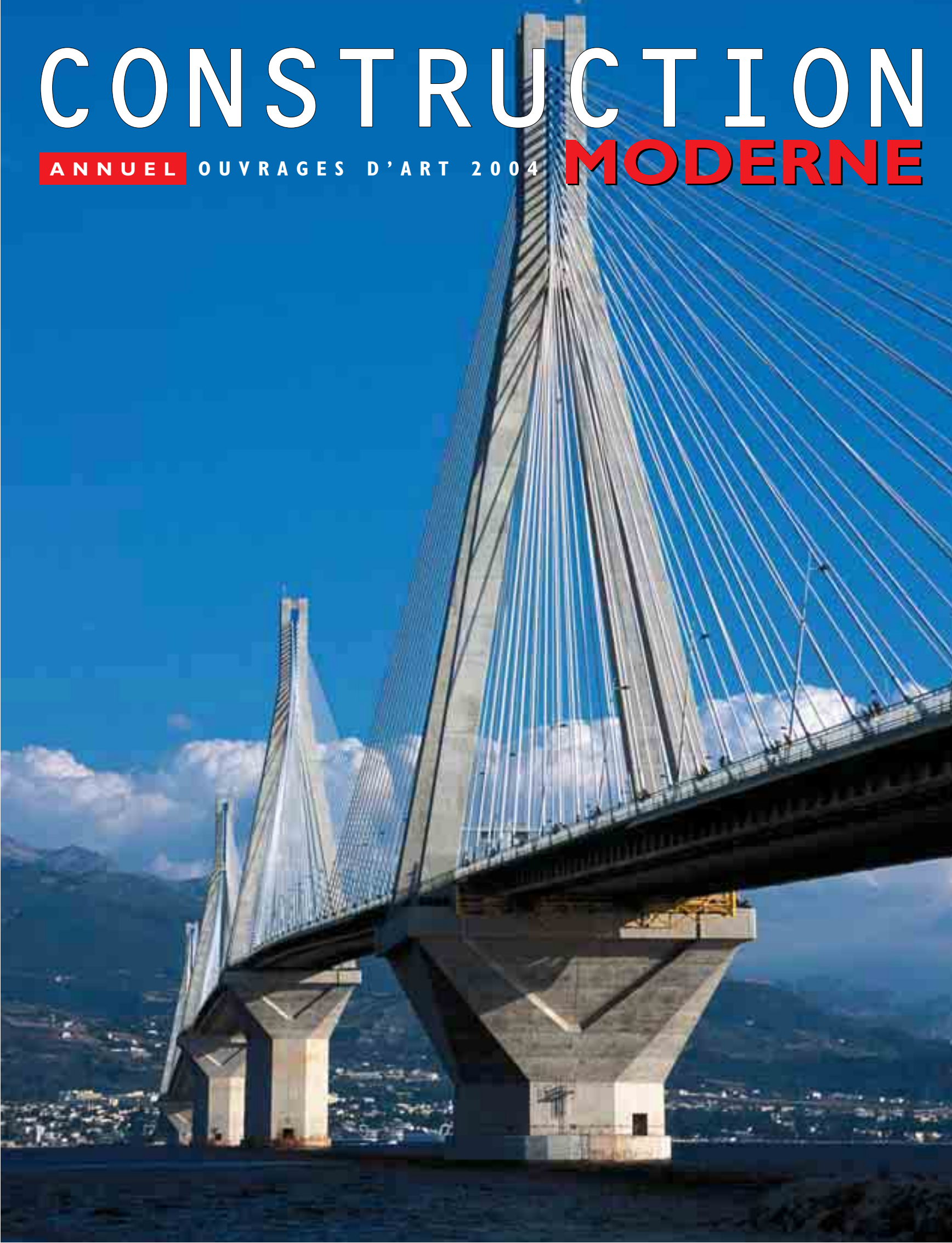
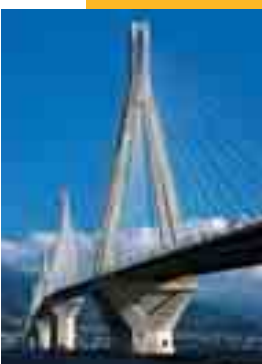


