux routiers ou ferrés, voies d'eau, etc.) ; ils en sont des points singuliers dont la défaillance peut occasionner une gêne considérable, voire des accidents très graves. Il importe donc de leur assurer une durée de vie assez longue pour éviter une cadence de renouvellement incompatible avec la capacité d'investissement de la collectivité publique.

Notons que cette préoccupation n'est pas nouvelle, comme en témoigne cet extrait d'une circulaire adressée le 12 octobre 1883 par le ministre des Travaux Publics aux préfets :

"Vous penserez comme moi, Monsieur le Préfet, que s'il est bon de créer des ouvrages nouveaux, il n'est pas moins indispensable de conserver et de maintenir ceux qui existent. Nous avons peut-être sur ce point des habitudes à former, et je compte sur votre concours."

Avec ou sans ce concours, les habitudes se sont formées depuis.

La tendance actuelle est de viser une durée de vie de 100 à 150 ans pour les ouvrages neufs ; l'expérience montre que les maîtres d'ouvrage cherchent souvent à conserver leur patrimoine bien au-delà de ce délai.

Cela nécessite de temps à autre des opérations de remise en état qui dépassent largement le domaine de l'entretien : c'est tout le domaine de la réparation.

Des réparations d'importance modérée exécutées en temps utile peuvent avoir un effet bénéfique majeur sur l'augmentation de la durée de vie. Encore faut-il les prévoir à bon escient et les préparer, puis les exécuter, soigneusement.

Elles ne suffisent pas toujours. Les conséquences du vieillissement ou les insuffisances d'origine peuvent affecter gravement la fiabilité des structures porteuses et nécessiter des interventions lourdes.

Majeure ou mineure, la réparation est destinée à remédier à des défauts et à des dégradations spécifiques. Elle est indissociable d'un diagnostic préalable obtenu à partir d'investigations parfois poussées, dont l'objectif est de déterminer ce qui se passe réellement et non ce qui devrait se passer selon des calculs dont les hypothèses sont forcément réductrices.

La démarche encore utilisée aujourd'hui pour conduire une réparation inclut la constatation des défauts, le diagnostic, l'étude spécifique de réparation et l'exécution des travaux, en gardant tout au long de son déroulement la préoccupation de la sécurité. Elle a été initiée dans les années 1970 par l'ingénieur général Edouard Beltrémieux (cf. *Travaux*, n° 780, novembre 2001) et a conservé toute sa valeur.

Ajoutons que, dès lors que les travaux de réparation portent sur le fonctionnement de la structure, il est utile de vérifier, par l'emploi de techniques

analogues à celles utilisées pour les investigations préalables, qu'on atteint effectivement l'objectif visé.

Une caractéristique de la réparation est qu'elle concerne des ouvrages existants. Cela implique deux différences importantes avec la construction des ouvrages neufs. La première réside dans le caractère spécifique du problème posé et, dans une certaine mesure, des solutions. Chaque ouvrage en situation pathologique est un cas particulier : la dégradation résulte certes de processus communs, par exemple la corrosion, mais aussi de la situation particulière de l'ouvrage, de ses insuffisances éventuelles, de son exposition aux agressions, etc. L'analyse des désordres et le diagnostic tiennent le plus grand compte de ces particularités, ainsi que des propriétés réelles des matériaux constitutifs et de la structure, telles qu'on peut les mesurer in situ. Le projet de réparation est adapté aux besoins spécifiques mis en évidence par le diagnostic. De nombreuses techniques de réparation

ont un domaine d'application assez général, mais il faut dans tous les cas en adapter le détail à l'ouvrage à réparer. Les techniques utilisées sont en général spécifiques et différent de celles qu'on applique sur les chantiers de construction. Notons toutefois que la montée en puissance de l'activité de réparation depuis une trentaine d'années a conduit au développement de techniques particulières dont certaines ont été utilisées par la suite dans la construction des ouvrages neufs ; l'exemple le plus connu est celui de la précontrainte extérieure au béton, mais on peut en trouver d'autres.

La deuxième différence réside dans le fait qu'il s'agit d'ouvrages en service. Les exigences légitimes des usagers conduisent à accorder une grande attention à la gestion du trafic pendant les travaux. La sécurité est en outre une préoccupation permanente des acteurs de la réparation ; elle concerne bien entendu la sécurité des usagers, mais aussi celle du personnel appelé à travailler sur l'ouvrage et bien souvent à coexister avec le trafic.

Le premier aspect peut poser des problèmes redoutables dans le cas où l'ouvrage à réparer est affaibli par la dégradation et où sa fermeture au trafic présente des difficultés majeures ; il est cependant indispensable de prévoir et de prendre les mesures appropriées pour prévenir les conséquences d'une défaillance éventuelle, dont les scénarios prévisibles font l'objet d'une analyse préalable.

Le deuxième aspect impose une organisation du chantier radicalement différente de celle que permettrait l'interruption totale du trafic, et plus encore de celle de la construction d'un ouvrage en site vierge.

Les métiers de la réparation des ouvrages sont en définitive très différents de ceux de la construction, tant au stade de la réflexion préalable et de la conception qu'à celui de la réalisation. Même s'ils ne donnent pas lieu à des opérations aussi spectaculaires, ils n'en sont pas moins encore plus passionnants. Tel est en tout cas le sentiment de ceux qui ont eu à les exercer.



## ■ CLAUDE BOIS

Ingénieur général  
des Ponts-et-Chaussées

Mission d'inspection  
spécialisée  
des ouvrages d'art

# Remplacement de la d'Aquitaine

La dégradation par corrosion des câbles porteurs du pont suspendu d'Aquitaine a atteint en 1998 un stade tel qu'il a été décidé de remplacer la suspension ; l'opération a été mise à profit pour élargir le tablier à 2x3 voies. Les études ont été menées en 1999 et les travaux exécutés de 2000 à 2002. L'article donne des indications sur le processus qui a conduit aux décisions les plus importantes et précise les conditions de gestion de la sécurité depuis la mise en évidence de l'état de dégradation jusqu'au transfert des charges sur la suspension neuve ; il décrit l'important travail d'études qu'il a été nécessaire d'effectuer pour préparer l'opération ; la réalisation des travaux fera l'objet d'une publication ultérieure.

## Le processus de décision et la gestion de la sécurité

### ■ L'OUVRAGE ET SA DÉGRADATION

#### Présentation générale

Deuxième pont suspendu de France, par ses dimensions, après le pont de Tancarville, le pont d'Aquitaine a été achevé en 1967, quelques années après son frère aîné (photo 1). Il présente une importance essentielle pour le fonctionnement économique de Bordeaux et de son agglomération, qui ne comporte que quatre ouvrages routiers de franchissement de la Garonne. Il supporte quotidien-

nement le passage de près de 100 000 véhicules, dont une proportion notable de poids lourds.

Il s'agit d'un pont à trois travées suspendues (143, 394 et 143 m) (photos 2 et 3). Chacun des deux câbles porteurs est constitué de 37 torons (parfois appelés câbles élémentaires) réunis en un faisceau hexagonal. Chaque toron comporte 127 fils ronds de 4,1 mm de diamètre (un fil d'âme et six couches à pas de toronnage alterné) et deux couches de fils dont la section transversale est en forme de Z, comprenant respectivement 42 et 48 fils pour une partie des torons, 43 et 49 pour le reste (la fabrication vient de deux usines). Ces couches sont destinées à fermer la surface extérieure des torons ("câbles clos"), dans le but de rendre plus difficile la pénétration de l'eau. L'expérience a montré par la suite que cette protection est illusoire.

Conformément au "dogme" en vigueur en France à l'époque de la construction, les fils n'ont pas été galvanisés ; ils ont fait l'objet d'une protection individuelle et d'ensemble par des produits traditionnels, dont la durée de vie n'est pas à l'échelle de celle attendue de l'ouvrage.

La résistance à la rupture des torons individuels, mesurée lors de la construction, était comprise entre 4 500 et 4 800 kN (pour 4 450 demandés par le marché), ce qui donne pour chaque câble une résistance initiale effective supérieure à 166 500 kN, en faisant l'hypothèse d'une répartition homogène des sollicitations entre les torons.

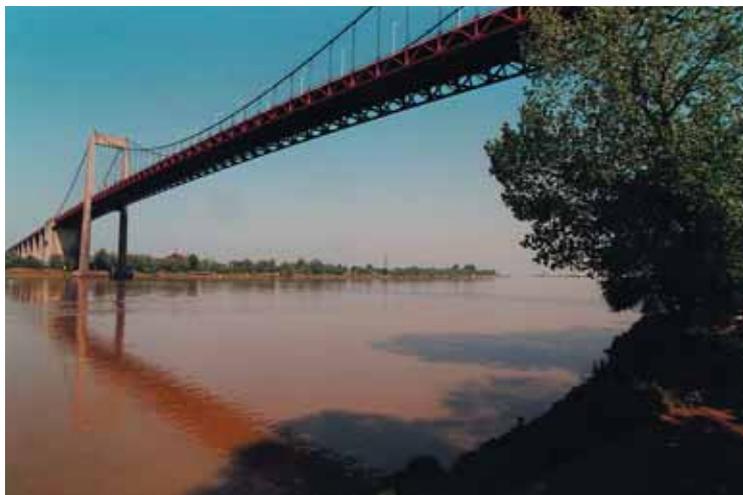
La tension maximale de chaque câble, sous charges permanentes et charges d'exploitation les plus défavorables, est de l'ordre de 55 000 kN vers le point bas de la parabole et 60 200 kN au voisinage des pylônes. La part des charges d'exploitation dans ces valeurs est d'un peu moins de 24 %.

#### Évolution

De 1967, date de sa mise en service, à 1977, l'ouvrage a fait l'objet de visites annuelles confiées à l'entreprise Baudin-Châteauneuf, qui l'avait construit ; cette entreprise était l'une des deux seules en France à disposer d'équipes spécialisées dans ce travail, connaissant bien les ponts suspendus.

En 1979, l'ouvrage a subi une inspection détaillée par l'équipe spécialisée du Laboratoire régional des

Photo 1  
Vue générale  
de l'ouvrage  
General view  
of the structure



© Setra/CTOA - Gérard Forquet

Photo 2  
Suspension  
de la travée centrale  
Centre span  
suspension



© Setra/CTOA - Gérard Forquet

# suspension du pont

Claude Bois



INGÉNIEUR GÉNÉRAL  
DES PONTS  
ET CHAUSSÉES  
Mission d'inspection spécialisée  
des ouvrages d'art

Philippe Léger



INGÉNIEUR GÉNÉRAL  
DES PONTS  
ET CHAUSSÉES  
HONORAIRE \*  
\* A l'époque attaché  
à la Direction des Routes

Ponts et Chaussées ; cette inspection a été complétée par l'auscultation électromagnétique des câbles dans les zones épanouies des chambres d'ancrage. En 1983, le laboratoire a procédé à une nouvelle inspection détaillée de la suspension.

Les conclusions de ces examens ne comportaient aucune source d'inquiétude : en 1979, seules 14 ruptures de fils étaient visibles de l'extérieur ; en 1983, on notait 39 ruptures sur la ferme amont et 29 sur la ferme aval.

La réfection de la protection extérieure des câbles a été effectuée en deux phases : ferme amont en 1984 et ferme aval en 1986 ; elle a été suivie d'un réglage de la tension des suspentes en 1986.

L'inspection détaillée suivante a été effectuée en 1993. Ses conclusions n'avaient toujours rien d'alarmant : la peinture était en bon état sur l'ensemble des faisceaux, des suspentes et des ancrages. On a recherché lors de cette inspection les indices de nouvelles ruptures de fils ; ils se situaient, sauf exception, au voisinage des colliers d'attache des suspentes, ce qui était le signe de ruptures probables sous les colliers. On en a relevé 178, inégalement réparties :

- ◆ 82 sur la demi-ferme amont rive droite, près de sept colliers ;
- ◆ 67 sur la demi-ferme amont rive gauche, près de six colliers ;
- ◆ 23 sur la demi-ferme aval rive droite, près de six colliers ;
- ◆ 6 sur la demi-ferme aval rive gauche, près de deux colliers.

En évolution significative depuis 1983, le nombre de ruptures décelées restait cependant très acceptable, par comparaison avec les évolutions constatées dans d'autres ouvrages.

Quelques ouvertures de colliers effectuées à l'occasion de travaux antérieurs avaient confirmé le caractère non alarmant de ces constatations.

Les conclusions tirées de ces examens conduisaient à poursuivre activement la surveillance de l'ouvrage. A la suite de la rupture, en 1995, d'un toron d'un câble du pont de Tancarville<sup>1</sup>, il a été décidé de renforcer la surveillance du pont d'Aquitaine en installant un dispositif de surveillance acoustique ; le matériel disponible ne permettant d'équiper que le quart de la suspension, le choix s'est porté sur la demi-ferme amont rive droite, dont la surveillance visuelle avait montré qu'elle était la plus dégradée.

Entre 1995 et 1998, la surveillance visuelle (pho-

to 4) a montré une évolution significative, confirmée par la surveillance acoustique. L'inspection détaillée de 1998 a notamment montré une évolution depuis celle de 1993 :

- ◆ 50 ruptures nouvelles sur la demi-ferme amont rive droite (dont 35 pour le seul collier n° 8) ;
- ◆ 44 ruptures nouvelles sur la demi-ferme amont rive gauche ;
- ◆ 1 rupture nouvelle sur la demi-ferme aval rive droite ;
- ◆ 23 ruptures nouvelles sur la demi-ferme aval rive gauche.

C'est surtout la concentration des ruptures au voisinage d'un nombre restreint de colliers qui était significative.



Photo 3  
Suspension  
d'une travée de rive  
*End span  
suspension*



Photo 4  
Ruptures constatées  
par la surveillance  
visuelle (collier 70)  
*Failures detected  
by visual monitoring  
(clamp 70)*

## Les constatations de 1998

Le programme de surveillance de 1998 prévoyait de compléter le diagnostic par l'ouverture de quelques colliers pour examen visuel direct. C'est ainsi qu'au cours de l'été 1998, les câbles ont été examinés sous cinq colliers, dont quatre ont été choisis parmi ceux pour lesquels l'évolution de 1993 à 1998

1. Dont la suspension a été remplacée par la suite.

**Photo 5**  
Ruptures constatées sous collier.  
Coexistence de zones corrodées et de zones intactes (collier 70)

*Failures detected under a clamp.  
Coexistence of corroded areas and intact areas (clamp 70)*



© CETE SO

**Photo 6**  
Constatations après démontage du collier 8 : état des torons 9 et 10

*Observations after dismantling clamp 8 : condition of strands 9 and 10*



© CETE SO

**Photo 7**  
Constatations après démontage du collier 8 : corrosion et ruptures dans la 4<sup>e</sup> couche

*Observations after dismantling clamp 8 : corrosion and failures in the fourth layer*



© CETE SO



avait été la plus sensible; le cinquième n'avait manifesté aucune évolution apparente depuis 1993, mais était celui qui présentait à cette époque le plus grand nombre de ruptures apparentes. A l'exception du collier n° 8 (appartenant à la demi-ferme amont rive gauche) où le processus de rupture était très avancé, les conclusions de la surveillance visuelle antérieure ont été confirmées et il a été possible de localiser les ruptures (photo 5). Celles-ci se sont produites préférentiellement dans les zones de contact entre un toron extérieur du faisceau et un toron de la couche sous-jacente, et non dans la zone de contact entre torons extérieurs voisins.

Sous le collier n° 8, deux torons ont été trouvés dans un état de dégradation très avancé (photo 6). Sur le toron n° 10 (toron d'angle inférieur du faisceau), on a pu noter 35 ruptures sur la couche extérieure (fils Z), 25 sur la deuxième (fils Z), 10 sur la troisième (fils ronds) et une visible sur la quatrième (photo 7). Sur le toron n° 9 (toron périphérique au-dessus du précédent), c'est un nombre de ruptures sur la couche extérieure supérieur au nombre de fils (51 ruptures pour 48 fils : certains fils sont cassés en plusieurs points) qui a pu être constaté; la deuxième couche de fils Z et au moins une couche de fils ronds sont atteintes.

Les ruptures des fils d'une couche s'alignent avec le pas de câblage des fils de la couche sous-jacente, ce qui conduit à mettre en cause le rôle des frottements interfilaire dans le processus de rupture. Certaines ruptures semblaient récentes (faciès non oxydé), ce qui conduit à penser que l'opération d'ouverture du collier a pu "traumatiser" certains fils en provoquant la transformation de fissures amorcées en ruptures franches.

Les fils prélevés au voisinage de la zone la plus endommagée présentaient des amorces de fissures analogues à celles que provoque la corrosion fissurante sous tension ou la corrosion par friction, amorces non encore transformées en ruptures. Enfin, l'examen des câbles a montré que les zones de rupture atteignaient assez vite la troisième couche (couche extérieure de fils ronds) alors qu'en l'absence de couches de fils Z, on a observé jusqu'à maintenant qu'elles n'atteignent les couches intérieures que bien après les couches périphériques.

## ■ LA PRISE DE DÉCISION

### Mise en place d'un comité technique

Dès la constatation des désordres, le maître d'ouvrage a pris la décision de placer l'ouvrage sous haute surveillance.

Sur proposition de l'IGOA, le directeur des routes a institué un comité technique chargé d'approfondir le diagnostic, de proposer les mesures à prendre et de suivre les études à entreprendre, puis les travaux à exécuter pour assurer la remise en état de l'ouvrage. Outre les acteurs ayant à intervenir directement dans la gestion et la réparation de l'ouvrage, ce comité comprend les experts qui avaient eu, peu d'années auparavant, à se pencher sur la réparation du pont de Tancarville; la présidence en a été confiée à l'ingénieur général Philippe Léger (cf. encadré).

Dès le début de ses travaux, le comité technique a eu à se prononcer sur deux plans : le sort à donner à l'ouvrage et son exploitation en sécurité avant remise en état, c'est-à-dire la gestion de la sécurité.

## Le sort à donner à l'ouvrage

Bien que les éléments manquent à ce stade pour apprécier la sécurité résiduelle de la suspension, il est apparu très vite que l'état de corrosion constaté en 1998 n'était qu'une étape d'un processus qui, si rien n'était fait, conduisait inéluctablement à la ruine de l'ouvrage. Une réparation partielle ne pouvait être envisagée, pas plus qu'une opération de nature à arrêter net en l'état le processus de corrosion pour assurer la pérennité de la résistance résiduelle des câbles.

La seule remise en état envisageable pour assurer la conservation de l'ouvrage à long terme était le remplacement complet de la suspension. La vitesse d'évolution des dégradations conduisait à penser qu'il était nécessaire de procéder à ce remplacement immédiatement, compte tenu notamment du temps nécessaire pour mener à bien cette opération. C'est ce qu'a proposé le comité technique et ce qu'a décidé la direction des Routes.

Une opération de même nature venait d'être achevée au pont de Tancarville. Le procédé qui vient naturellement à l'esprit consiste à mettre en place une suspension neuve et à lui transférer ensuite les charges du tablier. Il a paru judicieux de profiter d'une telle opération pour déporter la suspension neuve par rapport à l'ancienne pour rendre possible l'affectation au trafic de la pleine largeur disponible entre les montants des pylônes (20 m) pour permettre l'exploitation du tablier à 2 x 3 voies, afin de faciliter l'écoulement des quelque 100 000 véhicules qui passent chaque jour. D'autres solutions ont été envisagées, qui ne permettaient pas l'élargissement du tablier. Ce critère a été pris en compte, même s'il n'a pas été le seul, dans le choix de la solution.

## Montage de l'opération

Le déroulement des études, ainsi que le tour des différentes solutions envisagées, sont développés plus loin. Signalons seulement qu'elles ont fait l'objet d'un marché confié après appel d'offres au groupement des sociétés SETEC TPI et COWI A/S. L'étude préliminaire a été engagée en juin 1999, remise à la fin de juillet et approuvée par la direction des Routes le 6 août. Notons que la solution retenue incluait la mise en œuvre d'une suspension auxiliaire destinée à la fois à soulager la suspension existante et à reprendre le surcroît de charges résultant de l'élargissement du tablier.

L'étude de projet sur la solution retenue a été engagée aussitôt, achevée au début d'octobre et approuvée en octobre. La consultation d'entreprises a été lancée au début de novembre, avec remise des offres en janvier 2000. Les critères de choix des offres prévus dans le règlement de la consultation donnaient un poids fort aux délais partiels relatifs, d'une part à la mise en charge de la sus-

## COMPOSITION DU COMITÉ TECHNIQUE

### *Président*

Philippe Léger, IGPC

### *Vice-président*

Le directeur départemental délégué de l'Équipement de la Gironde (J.-P. Ourliac, puis F. Dupin)

### *Autres membres*

- L'inspecteur général chargé des ouvrages d'art (IGOA) (C. Bois)
- Setra (E. Bouchon, D. Lecointre)
- LCPC (T. Kretz)
- DDE de la Gironde :
  - Service des Grands Travaux (G. Philippon)
  - Service de la Gestion de la Route (J. Oyarzabal)
  - Subdivision pont d'Aquitaine (L. Llop)
- CETE du Sud-Ouest :
  - Division des Ouvrages d'art (P. Paillusseau)
  - Laboratoire de Bordeaux (R. Lafuente)
- Experts (personnes ayant eu à suivre le remplacement de la suspension du pont de Tancarville) : B. Bouvy, J.-C. Foucriat, J. Piccardi

### *Remarques*

1. Il s'agit de la composition initiale du comité technique ; certains membres ont été remplacés à l'occasion de changements d'affectation.
2. Les représentants des organismes spécialisés sont les responsables de l'action de ces organismes pour le comité technique, à charge par eux d'associer aux travaux les collaborateurs utiles.
3. Certains experts dont la compétence est indiscutable n'ont pu être associés au comité technique, dans la mesure où ils avaient normalement vocation à collaborer avec les bureaux d'études extérieurs ou les entreprises appelés à faire des offres, tant pour les études que pour les travaux.

pension auxiliaire, d'autre part au transfert définitif des charges sur la suspension neuve.

Les travaux, engagés en mai 2000, se sont achevés en 2003, le transfert des charges sur la nouvelle suspension ayant été effectué à la fin de 2002. Tous ces délais sont très courts. La volonté d'aller vite, sans pour autant qu'il en résulte une qualité dégradée, s'explique par les préoccupations développées ci-dessous.

## ■ LA GESTION DE LA SÉCURITÉ

Le comité technique a eu à se pencher sur tous les aspects du dispositif de haute surveillance, incluant l'appréciation de la sécurité résiduelle effective et de son évolution, la recherche de signes annonciateurs d'une évolution dangereuse, ainsi que la définition des mesures de sécurité à prendre en fonction des résultats de la surveillance.

**Photo 8**  
Surveillance visuelle :  
examen de la partie  
supérieure du câble

*Visual monitoring :  
examination  
of the upper part  
of the cable*



© CETE SO

**Photo 9**  
Surveillance visuelle :  
utilisation  
d'un rétroviseur  
pour la partie inférieure

*Visual monitoring :  
use of a rearview mirror  
for the lower part*



© CETE SO

► La défaillance contre laquelle on devait se prémunir était une évolution excessive du processus de rupture des fils élémentaires, pouvant entraîner celle d'un toron, voire d'un câble.

## Techniques de surveillance

Les seules techniques actuellement disponibles pour apprécier l'évolution de l'état de la suspension sont l'examen visuel (photos 8 et 9) et la surveillance acoustique (photo 10), éventuellement complétées par l'examen de prélèvements en laboratoire.

Ces techniques ont leurs limites :

- ◆ la recherche visuelle des ruptures de fils ne donne accès, dans le meilleur des cas, qu'aux 864 fils des couches périphériques des torons extérieurs du faisceau, soit un peu plus de 10 % du nombre total de fils. Même si on admet que les ruptures se localisent préférentiellement sur les 122 fils des trois couches périphériques de chacun des 18 torons extérieurs, cela concerne plus de deux fois le nombre de fils accessibles à l'examen visuel ; cet examen ne peut donc en aucun cas donner une image exacte de l'endommagement global du câble. Cette recherche visuelle est particulièrement longue et ne peut être effectuée en continu, mais seulement à intervalles relativement longs ;
- ◆ en l'absence de difficultés d'interprétation, la surveillance acoustique devrait permettre de comptabiliser chaque rupture et d'en estimer l'abscisse, mais elle ne permet pas de situer le fil rompu

dans la section transversale ; de plus, elle ne permet évidemment pas de prendre en compte les ruptures survenues avant son installation ;

◆ enfin, l'endommagement par corrosion des fils non encore rompus ne peut être déterminé que par des examens en laboratoire sur prélèvements, ce qui interdit évidemment la détermination de l'état de l'ensemble des fils.

Malgré ces difficultés, le comité technique a organisé le suivi autour de l'examen visuel et de la surveillance acoustique, seules disponibles en l'état actuel :

- ◆ l'examen visuel était effectué tous les mois par une équipe du laboratoire régional de Bordeaux ;
- ◆ la surveillance acoustique a été étendue en 1999 à l'ensemble de la suspension et le bilan des résultats obtenus a été effectué tous les mois par le laboratoire régional ;
- ◆ les résultats de ces deux modes de surveillance étaient examinés chaque mois par le comité technique.

Il subsiste toutefois des difficultés d'interprétation. D'une part, les caractéristiques de certains signaux acoustiques sont telles qu'on n'a pas la certitude qu'ils représentent des ruptures effectives ni qu'ils n'en représentent pas ; l'interprétation a été effectuée en fourchette, en fonction d'hypothèses différentes sur la signification de ces signaux. Cette difficulté s'est amplifiée à partir de l'ouverture du chantier, certaines manipulations provoquant des chocs sans importance sur l'état des câbles, mais générateurs d'ondes interprétées comme celles qui résultent de la rupture de fils par la technique dont nous disposons actuellement. D'autre part, au bout d'un délai de plus d'un an, on n'est pas arrivé à établir de corrélation fine entre les ruptures constatées à l'examen visuel et celles entendues par la surveillance acoustique. Une des causes, mais ce n'est pas la seule, réside dans le fait que la rupture d'un fil sous collier ne provoque pas instantanément le décollement de la peinture à la sortie du collier. La constatation de ces ruptures est très probablement différée, on ne sait pas de quel délai.

On a cependant noté une bonne corrélation globale entre les deux modes de constatation sur le nombre de ruptures dans une période de l'ordre du mois.

## Approche théorique de la sécurité de l'ouvrage

La question posée tout d'abord était celle de l'évaluation de la sécurité résiduelle.

La réponse à cette question passe par une connaissance fine de l'état réel des câbles, mais cela ne suffit pas : la force de rupture d'un ensemble de fils plus ou moins liés est inférieure à la somme de la résistance résiduelle des fils élémentaires. Pour l'évaluer, il faudrait connaître le détail de la

répartition des résistances résiduelles des fils et des interactions entre fils dans un toron et entre torons dans un câble ; ce n'est pas le cas ; il faudrait en outre disposer d'un modèle permettant de prendre en compte ces interactions ; ce n'est pas non plus le cas. Les quelques modèles qui existent ont été développés pour l'étude des matériaux composites, et il faut les adapter aux câbles. Le comité technique a suggéré qu'une action de recherche soit lancée sur ce thème : l'Université de Bordeaux, intéressée, a mis ce sujet à l'étude ; les résultats ne seront disponibles qu'après l'achèvement des travaux et n'ont pas pu être utilisés pour le pont d'Aquitaine.

Bien entendu, la question ne se limite pas à l'évaluation de la sécurité résiduelle en 1999, mais inclut la prise en compte permanente de l'évolution de l'état des câbles jusqu'à l'achèvement des travaux, ce qui est encore plus compliqué.

Signalons qu'un groupe de travail de l'AFGC a été chargé de faire le point des connaissances sur l'évaluation probabiliste de la sécurité des constructions existantes ; les difficultés rencontrées dans une telle analyse appliquée au pont d'Aquitaine sont présentées dans le rapport de ce groupe, publié en mars 2003.

En définitive, il n'existe, en l'état actuel des techniques, aucun moyen de décrire l'endommagement des câbles avec quelque précision.

### Approche empirique de la sécurité

Le risque contre lequel on devait se prémunir était celui de la rupture d'un câble et des conséquences de l'effondrement du pont suspendu qui pouvait en résulter.

Faute des outils évoqués plus haut, on s'est tourné pour assurer la sécurité vers l'approche phénoménologique d'une défaillance majeure : la rupture d'un câble commence par celle du toron le plus faible. Le scénario de rupture d'un toron sous chargement croissant a été étudié par des essais de laboratoire ; il présente une première phase lente pendant laquelle les fils se rompent un à un isolément, avec croissance de la charge ; passé un certain stade, les ruptures s'accroissent jusqu'à se succéder à un rythme très rapproché, et la rupture s'achève par une phase explosive au cours de laquelle tous les fils restants se rompent avec diminution de la charge. Le mécanisme est analogue dans le cas où un toron est soumis à une charge sensiblement constante, la corrosion provoquant un endommagement des fils les uns après les autres ; on commence par une phase lente de ruptures individuelles, puis il se produit une accélération sensible précédant une phase finale brutale. Ce scénario a été observé sur le pont de Dormans en 1981 et l'exploitation des mesures faites sur le pont de Tancarville peu avant la rupture d'un toron en 1995 ne contredit pas cette approche.



**Photo 10**  
Surveillance acoustique :  
implantation de capteurs  
sur un collier

*Acoustic monitoring :  
installation of sensors  
on a clamp*

© Setra/CTOA - Gérard Forquet

C'est la détection de ce scénario, aboutissant à la rupture d'un premier toron, qui a été retenue comme critère de haute surveillance, étant précisé que cette rupture éventuelle n'entraîne pas encore celle de l'ensemble du câble.

L'estimation de l'évolution de l'endommagement utilise l'examen visuel et la surveillance acoustique. Le comité technique a fixé à dix ruptures par mois au voisinage d'un même collier ou 150 ruptures en un mois sur l'ensemble de l'ouvrage, les seuils à partir desquels il devra procéder à un examen approfondi de la situation, pouvant déboucher sur la mise en application de mesures de sauvegarde. Il faut noter que ces seuils restent nettement en deçà d'une évolution explosive pouvant déboucher à terme sur la rupture d'un câble. La procédure prévoyait la réunion d'urgence du comité technique si ces seuils étaient atteints ; elle prévoyait aussi la possibilité pour le maître d'ouvrage de déclencher la mise en œuvre immédiate des mesures de sécurité dans le cas où le rythme des ruptures de fils laisserait présager une défaillance majeure.

### Les mesures de sécurité

Trois types de mesures de sécurité ont été étudiés : les restrictions partielles de circulation, la fermeture complète de l'ouvrage, le soulagement de la suspension.

#### *Restrictions partielles de circulation*

L'incidence du trafic lourd sur les risques d'accélération de la dégradation a été étudiée en détail par la Division des ouvrages du CETE et le LCPC, notamment vis-à-vis du risque de fatigue. L'étude n'a pas été menée à partir du trafic réel, mais à partir de la mesure des caractéristiques réelles du trafic lourd associée à celle des variations de tension des câbles, sous la forme de plusieurs campagnes d'une semaine de mesures en continu,

▶ réparties à différentes parties de l'année choisies pour être représentatives du trafic annuel réel.

Les conclusions ont été doubles :

- ◆ les variations de sollicitations induites par le passage des poids lourds sont trop faibles pour que le risque de fatigue puisse être pris en considération ;

- ◆ la part due aux poids lourds dans les sollicitations maximales appliquées aux câbles, même en appliquant des trafics "compactés" reconstitués à partir des trafics réels, est trop faible pour que sa suppression donne une marge de sécurité supplémentaire appréciable vis-à-vis d'un risque de défaillance, ou même vis-à-vis de la progression de la dégradation.

Une interdiction de l'ouvrage aux seuls poids lourds serait donc inopérante :

- ◆ soit à titre préventif pour éviter une accélération de la dégradation ;

- ◆ soit à titre curatif pour soulager la suspension si une rupture était à craindre.

Cette mesure n'a pas été retenue.

### *Fermeture de l'ouvrage*

C'est la mesure la plus radicale, et la seule à appliquer si on craint de s'acheminer vers un effondrement ; c'est dans cette optique qu'elle a été étudiée. Dans ce cas, les mesures à prendre ne se limitent pas au renvoi sur les autres franchissements des quelque 100 000 véhicules qui em-

pruntent l'ouvrage chaque jour (photo 11) ; elles doivent inclure en outre la mise en sécurité de tout le périmètre de la zone d'effondrement, ce qui implique :

- ◆ la fermeture de la Garonne à la navigation (l'ouvrage franchit le fleuve en aval d'une partie de la zone portuaire) ;

- ◆ l'évacuation d'une centaine de logements situés en rive droite à proximité de l'ouvrage ;

- ◆ la protection ou la fermeture de la ligne de chemin de fer de Bordeaux à Paris, qui franchit la butte de Lormont par un tunnel situé en avant du massif d'ancrage rive droite, dont les abords sont suffisamment proches de l'ouvrage pour qu'on doive envisager l'éventualité de projection d'éléments en cas d'effondrement.

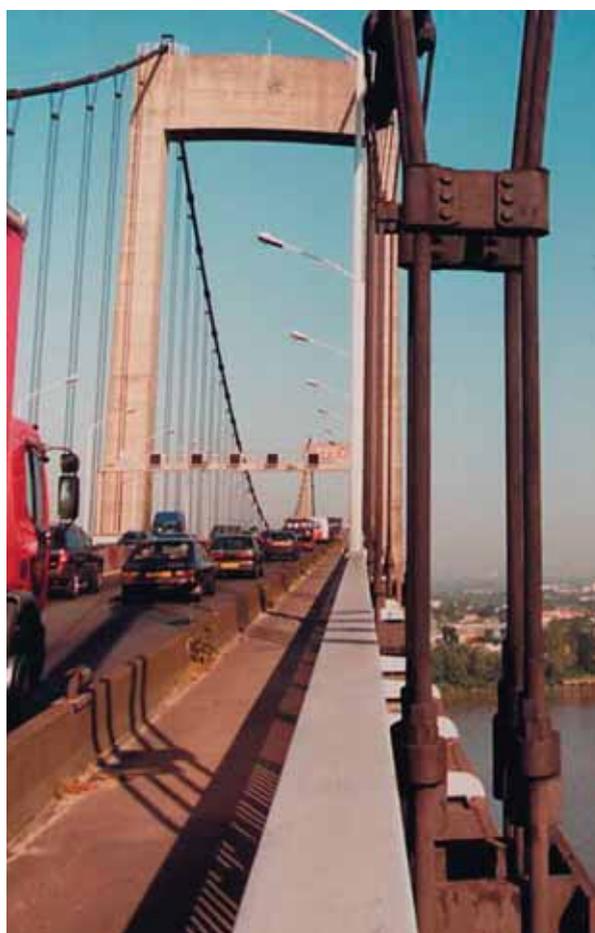
La mise en application de cette mesure a été étudiée en détail et a donné lieu à l'établissement de consignes détaillées auprès des divers services concernés. Sa mise en application demande un délai de l'ordre d'une semaine. Il est important que les seuils fixés pour la surveillance laissent au moins ce délai ; il en a été tenu compte.

### *Soulagement de la suspension*

Envisagée à l'origine pour accompagner une des solutions de réparation, la mise de l'ouvrage sur appuis provisoires a été étudiée aussi comme solution de mise en sécurité en cas de défaillance de la suspension. Cette mesure s'est avérée irréaliste, tant en termes de coût qu'en termes de délais de mise en œuvre et d'efficacité, sans parler des difficultés qui en auraient résulté pour la navigation. Elle n'a pas été retenue.

Une autre solution, plus réaliste, consiste à renforcer la suspension par la mise en place de torons supplémentaires ; elle a été imaginée à l'origine pour éviter d'augmenter les sollicitations appliquées aux câbles pendant les travaux, qui impliquent une augmentation de la charge permanente de l'ordre de 10 %, compte tenu de l'élargissement du tablier ; l'opération consiste à placer au-dessus de chaque câble existant quatre torons de mêmes caractéristiques que ceux en place ; leur mise en tension soulage de 10 % la sollicitation des câbles en place. Cette solution a été retenue et la suspension auxiliaire a été mise en tension en décembre 2000. Les dispositifs de fixation aux colliers existants et d'ancrage dans les massifs ont été réalisés de telle sorte qu'on puisse, dans un délai assez court, mettre en place sur chaque câble quatre torons supplémentaires, dont la mise en tension soulagera encore de 10 % les câbles existants ; on comptait ainsi être en mesure, au cas où le besoin s'en serait fait sentir, de ralentir la progression des ruptures si le rythme en devenait inquiétant. Mais le délai de fabrication de ces torons supplémentaires atteint plusieurs mois, ce qui n'est pas compatible avec la notion de mesure d'urgence ; de ce fait, le comité technique a été amené à recom-

Photo 11  
Trafic sur l'ouvrage  
Traffic  
over the structure



© Setra/CTOA - Gérard Forquet

mander que ces câbles soient mis en fabrication dès le début des travaux ; le maître d'ouvrage a complété cette approche "sécuritaire" et a commandé la mise en œuvre préventive du doublement de la suspension auxiliaire.

## Résultats obtenus

Le bilan de la surveillance dressé en mai 2001 montre une évolution lente et assez régulière des ruptures, avec quelques variations saisonnières, mais sans accélération perceptible sur une période d'observation de deux ans. Les résultats obtenus restent loin en dessous des seuils d'alerte fixés par le comité technique.

On peut estimer que, bien que l'approche utilisée soit très empirique, cette surveillance donnait un délai de sécurité glissant de plusieurs mois, permettant largement de prendre les mesures nécessaires en cas d'aggravation. Il restait pour cela indispensable de la poursuivre jusqu'à l'achèvement du transfert des charges sur la suspension neuve.

La première phase de la suspension auxiliaire, comportant quatre torons sur chaque ferme, a été mise en tension au début de 2001. Le bilan de la surveillance effectué mois après mois a permis de constater, avec 6 à 8 mois de recul, une diminution sensible du rythme des ruptures de fils enregistrés, tombé à quelques ruptures par mois.

Les quatre torons supplémentaires par ferme constituant la deuxième phase ont été mis en tension à la fin de l'année 2001. On a alors constaté une disparition presque complète des ruptures de fils enregistrées. Bien entendu, le dispositif de surveillance mis en place précédemment a été maintenu.

Le transfert des charges de l'ouvrage sur la suspension neuve a été effectué à partir de septembre 2002 et a été achevé en octobre. Le démontage des anciennes suspentes a été suivi de celui des anciens câbles porteurs, sur lesquels des échantillons ont été prélevés à des fins d'expertise.

## ■ CONCLUSION

L'approche de la gestion de la sécurité appliquée par le comité technique s'appuie pour la plus grande part sur l'avis collégial d'un groupe comprenant des experts très spécialisés dans le domaine particulier des ponts suspendus et des câbles et des spécialistes de la gestion de la sécurité. Cet avis est fondé sur leur expérience plus que sur une démarche véritablement scientifique. Le contexte opérationnel les a obligés à prendre des décisions sans autre certitude que l'intime conviction qui résulte de l'expérience acquise.

L'étude complète du remplacement de la suspension a été effectuée en 1999 et les travaux enga-

gés au printemps 2000. Ils se sont achevés en 2003. Cette durée des travaux, la plus faible que l'on puisse espérer, a constitué un élément essentiel de la décision, compte tenu notamment de la nécessité de réduire le plus possible le risque de devoir évacuer l'ouvrage et arrêter les travaux avant leur achèvement. Pour achever la rénovation de l'ouvrage, le remplacement de la suspension sera prolongé par d'autres travaux, prévus à partir de 2004, ne portant pas sur la structure porteuse, mais nécessaires pour assurer sa pérennité : renouvellement de la chape d'étanchéité et reprise des équipements.

Enfin, l'exploitation du pont suspendu à six voies implique l'élargissement du viaduc d'accès rive gauche, prévu à la suite en opération d'investissement.

## Les études

Le pont d'Aquitaine, qui franchit la Garonne à Bordeaux, est un pont suspendu à trois travées (150 - 393,75 - 150) construit dans les années 1960.

La DDE de la Gironde a décidé début 1999 de procéder au remplacement de la suspension (câbles porteurs et suspentes) en raison de la corrosion avancée des câbles porteurs et de procéder par la même occasion à son élargissement de quatre à six voies. A l'issue d'un appel d'offres, le groupement SETEC TPI - COWI A/S a été chargé d'une mission d'avant-projet, de projet, de constitution du dossier de consultation des entreprises et de visa des études d'exécution.

## ■ PROGRAMME DE L'OPÉRATION

Les travaux à entreprendre consistaient à :

- ◆ remplacer l'ensemble de la suspension ;
- ◆ élargir le tablier par des structures annexes destinées à porter les pistes cyclables et passages piétonniers ;
- ◆ modifier les dispositifs de retenue.

La principale condition géométrique était ainsi d'avoir une largeur utile d'au moins 20 m sur toute la longueur du pont suspendu et de libérer sur cette largeur un gabarit de 5 m à partir du niveau de la chaussée.

Par ailleurs, l'opération de remplacement devait satisfaire aux objectifs suivants :

*Jacques Ryckaert*



DIRECTEUR  
SETEC TPI

*Jean-Emile Croiset*



DIRECTEUR  
SETEC TPI

*Francis Rouvillain*



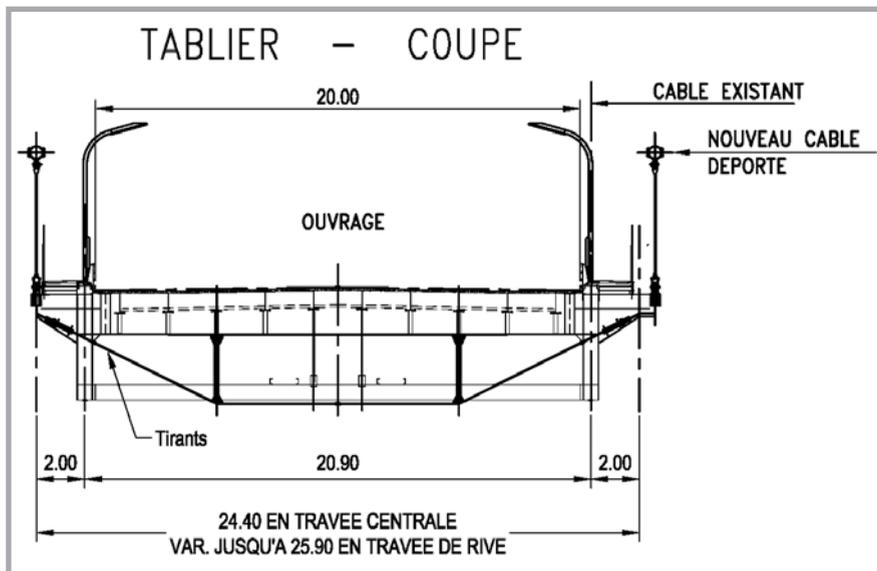
DIRECTEUR D'ÉTUDES  
COWI A/S

*Ove Sorensen*



INGÉNIEUR EN CHEF  
COWI A/S

Figure 1  
Caractéristiques  
principales du projet  
Main features  
of the project



- ▶ ◆ réduire le moins possible voire augmenter les coefficients de sécurité attachés aux diverses parties de l'ouvrage pendant les travaux, par rapport à la situation initiale ;
- ◆ réduire le plus possible le délai de mise en place de dispositifs définitifs ou provisoires chargés de reprendre les efforts de la suspension actuelle, en fonctionnement normal ou en cas de défaillance ;
- ◆ maintenir le trafic, avec des caractéristiques éventuellement réduites, des coupures complètes de quelques heures pouvant être tolérées, mais leur nombre devant rester le plus faible possible.

## ■ LES SOLUTIONS ENVISAGÉES

Au cours de l'étude préliminaire, quatre solutions qui combinaient entre elles les différentes exigences du programme ont été examinées.

### Solution A

Le principe de cette solution consistait à réaliser dans un premier temps des appuis provisoires en rivière, disposés sur toute la longueur du pont et destinés à soutenir l'ensemble du tablier, ce qui permettait ensuite de déposer la suspension actuelle et d'installer la nouvelle suspension. Les ancrages actuels des câbles sur les massifs d'extrémité pouvaient ainsi être intégralement réutilisés, sous réserve de leur capacité à reprendre les efforts supplémentaires dus à l'élargissement du tablier. Cette solution privilégiait donc la simplicité des opérations de changement de câble. Elle conservait le maximum des dispositions constructives de l'ouvrage actuel. Cette solution fut abandonnée pour les deux raisons suivantes :

- ◆ risque de collision de bateaux avec les appuis intermédiaires en rivière ;
- ◆ manque de capacité des ancrages existants.

### Solution B

Dans cette solution, chacun des câbles porteurs était remplacé par un nouveau câble placé à l'extérieur du câble existant. De nouveaux organes d'ancrage prenant appui à l'arrière des massifs d'ancrage étaient réalisés.

Cette solution privilégiait les caractéristiques de l'ouvrage rénové. Il était nécessaire de renforcer les poutres de pont pour supporter les efforts supplémentaires apportés par l'excentricité des câbles accrochés sur les consoles d'élargissement.

### Solution C

Cette solution était inspirée de celle mise en œuvre pour la réparation du pont de Tancarville. Elle consistait à remplacer chacun des deux câbles porteurs par deux câbles situés de part et d'autre du câble existant.

Les ancrages existants des câbles sur les massifs d'extrémité étaient ainsi intégralement réutilisés. Cette solution fut abandonnée car elle ne libérait pas un gabarit de 20 m sur toute la longueur du tablier aux passages du câble intérieur dans les massifs d'ancrage existants.

### Solution D

Cette solution se distinguait des trois autres par l'introduction de haubans qui se substituaient partiellement ou en totalité au système de suspension actuel. Cette solution fut abandonnée car elle se heurtait à de nombreuses difficultés qui ne garantissaient pas sa faisabilité :

- ◆ modification du système statique de l'ouvrage existant, nécessitant de nombreuses modifications pour établir la continuité du tablier au niveau des appuis et des joints de dilatation ;
  - ◆ renforcement de la poutre de rigidité pour reprendre les efforts de compression et de traction dus aux haubans ;
  - ◆ surcharge de la structure par le poids des poutres de rive, et donc surcharge des câbles existants.
- Les travaux nécessaires pour adapter les têtes de pylônes étaient techniquement difficiles : en hauteur et surplombant le trafic intense sur l'ouvrage. Cela nécessitait des restrictions importantes de trafic.

Pour chacune des solutions B, C et D, des dispositifs provisoires (haubanage auxiliaire, appuis provisoires en travée centrale, renforcement des câbles existants au moyen de torons supplémentaires) devaient être mis en œuvre dès le début des travaux de façon à mettre l'ouvrage en sécurité et à soulager la suspension actuelle des charges additionnelles dues à l'exécution des travaux sur le tablier. A l'issue de l'étude préliminaire et au regard des avantages et inconvénients des différentes solutions, la DDE de la Gironde a finalement décidé de

retenir la solution B, celle-ci présentant le meilleur compromis entre coût, délais, sécurité et faisabilité technique.

## ■ MODÉLISATION PAR LE PROGRAMME PYTHAGORE

Afin de pouvoir avoir une bonne connaissance des contraintes dans les différentes solutions envisagées pour la réparation du pont d'Aquitaine, un modèle informatique a été réalisé par M. Morisset, directeur scientifique à SETEC TPI, au cours des études de conception, au moyen du logiciel PYTHAGORE qu'il a développé. Ce modèle spatial a permis, grâce à la modélisation de tous les éléments de la poutre de rigidité et de ses appuis, de déterminer de manière rigoureuse les contraintes dans les différents éléments du tablier ainsi que les déformations. Il est à noter que les appuis du pont comportent de nombreuses bielles pour immobiliser le tablier dans les trois directions.

Les câbles, étant funiculaires des charges, rendent obligatoire l'utilisation d'un logiciel comme PYTHAGORE utilisant la méthode des grands déplacements. Les effets du second ordre se trouvent donc pris en compte.

Par ailleurs, l'opération de transfert de charge pour la mise en charge des nouveaux câbles en déchargeant progressivement les anciens a été entièrement simulée avec les différentes phases. On a pu ainsi déterminer les glissements nécessaires des nouvelles selles sur pylônes ainsi que les efforts dans le tablier et les pylônes.

Enfin, des cas de charges particuliers faisant appel au module dynamique, ont pu être appliqués sur ce modèle, permettant d'appréhender le comportement du tablier, notamment dans le cas de la rupture d'une suspente.

## ■ LA SOLUTION RETENUE

### Caractéristiques principales (figure 1)

Dans cette solution, la suspension existante est donc remplacée par une suspension excentrée de 2,00 m à l'extérieur du tablier. Les superstructures du tablier comportent :

- ◆ une chaussée de 20 m de largeur, limitée par des BN4 fixées sur la membrure supérieure des poutres de rigidité ;
- ◆ des pistes cyclables de 1,70 m de largeur, encadrées de deux garde-corps architecturés.

Le tablier est accroché aux suspentes par l'intermédiaire de consoles fixées sur les poutres de rigidité.

Les suspentes sont verticales sur l'ensemble du



Photo 1  
Fixation de la suspension  
auxiliaire sur un collier

*Attaching the auxiliary  
suspension system  
to a clamp*

pont. Les consoles d'élargissement du tablier sont de longueur variable dans les travées de rive pour tenir compte, dans ces travées, de l'excentricité variable du nouveau câble par rapport au câble existant, nécessitée par le passage de la suspension à l'extérieur de la culée d'origine.

Les nouveaux câbles ont une section globale circulaire. Ils passent à l'extérieur des blocs d'ancrage existants et sont ancrés en arrière de ceux-ci sur des poutres transversales en béton précontraint (cf. partie suivante). Ils ont sensiblement la même élévation que les câbles porteurs existants : les cotes des points de tangence au niveau des selles déviateurs et au milieu de la travée centrale sont celles de l'ouvrage existant, seules les selles d'appui sur pylônes sont légèrement rehaussées.

Au sommet des pylônes les nouveaux câbles sont déportés de 2,00 m vers l'extérieur, et à partir de ces points les câbles sont dirigés en ligne droite vers les points d'ancrage. L'excentricité au niveau des selles déviateurs, au droit des massifs d'ancrage, est de 2,73 m.

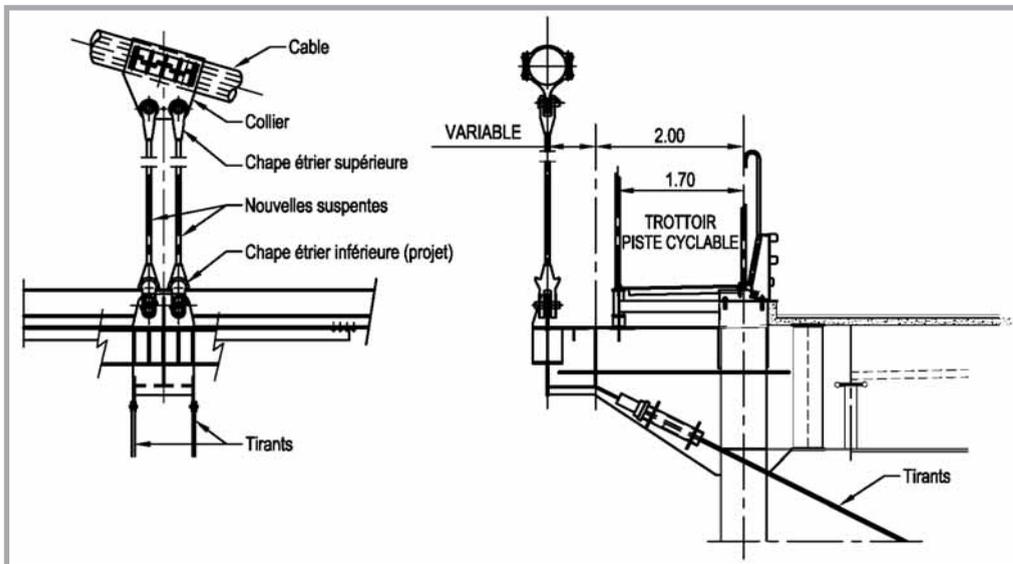
Par ailleurs, des câbles auxiliaires provisoires sont installés afin de reprendre les charges additionnelles sur les câbles existants, dues à l'exécution des travaux : poids de l'élargissement du tablier et charges de chantier. Ils sont constitués de quatre torons longeant les câbles existants, fixés directement au niveau des colliers des câbles existants par des traverses et ancrés dans les chambres d'ancrage au-dessus des tiges existantes.

Les nouveaux câbles, le long des massifs d'ancrage, sont placés à l'intérieur d'une enceinte visible, de façon à protéger la zone d'ancrage des intempéries.

### Mise en place de la nouvelle suspension et élargissement du tablier

*La suspension auxiliaire (photo 1)*

Avant de pouvoir commencer les travaux d'élargissement, il était nécessaire de concevoir une suspension auxiliaire capable de reprendre 10 % de la



**Figure 2**  
Principe de l'élargissement  
du tablier (projet)  
*Principle of deck widening (draft)*

**Photo 2**  
Attache des nouvelles  
suspentes sur les câbles  
*Attachment  
of new suspenders  
to the cables*



© COWI

► tension actuelle des câbles, pour compenser le supplément de charge dû à l'intervention sur le tablier. Les ancrages et les câbles porteurs malades ne permettaient en aucun cas l'introduction de charges supplémentaires, au cours des travaux, à celles existantes sous les conditions de service actuel.

Cette suspension auxiliaire est constituée de quatre torons de diamètre 70 mm, mis en place au dessus du câble existant et solidarisés à celui-ci au moyen de traverses fixées sur les colliers. Ils sont ancrés dans les chambres d'ancrage au-dessus des ancrages existants au moyen de nouveaux tirants perforants dans les blocs d'ancrage existants (photo 1).

Cette suspension auxiliaire a d'ailleurs été doublée au cours des travaux pour augmenter encore la sécurité de l'ouvrage, les ruptures de fils des câbles existants n'ayant pas cessé.

## *Élargissement du tablier (figure 2)*

Un des objectifs de la rénovation du pont d'Aquitaine était de permettre le passage de quatre à six voies en utilisant tout l'espace disponible entre montants des pylônes soit 20 m.

Un passage pour la piste cyclable et le trottoir à l'extérieur du tablier existant a été créé. Le report de l'axe des nouveaux câbles à 2,0 m à l'extérieur des câbles existants permet de placer le trottoir et la piste cyclable sur les consoles qui servent à accrocher le tablier aux suspentes. Cette disposition a l'avantage également de mettre en sécurité les suspentes en les éloignant de la voie poids lourds. Il a fallu concevoir de nouveaux points d'accrochage des suspentes avec une excentricité de 2,0 m en travée centrale et une excentricité variable en travée latérale du fait de l'écartement des câbles à 2,73 m au bloc d'ancrage (en raison de la géométrie existante des blocs d'ancrage).

Ces consoles sont situées au droit des pièces de pont. Cela revient à augmenter la portée des pièces de pont de 4 m en travée centrale et 5,5 m en travée latérale (soit plus de 20 %).

Le projet implique donc un renforcement des pièces de pont. Le système de sous-bandage, constitué de deux tirants parallèles tendus, renforce ainsi la pièce de pont par l'intermédiaire de poinçons verticaux entre les tirants et la semelle inférieure des pièces de pont.

Les suspentes sont accrochées sur les consoles par l'intermédiaire d'un profilé longitudinal HEA 500 qui répartit les charges. Celui-ci est contreventé par des bracons qui s'attachent sous la dalle de tablier et qui lui permettent de s'intégrer au système principal.

Un des soucis majeurs de ces dispositions fut de minimiser autant que possible les interventions sur la structure existante, en particulier les soudures avec une qualité d'acier à carbone équivalent de 0,45 – qui implique des précautions particulières – et sous les contraintes de service dans les membrures, le trafic sur l'ouvrage n'étant en principe ni interrompu, ni limité pendant toute la durée des travaux.

Nous avons aussi pris en compte dans ce projet de renforcement les problèmes qui pourraient résulter de la dissymétrie des forces agissantes, dans le cas du remplacement d'un tirant. Les consoles sont ainsi aménagées pour porter les barrières de sécurité qui bordent les pistes cyclables et la piste elle-même qui est constituée d'éléments juxtaposés avec revêtement antidérapant.

## *La nouvelle suspension*

### *Les nouveaux câbles porteurs*

Ils sont constitués de 55 torons de charge à la rupture minimum garantie de 3 200 kN et de six torons d'angle de charge à la rupture garantie de 1 600 kN. La capacité totale de chaque nouveau

câble est de 185 600 kN ce qui couvre la tension extrême dans le câble avec un coefficient de sécurité de 2,5. Cette composition du faisceau permet de donner aux câbles porteurs une configuration presque circulaire. La longueur à vide de fabrication des torons d'ancrage à ancrage est de : 787,71 m (791, 24 m à 50 % de la charge maxi), et un poids par toron, y compris sa bobine et les culots, de 17 t environ. Le diamètre extérieur d'un câble porteur est 520 mm.

Les fils composant les torons sont de la classe 1 660 N/mm<sup>2</sup>. Ils sont galvanisés à chaud avec dépôt de zinc minimum 400 g/m<sup>2</sup>.

Les torons sont fixés à leur extrémité par un culottage en zinc dans un sabot en acier coulé, lui-même fixé sur le bloc d'ancrage par deux tirants filetés, pour permettre l'ajustement en longueur à l'aide de vérins annulaires.

#### Les suspentes (photo 2)

Les suspentes sont en câbles clos de fils de qualité 1 570 N/mm<sup>2</sup>, galvanisés à chaud à 300 g/m<sup>2</sup>. Les câbles sont protégés par une gaine de 6 mm de PEHD adhérent et résistante aux UV, avec un minimum de 2 % de carbone graphite. Le diamètre de la section acier est de 50 mm pour les suspentes courantes et 55 mm pour les suspentes d'extrémité. La charge à la rupture garantie est de 2500 kN pour les suspentes courantes et 3 150 kN pour les suspentes d'extrémité : le coefficient de sécurité est au minimum 2,5.

Les suspentes sont réalisées à leur longueur théorique et assemblées avec les chapes étriers, culottées en atelier avec de la résine de polyester renforcée de silice en poudre type "Wirelock".

Les suspentes courtes sont équipées de rotules sphériques permettant les mouvements dans les deux directions principales, longitudinales et transversales. Ceci pour réduire les effets de fatigue à l'entrée des câbles dans les culots. C'est un point sensible de résistance à la fatigue.

Les attaches inférieures des suspentes sur le tablier permettent d'accrocher les suspentes par un système de tiges réglables en longueur au cours du transfert de charge.

#### Les colliers

Les colliers sont de forme circulaire permettant ainsi d'envelopper le câble comme une cerce (t = 25 mm). Ils comportent deux parties réunies par des tiges précontraintes de Ø 30 mm, en acier à haute résistance.

La traction est de 0,55 MN (55 t) par tige permettant d'assurer le non glissement des colliers dans tous les cas de charge avec un coefficient de friction de 0,12 entre câble et collier compte tenu de la perte de tension par relaxation des câbles porteurs et des tiges dans le temps. Il est important de faire un contrôle périodique des tensions des tiges.

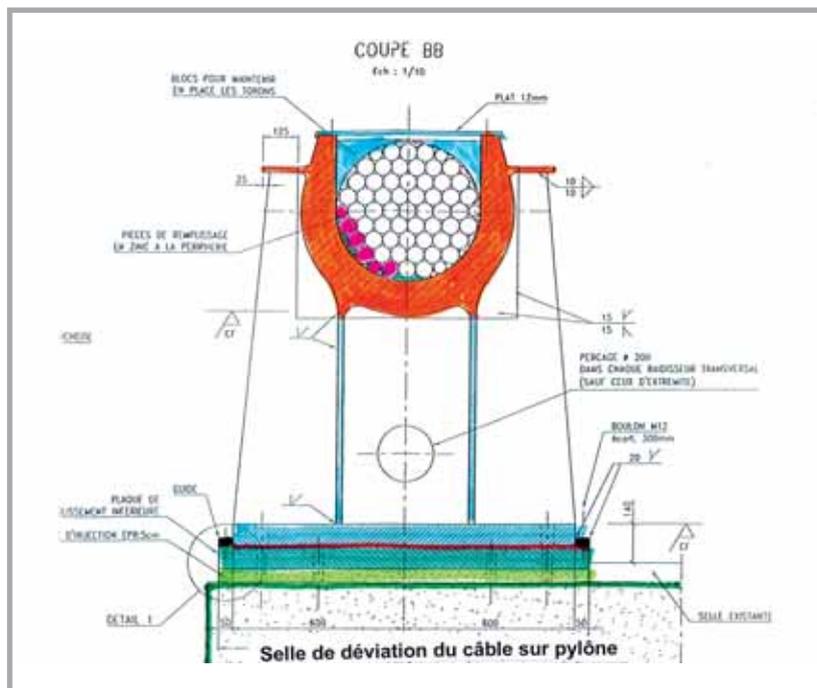


Figure 3  
Selle de déviation du câble sur pylône  
Cable diversion saddle on the tower

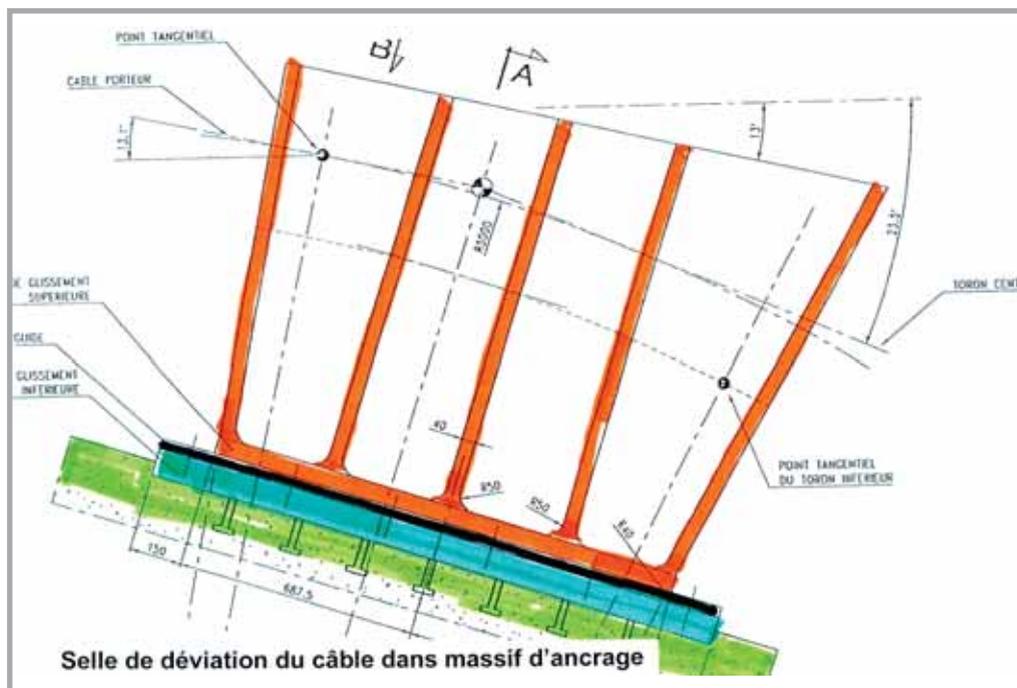


Figure 4  
Selle de déviation du câble dans le massif d'ancrage  
Cable diversion saddle in the anchoring foundation

Quand celle-ci tombe au-dessous de 80 % de la tension initiale un resserrage doit être effectué. Les colliers sont en acier coulé type BS 3 100 qualité A4, limite d'élasticité minimum 320 N/mm<sup>2</sup>.

#### Les selles au sommet des pylônes et dans les chambres d'ancrage (figures 3 et 4)

Les selles au sommet des pylônes sont en construction mixte. L'auget est en acier coulé qualité BS 3100 A4 alors que la structure de base est en acier mécano-soudé (poids total par pièce 15 t). Les selles de déviation dans les chambres d'ancrage sont en acier coulé BS 3100 A4 soudé (poids total par pièce 7,5 t).

Les selles reposent sur des plaques de téflon permettant leur glissement avec un très faible coefficient de friction.

Photo 3  
Dés humidification des câbles.  
Gaine d'étanchéité. Partie courante  
et transition avec un collier

*Dehumidification of the cables.  
Impervious duct. Continuous section  
and transition with a clamp*



Figure 5  
Dés humidification des câbles.  
Entrée dans la chambre  
d'ancrage

*Dehumidification of the cables.  
Entering the anchoring chamber*

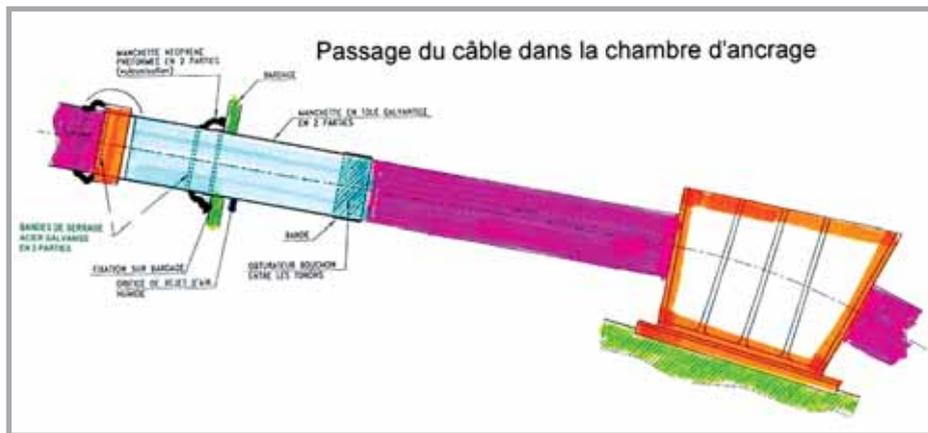


Figure 6  
Dés humidification  
des câbles.  
Passage  
sur pylône  
*Dehumidification  
of the cables.  
Passage over  
the tower*

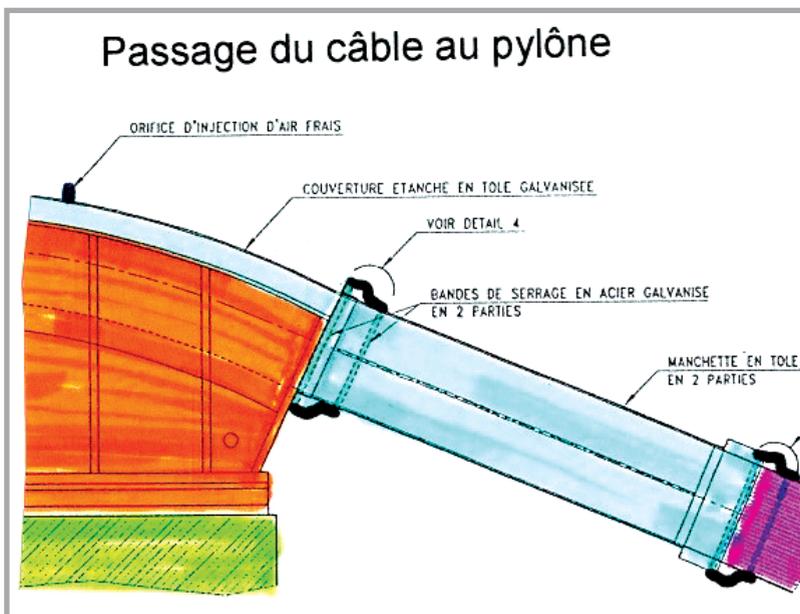
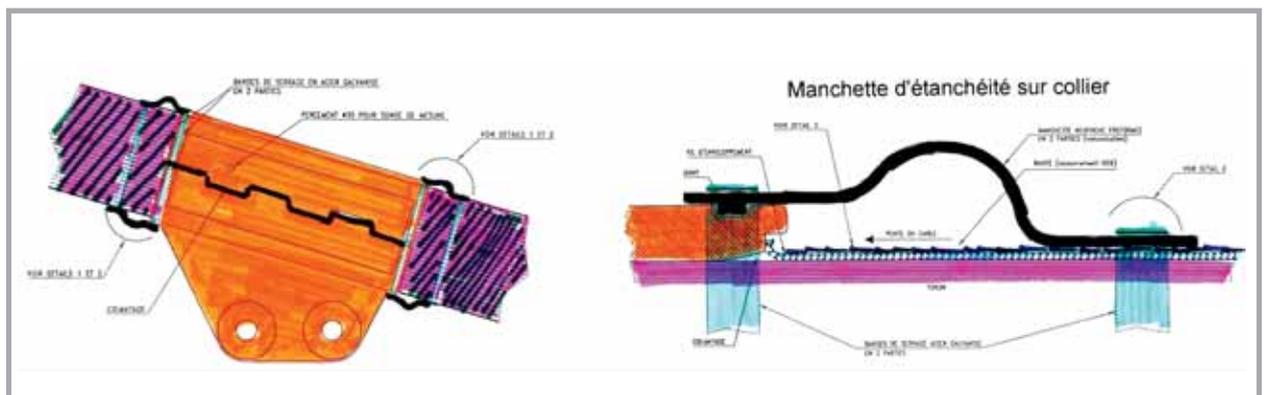


Figure 7  
Dés humidification des câbles.  
Franchissement d'un collier  
et manchette de fixation  
des instruments de mesure  
*Dehumidification of the cables.  
Clamp crossing and adaptor  
connecting piece  
for measuring instruments*



## Protection des câbles porteurs contre la corrosion

Étant donné les circonstances de la réparation du pont d'Aquitaine, il est évident que l'accent a été mis sur les moyens de protection contre la corrosion des câbles porteurs. Nous exposons ici principalement les moyens mis en œuvre pour cette protection :

- ◆ les conditions de protection prévue dans le dossier initial d'appel d'offres ;
- ◆ l'option qui a été adoptée sous la recommandation du groupement SETEC TPI - COWI A/S.

## Protection prévue dans le dossier d'appel d'offres

C'est le système classique qui comprend :

- ◆ la galvanisation des fils constituant les torons. C'est la protection la plus importante ;
- ◆ le colmatage des torons extérieurs avec une pâte polyuréthane riche en zinc ;
- ◆ un fil de sertissage de 3,5 mm en acier doux, lui aussi galvanisé ;
- ◆ un traitement en peinture à base de polyuréthane.

Le projet d'appel d'offres a été établi sur la base de projets connus, existants depuis de nombreuses années (30 ans) et ayant donné satisfaction, en particulier sur le pont du Petit Belt au Danemark.

## Un progrès en matière de protection des câbles porteurs : la dés humidification (photo 3 et figures 5, 6 et 7)

Consécutivement au succès de la protection des surfaces métalliques par la dés humidification (procédé appliqué pour la première fois sur le pont du Petit Belt au Danemark), les Japonais ont eu l'idée de l'appliquer pour la protection des câbles porteurs.

La première réalisation, après des essais assez succincts, a été faite sur les câbles porteurs du pont d'Akashi Kaikyo, le plus long pont suspendu du monde actuellement. Sur la base des résultats obtenus sur ce pont et d'autres ouvrages au Japon, il a été décidé de proposer cette solution de protection des nouveaux câbles porteurs du pont d'Aquitaine, en option dans le DCE.

Le principe du procédé est simple : sachant que toute corrosion de l'acier est inhibée si l'humidité de l'air ambiant est inférieure à 60 % d'humidité relative, il suffit de faire baigner les masses d'acier à protéger dans un climat sec.

COWI A/S a utilisé cette technique pour les surfaces intérieures du caisson sur le pont du Petit Belt en 1970, plus tard sur le pont de Faroe, ainsi que sur les ponts de Normandie, de Humber en UK, de Høga Kusten en Suède et sur les ponts du Storebælt et de l'Oresund dernièrement (Danemark - Suède).

La circulation d'un air sec à l'intérieur des câbles permet d'absorber l'humidité résidant dans le câble et empêche toute corrosion de s'établir. L'air insufflé sous pression initiale d'environ 2 kPa circule le long du câble, se charge de l'humidité enfermée dans la gaine et est rejeté à l'extérieur. Sous cette pression, l'air peut circuler sans difficulté sur 200 à 250 m de câble. Pour les longs câbles, il faut prévoir plusieurs points d'injection d'air sec.

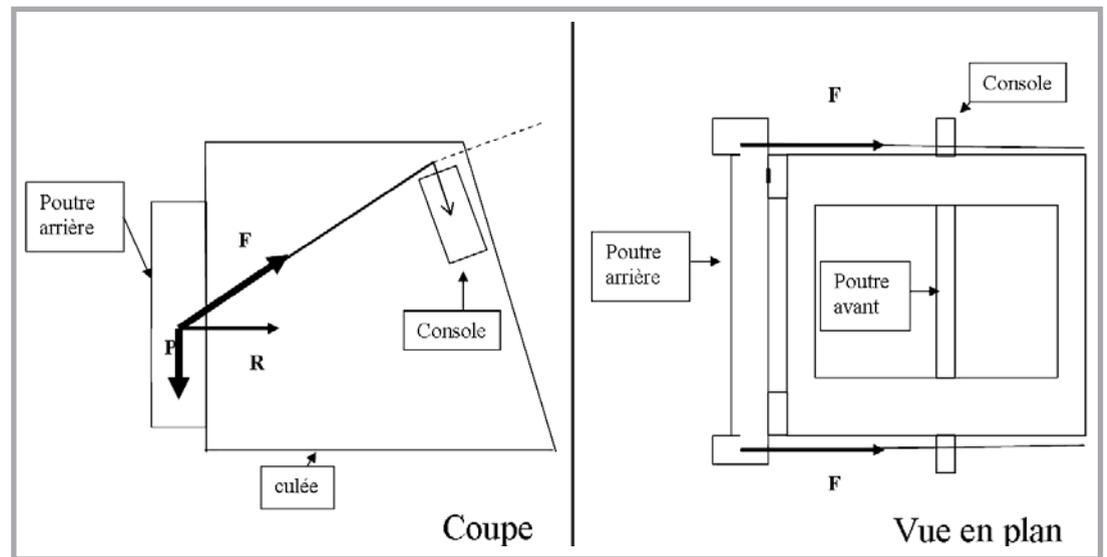
La difficulté pour les câbles porteurs est de réaliser une enveloppe étanche tout au long des câbles, compte tenu de tous les obstacles qui créent des discontinuités dans cette enveloppe, en particulier aux interruptions créées par les colliers d'attache des suspentes et les passages des câbles sur les selles d'appui et de déviation.

Le choix du matériau qui constitue la gaine est aussi un facteur déterminant du bon fonctionnement de ce système. Les qualités exigées pour ce matériau sont les suivantes :

- ◆ bande en matériau synthétique à recouvrement 50 %, vulcanisable et résistant à la perforation ;
- ◆ bonne adhérence au support (pas de décollement) ;
- ◆ conserver une bonne élasticité dans le temps pour supporter les déformations des câbles ;
- ◆ pouvoir assurer l'étanchéité sous une pression de 0,02 atm (20 cm de hauteur d'eau) ;
- ◆ conserver ses propriétés physiques sous des variations de températures entre - 5 et + 50 °C de température ambiante ;
- ◆ résister aux intempéries et au vieillissement ;
- ◆ pouvoir être peinte ;
- ◆ pouvoir être réparée ou remplacée ;
- ◆ les transitions aux colliers doivent pouvoir supporter des variations angulaires faibles mais fréquentes ;
- ◆ permettre la fixation d'appareillage de surveillance tels que sonde de température, de pression et d'humidité.

Pour contrôler la validité du choix du matériau sur ces différents points, des essais ont été réalisés sur le matériau lui-même, mais aussi sur un modèle représentatif des câbles porteurs pour valider les détails de transition entre gaine et collier.

C'est ce système qui a été mis en place sur les câbles porteurs du pont d'Aquitaine.



### Organes d'ancrage et de déviation des câbles

#### Ancrages des nouveaux câbles sur les massifs existants

Afin de reprendre les efforts amenés par l'ancrage des nouveaux câbles, l'option choisie a été de solliciter les éléments existants uniquement par des efforts de compression. La solution consistant à reprendre une partie des ancrages existants a été écartée : d'une part, il ne fallait pas les solliciter plus qu'actuellement et, d'autre part, ces ancrages étaient repris par des câbles de précontrainte existants dont la longévité était incertaine (ce choix a été confirmé après la mise à nu au cours du chantier de quelques armatures qui ne se révèlent pas en excellent état). De plus, la stabilité des culées a été augmentée du fait du poids de la poutre en béton.

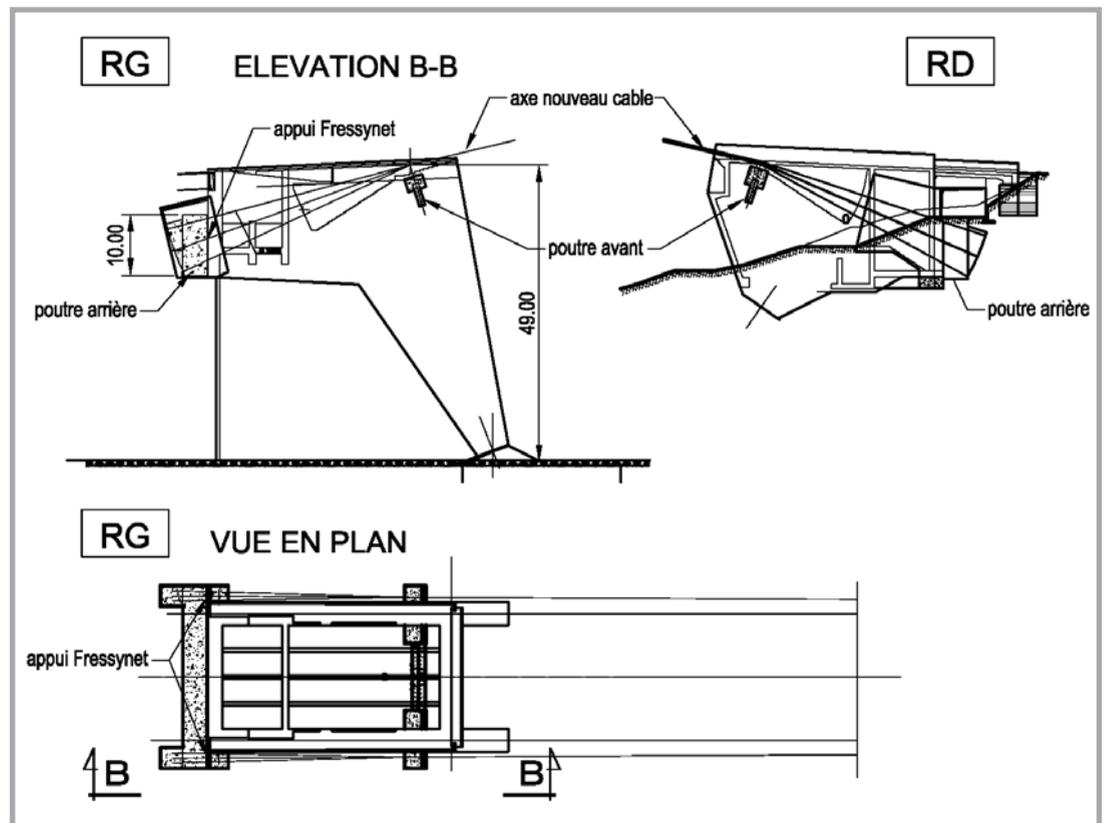
Une poutre horizontale comportant les nouveaux ancrages vient donc s'appuyer à l'arrière des massifs d'ancrage.

Les principales réflexions autour de ce système concernent :

- ◆ la nature du matériau : une solution en métal a d'abord été envisagée mais a été abandonnée à cause des difficultés de mise en place d'éléments volumineux nécessités par la rigidité à obtenir et aussi par la difficulté d'entretien coté rive droite ;
- ◆ la nature des appuis de la poutre arrière sur le massif : l'articulation verticale la plus simple, à savoir "l'articulation Freyssinet", est bien adaptée. Néanmoins, son bon comportement implique d'obtenir une résultante des forces, constituées par le poids de la poutre et la force d'ancrage de la suspension, pas trop éloignée de l'horizontale. Les dimensions choisies pour la poutre d'ancrage pour résister aux efforts inclinés des torons ont conduit à un poids tel que la résultante est horizontale sous charges permanentes (figure 8).

Figure 8  
Principe d'ancrage  
des nouveaux câbles  
New cable anchoring  
technique

Figure 9  
Ancrage des câbles  
dans les massifs existants  
*Anchoring cables  
in the existing foundation  
blocks*



### *Déviations des câbles sur massifs existants*

Les câbles des ponts suspendus sont déviés sur des selles avant leur ancrage afin que les torons soient toujours en appui sur ces selles. Les selles déviateuses reprennent des efforts de l'ordre de 1 200 t et sont situées à l'extérieur des massifs d'ancrage. Elles sont donc fixées sur des consoles nouvelles solidarisées par précontrainte aux massifs existants. Les consoles sont reliées entre elles par une poutre transversale de redressement en béton armé située à l'intérieur du massif afin de ne solliciter les voiles des massifs qu'en compression (figure 9).

### *Caractéristiques des organes de déviation des câbles*

#### *Poutre arrière pour ancrages des câbles*

La poutre arrière adoptée a une largeur de 4 m, une hauteur de 10 m et une longueur de 31 m environ. Elle est précontrainte par 19 câbles 25T15S disposés sur une seule file excentrée de 1,60 m. Une précontrainte provisoire, composée de trois câbles 25T15S, permet de mettre en tension l'ensemble des 19 câbles définitifs avant l'ancrage des câbles porteurs. Les trois câbles provisoires seront détendus à mi-transfert.

L'ancrage des torons est réalisé sur trois files verticales, la file centrale comporte 21 paires de tiges et les files extrêmes 20.

La distance entre les selles déviateuses et les ancrages des tiges doit être constante afin que les torons subissent les mêmes allongements en rai-

son des variations de température et des tensions; les ancrages sont donc situés sur des "oreilles" circulaires aux extrémités de la poutre précontrainte. La poutre s'appuie sur le massif par l'intermédiaire de deux articulations linéaires à noyau rétréci de béton, verticales, espacées de 20,90 m et axées sur les contreforts des massifs existants de 3,80 m d'épaisseur. Ces articulations préfabriquées ont une largeur de 10 cm, une épaisseur de 2 cm et une hauteur de 8 m. Elles ont été mises en place au coulage de la poutre précontrainte. Juste avant la mise en charge des nouveaux câbles du pont, le sommier d'appui a été bétonné au contact de l'articulation. Ceci a permis à la poutre transversale précontrainte d'effectuer une grande partie de ses déformations de fluage et de retrait avant d'être rendue solidaire du massif.

La construction de la poutre arrière sur la culée rive gauche fut prévue sur pile provisoire fondée sur pieux. Sur la culée rive droite, la construction de la poutre arrière se fit à l'abri après terrassement en sous-œuvre sous une dalle réalisée derrière la culée afin d'assurer la continuité de la circulation.

#### *Consoles supports des selles déviateuses*

Les consoles ont une longueur de 2 m avec une section en "T" de hauteur 5 m et de largeur totale 3 m. Elles sont précontraintes par sept câbles de type 12T15S en rive droite et trois câbles 12T15S en rive gauche. Les structures en "T" règnent, à l'intérieur des massifs d'ancrage, sur une longueur de 3 m puis sont prolongées par une poutre de redressement de section 1,00 m x 3,80 m de hau-

teur. La poutre de redressement est en béton armé pour éviter de solliciter les contreforts extérieurs de 3,80 m d'épaisseur sous l'effet du raccourcissement de cette poutre si elle avait été précontrainte.

#### Le renforcement des têtes de pylône

##### Principe structurel adopté

Les nouvelles selles d'appui sont positionnées à côté des selles existantes, vers l'extérieur des pylônes, avec un entraxe de 2 m. Ces nouvelles selles ne sont pas centrées sur les fibres moyennes des montants des pylônes et créent donc un moment en tête de ces montants de signe opposé à celui créé par les selles actuelles.

Outre le renforcement local du béton des pylônes sous les nouvelles selles par l'intermédiaire de câbles de précontrainte intérieurs ancrés dans des nouveaux plots en béton, on a disposé une précontrainte extérieure d'une jambe à l'autre de chaque pylône, ce qui compense l'excentrement des nouvelles selles.

Le renforcement consiste donc en :

- ◆ l'aménagement de l'appui sous les nouvelles selles ;
- ◆ le renforcement longitudinal et transversal de la zone d'appui sous les nouvelles selles par de la précontrainte intérieure ancrée sur des nouveaux plots en béton ;
- ◆ le renforcement des entretoises hautes par de la précontrainte extérieure excentrée.

##### Caractéristiques de ce renforcement

Les dispositions prises afin d'assurer l'intégrité du coin de béton sont les suivantes :

- ◆ perpendiculairement à l'axe longitudinal de l'ouvrage, des câbles de précontrainte horizontaux, installés dans des conduits réalisés par forage au sommet de chaque fût de pylône, sont mis en œuvre. Les ancrages d'une partie de ces câbles sont disposés côté nu intérieur de chaque fût de pylône, entre les deux poutres voiles qui constituent la traverse du pylône. Les autres câbles sont filants d'un fût à l'autre pour renforcer la traverse supérieure.
- Les câbles sont de type 25T15S et sont au nombre de six par fût de pylône (deux arrêtés à l'intérieur et quatre filants d'un fût à l'autre).
- Un sommier extérieur en béton est prévu de façon à bien répartir la précontrainte au droit du coin de béton du fût. Un sommier est également réalisé du côté intérieur pour rattraper d'éventuelles déviations de forage ;
- ◆ parallèlement à l'axe longitudinal de l'ouvrage, deux câbles de précontrainte de type 25T15S dans l'axe des nouvelles selles sont également mis en place afin de renforcer les coins supérieurs des fûts de pylônes. Ces câbles seront également ancrés dans un sommier en béton pour assurer la diffusion.

# L'appel d'offres et la dévolution des travaux

## ■ PROCÉDURE D'APPEL D'OFFRES

Compte tenu de la technicité des travaux de réparation, la personne responsable du marché a retenu la procédure d'appel d'offres restreint pour la consultation des entreprises.

L'avis d'appel d'offres a fait l'objet d'une large publication au niveau européen. Il a été publié en septembre 1999 dans le journal officiel de publication de la communauté européenne, dans le bulletin officiel des annonces de marchés publics et dans le *Moniteur du Bâtiment et des Travaux publics*.

Trois groupements d'entreprises spécialisées européennes de dimension internationale se sont portées candidates et ont été invités à remettre une offre sur la base du dossier de consultation des entreprises élaboré par SETEC TPI et COWI A/S. Ce dossier de consultation pour les travaux de remplacement de la suspension et d'élargissement du tablier du pont d'Aquitaine a été envoyé aux candidats au début du mois de novembre 1999.

Il comprenait les prestations suivantes :

- ◆ les études d'exécution et de méthode ;
- ◆ la mise en place d'une suspension auxiliaire provisoire pour la reprise partielle des charges du tablier pendant les travaux ;
- ◆ le renforcement et la modification des têtes de pylône et des massifs d'ancrage ;
- ◆ la mise en place d'une structure métallique d'élargissement du tablier ;
- ◆ la mise en place de la nouvelle suspension composée de fils galvanisés protégés par une peinture ;
- ◆ le transfert des charges de l'ancienne vers la nouvelle suspension ;
- ◆ le démontage de l'ancienne suspension ;
- ◆ la mise en œuvre d'un système de déshumidification dans les chambres d'ancrage des câbles porteurs.

Le règlement de la consultation prévoyait les critères de jugement des offres suivants :

- ◆ valeur technique des prestations ;
- ◆ délai de transfert de charge provisoire et définitif ;
- ◆ durée et ampleur des mesures de restrictions de circulation ;
- ◆ prix des prestations ;
- ◆ délai global.

Le dossier de consultation des entreprises ne prévoyait ni lot ni tranche spécifiques.

### Jean-Marie Aubarterre



CHEF DU SERVICE  
GRANDS TRAVAUX  
DDE de la Gironde

### Xavier Dairaine



CHEF DE LA SUBDIVISION  
PONT D'AQUITAINE  
DDE de la Gironde

## ► ■ OUVERTURE AUX VARIANTES

Le dossier de consultation des entreprises comportait une option à laquelle les entreprises devaient nécessairement répondre : la mise en œuvre d'un système de déshumidification des câbles porteurs. Cette option devant remplacer la mise en peinture des câbles. Elle comprenait la pose d'une gaine en caoutchouc étanche autour des câbles et la fourniture et la mise en fonctionnement de tous les appareils de déshumidification pour l'injection d'air asséché en légère surpression à partir des têtes de pylône.

Les candidats pouvaient également proposer plusieurs variantes techniques par rapport aux dispositions du dossier de consultation :

- ◆ modification de détails technologiques du système de déshumidification des câbles porteurs ;
- ◆ construction de la poutre d'ancrage des câbles à l'arrière du massif d'ancrage de la rive droite en sous-œuvre ;
- ◆ principe d'accès au pylône rive gauche situé dans la Garonne par une estacade ;
- ◆ constitution des câbles porteurs ;
- ◆ modification du principe de renforcement des pièces de pont par une structure mécano-soudée et par des tirants ;

- ◆ modification de la suspension auxiliaire provisoire ;
- ◆ modification des suspentes ;
- ◆ modification du principe de renforcement des têtes de pylône.

## ■ PROPOSITIONS DE VARIANTES ET CHOIX DE L'OFFRE ET DES VARIANTES

Les offres des trois groupements d'entreprises candidats ont été ouvertes en janvier 2000. Toutes les possibilités de variantes ont été exploitées par les candidats et ont conduit à modifier certaines dispositions techniques par rapport aux études de réparation.

Ainsi à l'issue de l'analyse des variantes proposées par le groupement d'entreprises retenu, la solution technique de remplacement de la suspension a été modifiée sur les points suivants :

- ◆ le principe d'élargissement du tablier : mise en place de pièces mécano-soudées complétées de tirants horizontaux. Dans la solution proposée, le sous-bandage en câble est remplacé par un système formé de profilés du commerce et par des tiges filetées, permettant la mise en œuvre de la

tension, composées de deux tirants. Les fixations principales sur les montants des poutres de rigidité sont réalisées par boulonnage ; seuls les voiles horizontaux transmettant des efforts de cisaillement sont soudés sur les âmes de ces montants. Cette solution permet des gains de poids et réduit les surfaces de préparation de la structure métallique existante ;

◆ Le principe de fixation de la suspension auxiliaire provisoire : cette solution permet des gains de délai non négligeables. Le principe retenu conserve la même fonction que la solution de base, c'est-à-dire le soulagement de la nappe de suspension existante en appliquant un effort dirigé vers le haut sur les colliers existants. Les ancrages de cette suspension auxiliaire étant assurés par une précontrainte à travers les massifs d'ancrage existants juste au-dessus des torons de la suspension. Ils sont réalisés après forage des murs arrière de la culée sur une profondeur d'environ 14 m. Un bâti métallique est fixé sur chaque collier incluant des peignes en PEHD dans lesquels les câbles auxiliaires sont mis en place et qui permettent le glissement afin d'éviter les efforts parasites liés aux variations de température. Sur les selles de déviation en tête de pylône, un bâti spécial est fixé équipé lui aussi de peigne en PEHD. Sur les sellettes d'épanouissement un simple bâti métallique est soudé afin de reporter les efforts de déviation. D'autre part après analyse des offres techniques, le maître d'ouvrage a décidé d'intégrer l'option de déshumidification des câbles porteurs au marché de travaux.

Le marché a été notifié dès le début du mois d'avril au groupement d'entreprises Dumez GTM (aujourd'hui Vinci Construction Grands Projets), GTM Construction (aujourd'hui GTM Génie Civil et Services) et Baudin Chateauneuf.

Un article séparé traitera de la réalisation de l'opération et décrira les modifications de détail apportées à la conception lors de l'exécution des travaux.

## ABSTRACT

### Replacing the Aquitaine bridge suspension system

*Various authors*

**Corrosion damage to the suspension cables of the Aquitaine suspension bridge had reached such a stage in 1998 that it was decided to replace the suspension system ; at the same time the deck was widened to a three-lane dual-carriageway road. Design engineering was carried out in 1999 and the work was performed from 2000 to 2002. The article gives information concerning the process leading up to the most important decisions and specifies the safety management conditions from detection of the damage condition up to transfer of the loads onto the new suspension system. It describes the extensive engineering work that had to be performed to prepare the project. Work performance will be dealt with in a later publication.**

## RESUMEN ESPAÑOL

### Sustitución de la suspensión del puente de Aquitania

*Autores diversos*

**La degradación derivada de la corrosión de los cables portadores del puente colgante de Aquitania ha llegado a alcanzar un grado tal que dio lugar a la decisión de sustituir la suspensión. Esta operación se ha aprovechado para ensanchar el tablero de 2 x 3 canales de tráfico. Los estudios fueron emprendidos en 1999 y las obras ejecutadas de 2000 a 2002. En este artículo figuran las indicaciones acerca del proceso que ha dado lugar a tomar las decisiones más importantes y precisa las condiciones de gestión de la seguridad desde el momento en que se puso de manifiesto el estado de degradación hasta el momento de la transferencia de las cargas en la suspensión nueva. Se describe la importante tarea de estudios que fue preciso efectuar para preparar la operación. La ejecución de las obras se habrá de exponer en una publicación ulterior.**

# La réparation du pont après l'effondrement de l'ouvrage

Attributaire du marché de reconstruction d'une partie de l'ouvrage après son effondrement accidentel, STPL est intervenu d'octobre 2002 à février 2003 selon un mariage de techniques modernes et ancestrales pour sauver cet ouvrage construit en 1605. Le tympan sera reconstruit à partir de pierres du Vercors (non gélives et de teinte similaire) et consolidé par un contre-mur en béton armé fortement ferraillé reprenant l'ensemble des efforts du remblai et des charges d'exploitation majorées des efforts de freinage, importants à cause de l'inscription en courbe descendante de l'accès à l'ouvrage. Les parties encore en place seront rejointoyées par la technique de voie sèche, ancrées par des tirants d'enserrements et injectées de coulis de ciment sous pression contrôlée (< 2 bars). La circulation sera finalement rendue en février 2003, après une coupure de plus de 2 ans, dans le respect des délais d'exécution.



Vue aval de l'ouvrage avant travaux

*Downstream view of the structure prior to the works*

## ■ L'OUVRAGE ET SON CONTEXTE

L'ouvrage, pont en maçonnerie datant de 1605, franchit le Drac entre les communes de Saint-Jean-d'Herans et de Cognet. Construit à 80 m d'un ancien pont romain par Lesdiguières, assisté de Pierre Salomon, maître maçon et Jhan Albert, maître charpentier, il supporte une chaussée de 2,60 m entre têtes de parapets maçonnés et approche 20 m de

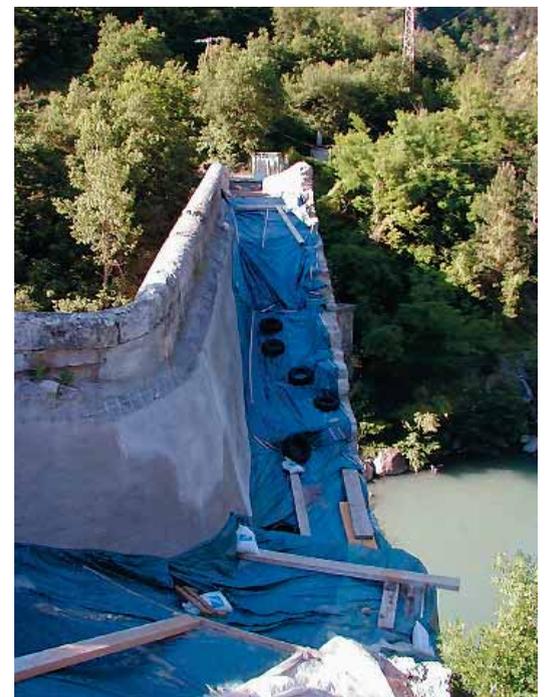
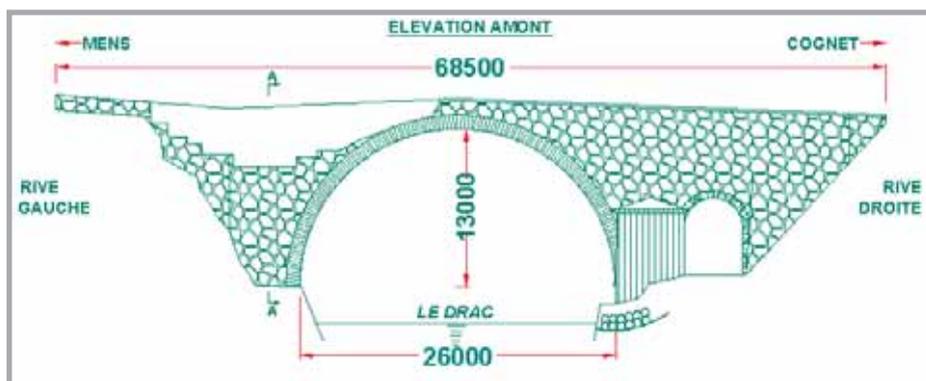


Photo 1 et figure 1

Tympan amont rive gauche effondré

*Collapsed upstream spandrel on the left bank side*



# de Cognet d'un tympan

hauteur à sa clef. La voûte principale de 26 m d'ouverture s'appuie sur le rocher en rive gauche et sur une pile maçonnée en rive droite, équipée d'un avant-bec et d'un arrière-bec composés également de blocs de pierre de taille maçonnés. La voûte secondaire s'appuie sur la pile et sur une fondation non visible.

Durant de longs siècles, il fut l'unique moyen de communication entre la Matheysine et le Trièves. Fragilisé par l'action du temps sur les pierres de l'ouvrage en tuf gélif, par les infiltrations d'eau au cœur de l'ouvrage non étanché et par les remblais successifs sur et hors ouvrage entraînant des surcharges importantes, le Conseil général de l'Isère, à la fin de l'année 2000, lance des travaux de réparation et consolidation par rejointoiement, injection et dalle béton générale. Malheureusement, au cours de cette campagne, le tympan amont rive gauche de l'ouvrage s'effondre pour une raison encore indéterminée. Les travaux sont donc arrêtés pour une expertise complète de l'ouvrage par le bureau d'études Quadric de Montluel, qui déterminera une solution de reconstruction et de consolidation de l'ouvrage.

Après validation de la stabilité de l'ouvrage ainsi différentiellement déchargé, puisque seul le remblai en rive droite est encore en place, divers travaux de sécurisation sont effectués, comme le déchargement du remblai rive gauche encore en place, la purge des éléments instables et le gunitage en béton projeté du tympan aval rive gauche. STPL, spécialiste de la réparation d'ouvrages d'art, sera alors chargé, après un nouvel appel d'offres, de la réparation du tympan et des parapets effondrés, de la création d'une dalle générale sur ouvrage et de la réparation générale (photo 1 et figure 1).

## ■ LES TRAVAUX

### L'organisation générale

La majeure partie des travaux consistant en la reprise de la zone effondrée en rive gauche, une grue à tour de type GTMR 336B avec 36 m de flèche est montée sur la culée rive gauche, permettant l'approvisionnement des matériels et matériaux jusqu'à l'axe de l'ouvrage sans surcharge de chantier. Pour les travaux en rive droite, les approvisionnements se feront à la main, les bétonnages à la pompe depuis la culée.

Au vu des travaux de reconstruction à réaliser, il

sera préférée une protection collective générale à des protections individuelles type harnais et ligne de vie. Les accès à la zone effondrée seront donc sécurisés par des garde-corps en tubes Ø 40/49 fixés sur l'extérieur du tympan amont et contreventés sur le tympan aval, évitant ainsi tout démontage-remontage souvent source de défaut de protections collectives (photo 2).

### La culée rive gauche

Les poussées dues aux multiples reprofilages successifs de l'accès en rive gauche, si elles ne sont pas à l'origine de l'effondrement du tympan, ne pourront toutefois pas être reprises par la nouvelle maçonnerie.

Les travaux ne se limiteront donc pas à une simple reconstruction du tympan effondré, mais à une nouvelle conception de l'ouvrage permettant la reprise de ces poussées, tout en conservant l'aspect extérieur fait en pierre de taille.

La solution retenue se compose d'un caisson en béton armé auto-stable d'épaisseur variable entre 40 cm et 1,20 m construit à l'intérieur même de

Jean-Louis Genevois



CHEF DE CHANTIER  
STPL

Jean-Pierre Zurdo



GÉRANT  
STPL

Mathias Monier



INGÉNIEUR TRAVAUX  
STPL

**Photo 2**  
**Mise en place des protections collectives**  
*Installation of collective protection equipment*



Figure 2  
Principe de reprise  
de la culée rive gauche  
*Technique  
for underpinning  
of the left-bank abutment*

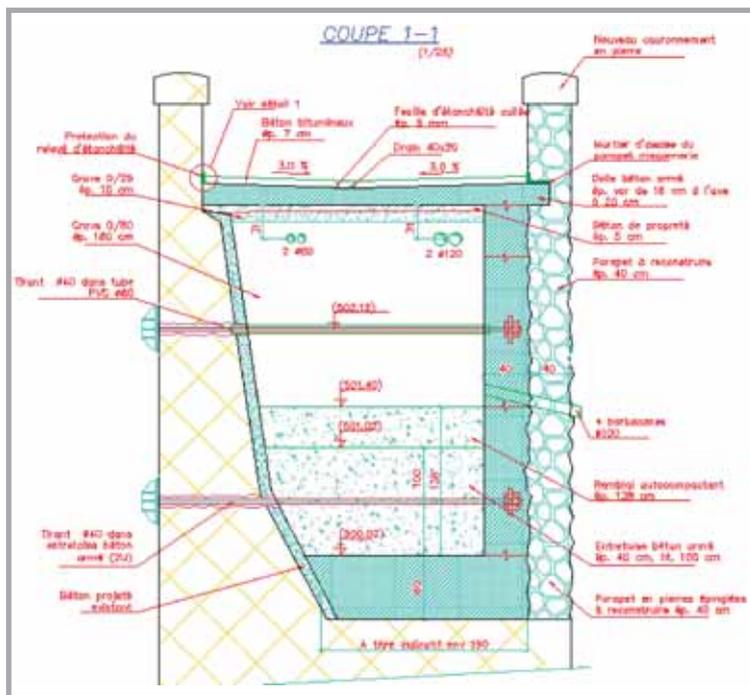


Photo 3  
Remontage du tympan en pierre  
*Installation of the stone spandrel on site*

Figures 5 et 6  
Perspective du caisson  
rive gauche  
(sans la semelle)  
*Perspective view  
of left-bank caisson  
(without footing)*

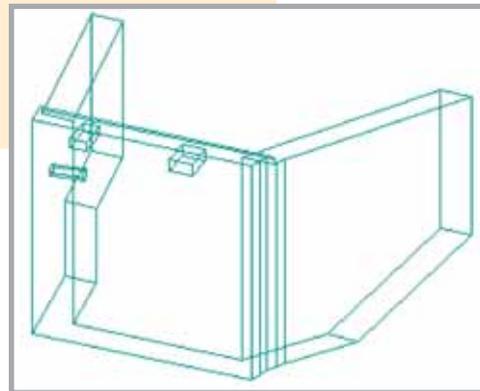
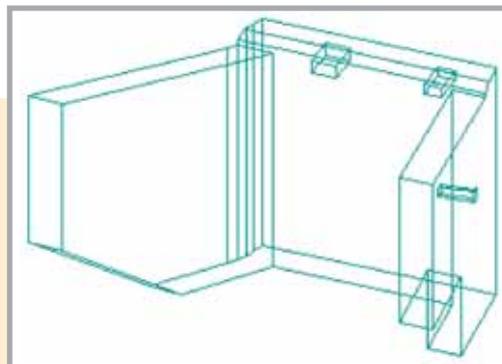
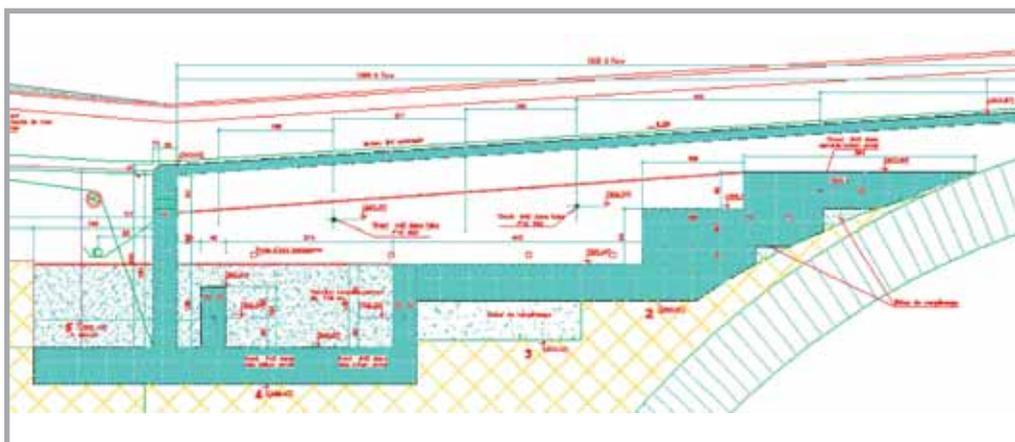


Figure 3  
Reconstruction en redans du tympan  
*Reconstruction of the spandrel  
with keyways*



l'ouvrage et remblayé en remblais auto-compactants limitant ainsi les efforts dynamiques de mise en place d'un remblai classique (figures 2, 5 et 6).

### La reconstruction du tympan

L'ouvrage ayant été décaissé jusqu'à l'extrados de la voûte, la reconstruction du tympan fonctionnera comme un mur en "L" se reposant sur la voûte de l'ouvrage, avec un parement en pierres extérieur. La semelle de 60 cm d'épaisseur et le voile de 40 cm serviront également, par l'intermédiaire d'entretoises béton armé et des tirants d'ancrages à stabiliser le tympan aval toujours en place. Là encore, un remblai auto-compactant est préféré au remblai classique qui aurait apporté trop de vibrations à l'ouvrage en cours de reconstruction. La sécurisation des postes de travail est assurée par les garde-corps préalablement installés sur l'extérieur de l'ouvrage. Prévu dès le départ sur toute la hauteur, il n'y aura aucune adaptation en cours de chantier, mais une dépose générale par cordistes après remontage du tympan et du parapet (figure 3, photos 3 et 4).

### Le renforcement en rive droite

Les tympans amont et aval rive droite ont également été renforcés par des entretoises béton armé doublées de tirants traversants en Gewi Ø 32. Ces entretoises permettent de consolider la partie supérieure des tympans et des redans intérieurs recevant la dalle béton de répartition (photos 5 et 6).

### La dalle de répartition

Après l'effondrement, il n'apparaissait plus concevable d'augmenter à nouveau les surcharges sur le remblai de l'ouvrage. La solution retenue a donc été de dimensionner une dalle reposant sur les redans intérieurs en maçonnerie (surépaisseur des



Photo 4  
Bétonnage du caisson  
rive gauche  
*Concreting the left-bank  
caisson*



Photos 5 et 6  
Détail d'une plaque  
d'appuis et d'un tirant  
*Detail of a support plate  
and a tie rod*



Photo 7  
Remblaiement au transporteur  
léger roulant sur les redans  
intérieurs  
*Backfilling by light transporter  
running over the interior  
keyways*

tympans rencontrée à l'intérieur de l'ouvrage) contreventée par les entretoises béton et le caisson en rive gauche, supprimant donc les surcharges sur les remblais.

Les circulations d'eau internes nuisant particulièrement à la pérennité de l'ouvrage, il fallait impérativement les capter et les diriger à l'extérieur de l'ouvrage. La dalle de répartition, étanchée par un complexe mince adhérent et prolongée à ses extrémités par deux tranchées drainantes, empêchera toute infiltration d'eau au cœur de l'ouvrage.

Un soin particulier sera apporté au relevé d'étanchéité dont l'adhérence et la protection feront l'objet d'un traitement spécifique : une engravure ragrée au mortier LHM (liant hydraulique modifié) sera réalisée dans l'épaisseur des pierres sur la longueur de l'ouvrage pour un relevé de 20 cm. Le complexe ainsi soudé à ce ragréage sera protégé par un profilé aluminium garni de mastic polyester. Par ailleurs, les pierres de couvertines étant en saillie de 5 cm à l'intérieur de l'ouvrage empêcheront tout écrasement du relevé par une roue d'un véhicule.

La faible largeur de l'ouvrage (2,60 m) ne permettant pas l'utilisation de finisher, l'enrobé sur l'ouvrage, en forme de toit inversé avec un fil d'eau central sera tiré à la main (photos 7, 8 et figure 4).



Photo 8  
Mise en place  
de l'enrobé à la main  
*Manual laying  
of the bituminous mix*



### La réparation des maçonneries

L'ensemble des maçonneries en place seront hydrocappées à 300 bars, repiquées et rejointoyées par projection en voie sèche de mortier bâtard chaux-ciment.

Ces travaux seront réalisés depuis deux nacelles volantes motorisées se déplaçant sur la dalle de répartition préalablement coulée. N'ayant pas assez de recul pour l'utilisation de contrepoids, les deux nacelles seront montées en vis-à-vis se contrebalançant l'une par rapport à l'autre. Les travaux amont et aval seront ainsi menés en parallèle (photo 9).

Lors de la préparation de ces maçonneries, une cavité a été découverte au droit de la pile en rive droite. Après rebouchage du parement en pierres, une

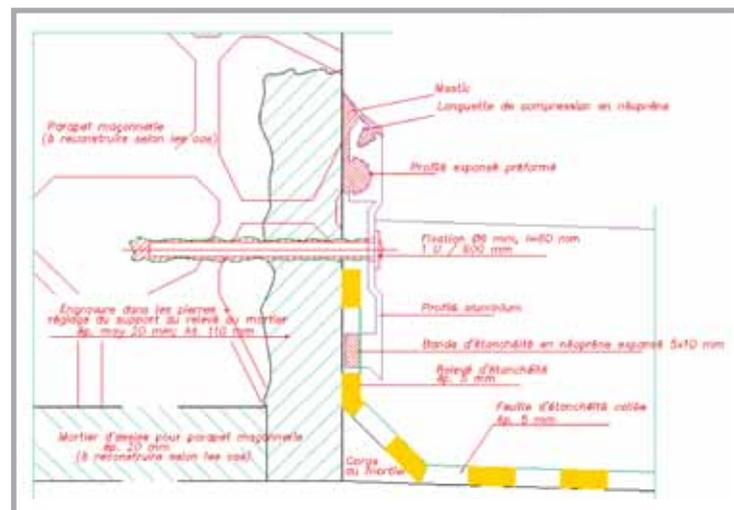


Figure 4  
Principe du relevé  
d'étanchéité  
*Flashing technique*

Photo 9  
Vue des nacelles  
d'accès depuis l'aval  
de l'ouvrage  
*View of access platforms  
from downstream  
of the structure*



Photo 10  
Forage des injecteurs  
pour le traitement  
de la pile  
*Boring injectors  
for treatment of the pier*



Photo 12  
Parapet rive droite  
déposé et reposé  
après numérotation  
des pierres  
*Parapet on right bank  
side removed and refitted  
after numbering  
the stones*



Photo 11  
Couvertines  
en pierre de taille  
reposées  
*Refitted ashlar  
copings*



Photo 13  
Vue aval de l'ouvrage  
*Downstream view of the structure*

►  
série d'injecteurs et d'évents seront forés en rotopercussion Ø 40 permettant l'injection de 10 t de coulis de ciment CPA 52.5 à refus, sous volume et pression contrôlés (arrêt de l'injection si le volume est supérieur à 1,3 m par injecteur ou si la pression dépasse 2 bars) (photo 10).

Une partie des parapets sera déposée et reposée après repérage intégral des pierres de taille. Les pierres de couvertines du parapet effondré ne purent être récupérées dans le Drac. Il faudra alors tailler 34 ml de couverture pour retrouver une unité sur l'ouvrage. Là encore, une pierre non gélive se rapprochant au maximum des pierres existantes sera utilisée (carrière de Thieule, 83) (photo 12). Afin de retrouver la continuité en tenon-mortaise du parapet, les pierres seront carottées à leur extré-

## LES PRINCIPAUX INTERVENANTS

### *Maître d'ouvrage*

Conseil général de l'Isère

### *Maître d'œuvre*

Cellule départementale des ouvrages d'art, subdivision de l'Équipement de La Mure

### *Bureau d'études*

Quadric (Montluel)

### *Coordination sécurité*

BECS

### *Entreprise principale*

S.T.P.L.

### *Sous-traitants*

- Etudes d'exécution : ETL
- Tirants et rejointoiement : Resirep
- Terrassements : Carron
- Étanchéité : Smac Acieroid
- Enrobés : Gerland

**Montant de l'opération : 265 000 €**

mité, la carotte conservée clavée au mortier de scellement à son emplacement initial, reconstituera ainsi le "pivot" de ce type d'emboîtement. Certaines couvertines existantes seront simplement réparées au mortier bâtard permettant ainsi de les conserver jusqu'à une prochaine campagne de remplacement (photo 11).

## ■ CONCLUSION

La réparation du pont de Cagnet, menée dans un contrôle permanent de qualité et sécurité suite à l'effondrement accidentel du tympan lors de la première tranche de travaux, se déroulera sans incident dans le respect des règles de sécurité et des délais de réalisation, rétablissant ainsi une voie de circulation localement importante, fermée depuis octobre 2000.

Les techniques modernes de réparation auront ainsi permis la sauvegarde d'un ouvrage du patrimoine national (photos 13 et 14).



Photo 14  
Vue du tympan remonté  
*View of the reassembled spandrel*

## ABSTRACT

Repair of Cagnet Bridge after the collapse of a structure spandrel

*J.-L. Genevois, J.-P. Zurdo, M. Monier*

Awarded the contract for rebuilding part of the structure following its accidental collapse, STPL performed work from October 2002 to February 2003 using a combination of modern and ancestral techniques to save this structure built in 1605. The spandrel will be rebuilt from Vercors stone (cold-resistant and of similar colour) and consolidated by a heavily reinforced concrete lining wall taking up all the forces of the backfill and the operating loads plus braking forces, which are strong due to the fact that the approach to the structure is on a descending curve. The parts still in place will be rejointed by the dry path technique, anchored by tie rods and cement grouted at controlled pressure (< 2 bar). Traffic will be finally restored in February 2003, after a break of more than two years, in accordance with the completion deadlines.

## RESUMEN ESPAÑOL

Reparación del puente de Cagnet tras el desplome de un tímpano de la estructura

*J.-L. Genevois, J.-P. Zurdo y M. Monier*

Tras la atribución del contrato de reconstrucción de una sección de la estructura tras su hundimiento accidental, STPL ha intervenido desde octubre de 2002 hasta febrero de 2004 según una aplicación de técnicas modernas y ancestrales para salvar esta estructura construida en 1605. El tímpano se ha reconstruido por medio de piedras del Vercors (no heladizas y de tono similar) y consolidado por un contramuro de hormigón fuertemente armado que soporta el conjunto de los esfuerzos del terraplén y de las cargas de operación aumentadas con los esfuerzos de frenado, que en el caso presente son importantes debido a la inscripción en curva descendente del acceso a la estructura. Las partes no modificadas serán recibadas según la técnica de vía seca, ancladas por tirantes de reajuste e inyectadas con lechada de cemento con presión controlada (de menos de dos bares). El tráfico rodado entrará finalmente en servicio en febrero

de 2003, tras una interrupción de más de dos años, cumpliendo así los plazos de ejecución.

# Elargir sous trafic autoroutier des viaducs à poutres précontraintes : plus de 10 ans d'expériences

Jacques Morand  
DÉPARTEMENT OA  
Scetauroute Beterem

Hubert Rossignol  
DÉPARTEMENT OA  
Scetauroute

Pierre Trouillet  
INGÉNIEUR CHARGÉ DES OA  
Contrôle des sociétés concessionnaires  
d'autoroutes

Comme dans la plupart des pays de l'OCDE, les caractéristiques géométriques des plus vieux tronçons des 7 800 km d'autoroutes concédées françaises sont devenues au fil des années insuffisantes pour écouler le trafic et requièrent un élargissement de leurs passages inférieurs et notamment des viaducs à travées indépendantes à poutres précontraintes (VIPP).

Ces ouvrages sont situés parmi les tronçons les plus circulés (en moyenne 70 000 véhicules par jour) et ont, pour certains, déjà fait transiter plus de 700 millions de tonnes de marchandises en moins de 40 ans.

Elargir de telles structures était difficile, compte tenu de l'importance du trafic (qui impose un échelonnement des travaux parfois sur plus d'une année), des conditions de réalisation (de nuit, en hiver, dans des emprises très limitées...), de la nature des structures (âgées, précontraintes longitudinalement et transversalement) et enfin des exigences parfois contradictoires à satisfaire.

La sévérité de ces contraintes amenait jusqu'alors à considérer ces ouvrages comme inélargissables. Leur démolition-reconstruction ne pouvant raisonnablement pas être envisagée car non économique et perturbatrice du trafic, c'est donc un véritable défi qui était à relever.

Cet article détaille les techniques innovantes d'élargissement, associant différents matériaux, qui ont été utilisées ces dix dernières années sur le réseau autoroutier concédé français pour répondre à ce défi.

## ■ PROBLÉMATIQUE DE L'ÉLARGISSEMENT DES VIADUCS PRÉCONTRAINS

Rappelons tout d'abord que les travaux doivent, bien entendu, être précédés d'un bilan des contraintes appliquées dans les structures et d'un diagnostic complet sur l'état des câbles de précontrainte, ce qui pour les ouvrages à élargir – nécessairement anciens – n'est pas du tout aisé.

### Exigences essentielles structurelles

Ce sont les ouvrages à précontrainte par post tension qui posent les questions les plus complexes et que l'on étudie ici. L'élargissement des ouvrages doit répondre aux exigences essentielles suivantes :

- ◆ E1 : assurer la continuité de la plate-forme à vide :
  - a) à court terme,
  - b) à long terme ;
- ◆ E2 : assurer la continuité de la plate-forme sous surcharges ;
- ◆ E3 : ne pas sur-solliciter l'ouvrage existant :
  - a) sous surcharges routières,
  - b) sous déformations différentielles (thermiques ou différées),
  - c) si possible soulager les poutres de rive ;

- ◆ E4 : assurer une continuité d'aspect entre parties existantes et nouvelles (architecture) ;
- ◆ E5 : assurer l'accès aux parties anciennes et nouvelles pour leur maintenance et réparation ;
- ◆ E6 : assurer au maximum la continuité du trafic en cours de travaux.

Ces exigences sont sévères et contradictoires. En effet :

- ◆ **E1a** n'est pas facile à réaliser pour les parties existantes. En effet, l'élargissement suppose le déport des dispositifs de retenue et donc l'application de surcharges dans des zones qui n'en recevaient pas (par exemple, la partie latérale du hourdis antérieurement disposée sous glissières se retrouve circulaire, alors que cette zone est aussi la zone d'ancrage des câbles de précontrainte transversale et que les cachetages des ancrages ne sont parfois pas cousus sur le hourdis...). Pour les parties nouvelles, la satisfaction de cette exigence suppose la connaissance préalable de la géométrie de l'extrados qui est masquée par les revêtements de chaussée ordinairement d'épaisseur non constante ;
- ◆ **E1b** requiert la stabilité de ce calage à long terme (absence de déformation différentielle par fluage entre les parties existantes et nouvelles) ;
- ◆ **E2** demande une continuité mécanique entre parties existantes et nouvelles ;
- ◆ **E3a** suppose que l'ouvrage existant est en bon

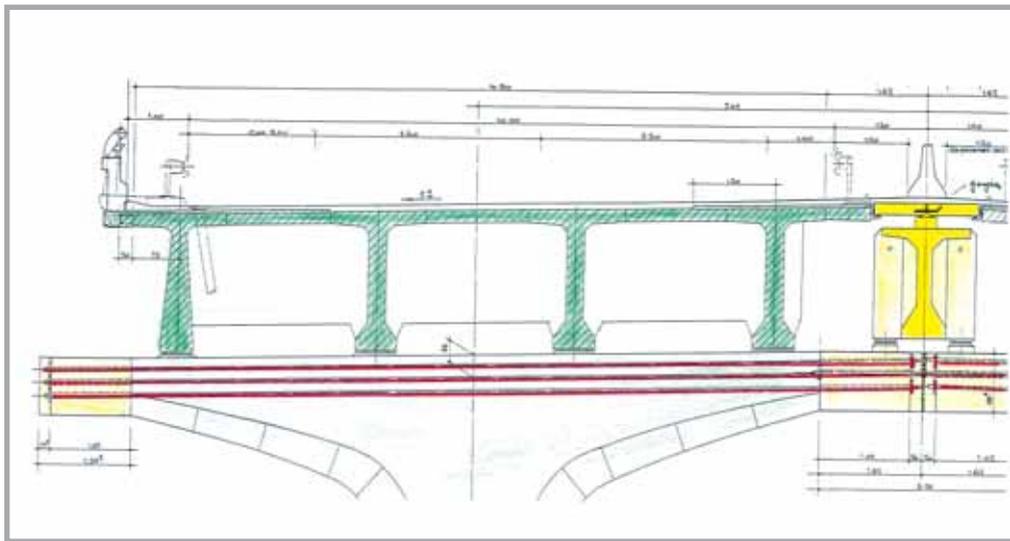


Figure 1  
Coupe transversale  
Cross section

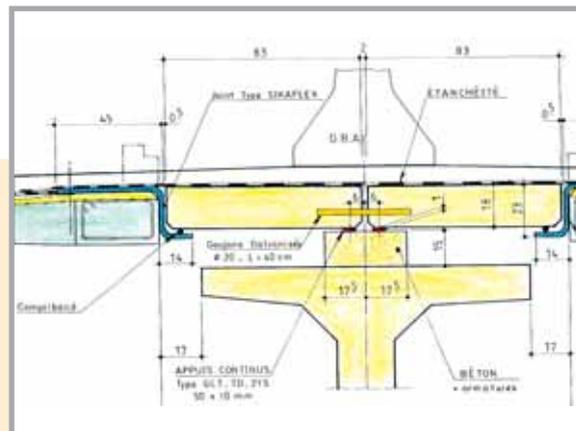
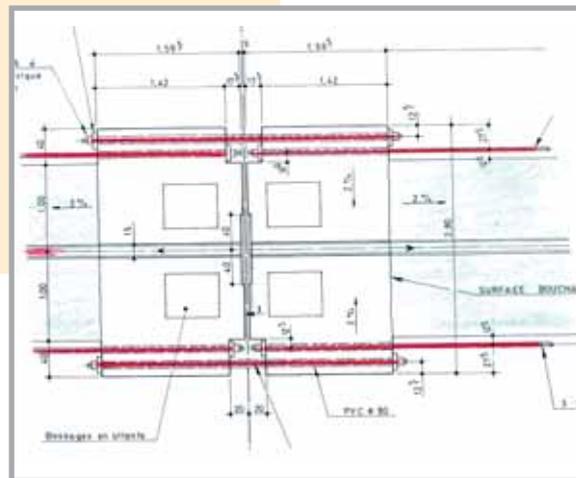


Figure 2  
Détails d'appui  
Support details



▶ état, or la précontrainte n'est accessible qu'en quelques points particuliers. Cette condition requiert au contraire de E2 une indépendance entre les différentes parties selon l'axe vertical (surcharges verticales). Une raideur minimale dans le sens longitudinal est par ailleurs recherchée pour pouvoir reprendre les efforts de freinage de façon "pas trop différentielle" entre parties existantes et nouvelles ;

◆ **E3b** réclame une indépendance selon l'axe vertical et l'axe longitudinal de façon à ce que la courbure sous gradient thermique et la dilatation puissent se faire librement, sauf, bien entendu à obtenir un comportement thermique égal des parties existantes et nouvelles ;

◆ **E3c** nécessite l'augmentation de la raideur de cette poutre ou l'application d'efforts extérieurs, ce qui est compatible avec E2 mais incompatible avec E3a et E3b ;

◆ **E4** demande généralement la réalisation de poutres en béton précontraint, ce qui rend difficile la satisfaction de E1b et E3b ;

◆ **E5** exige l'accès à toutes les parties structurales dont la tranche des hourdis précontraints, ce qui est peu compatible avec E2 ;

◆ **E6** : les ouvrages à élargir sont ordinairement les plus chargés en trafic et donc bien souvent en zone périurbaine. Il ne peut être question de construire un nouvel ouvrage latéralement au premier, ni en phase provisoire (méthodes de ripage), ni en phase définitive (méthode de déviation). De même, il est déconseillé de solidariser les deux tabliers composant un même franchissement, de façon à permettre au moins la circulation sur un tablier en cas de défaillance pathologique sur l'autre. Enfin, le chantier ne peut guère utiliser l'autoroute pour la circulation des matériaux et matériels et l'essentiel des accès doit se faire par-dessous ou sur le côté. La satisfaction complète de cette exigence conduit donc à l'insatisfaction de toutes les précédentes en phase définitive et à des restrictions particulières lors de la construction de l'élargissement (chantier "dans l'embaras des étais", bétonnage sous les vibrations du trafic).

Compte tenu de la complexité de ce qui précède, on considérait jusqu'au début des années 90 que les VIPP et les caissons en béton précontraint n'étaient pas élargissables.

La pression du trafic a conduit à relever ce défi et à chercher des solutions innovantes.

## ■ ÉLARGISSEMENT PAR L'INTÉRIEUR PAR POUTRE B.P. ET DALLES BIARTICULÉES

### L'ouvrage et la méthode utilisée

Le viaduc sur le Toutry situé sur l'autoroute A6 (Paris-Lyon) concédée à la Société des Autoroutes Paris Rhin Rhône (SAPRR) comprend deux tabliers à sept travées indépendantes, de 32,50 m de portée, et à poutres précontraintes. Transversalement, les entretoises et le hourdis sont précontraints. Il s'agissait d'augmenter la largeur roulable de 10 à 11,2 m.

Après suppression du dispositif de retenue en rive centrale, la méthode imaginée en 1993 par Michel Placidi (Razel TM) consiste à disposer (figure 1) :

◆ une poutre isostatique à précontrainte quasi centrée, de hauteur réduite dans l'inter-tablier ;

◆ des dalles préfabriquées simplement appuyées d'une part sur la nouvelle poutre, et d'autre part en rive du hourdis du tablier existant.

Les appuis des dalles sont composés (figure 2) :

- ◆ de bandes en élastomère posées sur la nouvelle poutre ;
- ◆ de supports métalliques en "Z" de 20 mm d'épaisseur accrochés en rive du hourdis existant, galvanisés, chevillés et collés sur le hourdis ;
- ◆ un goujonnage horizontal en acier inoxydable entre dalles jouant le rôle d'articulation d'axe longitudinal.

### Fonctionnement du système

Ce système crée une certaine continuité de la surface de roulement. Isostatique, il autorise donc des raideurs de structures différentes et garantit la connaissance des efforts appliqués au cours du temps.

Le câblage de la nouvelle poutre permet de limiter au maximum les courbures générées par les déformations différées par fluage (navier des contraintes à vide quasi rectangulaire dans une majorité de sections).

#### Comportement des dallettes

La rotation d'axe longitudinal des dallettes permet d'accepter des flèches différentielles entre structures.

Par exemple, une flèche différentielle de 1 cm se traduirait par une rotation de 0,75 degré et une ouverture du joint longitudinal de 3 mm. Cette rotation n'a aucune incidence sur le confort de l'utilisateur et n'est pas accompagnée d'un déplacement vertical.

Une chaussée souple continue, sans joint longitudinal particulier, pontait cette zone.

#### Comportement transversal en rive de hourdis

En flexion locale le hourdis est sollicité en flexion transversale par suite de l'appui des dallettes. Dans cette zone les sollicitations étaient précédemment faibles : il a donc fallu la renforcer en flexion. Après rabotage de 2 cm du béton, il a donc été rajouté des aciers complémentaires (HA 16 à 10 pm enrobés dans un microbéton de 6 cm d'épaisseur). Le cisaillement entre les bétons nouveaux et anciens reste limité (0,6 MPa à l'ELS, 0,85 à l'Elu).

#### Comportement des poutres existantes

En flexion générale, à l'ELS rare, la fibre inférieure est tendue à 3 MPa. Les aciers passifs existants sont insuffisants pour reprendre ces tractions. Compte tenu qu'à l'ELS fréquent, cette fibre reste comprimée à 20 MPa et qu'en situation d'exploitation normale la présence de poids lourds est très rare sur la file la plus à gauche, et compte tenu des mesures que prendra l'exploitant pour empêcher l'accumulation de PL sur cette poutre (côté TPC), il a été admis de surseoir à un renforcement de la poutre de rive.

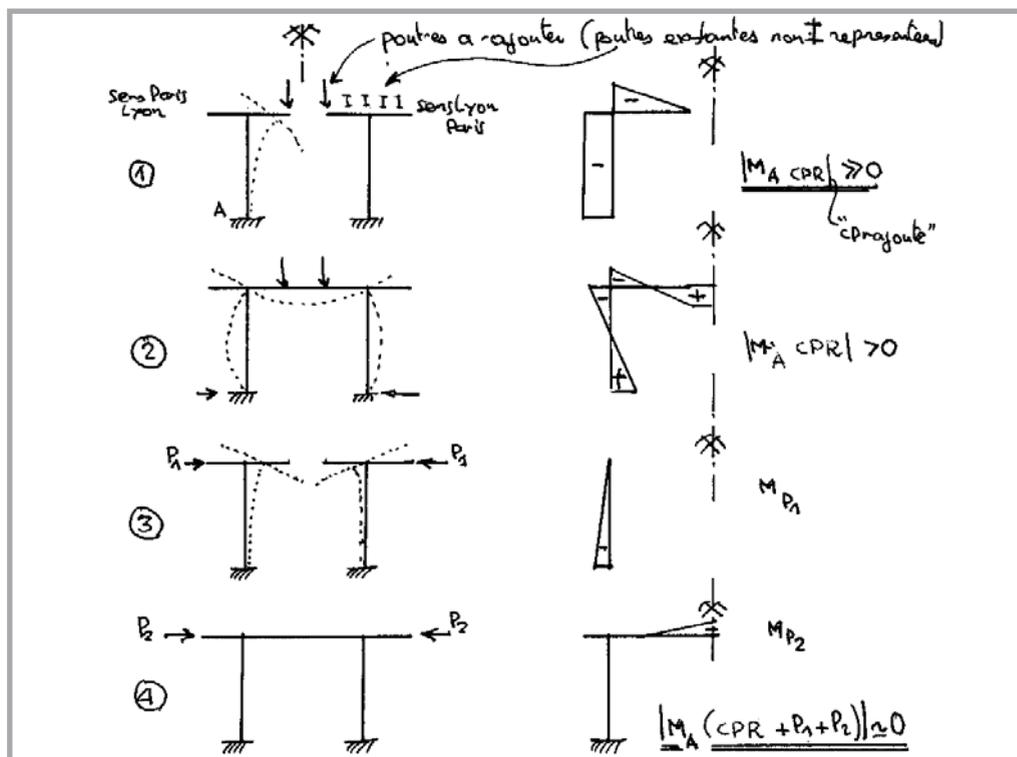


Figure 3  
Phasage de construction  
et diagrammes d'efforts associés  
Construction scheduling  
and associated force diagrams

#### Comportement des piles

Chaque tablier est posé sur des piles marteaux et les piles des différents tabliers sont coplanaires. La mise en place d'une poutre dans l'inter-tablier nécessite un appui en bout des chevêtres des piles marteaux précontraintes.

La réalisation d'un appui simple conduisait à des moments de l'ordre de 500 tm, inacceptables dans la pile et ses fondations, toutes deux conçues pour supporter des charges centrées.

Michel Placidi a donc imaginé une technique astucieuse de post-déformation puis figeage (figure 3). La mise en continuité des chevêtres conduit à la réalisation d'un portique plus favorable pour les moments mais requiert un tirant en tête des fondations sur pieux (24 HA 32) pour reprendre les poussées en pied de portique. Les contraintes s'avéraient encore excessives.

Les piles marteaux ont donc dû être préalablement précontraintes avant pose de poutre dans l'inter-tablier, ce qui a permis de diminuer les contraintes, tant dans la structure, qu'au sol.

Une fois la prolongation des chevêtres réalisée, ceux-ci ont été à leur tour précontraints.

Ainsi la réalisation de l'élargissement en TPC a nécessité la précontrainte préalable des piles et la reprise des efforts horizontaux sur les fondations.

#### Retour d'expérience : fabrication, coût, délais, comportement à long terme

Les intervenants sur ce chantier étaient :

- ◆ le maître d'œuvre :
- ◆ l'entreprise :
- ◆ le bureau d'études d'exécution :

L'accès au chantier s'est fait par le dessous de l'ouvrage, entre les deux tabliers. Les poutres ont été préfabriquées dans le terre-plein central de l'autoroute.

Deux portiques roulant à l'aplomb des poutres des

- ▶ tabliers existants assuraient la manutention des poutres nouvelles.  
Les travaux ont été réalisés en 6,5 mois et ont coûté 1,8 million d'euros TTC.  
On aurait pu craindre à long terme la rupture de la chape et "l'orniérage" du revêtement de chaussée au droit du joint. Avec un recul de 10 ans, on peut constater que cela n'a pas été le cas.

## ■ ÉLARGISSEMENT PAR L'EXTÉRIEUR PAR POUTRES B.P. ET ENTRETOISES MÉTAL ET SUPPORTAGE CONTINU DU HOURDIS EXISTANT (figure 4)

### L'ouvrage et la méthode utilisée

Le viaduc du Reyran situé sur l'autoroute A8 (Aix-Menton) concédée à la société des autoroutes Estérel - Provence - Côte d'Azur (Escota) comprend deux tabliers à trois travées indépendantes (32, 41, et 32 m de portée) et à poutres précontraintes. Transversalement, les entretoises et le hourdis sont précontraints.

Sa largeur utile devait être augmentée de 8,25 m (10,65 m de hourdis) à 13,50 m (figure 5).

L'ouvrage n'était pas réglementaire au sens de l'IP1 (traction en fibre inférieure de l'ordre de 56 à 88

bars selon les sections), mais aucun désordre n'a été constaté, tant lors des épreuves qu'en service. Compte tenu de l'absence de désordre, de la probabilité qui est apparue faible de surcharger l'ouvrage de camions de front, de la possibilité de soulager la poutre de rive extérieure lors de l'élargissement, compte tenu, encore, du coût de reconstruction (estimé à plus du double de celui de l'élargissement, sans compter le coût de déviation de l'autoroute), l'élargissement a été accepté à condition qu'il réduise les sollicitations dans les structures existantes.

La méthode imaginée par MM. Buffa et Guérard (Scetauroute) et M. Dallemagne (bureau d'études SDE - Sauvan Dallemagne Etudes) consiste à disposer, latéralement au tablier existant, un nouveau tablier composé de deux poutres précontraintes entretoisées et de plus grande raideur que celles des poutres existantes, puis à solidariser les parties existantes et nouvelles. Cette dernière opération est très complexe et se fait à plusieurs niveaux (figures 4 et 5) :

- ◆ appui par points "continu" longitudinal de l'about de l'encorbellement existant sur une des nouvelles poutres par des appareils en élastomère ponctuels fixés par boulonnage (pour éviter tout battement). Au-dessus de cette zone est disposé un joint de chaussée longitudinal souple type "viajoint";

- ◆ entretoisement vertical métallique en prolongation des cinq entretoises existantes et des cinq entretoises du tablier latéral. Cet entretoisement est précontraint dans son plan (photos 1, 2 et 3).

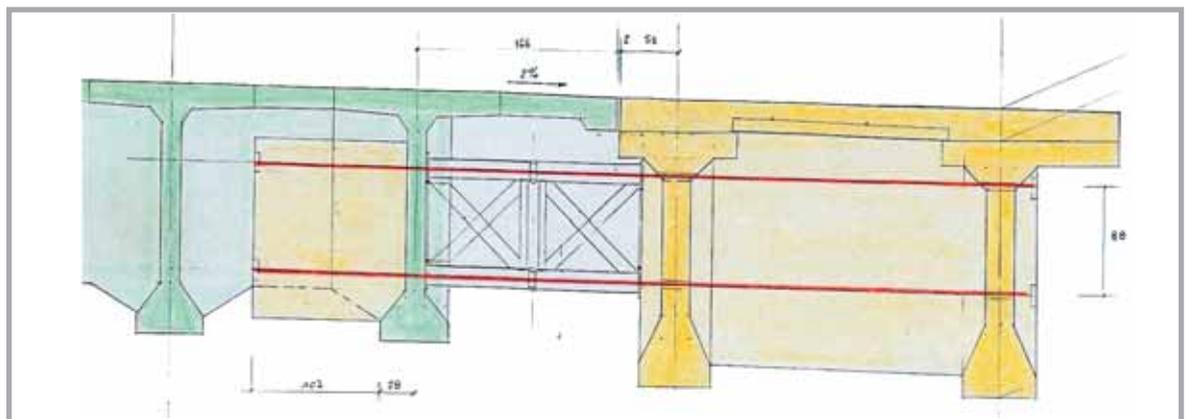
Pratiquement, l'entretoisement métallique est composé de deux treillis juxtaposés à membrures tubulaires dont les extrémités sont matées contre les âmes des poutres nouvelles et existantes. Pour faciliter leur mise en place et l'adaptation à la géométrie exacte du site, les tubes peuvent coulisser l'un dans l'autre avant soudage.

La précontrainte de l'entretoisement est réalisée par des barres courtes (Diwidag 32) disposées à l'intérieur des tubes, qui jouent ici le rôle de gaine. Elle est protégée par une injection à la cire pétrolière, puis ancrée dans l'about des nouvelles entretoises et dans des blochets fixés aux entretoises existantes par précontrainte.

Figure 4  
Vue perspective  
de l'ouvrage  
sur le Reyran  
*Perspective view  
of the structure  
over the Reyran*



Figure 5  
Coupe transversale  
*Cross section*



## Fonctionnement du système

### Les poutres rajoutées

Pour réduire les effets des déformations différentielles et notamment les flèches différentielles entre structures qui engendreraient des efforts importants, la précontrainte des poutres d'élargissement est mécaniquement centrée.

L'appui par points "continu" longitudinal de l'about de l'encorbellement réduit la flexion transversale du hourdis et autorise les déformations différentielles longitudinales entre structures.

Dans la mesure où les efforts de flexion d'ensemble sont repris par l'entretoisement, les flèches différentielles entre structures ne peuvent qu'être réduites. La flexion de l'encorbellement ancien est alors liée à l'effet local et transversal des surcharges. Le ferrailage existant en permet la reprise (notamment en moment positif) et des appuis en élastomère de petites dimensions (100 x 200) régulièrement espacés (2,85 m) sont suffisants. Des cales permettent le réglage fin de la platine d'appui (figure 6).

L'entretoisement métallique assure une reprise de la flexion transversale tout en autorisant les déformations différentielles longitudinales (6 mm attendu). La transmission de l'effort tranchant en about d'entretoisement métallique se fait par un système de platines en acier boulonné sur le moignon d'entretoisement à l'extérieur de la poutre existante. Le métal a été préféré au béton car il permet la réalisation d'un entretoisement plus souple suivant un axe vertical (liberté vis-à-vis des déformations différées longitudinales) et l'on pensait qu'il diminuerait les temps de coupure du trafic nécessaire pour assurer la prise du béton.

Retour d'expérience : fabrication, coûts, délai, comportement à long terme

Les intervenants sur ce chantier étaient :

- le maître d'œuvre : Scetauroute;
- l'entreprise : Sogéa;
- le bureau d'études d'exécution : SDE.

Les calculs réalisés ont montré que l'ouvrage existant était globalement moins sollicité après élargissement.

Les problèmes rencontrés lors de la réalisation sont les suivants :

- ◆ pertes de précontrainte des barres courtes plus fortes que prévu, (notamment par mise en tension successive des câbles des entretoises successives) nécessitant une re-tension;
- ◆ difficulté de mise en place des entretoises métalliques;
- ◆ nécessité de réaliser le soudage (12 passes) et le matage hors trafic de nuit.



Photo 1  
Liaison  
de l'entretoisement  
*Bracing link*

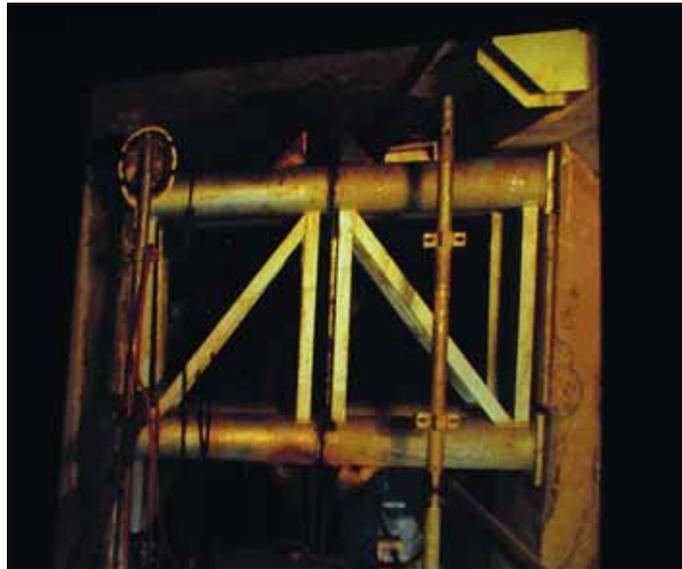


Photo 2  
Entretoise  
métallique  
*Metallic  
cross tie*

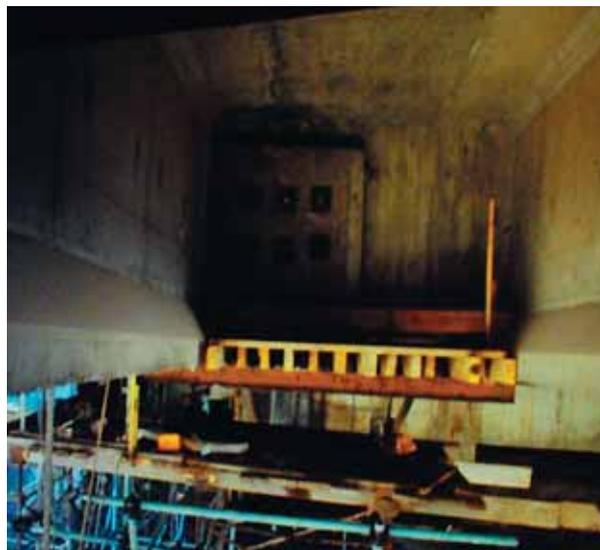


Photo 3  
Blochets d'ancrage  
côté existant  
*Anchoring struts  
at the existing  
structure end*

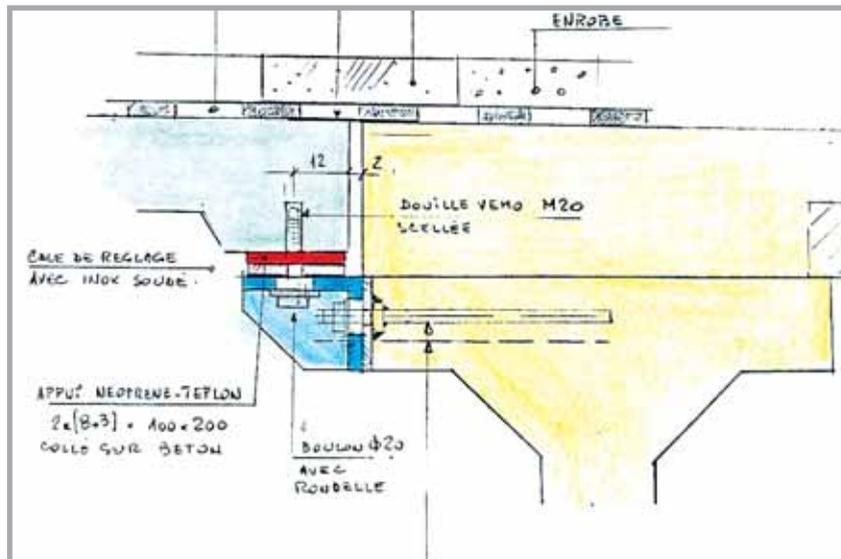


Figure 6  
Appuis ponctuels  
du hourdis existant  
sur poutre  
d'élargissement  
*Isolated supports  
for the existing deck  
section on widening  
structure beam*

Figure 7  
Vue perspective  
de l'ouvrage  
sur la Siagne  
*Perspective view  
of the structure  
over the Siagne*



Photo 4  
Entretoises existantes -  
Entretoise de liaison -  
Entretoises  
de l'élargissement  
*Existing cross ties -  
Link cross tie -  
Widening structure  
cross ties*



► Une instrumentation des membrures a permis de contrôler la mise en tension et de vérifier ultérieurement le comportement sous surcharges. Les épreuves ont permis de s'assurer du bon comportement. Le joint entre hourdis a été réalisé par un bitume-élastomère coulé en place. La solution élargissement était évaluée à l'APOA à 3 millions d'euros HT hors balisage, très largement inférieur au coût de reconstruction. Pour une surface ajoutée de 848 m<sup>2</sup> soit 3500 euros HT par m<sup>2</sup>. Après plus de 10 ans il n'a pas été noté d'anomalie de fonctionnement.

## ■ ÉLARGISSEMENT PAR L'EXTÉRIEUR PAR POUTRES B.P. ET ENTRETOISE BÉTON (figure 7)

### L'ouvrage et la méthode utilisée

Le viaduc de la Siagne est situé sur la même autoroute que le précédent et a été étudié en 1992 par MM. Buffa et Morand. C'est un ouvrage biais (74 grades) à trois travées

indépendantes (12, 40, et 12 m), seule la travée centrale est à poutres précontraintes. Sa largeur utile devait être augmentée de 8,50 m utiles (10,90 m de hourdis) à 13,00 m. Le trafic autorisant une coupure, les cinq entretoises métalliques du cas précédent sont remplacées par une entretoise en béton précontraint unique, placée à mi-portée et liant toutes les poutres (nouvelles et anciennes) (figure 7). Les abouts de hourdis (nouveau et ancien) sont simplement séparés par un joint sec.

### Fonctionnement du système

L'attelage transversal à mi-travée (photo 4) permet de réduire les flèches différentielles. Au quart de travée elles ne dépassent pas 1,4 mm, sous surcharges. Le fait qu'elle soit disposée seulement en milieu de travée n'entraîne théoriquement aucune sollicitation parasite sous l'effet du retrait et du fluage différentiels car il correspond à un point de déplacement longitudinal nul. Les poutres à talons ont été remplacées ici par des poutres rectangulaires pour simplifier les coffrages et disposer de plus de place pour disposer la précontrainte centrée.

### Retour d'expérience : fabrication, coûts, délai, comportement à long terme

Les intervenants sur ce chantier étaient :

- le maître d'œuvre : Scetauroute ;
- l'entreprise : Sogéa ;
- le bureau d'études d'exécution : SDE.

Les âmes des poutres de l'ouvrage existant sont préalablement carottées pour permettre la mise en place des câbles. Ceci n'a amené aucun problème particulier.

Le joint entre hourdis a été réalisé par un simple pontage des deux étanchéités (existant - élargissement), le béton bitumineux comprenant un "trait de scie" rempli de produit élastomère.

Le coût à l'APOA était de 2 millions d'euros TTC balisage soit 3035 euros TTC/m<sup>2</sup> élargi. Dix après, cet ouvrage n'a pas posé de problèmes particuliers.

## ■ ÉLARGISSEMENT PAR L'EXTÉRIEUR PAR CAISSON MIXTE (figure 8)

### L'ouvrage et la méthode

Les viaducs de l'Argens sont situés sur la même autoroute que les précédents. Ce sont trois ouvrages identiques, à deux tabliers, comprenant chacun trois travées indépendantes d'environ 32 m de

portée pour la travée centrale à quatre poutres entrecroisées uniquement sur appui. Les tabliers sont, d'origine, attelés sur piles.

Le hourdis est précontraint transversalement.

Leur largeur utile devait être augmentée de 13 m (14,60 m de hourdis) à 14,50 m.

Le recalcul de l'ouvrage conduisait à des tractions en fibre inférieure sous surcharges de 1,6 MPa, sous sollicitations fréquentes la section restant toutefois comprimée à vide.

L'élargissement a été accepté sous réserve de soulager la poutre de rive et à condition de vérifier l'ouvrage à chaque rechargement de chaussée.

La solution mise au point par MM. Buffa et Morand en 1994 consiste en un élargissement composé d'un caisson mixte latéral soutenant tous les 4 m la poutre de rive par des appuis ponctuels réglables (figures 8 et 9).

Des appuis dédoublés sur culée permettent de reprendre la torsion.

Il n'y a plus ici d'entrecroisement. Les hourdis de l'élargissement et celui de la poutre de rive ne sont pas liaisons.

La planéité des déplacements sous surcharges n'est pas assurée.

De façon à réduire les efforts dus au choc d'un véhicule sur la structure le dispositif de retenue en rive est une barrière BN5.

Retour d'expérience : fabrication, coûts, délai, comportement à long terme

Les intervenants sur ce chantier étaient :

- ◆ le maître d'œuvre : Scetauroute ;
- ◆ l'entreprise : Sogéa (génie civil) - Richard Ducros (caisson métallique) ;
- ◆ le bureau d'études d'exécution : SDE.

Le coût de l'élargissement s'est élevé à 6 700 euros par m<sup>2</sup> HT.

Neuf ans après, cet ouvrage n'a pas posé de problème particulier.

## ■ ÉLARGISSEMENT SIMULTANÉ DES RIVES PAR POUTRES MÉTAL

### Les ouvrages et la méthode

Il s'agit d'une série de six ponts situés sur le tronçon Lyon-Bollène de l'autoroute A7 (le Dolon, la Sanne, la Suzon, la Bancel, la Galaure, le Roubion) concédée à la société des Autoroutes du Sud de la France (ASF).

Chaque franchissement est composé de deux tabliers à travées indépendantes et poutres précontraintes d'une trentaine de mètres de portée construits en 1963.

Il s'agit d'augmenter la largeur roulable de 12,5 m



Figure 8  
Vue perspective des ouvrages sur l'Argens  
Perspective view of the structures over the Argens

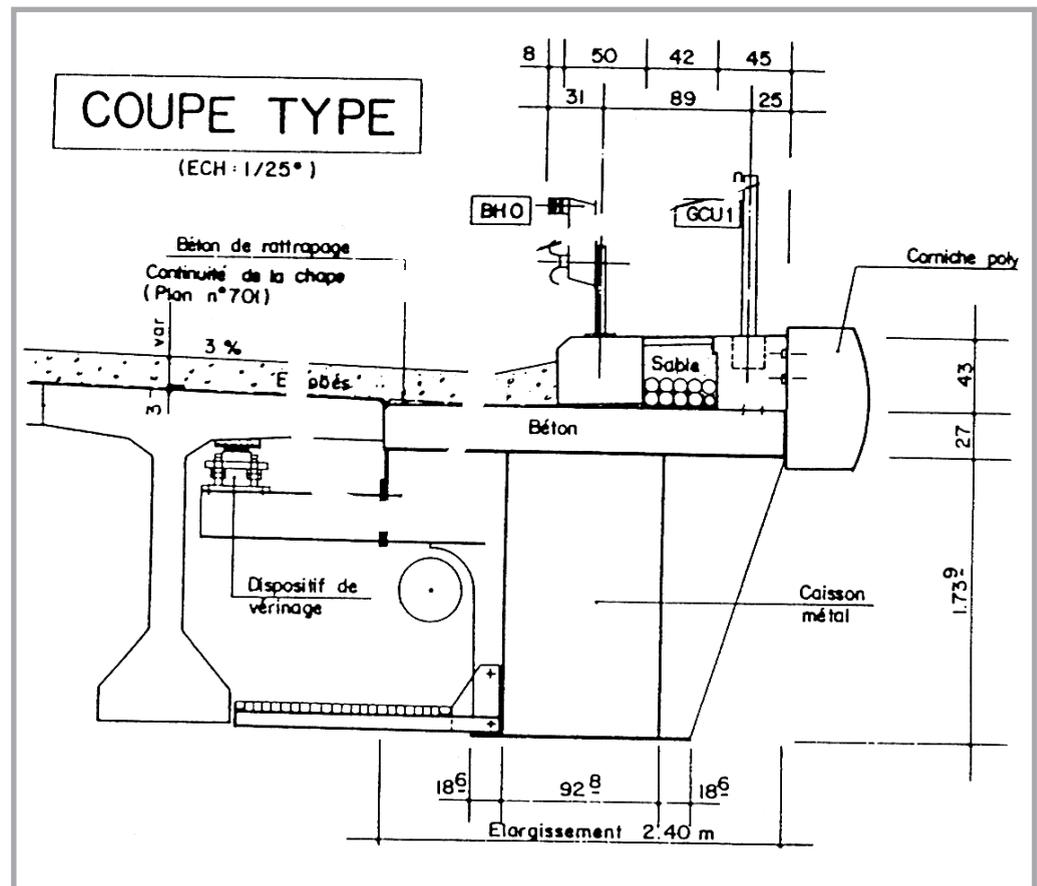


Figure 9  
Coupe transversale  
Cross section

à 14,2 m pour chaque sens, soit 1,70 m en vue de pouvoir exploiter l'autoroute en "2 + 2 et 0".

La solution imaginée par H. Rossignol (Scetauroute) consiste à déporter les dispositifs de retenue sur des poutres métalliques latérales liaisons au tablier existant par une précontrainte transversale (figure 10).

Ces poutres participent à la flexion générale du tablier. Côté terre plein-central, il s'agit d'un caisson fermé ; côté latéral, il s'agit d'une poutre simple inclinée.

Figure 10  
Coupe transversale  
montrant l'appui des poutres  
les unes sur les autres  
*Cross section showing the beams  
supported on one another*

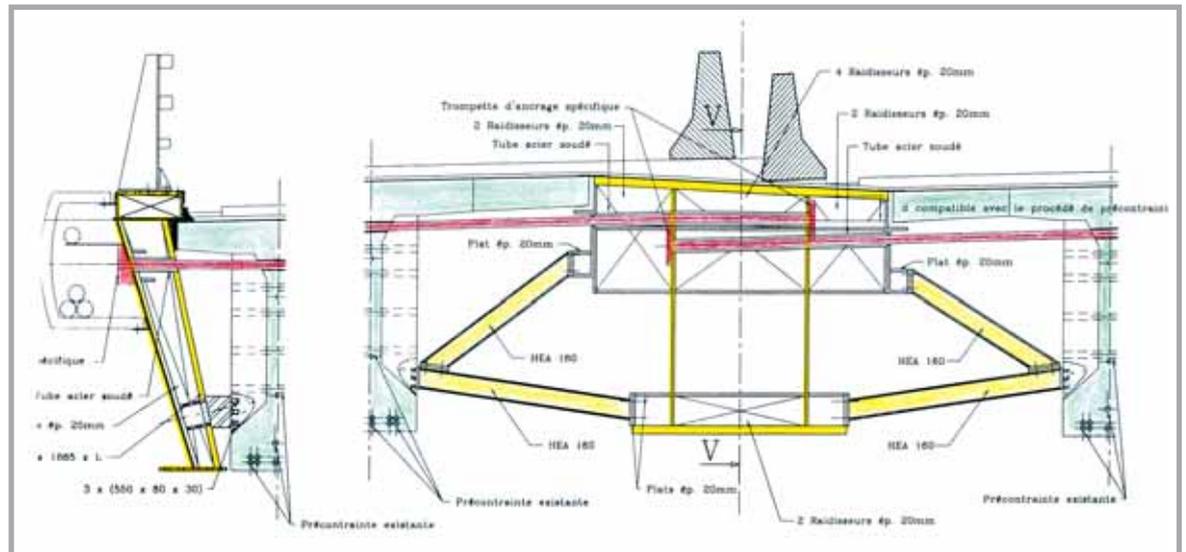


Photo 5  
Caisson en TPC  
et détail  
de son entretoisement  
*Box girder in central  
reserve and details  
of its bracing*



## Fonctionnement du système

Dans l'axe de l'ouvrage, le caisson métallique est entretoisé sur les deux tabliers à l'aide d'une précontrainte réalisée avec des barres courtes. Les poutres métalliques de rive sont liaisonnées aux tabliers existants par l'intermédiaire d'une précontrainte transversale (photo 5).

Cette précontrainte est sollicitée en cas de chocs sur le dispositif de retenue.

Les actions thermiques différentielles entre poutres métalliques et tablier béton ont été prises en compte. Une étude fine a permis de montrer que le gradient thermique dans la poutre métallique de rive était limité à 5°.

La résistance locale des talons des poutres de rive en flexion, sous l'effet d'une roue isolée a fait l'objet d'un examen approfondi car cette zone n'était initialement pas sollicitée.

## Retour d'expérience

Les intervenants sur ce chantier étaient :

- ◆ le maître d'œuvre : Scetauroute ;
- ◆ l'entreprise : GTM construction D.R. de Lyon ;
- ◆ le bureau d'études d'exécution : Ingerop.

La jonction de la poutre rajoutée avec la structure existante se produit au droit du caniveau, générant ainsi un point triple nécessitant un traitement très soigné.

Le coût du mètre carré rajouté est compris entre 1 700 et 1 900 euros HT.

## CONCLUSIONS

L'élargissement des ponts à poutres précontraintes constituait un véritable défi compte tenu des exigences auxquelles il devait répondre. Celui-ci a été

relevé avec succès à l'aide de techniques originales.

Du fait de l'importance du maintien de la circulation, les meilleurs techniques furent celles qui minimisaient les coupures du trafic pour les manutentions ou le coulage des bétons en place. A ce titre, les solutions avec poutres ou caissons métalliques se sont avérées les meilleures.

On pouvait craindre que l'architecture de ces ponts en béton soit altérée par des élargissements métalliques, mais ce ne fut pas le cas.

Après dix ans d'exploitation, on constate que les solutions proposées ont donné satisfaction.

## ABSTRACT

Widening prestressed-beam viaducts under motorway traffic : more than ten years' experience

*J. Morand, H. Rossignol, P. Trouillet*

As in most OECD countries, the geometric properties of the oldest sections of the 7 800 km of French motorway concessions have over the years become inadequate to cope with the flow of traffic and require enlargement of their underpasses, and especially viaducts with independent prestressed beam spans.

These structures are among the most heavily trafficked motorway sections (70,000 vehicles per day on average), and in some cases they have already carried more than 700 million tonnes of goods in less than 40 years.

Widening such structures was difficult, given the traffic volume (which requires that the work be sometimes spread out over more than a year), work conditions (by night, in winter, in very confined spaces, etc.), the nature of the structures (old, with longitudinal and transverse prestressing) and, finally, sometimes contradictory requirements to be met.

Given the stringency of these constraints, it was previously considered that these structures would not be widened.

Their demolition and reconstruction could not reasonably be considered because it would be uneconomic and disturb the traffic, and it is therefore a real challenge that had to be taken up.

This article describes in detail the innovative widening techniques, combining different materials, that have been used over the last ten years on the French concession motorway network, to meet this challenge.

## RESUMEN ESPAÑOL

Ampliar los viaductos de vigas pretensadas sin interrupción del tráfico rodado : más de 10 años de experiencias

*J. Morand, H. Rossignol y P. Trouillet*

Así como ocurre en la mayor parte de los países de la OCDE, las características geométricas de los más antiguos tramos de los 7 800 km de autopistas

en concesión francesas se han manifestado, con el transcurso de los años, insuficientes para hacer frente al tráfico rodado y, fundamentalmente, al tratarse de los viaductos de tramos independientes de vigas pretensadas. Estas estructuras se sitúan entre los tramos que soportan la mayor carga del tráfico (en promedio, 70 000 vehículos diarios) y, en ciertos casos, y para algunos de ellos, ya han transitado más de 700 millones de toneladas de mercancías en menos de 40 años.

Así, resultaba difícil ensanchar semejantes estructuras, habida cuenta de la importancia del tráfico rodado (que impone un escalonamiento de las obras que alcanzan más de un año en ciertos casos), así como condiciones impuestas de ejecución (nocturnas, invernales, en zonas muy limitadas...), del género de las estructuras (antigüedad, pretensados longitudinal y transversalmente) y, finalmente, ciertos requerimientos que, en algunos casos se deben tener debidamente en cuenta.

La severidad de estas imposiciones conducía hasta entonces a considerar estas estructuras como imposibles de ampliar.

Por consiguiente, su derribo y reconstrucción no se podía vislumbrar al no resultar económico y al ser también perturbador del tráfico rodado, constituyendo así un verdadero reto que se debía aceptar obligatoriamente.

Se describen con mayor detalle las técnicas innovadoras de ensanche, combinando diversos materiales, que se han utilizado durante estos diez últimos años, para responder a semejante reto.

Après plusieurs années d'abandon, le quai du río Tinto, déclaré Patrimoine culturel de la ville de Huelva (Espagne), reprend vie. Mais l'industrie des minerais a désormais cédé la place aux loisirs.

# Conservation du patrimoine

## Réhabilitation du quai et du pont de Floirac

### Un quai sauvé de la corrosion

Soumis à un environnement marin agressif, le quai menaçait de s'effondrer à plusieurs endroits

*Subjected to an aggressive marine environment, the quay was threatening to collapse in several places*



Le platelage a principalement été reconstitué au moyen d'elondo, à l'exception d'une petite partie en eucalyptus rouge

*The flooring was chiefly reconstructed using elondo, except for a small part in red eucalyptus*



Les dalles du plancher mesurent 0,20 m de large et 1,10 m de long, pour une épaisseur variant de 40 mm à 70 mm en fonction de leur emplacement

*The floor slabs measure 0.20 m wide and 1.10 m long, with a thickness ranging from 40 mm to 70 mm depending on their location*



Entre 1850 et 1870, l'Espagne est confrontée à une grave crise économique qui l'empêche d'effectuer les investissements nécessaires à une exploitation rentable des mines de pyrite du río Tinto près de Huelva. Dans une Europe alors en pleine révolution industrielle, les matières premières de la ceinture pyritique ibérique sont très convoitées. Elles constituent une alternative aux gisements de soufre siciliens mais aussi aux gisements de cuivre, or et argent africains et américains. La position géographique avantageuse et les coûts d'extraction relativement bas transforment les mines de Río Tinto en un objectif stratégique pour les investisseurs étrangers. Mais faute de moyens, l'Espagne ne peut supporter les investissements nécessaires à une exploitation rationnelle des mines qui passe, entre autres, par la construction d'une voie ferrée entre río Tinto et Huelva et d'un quai de déchargement sur la rive gauche de l'Odiel. En 1870, une loi autorisant la vente des mines est promulguée. Pour les investisseurs, la concession des mines implique aussi celle des terrains et de l'exploitation de la voie ferrée qui permet le transport des matériaux jusqu'à un embarcadère fluvial. C'est en 1873 que l'Espagne Républicaine naissante, occupée par les rébellions, le début des guerres Carlistes et par la guerre de Cuba, signe le contrat de vente d'une partie des mines à la Río Tinto Company Ltd.

#### ■ L'HÉRITAGE D'UNE ÉPOQUE

Associant bois, métal et remblais, le quai du río Tinto fait donc partie de l'histoire de Huelva et témoigne de l'expansion de l'activité minière en Andalousie à la fin du XIX<sup>e</sup> siècle. Conçu et construit en 1875 par l'ingénieur anglais George Barclay Bruce, l'ouvrage mesure 1 165 m de long en tout, et se situe, pour la moitié de sa longueur, dans l'estuaire du río Tinto offrant une zone d'appointement de 580 m de long. Il est mis en service en mars 1876. La construction, alors supervisée par Thomas Gibson, s'inspire des embarcadères de la Tyne qui étaient dotés d'un système de chargement du minerai par gravité. Outre la fonction du chargement de navire en minerais, le maître d'ouvrage

# de Rio Tinto (Espagne)

impose que le quai assure l'embarquement et le débarquement de passagers ainsi que le chargement et le déchargement de marchandises quelles qu'elles soient.

Le quai possède deux niveaux supérieurs, où circulaient les wagonnets, et un niveau inférieur réservé aux autres opérations. Les wagonnets étaient poussés par une locomotive jusqu'au point le plus haut d'où ils redescendaient par gravité jusqu'à l'extrémité du quai. Le minerai était ensuite déchargé dans les cales des navires amarrés le long du quai. Une des grandes particularités du projet résidait dans la solution technique apportée aux fondations. En effet, la longueur des piles-pieux fondées dans le sol, trop courte, ne permettait de supporter que le poids propre de la structure. Bruce et Gibson eurent donc recours à une solution révolutionnaire consistant à conserver des pieux de 10,50 m de long fondés dans le sol et à ajouter, à chaque massif de pieux, une plate-forme en bois reposant dans le lit du fleuve pour distribuer les charges vives. Nécessitant l'intervention d'un plongeur pour mettre en place le bois au fond du fleuve, la construction fut lente et pénible.

Pendant plus de 100 ans, l'ouvrage resta un haut lieu d'activité du port andalou, avant d'être abandonné en 1980.

## ■ DES TRAITEMENTS SUCCESSIFS

Soumise à un environnement marin agressif, la structure se dégrade et menace de s'effondrer. L'élargissement de la route en bordure de fleuve obligea, entre autres, à détruire le portique reliant les rampes de rive et la partie de structure située dans le fleuve, scindant ainsi le quai en deux tronçons.

En 1989, une campagne d'auscultation et d'essais sert de base à la rédaction et la planification des opérations de réhabilitation.

La municipalité engage la réhabilitation du quai, dont elle confie la supervision au bureau technique de la Société municipale des eaux de Huelva.

La première campagne de travaux a lieu en 1991. Elle consiste à démonter les plates-formes en bois, contenir l'effondrement et protéger contre la corrosion les niveaux 1 et 2 du tronçon de quai situé dans l'estuaire, remplacer les poutres métalliques du niveau inférieur et les recouvrir d'un platelage pour rétablir l'accès des piétons à ce niveau. Ces travaux sont réalisés entre 1991 et 1993.

En 2000, la société municipale des eaux de Huel-

va engage la réhabilitation du tronçon de rive (de 165 m de long), entre les portiques 1 et 16 de la structure métallique, la réfection des plates-formes des trois niveaux pour permettre la circulation piétonnière, la réalisation des rampes et l'aménagement des espaces destinés aux promeneurs et aux touristes.



**Autrefois maillon essentiel de l'activité minière de la région de Huelva, le quai du Rio Tinto qui vient d'être classé Patrimoine industriel a cédé la place aux loisirs**

*Formerly an essential link for the mining industry in the Huelva region, Río Tinto Quay, which was recently classified as part of the industrial heritage, has been converted for recreational use*



**Les poutres à claire-voies du niveau inférieur du quai étaient enterrées et se trouvaient, de fait, dans un état de corrosion très avancé**

*The lattice girders of the lower level of the quay were underground and were in fact in a very advanced state of corrosion*

En 2003, l'appel d'offres pour la troisième et ultime phase de réhabilitation du quai est lancé. Cette opération vise à rendre piétonniers les niveaux 1 et 2 et comprend la construction d'une passerelle entre les deux tronçons du quai, ainsi que l'aménagement des rives. Les phases successives de réhabilitation et modification du quai sont confiées à Freyssinet SA, la filiale espagnole de Freyssinet International (groupe VINCI). Cette relation de confiance réitérée par le bureau technique de la Société municipale des eaux de Huelva, témoigne de l'expertise technique et du savoir-faire de l'entreprise dans le domaine de la réparation.

Après rédaction du projet, la dernière phase des travaux démarre au début de l'été 2004. Point commun à toutes les interventions : l'architecture de l'embarcadère doit rester fidèle à l'ouvrage d'origine. Ainsi, bien que le platelage soit réalisé dans

**Tomas Palomares**

**DIRECTEUR**  
Freyssinet SA (Espagne)



**Patrick Ladret**

**DIRECTEUR TECHNIQUE**  
Freyssinet SA (Espagne)



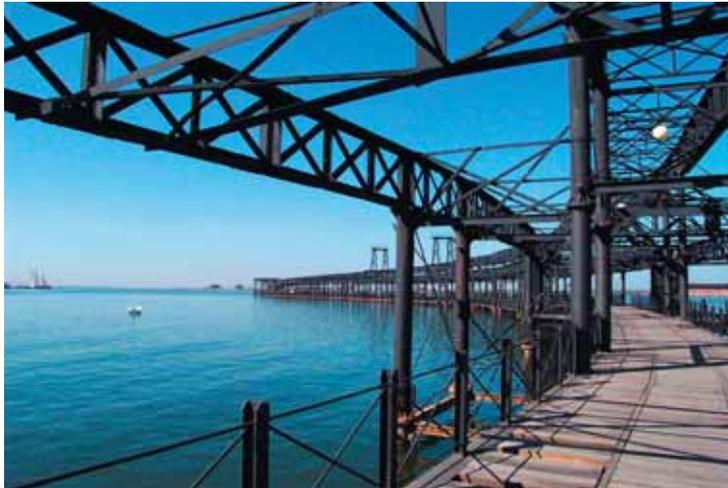
**Cesar López**

**INGÉNIEUR TP**  
Freyssinet SA (Espagne)



Freyssinet SA devait conserver au maximum les éléments d'origine du quai ou remplacer les pièces les plus endommagées par des répliques fidèles, rétablir à l'identique la géométrie des plates-formes sur lesquelles circulaient les wagonnets

*Freyssinet SA had to preserve insofar as possible the original components of the quay or replace the most severely damaged parts with faithful replicas, and restore the exact geometry of the platforms on which the mine cars travelled*



Les ultimes aménagements ont porté sur l'installation d'escaliers et d'accès pour personnes à mobilité réduite, la pose de vingt-deux lampadaires architecturaux, plantations, etc.

*The final developments concerned the installation of stairways and means of access for people with motor handicaps, the installation of twenty-two designer lamp posts, planting of flowers, etc.*



au niveau des zones de stagnation de l'eau, c'est-à-dire principalement sur l'aile supérieure et dans le patin inférieur des claires-voies, sont réparées. Puis les équipes Freyssinet s'attellent à la reconstruction à l'identique des plates-formes en bois. La structure en bois se compose d'une structure portante au moyen d'arbalétriers – poutres de petite taille ancrées dans l'aile supérieure du cintre métallique qui offrent à la traverse un soutien adéquat dans la zone de transmission des efforts – et d'un plancher. Les traverses, reposant sur les arbalétriers, permettent l'ancrage des solives du plancher sur lesquelles sont fixées les dalles du platelage. Mesurant 0,20 m de large et 1,10 m de long, les dalles ont une épaisseur variant de 40 mm à 70 mm en fonction de leur emplacement. Les bois utilisés sont l'elondo pour les solives et le plancher, à l'exception d'une petite partie en eucalyptus rouge. Les fixations pour l'entretoisement et les ancrages sont en acier inoxydable.

Après les ultimes aménagements – installation d'escaliers et d'accès pour personnes à mobilité réduite, pose de 22 lampadaires architecturaux, plantations, etc. –, Freyssinet SA a cédé la place aux curieux et aux promeneurs.



► deux directions avec une dominante transversale pour la descente de charges, sur poutre, un longeron d'eucalyptus symbolise les rails aujourd'hui disparus.

## ■ UN BAIN DE JOUVENCE

Les travaux commencent par la dépose de toutes les parties irrécupérables de la structure. Ainsi, la structure en bois qui composait les plates-formes de circulation des wagonnets et qui menaçait de s'effondrer est démolie. Pour rendre praticables les plates-formes de circulation des wagonnets, les poutres à claires-voies du niveau inférieur – qui étaient enterrées et se trouvaient de fait dans un état de corrosion très avancé – sont remplacées par de nouvelles poutres, parfaites répliques des originales, avec imitation du rivetage. L'intervention se poursuit par la passivation des aciers qui sont traités par grenailage, et application d'une première couche de peinture époxy riche en zinc, de couches intermédiaires et de finition. Les parties oxydées des profilés métalliques sont reconstituées et les parties les plus endommagées

### LES PRINCIPAUX INTERVENANTS

#### *Maître d'ouvrage*

Mairie de Huelva - Entreprise municipale des Eaux de Huelva SA

#### *Maître d'œuvre*

Mairie de Huelva - Société municipale des Eaux de Huelva SA, sous la direction de D. Joaquin Barba Quintero

#### *Entreprise générale*

Freyssinet SA

### LES PRINCIPALES QUANTITÉS

- Acier utilisé pour la construction des répliques des claires-voies au niveau 0 : 143 100 kg
- Acier utilisé pour la réparation de la structure originale : 60 000 kg
- Longueur de la rambarde du quai : 1 910 ml
- Surface de la structure métallique traitée : 7 800 m<sup>2</sup>
- Elondo utilisé pour les solives et le plancher : 300 m<sup>3</sup>
- Volume d'excavation : 10 000 m<sup>3</sup>
- Surface du revêtement en pierres calcaires du Portugal : 2 990 m<sup>2</sup>
- Surface du gazon sur la partie droite : 1 820 m<sup>2</sup>

# La reconstruction du pont Miret à Floirac (France)

## Un ouvrage presque centenaire

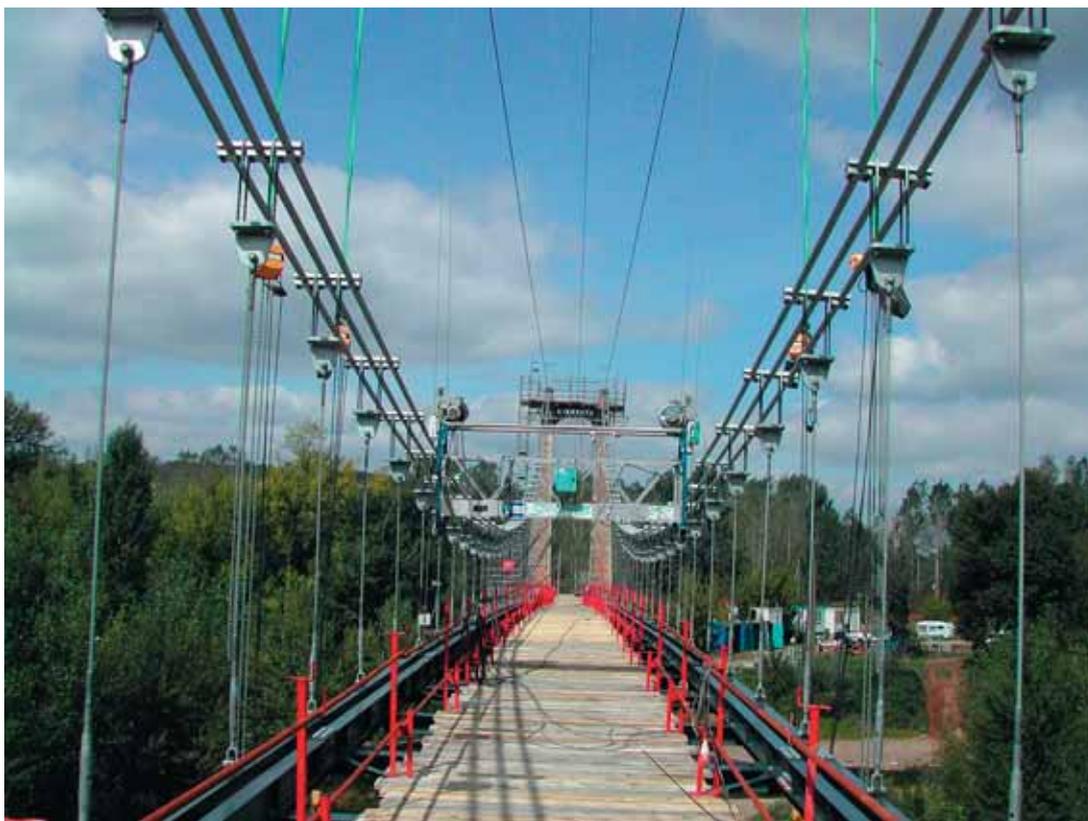
Christian Schmitt

INGÉNIEUR COMMERCIAL  
Freyssinet



Eric de Pablo

CONDUCTEUR  
DE TRAVAUX  
Freyssinet



Spécialiste de la réparation de ponts suspendus, Freyssinet a mis au point une méthode s'inspirant du blondin pour manutentionner les charges lourdes sur de grandes portées

*A specialist in the repair of suspension bridges, Freyssinet has developed a method based on the cableway for handling heavy loads over large span lengths*

### LES PRINCIPALES QUANTITÉS

#### Métal (80 t)

- Tablier : 60 t
- Trottoirs : 13 t
- Garde-corps : 3 t
- Appuis : 4 t

#### Câbles (35 t)

- 6 câbles porteurs de 64 mm
- 8 câbles de retenue de 43,2 mm
- 24 haubans de 31,7 mm
- 72 suspentes de 20 mm
- 2 câbles poutres garde-corps de 31,7 mm
- 4 câbles poutres garde-corps de 20 mm

© Francis Vigouroux - Photothèque Freyssinet

Construit en 1912, le pont Miret, qui franchit la Dordogne à Floirac (Lot), est un ouvrage suspendu, composé d'une travée métallique de 140 m de portée et de deux doubles pylônes maçonnés atteignant 17 m. Le tablier, large de 4,40 m, comporte une chaussée de 2,20 m et deux trottoirs de 0,65 m. N'ayant pas traversé le temps sans dommages, cet ouvrage répondait de moins en moins aux normes en vigueur. Sa capacité de charge ne dépassait pas 1,5 t, et en fonction des conditions climatiques, l'ouvrage était fermé à la circulation. Une cure de rajeunissement s'imposait donc, et même de renforcement puisque le Conseil général du Lot souhaitait porter la capacité du pont à 3,5 t. Intervenant comme entreprise générale, Freyssinet France a proposé une solution variante pour remplacer le tablier et la suspension de l'ouvrage.

#### Photo 2

Les principaux travaux réalisés sur l'ouvrage ont concerné le changement de pièces endommagées et le réglage des suspensions

*The main work performed on the structure concerned the replacement of damaged parts and adjustment of the suspension systems*



© Francis Vigouroux - Photothèque Freyssinet

### ■ MISE EN ŒUVRE

En février 2003, le chantier a d'abord consisté à réaménager et à renforcer les massifs d'ancrage

© Francis Vigouroux - Photothèque Freyssinet



**Vue horizontale de l'ouvrage terminé**

*Horizontal view of the completed structure*



existants à l'aide de tirants d'ancrage et à remplacer les dispositifs d'appui. Puis Freyssinet s'est attaqué au démontage et au remplacement de l'intégralité du tablier et de la suspension. Belle occasion d'utiliser la méthode du "câble outil" un procédé tout nouveau mis au point par les ingé-



© Francis Vigouroux - Photothèque Freyssinet

**La réhabilitation prévoyait la conservation des pylônes d'origine en maçonnerie, hauts de 17 m**

*The renovation plan provided for preservation of the original masonry towers, 17 metres high*

nieurs de Freyssinet et récompensé lors des prix de l'Innovation VINCI 2003 (cf. encadré).

Supportés par les pylônes existants, les câbles de travail, provisoires, sont fixés sur les massifs d'ancrage et reçoivent un chariot de manutention à l'aide duquel sont déposés un à un les éléments du

## LE CÂBLE OUTIL : UNE MÉTHODE DE CONSTRUCTION ÉCONOMIQUE POUR OUVRAGES PIÉTONS OU ROUTIERS

### *Description*

L'innovation consiste à mettre en œuvre un câble outil comprenant : deux câbles outils ancrés sur chaque rive, suspendus au-dessus du futur pont par deux béquilles provisoires ; deux portiques mobiles équipés chacun de deux outils de levage et de descente ; des dispositifs de déviation fixés sur des pylônes définitifs. Le tablier métallique est monté par moitié sur chaque rive et lancé comme un téléphérique. Il est ensuite câblé comme un pont suspendu classique avant démontage de l'outil.

### *Intérêts majeurs*

Le système du câble outil s'est révélé très efficace dans la construction de deux ouvrages (passerelle de 110 m de portée à Laroin près de Pau et pont Miret à Floirac ainsi que pour la déconstruction du pont suspendu de Livinhac avec une portée de 100 m). Le système de suspension sert tout d'abord à toutes les manutentions ; il permet également de régler la géométrie définitive du tablier.

Le coût relativement faible et la possibilité de réemploi positionnent favorablement Freyssinet sur le marché en plein essor des passerelles de longue portée.

**Détail des câbles de suspension et de suspentes**  
*Detail of suspension cables and suspenders*



© Francis Vigouroux - Photothèque Freyssinet



La capacité de charge ayant été portée à 3,5 t, l'ouvrage a été rouvert à la circulation

*The loading capacity having been increased to 3.5 tonnes, the structure was reopened to traffic*

tablier métallique. Après la phase démontage, le même appareillage est utilisé pour transporter les éléments du nouveau tablier avant qu'ils ne soient fixés définitivement à la nouvelle suspension. Cette solution permet aussi le réglage géométrique définitif du tablier avant l'accrochage des suspentes et la pose du tablier. Les travaux se sont achevés par la mise en place des trottoirs, des platelages bois et des garde-corps avant de procéder au réglage définitif de la suspension et aux essais de charge.

Remis à neuf avec deux mois d'avance sur le calendrier, le pont Miret a pu être inauguré et rouvert fin décembre 2003.

## LES PRINCIPAUX INTERVENANTS

### *Maître d'ouvrage*

Conseil général du Lot

### *Maître d'œuvre*

DDE 46 CDOA

### *Entreprise générale*

Freyssinet

### *Bureau d'études*

Ingérop

### *Sous-traitants*

- GTS (fondations spéciales)
- Capraro (génie civil)

## ABSTRACT

Preservation of the cultural heritage. Renovation of Rio Tinto Quay and Floirac Bridge

*T. Palomares, P. Ladret, C. Lopez, Ch. Schmitt, E. de Pablo*

Freyssinet (subsidiary of Vinci Construction) performs work to improve and extend the life of structures for all types of applications (communal, industrial and commercial infrastructure, high-rise buildings and historic monuments). Always taking an overall view of the structures, including their design, Freyssinet provides its customers with a complete range of repair solutions, either innovative or tried and tested on numerous projects. This know-how is illustrated by a great variety of projects performed, such as the renovation of Rio Tinto Quay in Spain and Floirac Bridge in France.

## RESUMEN ESPAÑOL

Conservación del patrimonio. Rehabilitación del muelle de Río Tinto y del puente de Floirac

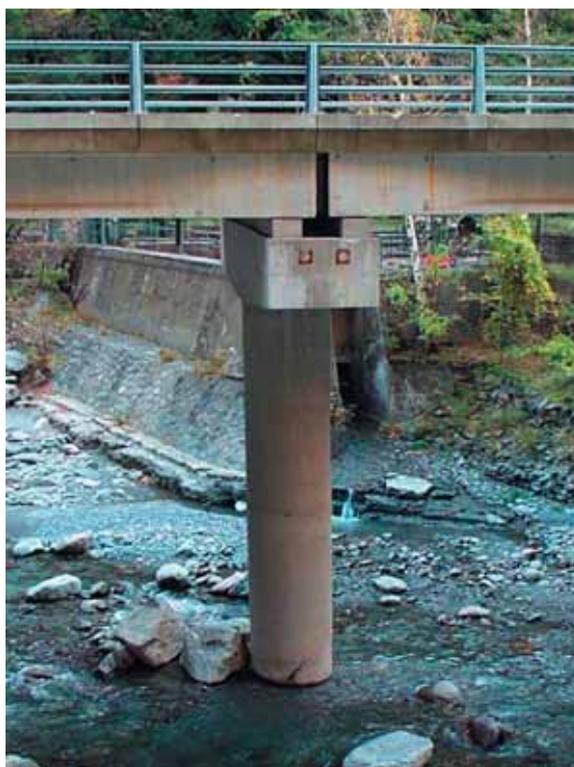
*T. Palomares, P. Ladret, C. Lopez, Ch. Schmitt y E. de Pablo*

Freyssinet (filial de Vinci Construcción) interviene para mejorar y perennizar las estructuras que permiten responder a toda clase de aplicaciones (infraestructuras colectivas, industriales, comerciales, inmuebles de gran altura y monumentos históricos). Al proceder siempre a una visión global de las estructuras, e inclusive de su propio concepto, Freyssinet pone a la disposición de su clientela un conjunto completo de soluciones innovadoras de reparación o sometidas a prueba en numerosas obras. Una pericia y experiencia práctica que se ilustra por referencias sumamente diversas, así como ocurre con la rehabilitación del muelle de Río Tinto, en España, o del puente de Floirac, en Francia.

# Deux restaurations d'ouvrages de BSI®-Ceracem

Les ouvrages en montagne sont soumis de façon cyclique à des conditions particulièrement sévères pour le béton : chocs de pierres, gel-dégel, usure... Ils sont souvent constitués d'une structure en béton armée que l'on protège par des éléments rapportés (béton d'usure, revêtement d'étanchéité, écran de protection) afin de leur conférer une pérennité minimum.

Deux chantiers réalisés avec un béton fibré ultra-performant, le BSI®-Ceracem, ont permis de montrer qu'il était possible de réaliser des structures capables, seules, de résister à ces agressions (photo 1).



**Photo 1**  
Pile du viaduc de Valabres soumise aux chocs de blocs rocheux  
*Pier of the Valabres viaduct subjected to impacts by blocks of rock*

**Photo 2**  
Préparation du support  
*Preparing the substrate*



Dans les deux cas présentés ci-après le choix du matériau pour la réalisation du confortement et de la réparation des ouvrages, s'est porté sur le BSI®-Ceracem, le BFUP du groupe Eiffage, les caractéristiques mécaniques et physiques de ce béton fibré à ultra hautes performances étant particulièrement bien adaptées aux conditions extrêmes que rencontrent les ouvrages situés en altitude.

Les caractéristiques du matériau, requises pour ce type d'intervention sont :

- ◆ forte résistance à la compression ;
- ◆ matrice compacte à pores fermés (béton étanche) ;
- ◆ résistance élevée au cycle gel-dégel ;
- ◆ résistance importante aux chocs (par le principe de fibrage) ;
- ◆ résistance importante à l'abrasion (indice CNR = 0,80).

**Photo 3**  
Protection achevée  
*Protection completed*



# de montagne par l'utilisation

**Bertrand Monod**  
CHEF DE LA SUBDIVISION OUVRAGES  
D'ART  
Conseil Général Alpes-Maritimes

**Arnaud de Meyrignac**  
CHEF DE DIVISION  
DES INFRASTRUCTURES A43  
SFTRF

**Franck Aluni-Pierelli**  
CONDUCTEUR DE TRAVAUX  
Eiffage TP

**Alain Champenois**  
CONDUCTEUR DE TRAVAUX  
Eiffage TP

**René-Gérard Salé**  
DIRECTEUR COMMERCIAL BSI  
Eiffage TP

## ■ VIADUC DE VALABRES

### Pathologie

Une des piles du viaduc de Valabres est située dans le lit mineur du torrent, la Tinée. Le fût de cette pile ainsi que l'arase supérieure de sa semelle étaient particulièrement érodés sous l'action conjuguée des chocs de pierres de fort calibre et de l'abrasion des galets en suspension dans l'eau lors des fréquentes crues du torrent.

Les aciers de pile et de semelle étaient à nu et la réduction de section de la pile était sensible. Une protection pérenne et de faible épaisseur sans augmenter l'importance de l'obstacle était donc requise pour remettre en conformité cet ouvrage.

### Principe de réparation

(photos 2 et 3)

- 1) Décapage par eau sous pression du fût de pile et de la semelle (amélioration de l'adhérence entre les deux bétons).
- 2) Mise en place de connecteurs anti-vibratoires sur ces deux éléments pour éviter tout décollement du BFUP avec le béton d'origine.
- 3) Mise en place d'un coffrage métallique et coulage d'une première levée de 2,00 m (jour j) (deux joints verticaux sont insérés pour ne pas bloquer les effets de retrait).

- 4) Mise en place d'un second coffrage métallique, puis seconde levée de 2,00 m (jour j + 1).
- 5) Coulage du renforcement de la semelle.

Les épaisseurs respectives mises en œuvre sont de 10 cm pour le chemisage et de 5 cm pour le dessus de la semelle. Les gâchées de BSI®-Cera-cem ont été confectionnées avec le malaxeur de la centrale BPE locale.

## ■ CANAL DE SAINT-JULIEN-MONT-DENIS

### Pathologie

Les chocs de pierres ainsi que l'abrasion dus à l'écoulement de l'eau ont détruit le béton constituant le nez de chute de cet ouvrage sur plus de 25 cm d'épaisseur et les armatures ont été mises à nu. Un béton pérenne a donc été choisi pour répondre aux diverses causes de destruction et par son étanchéité pour protéger les armatures existantes (photo 4).

### Principe de réparation

- 1) Reconstitution du nez, après décapage à l'eau sous pression, avec conservation des armatures passives.
- 2) Malaxage et coulage du BSI®-Cera-cem directement sur la zone considérée.
- 3) Remise en service à j + 2.

L'intérêt de cette réparation réside, outre les performances de la matière, dans la possibilité de couler in situ un béton fibré à ultra hautes performances (photo 5), en lui conservant toutes ses performances mécaniques et en permettant un décoffrage dès le lendemain.



Photo 5  
Bétonnage  
Concreting



Photo 4  
Eau chargée s'écoulant  
dans le canal  
Contaminated water  
flowing out in the canal



Photo 6  
Installation  
à pied d'œuvre  
Installation  
on site

Le malaxeur, les sacs de prémix (prémélange industriel des composants secs sous contrôle qualité), l'adjuvant et les fibres constituant le BSI®-Cera-cem ont été amenés à pied d'œuvre, dans le fond du torrent (photo 6).



Photo 7  
Canal remis en service  
*Canal restored to operation*

## CONCLUSION

L'emploi du BSI®-Ceracem pour la restauration d'ouvrages en montagne permet de répondre aux spécificités particulières qui les caractérisent, tant au niveau des performances du matériau auxquelles elles font appel, qu'au niveau des délais d'intervention qui sont très courts (photo 7).

### LES PRINCIPAUX INTERVENANTS

#### > Viaduc de Valabres

*Maître d'ouvrage*  
Conseil Général Alpes Maritimes

*Bureau de contrôle*  
CETE de Nice

*Bureau d'études*  
Eiffage TP - STOA

*Entreprise*  
Eiffage TP

#### > Canal de Saint-Julien-Mont-Denis

*Maître d'ouvrage*  
SFTRF

*Entreprise*  
Eiffage TP

### ABSTRACT

Two projects for restoration of civil engineering structures in mountainous areas through the use of BSI®-Ceracem

*B. Monod, A. de Meyrignac,  
Fr. Aluni-Pierelli, A. Champenois,  
R.-G. Salé*

Civil engineering structures in mountainous regions are subjected in cyclic fashion to extremely severe conditions for concrete : stone impacts, freezing-thawing, wear, etc. They often consist of a reinforced concrete structure that is protected by added-on components (wearing concrete, waterproof coating, protective shield) to provide them with a minimum of permanence.

Two projects performed with an ultra-high-performance fibrous concrete, BSI®-Ceracem, showed that it was possible to build structures capable, by themselves, of resisting such aggression (photo 1).

### RESUMEN ESPAÑOL

Dos restauraciones de estructuras de montaña mediante la aplicación de BSI®-Ceracem

*B. Monod, A. de Meyrignac,  
Fr. Aluni-Pierelli, A. Champenois  
y R.-G. Salé*

Las estructuras ubicadas en montaña se ven sometidas de forma cíclica a condiciones particularmente rudas para el hormigón : impactos de piedras, formación de hielo y deshielo consecutivo, desgaste, etc. Estas estructuras están formadas frecuentemente por una protección de hormigón armado que, a su vez se protegen por elementos superpuestos (hormigón de desgaste, revestimientos de impermeabilización, pantallas de protección), con objeto de conseguir una duración mínima. Se han ejecutado dos obras con empleo de un hormigón cargado de fibras, de características mejoradas, el BSI®-Ceracem, que han permitido demostrar la posibilidad de obtener estructuras capaces, por sí solas, de resistir a semejantes agresiones (fotografía 1).

# L'église Saint-Joseph du Havre

## Un exemple de restauration à l'identique

Modèle du concept architectural cher à Auguste Perret, l'église Saint-Joseph du Havre a subi de nombreuses dégradations au fil des ans. Soucieuse de préserver son patrimoine architectural, la ville du Havre a donc décidé de restaurer cet édifice.

Elle a fait appel à l'entreprise Lanfry qui a choisi une solution technique innovante de réparation des bétons à l'identique. Celle-ci associe l'expertise du plasticien du béton, Jean-Pierre Aury, aux produits Sika (mortiers de réparation, inhibiteur de corrosion, hydrofuge...).

La reconstruction de l'église de Saint-Joseph du Havre, détruite par les bombardements de 1944, fut confiée en 1951 à Auguste Perret, le père de l'architecture moderne.

Celui-ci a entrepris les travaux de 1951 à 1957, en s'appuyant sur un projet de 1926 et sur les principes qui ont fait de lui, l'architecte du béton armé apparent.

Cette église aux lignes sobres, surmontée d'un clocher octogonal fut entièrement réalisée en béton. L'intérieur de plan carré, est une réalisation dont l'effet est saisissant! Quatre groupes de quatre piliers supportent la base du clocher qui forme une tour lanterne octogonale d'une hauteur de 84 m. Les claustras garnis de vitraux multicolores, dus au talent de Marguerite Huré, éclairent le volume intérieur.

Cet édifice s'intègre harmonieusement dans l'ensemble de la nouvelle ville et apparaît en premier, pour qui navigue dans la baie de Seine ou la rade du Havre.

Véritable modèle d'architecture, l'église Saint-Joseph du Havre a subi de nombreuses dégradations au fil des années. Les bétons ont été abîmés, éclatés, soufflés...

La ville du Havre très attachée à son patrimoine architectural a donc décidé de restaurer à l'identique son église.

### TECHNIQUES DE RESTAURATION

La réfection de l'église a été réalisée en trois phases : repérer les parties endommagées, les réparer et les protéger à l'aide d'un traitement préventif.

Dans un premier temps, un hydro-gommage fut réalisé sur toutes les surfaces en béton (soit 12 350 m<sup>2</sup> de béton). Un sondage des façades a permis de déceler les fissures. Le béton a ensuite été dépiqueté sur les zones dégradées, et les aciers mis à nu par broissage.

Les éclats de bétons répertoriés et optimisés re-



présentent environ 120 m<sup>2</sup> de surface sur environ 4 cm d'épaisseur.

Pour finir, ces armatures sont protégées par un revêtement anticorrosion, le Sika Monotop 610 AC. Après avoir dégagé les parties à réparer, et les avoir protégées de la corrosion, les travaux de restauration proprement dits ont débuté.

Ces réparations vont être effectuées grâce à l'association de deux mortiers : un mortier hydraulique et un micro-béton.

Pour commencer, un mortier hydraulique prédosé, renforcé par des fibres synthétiques, le Sikatop 122 F est appliqué sur les zones dégradées.

Caractérisé par de très hautes résistances mécaniques, une excellente adhérence sur le support et une limitation des effets de retrait, ce mortier fait également office de couche d'accrochage pour le

Allain Legros



RESPONSABLE  
GRANDS COMPTES -  
PRESCRIPTEUR  
Sika France SA



Vue générale de l'église  
Saint-Joseph au Havre  
*General view of Saint-Joseph church  
in Le Havre*

Vue d'ensemble  
de l'église avant réparation  
*General view of the church  
prior to repairs*

Détails  
des dégradations  
*Concrete splinters*



Détails dégradations éclats de béton  
*Details of damage, concrete splinters*

Application hydrofuge  
de surface Conservado SP  
*Application of Conservado SP  
surface water-repellent*



► micro-béton esthétique. Le Sikatop 122 F est appliqué par zone de 2 à 3 cm d'épaisseur avec un léger décaissage.

Les bétons de l'église Saint-Joseph du Havre présentent de nombreuses particularités de colorations et de granulométries dont il a fallu tenir compte dans l'élaboration du micro-béton.

Jean-Pierre Aury, plasticien du béton, est intervenu afin d'étudier les nombreux coloris et retrouver les granulats utilisés à l'époque. Le responsable du chantier, avec sa collaboration, a donc élaboré des échantillons par des mélanges précis et dosés au gramme près, de pigments d'ocre ton pierre et noir, et de différents granulats.

Ces échantillons ont ensuite été comparés aux zones à restaurer, afin d'appliquer un mortier de réparation parfaitement identique à celui d'origine. Mais les particularités de cet édifice ne s'arrêtent pas là ! Il possède également de nombreuses marques de planches visibles sur les aplats de béton ainsi que des dalles de gravillons lavés.

Pour reproduire la trace du coffrage d'origine le mortier de finition a donc été appliqué, selon les cas, à la taloche, à l'éponge, ou au moyen d'une planche de bois. Et, deux sortes de dalles de gravillons lavés ont été utilisées pour remplacer celles d'origine : des dalles faites de gravillons de carrière à angle vif, et des dalles de rivière dont chaque élément est arrondi et poli.

Ces réparations terminées, l'édifice a été recouvert de produits de protection. Le fût, partie haute de l'église (6 800 m<sup>2</sup>) est protégé par du Sika Ferrogard 903, un inhibiteur de corrosion, qui migre dans

## PRODUITS ET QUANTITÉS UTILISÉS

- Conservado SP : hydrofuge de façade à haut pouvoir protecteur – 7 600 l
- Sika Ferrogard 903 : imprégnation inhibitrice de corrosion pour béton armé (traitement préventif anticorrosion des armatures du béton) – 3 100 kg
- Sika Monotop 610 AC : revêtement anticorrosion pour la protection des armatures en béton (opération de passivation des fers apparents avant recouvrement par mortier de réparation) – 100 kg
- Sikatop 122F réparation : mortier hydraulique prédosé renforcé par des fibres synthétiques – 3 000 kg
- Sikatop 121 surfaçage : mortier hydraulique prédosé à hautes performances pour surfaçage millimétrique – 80 kg
- Sikalutex : résine synthétique pour l'amélioration de l'adhérence des mortiers – 10 l
- Sikaflex Pro 2 HP : mastic polyuréthane à bas module d'élasticité pour joints de façade – 450 unités
- Silygutt bâtiment C Trans : mastic silicone pour l'étanchéité des verres extérieurs de protection des vitraux – 600 unités
- Micro béton : formulation Jean-Pierre Aury : 15 m<sup>3</sup>



**Application inhibiteur Sika Ferrogard 903**  
**Application of Sika Ferrogard 903 inhibitor**

le béton pour se fixer sur la surface des aciers, et permet de retarder l'apparition de phénomènes de corrosion, prolongeant ainsi la durée de vie de l'ouvrage.

Ensuite, cette partie haute ainsi que la partie basse sont protégées par du Sika Conservado SP, un hydrofuge de façade incolore à haut pouvoir protecteur. Il améliorera ainsi la résistance aux salissures et diminuera l'accrochage des mousses et lichens.

## ■ RESTAURATION ET AUTHENTICITÉ

Le procédé, mis au point par Jean-Pierre Aury et Sika, est une solution de réparation à l'identique qui préserve l'aspect originel du béton et respecte ainsi l'esprit de l'œuvre architecturale. Cette association de compétences a déjà été appliquée avec succès sur plusieurs ouvrages comme le théâtre des Arts de Rouen, la Cité de la Mer de Cherbourg, la Cité Universitaire de Paris...

L'église Saint-Joseph du Havre est un exemple supplémentaire de l'intérêt de ce procédé qui participe à la démarche de restauration du patrimoine architectural.

### LES PRINCIPAUX INTERVENANTS

*Maître d'ouvrage*

Ville du Havre

*Maître d'œuvre*

François Mirc, architecte (Bois Guillaume, 76)

*Entreprise*

Georges Lanfry (Déville-Lès-Rouen, 76)

*Plasticien du béton*

Jean-Pierre Aury (Colonard, 61)

*Prescripteur et fournisseur des produits*

Sika France SA (Le Bourget, 93)

### ABSTRACT

Saint-Joseph du Havre church. An example of restoration to the original condition

A. Legros

**A model of the architectural concept dear to Auguste Perret, Saint-Joseph du Havre church has sustained much damage over the years. Anxious to preserve its architectural heritage, the city of Le Havre therefore decided to restore the building.**

**It selected the company Lanfry which chose an innovative repair technique to restore the concrete to its original condition. This technique combines the expertise of the concrete plastic surgeon, Jean-Pierre Aury, with Sika products (repair mortars, corrosion inhibitor, water-repellent, etc.).**

### RESUMEN ESPAÑOL

La iglesia de Saint Joseph, en Le Havre. Un ejemplo de restauración de forma idéntica

A. Legros

**Modelo de un concepto arquitectónico, siempre preferido por Auguste Perret, la iglesia de Saint Joseph, en Le Havre, ha sido objeto de numerosas degradaciones con el paso de los años. Por consiguiente y con objeto de preservar su patrimonio arquitectónico, la villa de Le Havre ha tomado la decisión de restaurar este edificio.**

**Para tal menester, se ha recurrido a la empresa Lanfry, que ha elegido una solución técnica innovadora de reparación de los hormigones según su forma idéntica inicial. Esta empresa se ha asociado a la pericia del especialista del estado plástico del hormigón, Jean-Pierre Aury, conjuntamente con los productos Silka (morteros de reparación, inhibidor de corrosión, empleo como hidrófugo, etc.).**

# Rénovation du musée d'Albi

Dans le cadre des travaux de restructuration du palais de la Berbie à Albi, monument historique qui abrite le musée Toulouse-Lautrec, le groupement Solétanche Bachy - Demathieu et Bard a réalisé des travaux d'infrastructures et de réhabilitation en reprise en sous-œuvre faisant appel à des méthodes de soutènement particulières : pieux sécants et paroi berlinoise avec micropieux, calculés à l'aide du programme PARIS et exécutés selon la méthode observationnelle.

L'ancien palais épiscopal de la Berbie (déformation de l'occitan Bisbia qui signifie évêché), puissant édifice dont la construction a été commencée au XIII<sup>e</sup> siècle, abrite aujourd'hui le musée Toulouse-Lautrec. Plus de mille œuvres de cet artiste, né à Albi en 1864, y sont conservées.

D'importantes restructurations dans ce monument historique ont débuté en janvier 2002, à l'initiative du Syndicat mixte d'aménagement du musée Toulouse-Lautrec, maître d'ouvrage, et de son mandataire la SEM 81. Les travaux portent principalement sur l'amélioration de l'accueil du public et la création de locaux techniques.

La première phase de cet important chantier d'infrastructures a été confiée en 2002 à un groupe-

ment intégré constitué des entreprises Solétanche Bachy et Demathieu et Bard.

Les travaux étaient principalement situés sous la Cour d'Honneur et dans la tour d'Amboise.

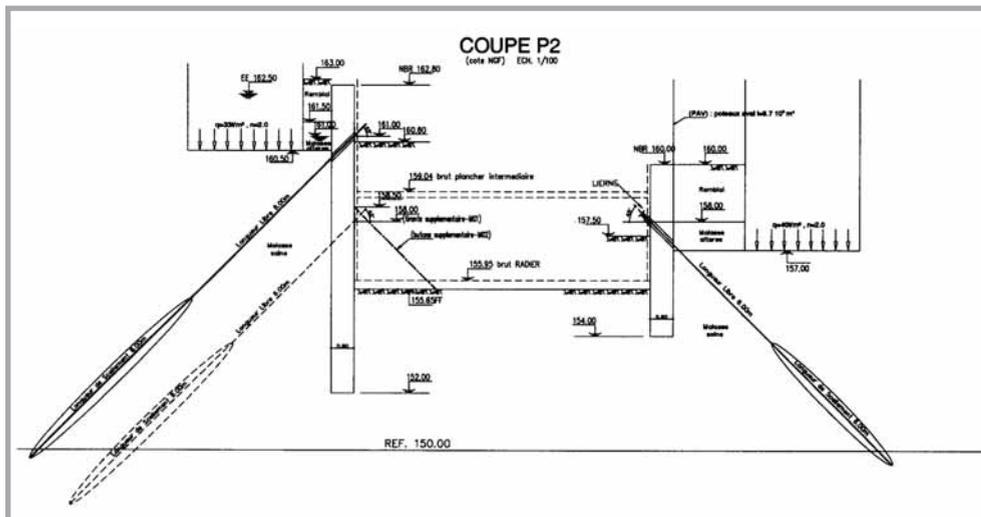
## ■ LA COUR D'HONNEUR

La première partie du chantier consistait en la réalisation, sous la Cour d'Honneur, d'un auditorium de 160 places ainsi que de locaux techniques. Cela a nécessité un terrassement de près de 8 m de profondeur le long des façades intérieures du palais.

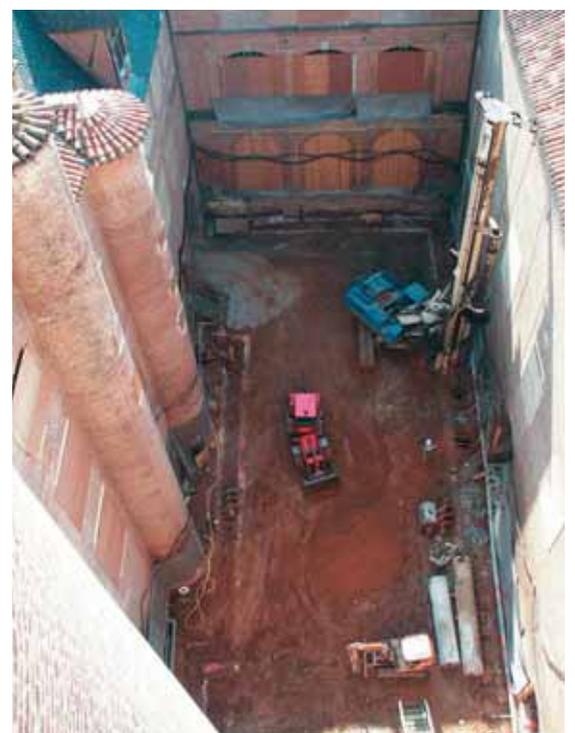
Cette fouille de 10 m par 28 m a été exécutée à l'abri d'un mur de soutènement en pieux sécants de diamètre 800 mm. On a alterné les pieux armés avec des pieux remplis de béton maigre (espacement de 60 cm entre chaque axe de pieux).

En phase provisoire, chaque pieu armé a été muni d'un tirant d'ancrage 5T15 (cf. coupe de principe) de manière à ce que la déformée maximale au droit des fondations des bâtiments existants soit de l'ordre de 15 mm. La poussée de la terre et de l'eau est transmise horizontalement par effet voûte dans les pieux non armés aux pieux armés. Les

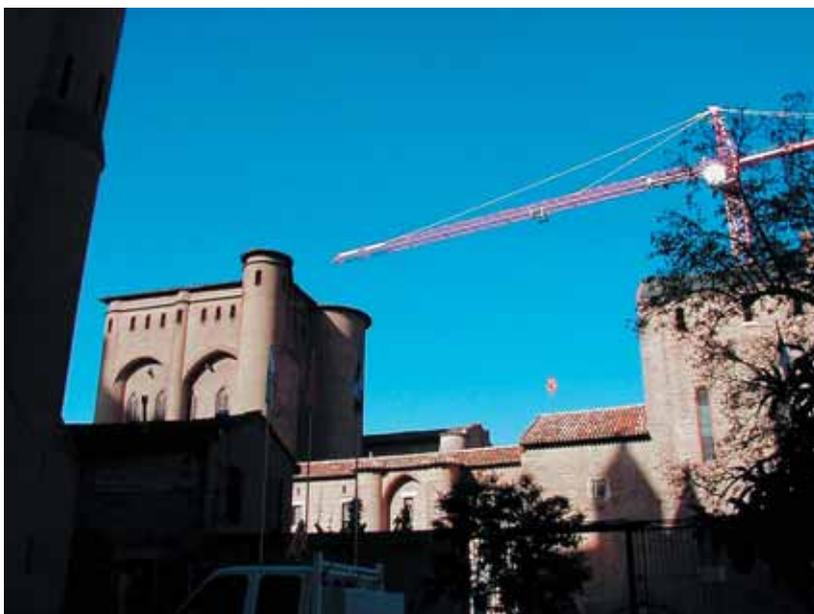
Coupe des travaux dans la Cour d'Honneur  
Cross section of works in the Court of Honour



Vue de la Cour d'Honneur pendant le forage des pieux  
View of the Court of Honour during pile drilling



Le palais de la Berbie  
"Palais de la Berbie" building



# Toulouse-Lautrec

pieux armés reprennent par flexion verticale l'intégralité de la poussée des terres et de l'eau en phase provisoire.

En phase définitive, les tirants sont supprimés et les efforts sont repris par la structure. Un contre-voile d'épaisseur 20 cm avec drains est mis en place à l'avant des pieux. La poussée des terres et de l'eau est transmise horizontalement par effet voûte dans les pieux non armés aux pieux armés. Ces derniers, aidés par le contre-voile, reprennent par flexion verticale entre planchers l'intégralité de la poussée des terres et de l'eau.

La structure intérieure reprenant l'effet de basculement dû à la dissymétrie des poussées sur le soutènement a été modélisée à l'aide du logiciel de calcul PARIS développé par le bureau d'études de Solétanche Bachy.

En effet, le soutènement a été calculé comme une juxtaposition de poutres verticales soumises à la poussée et à la butée des terres et à la poussée

de l'eau appuyée sur les tirants en phases de travaux et sur les différents niveaux de planchers pour les phases de service.

L'action exercée par le terrain sur chaque face de la paroi est calculée en tenant compte du comportement élasto-plastique des terrains.

L'utilisation du programme PARIS a permis de modifier le projet de base constitué de tirants définitifs en faisant donc participer la structure intérieure en phase définitive.

Les caractéristiques géotechniques prises en compte durant toutes les phases provisoires, jusqu'à la dernière phase de génie civil (construction de la dalle de couverture) ont été évaluées à partir des pressions limites mesurées dans les sondages pressiométriques, en utilisant les corrélations proposées par M. Cassan.

Pour confirmer ces hypothèses, un suivi des déformées a été réalisé sur la Cour d'Honneur suivant le principe de la "méthode observationnelle" : mise

*Stéphane Monleau*



DIRECTEUR  
COMMERCIAL ADJOINT  
Solétanche Bachy France

*Franck Weyland*



DIRECTEUR RÉGIONAL  
SUD-OUEST  
Solétanche Bachy France

*Dominique Mazzieri*



CHEF DE PROJET -  
DIRECTION TECHNIQUE  
GROUPE  
Solétanche Bachy

Construction des infrastructures dans la Cour d'Honneur, à l'abri du mur de pieux sécants revêtu de son contre-voile

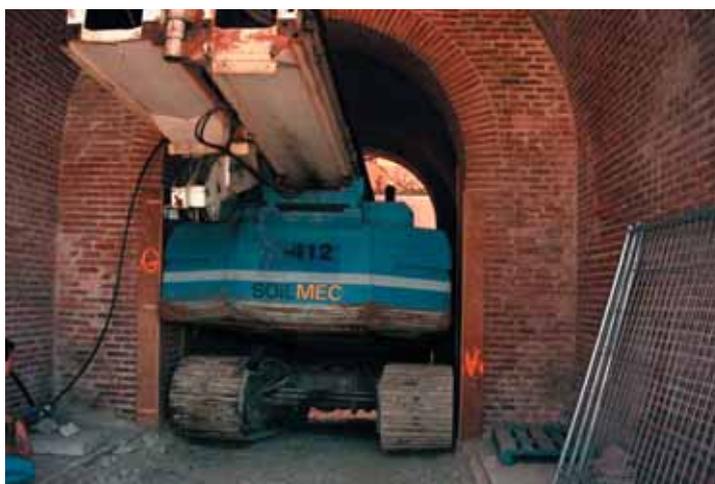
*Infrastructure construction in the Court of Honour, sheltered by the wall of secant piles lined with its shear wall*



Réalisation des micropieux dans la tour d'Amboise  
*Execution of micropiles in the Amboise tower*

Accès médiéval pour foreuse de pieux. Comment une foreuse de pieux des temps modernes se glisse au cœur de l'histoire

*Medieval access for pile driller. How a modern-day pile driller slips into the heart of history*



► en place d'inclinomètres dans les pieux et relevés topographiques. Les mesures, tant pour confirmer ces hypothèses que pour renforcer l'ouvrage dans le cas où l'on constaterait que les caractéristiques effectives des terrains diffèrent des hypothèses retenues, ont fait l'objet de notes spécifiques. En cas de déplacements supérieurs aux limites fixées, un lit de tirants supplémentaire ou de bracons aurait été exécuté. Nous sommes cependant restés largement à l'intérieur du seuil de tolérance. L'exiguïté du site a représenté une difficulté de réalisation non négligeable : on notera en particulier, l'accès de la grue de forage des pieux à l'intérieur de la cour du palais (la largeur étant en effet limitée à 2,4 m).

## ■ LA TOUR D'AMBOISE

L'objectif était d'y créer une extension souterraine de deux salles en sous-sol. Les travaux étaient réalisés à partir d'une emprise réduite de 13 m par 12 m.

Cette seconde fouille a été exécutée à l'abri d'une paroi microberlinoise constituée de micropieux. Les micropieux, d'une hauteur de douze mètres, étaient espacés de 50 cm et ils étaient constitués d'un tube pétrolier de forte inertie (diamètre 178 mm, épaisseur 10 mm) dans un forage de 250 mm. Plus de 160 micropieux ont été mis en place et ont été scellés par injection sous faible pression (type II au sens du DTU 13-2) dans la molasse saine.

Le creusement s'est fait en taupe à l'abri de ce rideau de micropieux, les planchers définitifs étant mis en place en descendant afin de soutenir la structure. Ce dispositif était complété par un voile en béton projeté de 25 cm d'épaisseur.

Un poteau central reprenant environ 600 t a aussi dû être repris en sous-œuvre pendant le terrassement, au moyen de micropieux.

## ■ AUTRES TRAVAUX

Parmi les autres travaux, on retiendra particulièrement la création d'une cage d'ascenseur dans la tour Mage, réalisée par sciage dans la structure existante ainsi que la remise en état de nombreuses salles existantes.

### Sécurité

Ce chantier présentait de nombreux risques liés à la superposition des tâches, à l'exiguïté des accès et des plates-formes de travail, aux travaux de reprise en sous-œuvre et de modification des structures, au survol des charges. Une gestion rigoureuse

de la sécurité a été mise en place, comprenant :

- ◆ l'analyse des risques phase par phase, ainsi que zone par zone ;
- ◆ des réunions sécurité chaque lundi pendant une heure faisant l'objet d'un compte rendu détaillé ;
- ◆ l'accueil et information du personnel avant toute intervention ;
- ◆ des protections collectives adaptées (tours d'accès, échafaudages, passerelle, etc.) ;
- ◆ l'utilisation d'appareils de levage spécialement adaptés, pour les manutentions exceptionnellement nombreuses et variées.

## LES PRINCIPAUX INTERVENANTS

### *Maître d'ouvrage*

Syndicat mixte pour le réaménagement du musée Toulouse-Lautrec

### *Maître d'ouvrage délégué*

SEM 81

### *Maître d'œuvre*

Architecte : Ph.-Ch. Duboid et associés

### *Bureau d'études*

OTCE

### *Bureau de contrôle*

Socotec et AINF SA

### *Coordonnateur SPS*

Jacobs Serete

### *Entreprise*

Groupement Demathieu et Bard - Solétanche Bachy France

## ABSTRACT

Renovation of Toulouse-Lautrec Museum in Albi

*S. Monleau, Fr. Weyland, D. Mazzieri*

**Within the framework of restructuring work on "palais de la Berbie" in Albi, the historical monument that houses the Toulouse-Lautrec museum, the consortium formed by Solétanche Bachy and Demathieu et Bard performed infrastructure work and renovation by underpinning making use of special supporting methods : secant piles and Berlin-type retaining wall with micropiles, designed using the Paris program and executed by the observational method.**

## RESUMEN ESPAÑOL

Renovación del museo Toulouse-Lautrec, en la ciudad de Albi

*S. Monleau, Fr. Weyland y D. Mazzieri*

**Actuando en el marco de las obras de restauración del Palacio de la Berbie, en Albi, monumento histórico que contiene el Museo de Toulouse-Lautrec, el Grupo de empresas constructoras Soletanche-Bachy - Demathieu et Bard, ha ejecutado las obras de infraestructura y de rehabilitación con recalce de los cimientos, recurriendo para ello a métodos de sostenimiento particulares : pilotes secantes y pared berlinesa con micropilotes, calculados con ayuda del programa París, y ejecutados según el método de observaciones.**

# Restructuration d'un

La réhabilitation de l'ancien immeuble du Crédit Foncier, situé à Paris rue Volney, avait notamment pour objectif de lui apporter une grande transparence. Les transformations intérieures et l'aération des façades, voulues par l'architecte, ont conduit à une redistribution avec forte concentration des descentes de charges sur les éléments porteurs. Pour répondre aux exigences du projet, des solutions techniques particulières, issues du monde des TP, ont été adoptées. Des planchers en poutrelles enrobées, inspirés des ouvrages SNCF, ont permis de franchir des portées importantes tout en étant très fortement sollicités. Des poteaux en BSI®-CERACEM de faible section ont permis de reprendre les charges tout en respectant la géométrie et l'aspect souhaités par l'architecte.

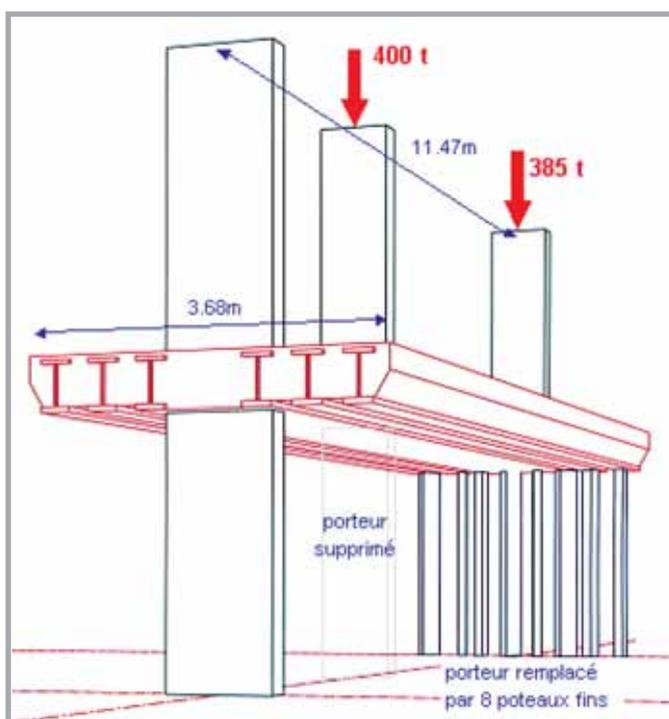


**Photo 1**  
Restructuration des façades  
*Facade restructuring*

## LE PROJET (photo 1)

La société Gécina-Simco est le nouveau propriétaire de l'ancien immeuble du Crédit Foncier situé rue Volney à Paris. Afin d'y installer son nouveau siège, des transformations importantes de cet immeuble de sept étages et quatre niveaux de sous-sol ont été envisagées.

**Figure 1**  
Exemple de nouveau plancher  
*Example of new floor*



Les principales difficultés auxquelles a été confrontée l'entreprise SNSH (mandataire de l'opération) sont liées à la restructuration imaginée par l'architecte. En créant de nouveaux volumes intérieurs et en aérant les façades, la redistribution des descentes de charges ne permettait plus de faire transiter les efforts dans des sections courantes en béton armé ou précontraint.

## PLANCHERS EN POUTRELLES ENROBÉES

### Description de la solution

Afin d'aménager des volumes intérieurs plus spacieux, le projet prévoyait la suppression de porteurs par lesquels transitaient jusqu'à 400 t. Ces charges verticales devaient alors être reprises par des planchers dont l'épaisseur devait permettre de conserver les hauteurs sous plafond imposées. Devant les sollicitations à reprendre, des solutions de planchers en BHP précontraint ont été imaginées mais ne permettaient pas de respecter les contraintes d'encombrement du projet. Une solution inspirée des ponts SNCF à poutrelles enrobées a alors été étudiée.

La figure 1 décrit l'un des quatre planchers réalisés. D'une épaisseur totale de 60 cm pour une portée de 11,47 m, il permet la suppression de l'ancien poteau central en béton armé et de transférer les charges vers les poteaux adjacents, dont l'un est remplacé par huit poteaux fins en BSI®-Ceracem. Ce plancher est constitué de six profilés reconstitués soudés de 515 mm de hauteur noyés dans un béton B60. Dix barres Macaloy de diamètre 32 mm et six de diamètre 40 mm sont disposées transversalement, permettant de créer des chevêtres intégrés et assurer la diffusion des charges, respectivement au droit du porteur supprimé et du poteau d'appui.

La précontrainte a été dimensionnée de façon à obtenir des sections transversales uniformément comprimées sous charges permanentes. Cette précaution a pour effet d'augmenter la durabilité de l'ouvrage, de limiter les déformations verticales et de favoriser la répartition des charges entre les poutres métalliques.

### Phasage de réalisation

Les planchers ont été construits en sept phases :  
◆ pose de la charpente métallique ;

# immeuble parisien

Patrice Genes  
DIRECTEUR DE TRAVAUX  
SNSH

Frédéric Alexandre  
CONDUCTEUR DE TRAVAUX  
SNSH

Marco Novarin  
INGÉNIEUR D'ÉTUDES  
Eiffage TP

Alain Simon  
INGÉNIEUR MÉTHODES  
Eiffage TP

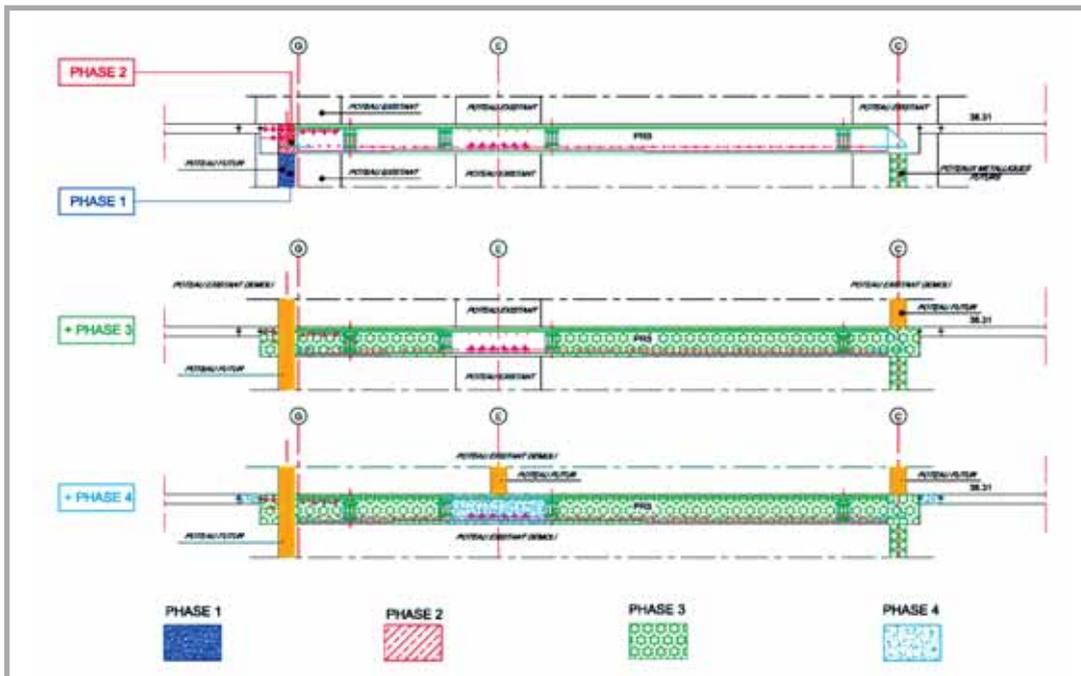


Figure 2  
Phasage de bétonnage  
Scheduling of concreting

- ◆ bétonnage du plancher en laissant des réservations au droit des porteurs existants ;
- ◆ pose du plancher sur les appuis définitifs ;
- ◆ mise en charge du plancher par vérinage à l'aide d'une charpente provisoire ;
- ◆ démolition des porteurs à supprimer ;
- ◆ bétonnage des réservations ;
- ◆ dévérinage et retrait de la charpente provisoire.

Compte tenu des fortes contraintes d'accessibilité, les bétons ont tous été pompés depuis l'extérieur du bâtiment (figure 2).

Un des avantages de cette solution est la faible quantité d'étaie nécessaire à la mise en place des profilés, ce qui est d'autant plus intéressant dans un bâtiment en cours de réhabilitation. Cependant, les dimensions importantes des éléments ont demandé une étude détaillée des procédures de transport et mise en œuvre, les opérations de manutention devant être réalisées dans des espaces relativement limités.

## ■ POTEAUX EN BSI®-CERACEM

### Choix de la solution

Le projet prévoyait des poteaux d'apparence métallique avec des angles vifs, de section 120 x 300 mm pour une hauteur de 3 m et imposait, de plus, une stabilité au feu d'une heure. Comp-

te tenu de la redistribution des charges engendrée par la transformation du bâtiment, certains poteaux devaient reprendre jusqu'à 100 t en service. Compte tenu de ces contraintes, auxquelles s'ajoutent les spécificités d'un chantier de réhabilitation (accès réduits, manutentions délicates...) une solution de poteaux en béton fibré à ultra hautes performances s'est avérée avantageuse. Elle présente en effet l'intérêt d'être beaucoup plus légère qu'une solution métallique (le poids des éléments est environ divisé par 3) et permet de conserver l'aspect demandé (des poteaux métalliques devant être protégés par une peinture intumescente perdent leur aspect métal).

La solution retenue par SNSH consiste en une fine enveloppe métallique en acier de 3 mm remplie de BSI®-CERACEM. Cette enveloppe définitive servant de coffrage pour le bétonnage intérieur. D'un poids unitaire de 230 kg, chacun des 84 poteaux a été fabriqué par Hurks Beton au Pays Bas (photo 2 et encadré "Caractéristiques du matériau").

### Tenue au feu

L'enveloppe métallique des poteaux n'ayant qu'une fonction architecturale, c'est le BSI®-CERACEM qui assure la tenue au feu de la structure. La formule utilisée est dérivée de celle mise en œuvre sur le chantier de la gare de péage du viaduc de Millau. Sa principale différence réside dans sa capacité accrue vis-à-vis de la résistance au feu pour



Photo 2  
Percement des façades et mise en place des nouveaux poteaux  
Drilling facades and putting in place the new columns

### CARACTÉRISTIQUES DU MATÉRIAU

- Résistance caractéristique en compression à 28 j : 165 MPa
- Résistance caractéristique en traction à 28 j : 8,8 MPa
- Module d'Young à 28 j : 65 GPa
- Coefficient de Poisson : 0,2
- Coefficient de fluage propre et de dessiccation : 1
- Densité : 2,80 t/m<sup>3</sup>
- Taux de fibrage : 2,5 %
- Durée pratique d'utilisation : 2 heures
- Autoplaçant



Photo 3  
Poteau chargé, sans enveloppe,  
après 2 heures de feu ISO 834

*Loaded column, without shell,  
after two hours' fire testing  
as per ISO 834*



Photo 4  
Poteau chargé, avec enveloppe,  
après 2 heures de feu ISO 834

*Loaded column, with shell,  
after two hours' fire testing  
as per ISO 834*

► atteindre une heure de stabilité d'un poteau soumis au feu ISO 834.

Des essais ont été effectués au "TNO Centre for Fire Research" à Delft (Pays-Bas) sur une série de poteaux, certains chargés d'autres non, avec ou sans enveloppe métallique. Afin d'estimer la marge de sécurité par rapport au cahier des charges (stabilité 1 heure), les essais ont été conduits sur une plage de 2 heures.

Les photos 3 et 4 ont été prises à la fin de l'essai sur deux poteaux maintenus chargés pendant les deux heures de montée en température. Une stabilité de 2 heures sous charge est donc obtenue, avec ou sans enveloppe métallique. La surface du poteau "nu" ne fait apparaître aucun écaillage mais un simple éclaircissement du parement et l'empreinte des quelques fibres affleurantes.

Ce maintien de l'intégrité du matériau est la conséquence d'un dosage précis en fibres polypropylène, dont la particularité est de fondre dès qu'elles sont chauffées vers 150 °C. Les vides ainsi créés permettent de limiter la pression interne exercée par la vapeur d'eau qui se forme avec la montée en température.

## ■ CONCLUSION

Les techniques originales mises en œuvre sur ce chantier de réhabilitation ont permis de respecter en tout point le projet, ce qui semblait a priori délicat. Le résultat obtenu permettra peut-être d'accorder plus de liberté aux architectes devant les contraintes imposées par un bâtiment existant.

## ABSTRACT

Restructuring of a Paris building

*P. Genes, Fr. Alexandre, M. Novarin, A. Simon*

The main objective of renovation work on the former Crédit Foncier bank building, located rue Volney in Paris, was to provide it with greater transparency. The interior conversion work and lightening of the facades, decided by the architect, led to a redistribution of loads with a strong concentration of loads carried to the ground on the loadbearing elements.

To meet the project requirements, special technical solutions were adopted, coming from the public works sector. Floors of coated joists, inspired by SNCF (French Rail) structures, enabled large span lengths to be crossed while bearing very heavy loads. Columns of BSI®-Ceracem of small cross section made it possible to take up the loads while complying with the geometry and appearance desired by the architect.

## RESUMEN ESPAÑOL

Restauración de un inmueble en París

*P. Genes, Fr. Alexandre, M. Novarin y A. Simon*

La rehabilitación del antiguo inmueble del Crédit Foncier, ubicado en la rue Volney de París, tenía como propósito fundamental obtener una gran transparencia. Las transformaciones interiores y la ventilación de las fachadas según el propósito del arquitecto han conducido a una redistribución con una elevada concentración de las cargas aplicadas en los elementos portadores. Para responder a los requerimientos del proyecto se han aplicado soluciones técnicas particulares, derivadas del sector de las obras públicas. Los forjados en forma de viguetas revestidas, inspiradas de las estructuras de los ferrocarriles franceses (SNCF), han permitido salvar alcances importantes incluso estando muy ampliamente solicitados. Diversos pies derechos en BSI®-Ceracem de sección reducida han permitido soportar las cargas pero siempre respetando la geometría y el aspecto deseados por el arquitecto.

## LES PRINCIPAUX INTERVENANTS

*Maître d'ouvrage*  
Geciter

*Maître d'œuvre*  
E. Naud & L. Poux

*Bureau de contrôle*  
Veritas

*Bureaux d'études*  
• ETTA  
• Eiffage TP - STOA

*Entreprise*  
SNSH

# Travaux dans la galerie des Glaces

Versailles : 1678 - 1684 / 2004 - 2007

Chef-d'œuvre du décor monumental, la galerie des Glaces a été voulue comme la vitrine politique de la France au XVI<sup>e</sup> siècle. Le groupe VINCI s'engage aujourd'hui dans la plus importante opération de mécénat culturel jamais réalisée en France en finançant la restauration intégrale de cet ensemble unique au monde, inscrit sur la liste du patrimoine mondial de l'Unesco et parcouru par plus de trois millions de visiteurs chaque année. Ainsi, plus de trois cents ans après sa construction et afin de lui rendre tout son lustre et d'en assurer sa pérennité, la galerie des Glaces va être entièrement restaurée par une centaine d'ouvriers, artistes et artisans.

## ■ LA CONSTRUCTION - TRAVAUX DE 1678 À 1684

### Origine du projet, contexte général

L'histoire du château de Versailles commence en 1607, Louis XIII fait sa première chasse à Versailles. En 1623 il fait construire au milieu des forêts et au sommet d'une butte, un modeste logis en brique, pierre et toit d'ardoises. Le domaine s'étend alors sur 3 hectares.

Louis XIV effectua sa première visite à Versailles en 1651. Le roi, désireux d'agrandir le château, confia cette tâche à Le Vau qui présenta parmi plusieurs projets, un projet qui consistait à agrandir le château, côté jardin, par une enveloppe de pierre. Ce projet fut exécuté entre 1668 et 1670.

Mais Louis XIV rêvait de construire un palais qui marquerait son époque. La création de Versailles répondra donc à un souhait politique et économique. Dirigeant personnellement les affaires du royaume et centralisant l'administration, le roi souhaitait regrouper auprès de lui les ministres et leurs services. Ainsi Jules Hardouin-Mansart dut élaborer dès 1677 des projets pour l'installation de la Cour. Le palais s'étendra alors aux dimensions que nous lui connaissons sur un domaine de plus de 11 000 ha (aujourd'hui la surface du domaine est de 1064 ha). La construction de la galerie des Glaces s'étend de 1678 à 1684, élevée sur l'ancienne terrasse du château neuf, elle symbolise la puissance du monarque absolu. Limitée au nord par le salon de la Guerre et au sud par le salon de la Paix, elle s'étend sur 73 m de longueur, 12,5 m de haut, 13 m de large, et occupe toute la façade ouest du château pour servir de passage entre les appartements du roi et ceux de la reine.

En 1684, 22 000 à 30 000 ouvriers (selon la disponibilité des régiments) et 6 000 chevaux s'affairaient sur les différents chantiers de Versailles. On érigea une colline afin de porter les 680 m de longueur du château. Une forêt entière fut plantée.

Jules Hardouin-Mansart coordonnait alors l'immense chantier. La facture totale s'élèvera à plus de 634 millions d'euros repartis sur les 54 années de construction du château.

En 1686, la décoration de la galerie des Glaces par Le Brun s'achève. L'audience des ambassadeurs du roi de Siam a lieu dans la galerie des Glaces. Le 19 février 1715, pour une dernière fois la galerie des Glaces est au service de la diplomatie du Roi-Soleil, Louis XIV, quelques mois avant sa mort, vêtu d'un habit de satin constellé de diamants (12 500 000 livres) y reçoit les ambassadeurs de la Perse.

Commencé en 1678, le chantier fut mené en 6 ans à peine, au prix d'immenses efforts tant financiers qu'humains. La Grande galerie fut inaugurée le 15 novembre 1684.

Cette entreprise très moderne pour l'époque a vu le jour grâce à quatre personnalités : Louis XIV, Colbert, Le Brun et Jules Hardouin-Mansart. Ainsi ce grand ouvrage réunit autrefois les plus grands artistes, architectes et artisans.

La galerie des Glaces a été voulue comme une vitrine de la qualité et de la diversité des savoir-faire français.

### Travaux et compétences de l'époque

Près de 36 000 ouvriers ont travaillé sur le gigantesque chantier de Versailles. Toutes les compétences des artisans de l'époque furent mises à contribution pour la construction de cet ensemble qui devait être la vitrine du savoir-faire français.

En cas d'accident de travail, des dédommagements suivants étaient prévus :

◆ 30 à 40 livres pour un bras ou une jambe cassé

(soit 450 à 600 €);

◆ 40 à 100 livres pour la veuve en cas de morta-

lité (600 à 1 500 €).

Vitrine politique et diplomatique d'abord, vitrine ar-

## TREIZE ENTREPRISES QUALIFIÉES MONUMENTS HISTORIQUES DANS LE GROUPE VINCI

*Bourgeois, Cavalier, Chanzy-Pardoux, Comte, Degaine, Girard, Jugla, Faure & Silva, LCRI, Mastran, Pateu & Robert, Société Ritou Construction, Socra.*

Ces entreprises veillent attentivement à préserver leur qualification en restauration dans leurs corps d'état de spécialisation.

Deux autres entreprises sont habilitées à travailler sur le patrimoine ancien, inscrit à l'inventaire supplémentaire des Monuments historiques : *Sogea Ouest et Gautier.*

Ensemble, ces quinze entreprises aux savoir-faire pointus réunissent 750 spécialistes du patrimoine sur le territoire français (28 implantations dans 17 régions) et au Luxembourg.

Par la formation constante de leurs compagnons et les qualifications qu'elles possèdent, elles couvrent l'ensemble des compétences pour restaurer et entretenir le patrimoine architectural et culturel : taille de pierre, maçonnerie traditionnelle, charpente, couverture, ferronnerie, peinture murale et décors (mosaïque, staff, stuc).

Vinci a parallèlement développé depuis une dizaine d'années une offre destinée à la mise en valeur du patrimoine par la lumière. *Citéos*, filiale de VINCI Energies spécialisée dans ce domaine, est organisée en réseau sur toute la France (27 implantations et 500 salariés).

tistique et technologique ensuite, aujourd'hui vitrine des savoir-faire du Grand Siècle.

### *Les décors de peintures et de stucs*

Œuvre du premier peintre du roi, Charles Le Brun, ces décors sont avant tout au service de la politique du roi. C'est la première fois dans ce type de décor que la personne du roi est mise en situation, les règles en cours à l'époque voulaient que ce soient des sujets mythologiques qui se fassent l'interprète des valeurs royales. C'est donc une entreprise très moderne pour l'époque, ces décors relatent les grandes victoires de Louis XIV ainsi que ses actions de politique intérieure (arrêt des duels, reformation de la justice).

Les peintures sont à la fois peintes directement sur l'enduit de la voûte mais aussi sur de grandes toiles qui ont été marouflées à la voûte. Le roi n'était jamais peint directement sur ces grandes toiles, il était toujours peint sur chevalet et ce pour mieux respecter la personne royale, les toiles de la voûte forment ainsi une sorte de puzzle.

Les ornements en stuc reproduisent tous les symboles de puissance (aigles, lions, sphinx...).

Il fut décidé en cours de chantier d'écrire les cartouches qui légendent les peintures en français et ce fut Boileau et Racine qui furent chargés de l'élaboration de ces textes. C'est la première fois qu'on abandonnait l'utilisation du latin au profit du français pour ce type de légendes.

### *Les marbres*

La galerie des Glaces comporte un ensemble de lambris et de dallages en marbres polychromes, totalisant une superficie d'environ 1 100 m<sup>2</sup>. Les marbres de la galerie des Glaces proviennent de différentes régions. Six sortes de marbres sont présents dans les décors conçus par Mansart pour la galerie des Glaces.

### *Le marbre rouge Rance de Belgique*

A l'époque de la construction de Versailles, c'était la carrière de la Margelle à Rance, qui fournissait la majorité des marbres mais n'arrivait plus à satisfaire tous les besoins d'autant plus qu'on demandait des blocs de plus en plus grands pour les colonnes et l'on décida de l'ouverture du gisement du "trou à rocs" dénommé depuis "Trou de Versailles". Pour transporter les énormes colonnes monolithes, les ingénieurs de Louis XIV abattirent tout un quartier de forêt, souvent des troncs de chênes pour construire un chemin artificiel (de Renlies à Cousolre).

Les marbres de Belgique ne sont pas les seuls à servir la gloire du roi. Tous les matériaux les plus beaux et les plus chers devaient être montrés à Versailles. Il ne faut pas oublier que Versailles a été voulu comme la vitrine de la France.

Donc, à côté des marbres "belges" on y rencontre les célèbres marbres des Pyrénées : le Sarranco-

lin Ilhet, le vert Campan et le Campan grand mélange et rubané. Le point fort de l'exploitation du marbre de Sarrancolin, marbre rouge veiné de jaune, de vert et de blanc, déjà connu au temps de l'Empire romain, se situe aussi sous le règne de Louis XIV. Connu sous le nom de marbre d'Antin, servant au décor et à l'ornement des principaux édifices de France. Les trois carrières de Beyrède, Ilhet et Sarrancolin sont réexploitées depuis 1990. Ces marbres étaient transportés sur des radeaux jusqu'à l'embouchure de la Garonne, puis par voie maritime rejoignaient le port du Havre pour ensuite être acheminés à Versailles par la Seine.

### *Les marbres blancs*

Ils provenaient des carrières de Carrare en Italie. Jugés trop chers, leur emploi est limité. La couleur blanche permettait de mettre en valeur les autres marbres de couleur. Ils étaient généralement acheminés par voie maritime jusqu'au port du Havre ou débarqué dans le port de Toulon puis transportés jusqu'à Versailles par voie fluviale.

### *Les sculptures métalliques (bronzes d'art)*

En 1701, Louis XIV a repris après une longue interruption les embellissements de Versailles. Louis XIV veut alors que le plomb doré soit remplacé par le bronze, tout au moins dans les sculptures qui se trouvaient à hauteur de l'œil et de la main. Ces bronzes furent finis et posés en 1703. Ils sont l'œuvre de Domenico Cucci, originaire de Rome, il travailla aux Gobelins jusqu'à sa mort en 1705.

Les décors en plomb et éléments en bronze dorés ont été restaurés à de nombreuses reprises, en 1792, 1814, 1946, 1975 et 1979.

Les éléments en métal doré sont très présents dans le décor de la galerie, jusqu'aux parcloches et aux cabochons qui maintiennent les glaces. On distingue deux types de décorations :

- ◆ les éléments décoratifs (chutes de trophées, bases de pilastres et de colonnes, parcloches de glaces) fabriqués en bronze coulé à la cire perdue dans un alliage cuivreux. Ces éléments sont fixés et maintenus par une visserie en laiton sur des armatures en fer scellées à la maçonnerie ;
- ◆ et les éléments de serrurerie et de quincaillerie (targettes, verrous, boutons de tirage, espagnolettes, tringlerie...) faits de bronze, fer forgé et acier, ou laiton doré au mercure.

### *Les glaces*

Sur chacune des 17 arcades qui font face aux portes-fenêtres et qui en ont les dimensions, Hardouin-Mansart a conçu un décor qui donnera son nom à la galerie. Vingt et une glaces ornent chacune des arcades soit 357 glaces pour toute la galerie.

Ces glaces sont dites "au mercure" d'après leur procédé de fabrication. Pour les fabriquer il fallait appliquer sur du verre une décoction d'étain et de mercure mélangés à chaud, l'étain collait à la

surface du verre, le mercure lui s'évaporait et s'écoulait laissant une couche argentée (l'étamage).

Mais ce procédé était très toxique pour les ouvriers à cause des vapeurs de mercure, de nombreux ouvriers en sont morts jusqu'à ce qu'un nouveau mode de fabrication des glaces soit inventé en 1837 sans mercure par un certain M. Liebig. Les glaces au mercure seront interdites en 1850 par l'Etat.

Cette technique était apparue à la fin du XV<sup>e</sup> - début du XVI<sup>e</sup> en Italie et plus précisément à Murano, une île de la lagune de Venise. A l'époque de la construction du château de Versailles la production de ces glaces se faisait à une échelle semi-industrielle et les secrets de fabrication étaient jalousement gardés par la république de Venise. C'était compter sans Colbert et son dévouement aux plus grandes ambitions royales. Des ouvriers vénitiens furent débauchés et vinrent travailler à la manufacture de Tourlaville dans le Cotentin (devenue Manufacture royale de la Glacerie) qui fonctionnera de 1667 à 1834. Mais la chute du monopole de Venise ne fut pas sans conséquences, plusieurs ouvriers furent assassinés pour avoir trahi la république.

Une glace coûtait à l'époque 352 livres (5 280 €).

### Le parquet

Lorsque la galerie n'était encore qu'une terrasse, le sol était en marbre mais Jules Hardouin-Mansart choisit d'y faire poser un parquet, composé de motifs carrés enchâssés, selon le modèle défini par Roubo de Mazerolles. Ce type de parquet est aussi appelé "Versailles" c'est un parquet traditionnel constitué de lames massives de 23 à 25 mm d'épaisseur, cloué sur des lambourdes. Les lames peuvent être disposées de différentes manières pour former des suites de panneaux carrés, composés d'assemblages plus ou moins complexes de lames associant des bois de différentes essences.

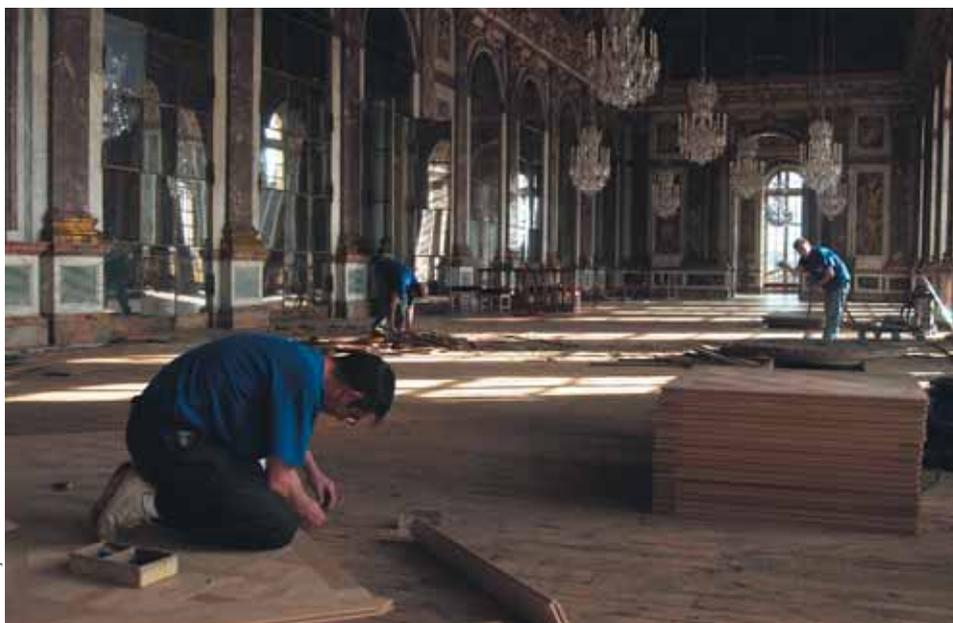
## ■ LA RESTAURATION DE LA GALERIE DES GLACES, 2004 - 2007

### Présentation du projet

#### Une nouvelle forme de mécénat

Cette opération est financée en totalité par le groupe VINCI, à hauteur de 12 millions d'euros. C'est la plus importante opération de mécénat culturel jamais réalisée en France.

De plus, c'est une forme de mécénat inédite car le soutien financier est indissociable de la mise à disposition des compétences des entreprises du groupe VINCI, c'est un mécénat de compétences. Ainsi les lots de restauration des marbres et des bronzes d'art, les travaux de maçonnerie et d'électricité et la mise en place des installations de chantier relèvent des compétences du groupe, et comme pour



© François Poche

### Reprise du parquet

#### Reworking the parquet floor

les autres lots, leur attribution a été soumise à la décision du comité de direction qui est constitué de la présidente de l'établissement public de Versailles, Christine Albanel et du président du groupe VINCI, Antoine Zacharias.

#### Travaux et compétences du groupe VINCI

Sept filiales de VINCI travaillent sur le projet, cinq sont directement impliquées dans les travaux :

- ◆ Socra pour la restauration des marbres et des bronzes d'art ;
- ◆ Degaine pour les travaux de maçonnerie, vérification des structures de la voûte ;
- ◆ Dumez Ile-de-France a mis en place toutes les installations de chantier, échafaudages, cantonnements... ;
- ◆ Lefort-Francheteau a mis en place une ventilation conséquente des installations de chantier pour que les restaurateurs puissent travailler dans de bonnes conditions sous la voûte ;
- ◆ SDEL Artec reprend tout le réseau électrique pour le remettre aux normes actuelles et mettra en place le nouvel éclairage de la voûte ;
- ◆ Dynacoord assure la coordination SPS du projet ;
- ◆ Axians a mis en place les installations vidéos qui permettent de faire découvrir au public les travaux de restauration en cours derrière l'échafaudage.

Cette nouvelle forme de mécénat a été mise en place entre l'établissement public de Versailles et le groupe VINCI, par le biais d'une convention-cadre qui définit les modalités administratives de ce partenariat de type public-privé. Afin de permettre au groupe VINCI d'assurer la maîtrise d'ouvrage du projet, le ministère de la Culture et de la Communication lui a délivré une autorisation d'occupation temporaire.

#### Les organes de gestion du projet

### LE CALENDRIER

- Mars - juin 2004 : phase de travaux préliminaires, mise en place des installations de chantier, remise à neuf du parquet et des réseaux électriques
- Juillet 2004 - novembre 2005 : 1<sup>re</sup> phase de restauration (partie nord de la galerie)
- Décembre 2005 - janvier 2006 : phase de démontage et de remontage des échafaudages
- Février 2006 - mars 2007 : 2<sup>e</sup> phase de restauration (partie sud de la galerie)

Passage des réseaux électriques dans le plancher  
Running electrical cables through the flooring



Hormis la maîtrise d'ouvrage et la maîtrise d'œuvre, trois entités assurent le suivi et la gestion de ce chantier hors norme :

- ◆ un **comité de pilotage**, composé du directeur général et du directeur des parcs et bâtiments de l'établissement public du musée et du domaine national de Versailles, d'un inspecteur général des Monuments historiques, d'un directeur de projet désigné par VINCI et d'un représentant de VINCI, prend les décisions d'ordre administratif et budgétaire et suit l'exécution des programmes ;

- ◆ un **conseil scientifique international** – constitué d'une vingtaine de spécialistes de la peinture décorative et de l'architecture du XVII<sup>e</sup> siècle, de restaurateurs européens, des responsables de Versailles et d'autres musées européens –, suit les étapes de ce grand chantier et se prononce sur les options de restauration ;

- ◆ un **comité de suivi** est amené à se prononcer tous les mois sur les choix méthodologiques des restaurateurs (peintures et sculptures). Il est constitué des membres du comité de pilotage ainsi que de représentants de la conservation du musée du château de Versailles, de l'inspection générale de l'Architecture et du Patrimoine, du Centre de recherche et de restauration des musées de France et du Laboratoire de recherche des monuments historiques.

#### *L'accueil du public*

Malgré l'importance des travaux entrepris, la galerie des Glaces restera ouverte au public pendant toute la durée des travaux et une partie en sera toujours visible (environ 40 %).

Durant toute la phase de travaux préliminaires, malgré la nature des travaux (mise en place de l'échafaudage, remise à neuf du parquet), le public a

toujours eu accès à la galerie dans les mêmes conditions. Ainsi les ouvriers en charge de ces travaux travaillaient principalement le lundi (jour de fermeture au public) mais aussi la nuit (travaux bruyants type mise en place de la ventilation).

Il y a une volonté commune à tous les partenaires de ne pas priver le public et de lui faire savoir en quoi consistent les travaux de restauration. Ainsi pour mieux accueillir le public une scénographie a été conçue pour cacher l'échafaudage mais aussi expliquer en quoi consistent ces travaux. Le public est donc informé dès son arrivée dans le salon de la Guerre de la nature des travaux réalisés par des écrans vidéos qui montrent l'état des décors et les gestes de restauration qui vont leur être appliqués.

Un corridor de 5 m de large et de haut a été aménagé sous l'échafaudage. Dans ce corridor une reproduction du Bal des Iffs, donné pour le mariage de Louis le Dauphin, fait face à un mur de miroirs, et permet au visiteur d'imaginer la galerie à l'époque de ces grands bals.

Les lustres ont été remplacés dans la trame centrale, sous l'échafaudage, ce qui assure une continuité avec la partie non échafaudée. Et une musique a été spécialement conçue pour accompagner le public dans ce passage.

#### Travaux et compétences en 2004

Cette campagne de restauration est devenue nécessaire au vu de l'état général des décors peints de la voûte, tout comme celui des décors d'architecture qui est très médiocre. De plus les restaurations antérieures montrent des signes d'altération et de vieillissement. Sans compter que les réseaux électriques sont vétustes et obsolètes.

Des restaurations partielles avaient déjà eu lieu dès 1698 (12 ans après la fin des travaux), à cause de l'utilisation continue et intense des bougies qui noircissait les toiles. Puis entre 1752 et 1768, la veuve Godefroy et le Sieur Colin doivent refixer plusieurs toiles qui se sont détachées de la voûte. En 1814, Louis XVIII commande la restauration des peintures de la galerie. Ainsi en 1821-1822 est établi le premier rapport exhaustif sur l'état de l'ensemble de la galerie, la campagne de travaux durera jusqu'à la fin du règne de Charles X et consistera en une série d'opérations lourdes : dépose de toiles, consolidations et remplacement de lacunes. La dernière campagne de restauration remonte à 1950 : renforcement de la structure de la voûte, reprise partielle des peintures fissurées, fendues, clouées, décollées, pulvérulentes, couvertes de chancis...

Un demi-siècle a passé, les techniques de restauration et les nouvelles exigences de scientifiques de conservation et de réversibilité des opérations permettent d'entreprendre une restauration d'ensemble de ce chef-d'œuvre monumental, qui fait

#### LE BUDGET

- **Budget global** : 12 millions d'euros TTC

- Effectif : environ 100 personnes

- Une vingtaine d'entreprises mobilisées

- 3 ans de travaux (mars 2004 - mars 2007) consécutifs à une année d'études préalables

- **Budget travaux** : 3 000 K€

- Lot 1 – Installations de chantier - Protections : 900 K€

- Lot 1bis – Ventilation du chantier : 100 K€

- Lot 2 – Maçonnerie - Plâtrerie : 150 K€

- Lot 4 – Menuiserie bois : 400 K€

- Lot 9 – Peinture : 50 K€

- Lot 10 – Electricité : 1 400 K€

- **Budget restauration** : 4 700 K€ TTC

- Lot 3 – Restauration des marbres : 700 K€

- Lot 5 – Restauration des peintures : 2 500 K€

- Lot 6 – Restauration des sculptures et des dorures : 1 000 K€

- Lot 7 – Restauration des bronzes d'art : 400 K€

- Lot 8 – Miroiterie : 100 K€

partie du patrimoine mondial de l'Unesco. Il s'agit non seulement de rendre son lustre à cet ensemble mais aussi d'assurer sa pérennité.

#### *La restauration des décors*

Les grandes lignes du projet de restauration sont les suivantes : pour les décors peints de la voûte une restauration en conservation des interventions exécutées en 1814-1815 est prévue tout en dé-restaurant celles des années 1949-1953 ; pour les décors d'architecture une restauration à l'identique est envisagée, les marbres, sculptures métalliques, glaces et parquet seront également nettoyés et/ou restaurés.

#### *Les décors peints et sculptés*

Ce sont les deux lots les plus importants de ce chantier, financièrement mais aussi en terme de temps passé et d'effectifs humains. En effet, la restauration des peintures et des stucs est le travail le plus long et le plus délicat de ce chantier. Un marché à hauteur de 5 millions d'euros remporté par l'équipe qui vient de terminer la restauration de la galerie d'Apollon au Louvre. C'est un groupement de restaurateurs indépendants organisés selon une structure pyramidale avec des chefs d'équipe spécialisés (support, couche picturale, stucs, dorure). Une équipe de 60 personnes va travailler sur ces décors altérés par le temps et le vieillissement des vernis des précédentes restaurations.

Les travaux de restauration des peintures ont commencé au mois de juillet par un dépoussiérage de l'ensemble des décors, aujourd'hui les opérations de dégrasage sont en cours. Viendra ensuite le nettoyage des peintures qui permettra d'enlever les couches de vernis altérés qui ont tendance à assombrir les toiles. Parallèlement des opérations de refixage des toiles et de consolidation du support seront menées. Une réintégration, la plus discrète possible, est prévue pour les zones lacunaires et enfin la dernière opération sera le vernissage de l'ensemble de la voûte peinte.

Après le dépoussiérage des stucs, des travaux de consolidation et de recollage des parties cassées et/ou mobiles seront entrepris, les produits utilisés pourront être appliqués par injection, par imprégnation ou encore au goutte à goutte.

La restauration des dorures aura pour but de rétablir l'harmonie générale des dorures, dont la lisibilité, a été "brouillée" à la suite de restaurations trop radicales. Ce point important nécessite donc d'effectuer des nettoyages extrêmement soignés et nuancés, de réaliser, chaque fois que cela est nécessaire, des dorures neuves selon les mêmes techniques (dorure à la mixtion) et de les accorder parfaitement avec les anciennes. Le rétablissement de la dorure sur les faces intérieures des portes-fenêtres est aussi prévu.



Les combles nettoyés

*The cleaned attics*

#### *Les marbres*

Le programme de travaux consiste à remettre en valeur l'ensemble des marbres polychromes (lambris verticaux, voussures, embrasures, tapis d'ébrasements, frise périphérique), qui ne présentent pas de problèmes majeurs mais nécessitent des interventions ponctuelles particulièrement minutieuses, notamment pour le traitement des usures, lacunes, épaufures et masticages anciens ayant viré.

Les travaux incluent la dépose systématique des tapis d'ébrasement de portes-fenêtres, pour permettre d'une part le remplacement des dalles défectueuses (très usées, cassées...) et d'autre part la consolidation des revers des tapis. Enfin les marbres feront l'objet d'un traitement de finition très soigné afin de leur rendre leur éclat sans faire disparaître leur patine ancienne.

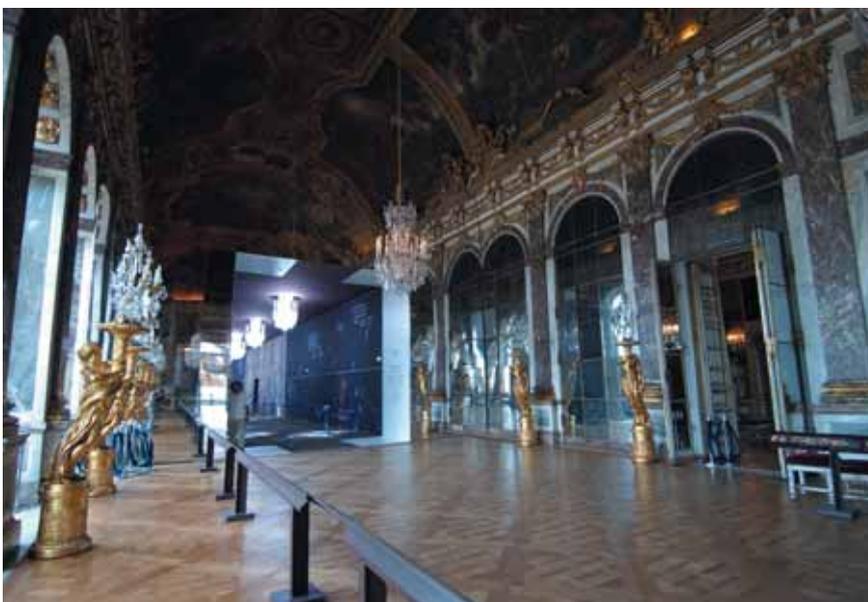
#### *Les sculptures métalliques*

En interface avec la restauration des marbres (trophées) et des miroirs (parcloles et cabochons), ce lot concerne des éléments très différents du décor (chutes de trophées, bases de pilastres et de colonnes, parcloles de glaces, targettes, verrous, boutons de tirage, espagnolettes, tringlerie), avec des matériaux différents : bronze coulé, fer forgé, laiton...

Pour les sculptures, les travaux de restauration consisteront en une dépose des éléments les plus abîmés, un nettoyage de tous les différents éléments, et le remplacement, si nécessaire, de certains de ces éléments (les éléments manquants seront restitués après avoir effectué des moulages sur les originaux). Pour les éléments de serrurerie, l'intervention consistera principalement à nettoyer les dorures, à remettre en état les mécanismes et les structures de ces ouvrages (serrures, tiges



Montage de l'échafaudage  
*Scaffolding erection*



Le fronton de l'échafaudage recouvert de miroirs  
The pediment of the scaffolding covered with mirrors

© François Poche

s'élève à plus de 100 000 €.

Travaux envisagés : traitement des piqûres et altérations du tain en remplaçant l'étamage par une argenture si nécessaire, uniquement sur des points de dégradation avancée pouvant avoir une incidence à terme sur la pérennité des glaces. Tous les parquets des porte-glaces vont être vérifiés et consolidés si nécessaire. Les parcloses et les cabochons en bronze qui maintiennent les glaces vont aussi être restaurés par le titulaire du lot bronzes d'art. Enfin toutes les glaces seront nettoyées avec du papier imbibé d'alcool à brûler.

### Les travaux de remise à neuf

D'autres travaux plus "lourds" vont permettre d'assurer la pérennité de cet ensemble et de mieux le mettre en valeur. Ces travaux sont aussi réalisés dans le respect de l'état original de la galerie des Glaces.

### Maçonnerie

Les travaux de maçonnerie sont étroitement liés à la mise aux normes du réseau électrique. En effet d'anciens conduits de cheminées ont été aménagés pour permettre la mise en place des chemins de câbles. Des locaux techniques ont aussi été créés dans les combles en vue d'installations concernant la sécurité incendie. La mise en place d'un nouvel éclairage a aussi amené la société Degaine à exécuter le percement de nouveaux passages de réseaux à la naissance de la voûte.

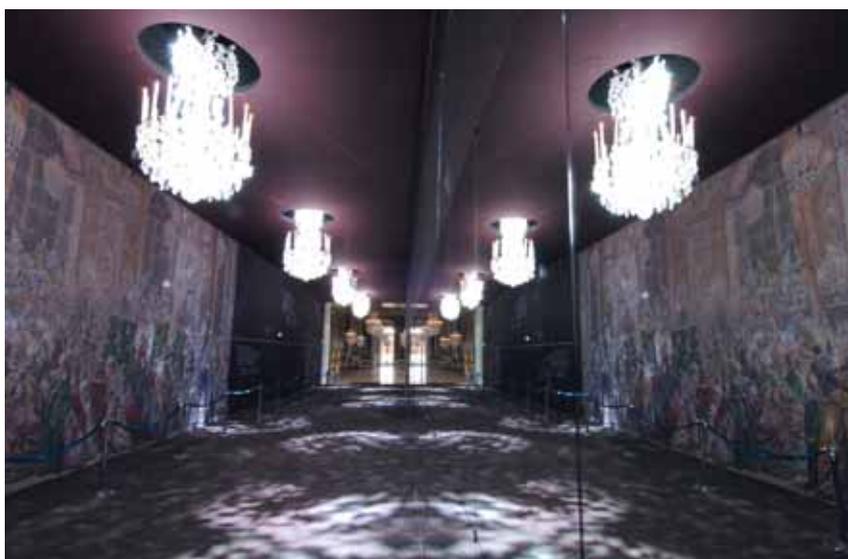
Le nettoyage de la voûte et l'enlèvement de gravois dans les combles afin de pouvoir en vérifier les structures étaient aussi une des missions importantes du titulaire de ce lot.

### Le parquet

Le parquet a été refait à neuf en un peu plus de trois mois (mars-juin 2004) par la société Briatte (qui avait déjà refait le parquet de la galerie dans les années 1950), sans jamais limiter l'accès du public à la galerie. C'est donc un parquet de chêne entièrement neuf que parcourent aujourd'hui les visiteurs. Le parquet existant a été entièrement déposé car il ne présentait aucun intérêt archéologique (il datait des années 1950) et ne répondait pas aux normes de fabrication du parquet type "Versailles"; Il avait été assemblé avec des chevilles métalliques, alors que l'utilisation de chevilles en bois est plus conforme à l'aspect original.

### Electricité

Lors de la remise à neuf du parquet, tous les anciens réseaux électriques qui étaient aménagés dans le plancher ont été déposés et remplacés par de nouvelles installations conformes aux normes européennes. La reprise complète des réseaux électriques a permis de mettre en place des installations qui permettront à l'établissement public de



Le corridor et son aménagement scénographique

The corridor and its scenic artwork

© François Poche



de verrou, fiches). Les fixations et la visserie seront reprises selon les besoins, sachant qu'il est toujours souhaitable de conserver les éléments anciens en bon état. Enfin, des reprises ponctuelles de dorure seront envisagées pour les zones lacunaires où le cuivre réapparaît. L'utilisation d'un "pinceau électrolytique" permettra de redorer ces parties altérées.

### Les glaces

Sur les 357 glaces de la galerie, seules vingt vont être remplacées, par d'anciennes glaces au mercure qui sont stockées dans les magasins du Sénat, ou qui ont été récupérées par le titulaire de ce lot de restauration M. Vincent Guerre par le biais de ses activités d'antiquaire, car on ne peut pas aujourd'hui relancer la fabrication de glaces au mercure. La remise en place d'une glace coûte aujourd'hui près de 1 000 €, le marché du lot miroiterie

disposer d'un potentiel suffisant pour l'organisation de réceptions.

Le titulaire de ce lot est aussi chargé de mettre en place des installations qui concernent la sécurité incendie et qui seront reliées au nouveau système de sécurité mis en place dans le cadre du projet du "Grand Versailles" qui prévoit la remise à niveau de toutes les installations du château sur les 15 années à venir.

#### *Eclairage*

La mise en place d'un nouvel éclairage par la société SDEL Artec, une entreprise spécialisée en mise en valeur de patrimoine se fera selon les préconisations d'un éclairagiste et le modèle de lampe choisie sera adapté aux besoins particuliers des décors.

L'éclairage actuel trop chaud et trop ponctuel va être remplacé par plusieurs centaines de sources froides et réglables individuellement en fonction de la luminosité extérieure. Ce nouvel éclairage révélera les moindres détails du décor, car la lumière ne doit pas être la même sur les peintures sur toiles, sur enduit ou encore sur les décors en stucs.

De plus, la réouverture des oculi situés derrière les trophées permettra de retrouver une source d'éclairage naturel voulue par Charles Le Brun au moment de la construction de la galerie. Cette réouverture a été possible par la mise en place de cloisons coupe-feu qui isolent la galerie des combles.

#### *Spécificités*

La mise en place et le respect de règles de sécurité et de prévention santé ainsi que la réalisation d'installations de chantier spécialement adaptées au travail des restaurateurs est une priorité de ce chantier.

#### *Les installations de chantier*

L'échafaudage a donc été conçu en liaison étroite avec les restaurateurs et peut être modifié selon les besoins. Une ventilation du chantier a été mise en place pour limiter la gêne procurée par l'utilisation des solvants pour nettoyer les décors, et réguler la température sous la voûte.

#### *La coordination SPS*

La coordination est une nouvelle exigence sur les chantiers aujourd'hui, elle s'avère particulièrement indispensable sur cette opération où des métiers et des pratiques très différentes se côtoient. L'utilisation de produits spécifiques par les restaurateurs est strictement réglementée et les services de sécurité de l'établissement public sont partie prenante dans le maintien et la prescription des règles de sécurité du chantier.

#### *Les relevés holographiques*

La société Holo 3 va profiter de ce chantier pour affiner une méthode d'analyse des altérations de la



Les premiers travaux de restauration des peintures

*The first painting restoration works*

© François Poche



Les premiers relevés sur les décors en stuc

*The first measurements on the stucco decorations*

© François Poche

structure de la voûte. Cette technique optique est issue de l'aéronautique, elle permet de déceler, par excitation de la structure à l'aide de hautes fréquences, les zones altérées.

## ■ CONCLUSION

La fin des travaux est prévue pour le printemps 2007 et l'objectif majeur de cette opération de restauration aura été de pouvoir transmettre aux futures générations un patrimoine le plus authentique possible et d'en assurer pour un temps sa pérennité.

Participer à sa restauration, rendre à ce lieu toute sa beauté et son lustre mobilise aujourd'hui à nouveau des dizaines de métiers différents, tech- ▶

► niques, scientifiques et artistiques. C'est une centaine de personnes de tous ces métiers qui vont travailler pendant 3 ans sur ce chantier, une aventure commune passionnante.

*"Vinci a, compte tenu de sa taille et de sa responsabilité sociale et environnementale, en un mot de sa responsabilité citoyenne, le souci du développement durable tant de ses activités et de ses métiers que du monde et de l'environnement dans lequel nous nous inscrivons [...]. Je pense que le développement durable commence par la prise en charge et l'inscription dans la durée de ce qui est beau, à commencer par le patrimoine national. Ma responsabilité de patron d'un des principaux groupes français, c'est de faire en sorte que le patrimoine national soit sauvegardé ou préservé."* Antoine Zacharias - PRÉSIDENT DE VINCI

## LES PRINCIPAUX INTERVENANTS

### Maîtrise d'ouvrage

VINCI

### Coordonnateur SPS

Dynacoord

### Bureau de contrôle technique

Qualiconsult

### Maîtrise d'œuvre

Frédéric Didier, architecte en chef des Monuments Historiques

### Bureau d'études techniques "Electricité"

Alternet

### Eclairagiste

Cosil

### Entreprises et restaurateurs

- Lot 1 – Installations de chantier - Protections : Dumez Ile-de-France, Entrepose échafaudages, Sarl Bruno et Nicole Martin
- Lot 1bis – Ventilation du chantier : Lefort-Francheteau
- Lot 2 – Maçonnerie - Plâtrerie : Degaine
- Lot 3 – Restauration des marbres : Socra et DBPM
- Lot 4 – Menuiserie bois - Charpente bois : Les Ateliers Saint-Jacques
- Lots 5 et 6 – Restauration des peintures et des sculptures et dorures : Les Restaurateurs Associés – Cinzia Pasquali, Véronique Sorano-Stedmann, Alain Roche, Maria-Gabriella De Monte et Lucien Mariotti
- Lot 7 – Restauration des bronzes d'art : Socra et Antoine Amarger
- Lot 8 – Miroiterie : Vincent Guerre
- Lot 9 – Peinture : SN Martial Lacour
- Lot 10 – Electricité : SDEL-Arttec

## ABSTRACT

Work in the Hall of Mirrors.  
Versailles : 1678 - 1684 /  
2004 - 2007

P. Palem

A masterpiece of monumental decoration, the Hall of Mirrors was designed as the political showcase of 16th century France. Vinci Group is now undertaking the largest cultural sponsoring operation ever carried out in France by funding the full restoration of this complex that is unique in the world, included on the Unesco World Heritage List and passed through by more than three million visitors each year. Thus, more than three a hundred years after it was built, to restore to it all its lustre and keep it alive, the Hall of Mirrors will be completely restored by a hundred or so workers, artists and craftsmen.

## RESUMEN ESPAÑOL

Obras en la Galería de los Espejos. Palacio de Versalles : 1678 -1684 /  
2004 - 2007

P. Palem

Obra maestra de la decoración monumental, la Galería de los Espejos ha tenido como intención obtener el escaparate político de la Francia del siglo XVI. El Grupo Vinci tiene actualmente a cargo la operación de mayor envergadura del mecenazgo cultural que se ha llevado a cabo en Francia, haciéndose cargo del coste de la restauración integral de este conjunto único en el Mundo, que figura en la lista del patrimonio mundial de la Unesco, y que recibe anualmente la visita de más de tres millones de personas. Por consiguiente, más de trescientos años después de su construcción y con objeto de recuperar todo su lustre y garantizar su perennidad, la Galería de los Espejos quedará totalmente restaurada por un centenar de obreros, artistas y artesanos.