CONSTRUCTION

ANNUEL OUVRAGES D'ART 2004

MODERNE





© Vinci

>>> En couverture:
le pont Harilaos-Trikoupis
reliant Rion à Antirion
en Grèce. © Vinci

	PAGES
réalisations	
GRÈCE - Pont Harilaos-Trikoupis	01
La force et la grâce unies contre les éléments	06
	PAGES
A89 - Viaduc de la Sioule	07
Un pont autoroutier au palmarès des records	11
	PAGES
LA RÉUNION - Bras de la Plaine	12
Deux doigts tendus au-dessus d'une brèche géante	16
	PAGES
solutions béton	
LES BFUP	17
Les BFUP : des structures élancées qui laissent place à l'imagination	24
	PAGES
réalisations	
PUGET-THÉNIERS - Pont	25
Une fine équerre mise en place par rotation	28
	PAGES
A29 - Viaduc de la Bresle	29
Une structure légère et respectueuse de l'environnement	32
	PAGES
LGV EST - Lots 12 et 18	33
Une innovation pour les ouvrages ferroviaires	36
	PAGES
témoignages	
Architectes et ouvrages d'art	37
L'art du dialogue entre ingénieur et architecte	39
	PAGES
bloc-notes	
• Livres	40

éditorial

La réussite de l'ouvrage d'art vient d'abord de la symbiose originelle entre l'ingénieur et l'architecte. Elle vient aussi de l'apport des autres concepteurs associés: que serait le pont reliant Rion à Antirion sans la performance de ses fondations? Elle vient enfin des constructeurs et des spécialistes de matériaux qui ont apporté, ces dernières années, une évolution remarquable du matériau béton. Les progrès considérables du béton ont permis une audace toujours plus grande des formes grâce à la maîtrise de la maniabilité et l'amélioration du comportement mécanique, et des avancées déterminantes pour la durabilité et la maintenance des ouvrages grâce à sa compacité. Mais je mettrai en avant l'amélioration considérable de la qualité des parements; j'y vois la clé lumineuse du renouveau actuel de l'intérêt du public pour ce matériau. Continuons dans cette voie d'excellence, elle répond aux critères du développement durable.

YANN LEBLAIS,
président de Syntec Ingénierie

CONSTRUCTION MODERNE

DIRECTEUR DE LA PUBLICATION: Anne Bernard-Gély
DIRECTEUR DE LA RÉDACTION: Roland Dallemagne
CONSEILLERS TECHNIQUES: Philippe Gégout; Patrick Guiraud; Serge Horvath

CIM Béton

CENTRE D'INFORMATION SUR
LE CIMENT ET SES APPLICATIONS

7, place de la Défense • 92974 Paris-la-Défense Cedex
Tél.: 01 55 23 01 00 • Fax: 01 55 23 01 10

• E-mail: centrinfo@cimbeton.net
• internet: www.infociments.fr

La revue *Construction moderne* est consultable
sur le site www.infociments.fr

Pour les abonnements, fax: 01 55 23 01 10,
E-mail: centrinfo@cimbeton.net

CONCEPTION, RÉDACTION ET RÉALISATION:
L'AGENCE PARUTION
41, rue Greneta - 75002 Paris

RÉDACTEUR EN CHEF: Norbert Laurent
RÉDACTRICE EN CHEF ADJOINTE: Maryse Mondain
MAQUETTISTE: Sylvie Conchon

Pour tout renseignement concernant la rédaction,
tél.: 01 53 00 74 13



La force et la grâce unies contre les éléments

●●● LE PONT HARILAOS-TRIKOUPIS TENDU ENTRE LES VILLES DE RION ET D'ANTIRION, OUVRAGE MONUMENTAL

IMAGINÉ DEPUIS PLUS D'UN SIÈCLE, RATTACHE DÉSORMAIS LE PÉLOPONNÈSE À LA GRÈCE CONTINENTALE.

LES CONTRAINTES DU SITE, AINSI QUE LA NÉCESSITÉ DE RÉPONDRE AUX IMPORTANTS RISQUES

DE TREMBLEMENTS DE TERRE DUS À LA PRÉSENCE D'UNE FAILLE TECTONIQUE, ONT CONSTITUÉ UN DÉFI

TECHNOLOGIQUE SANS PRÉCÉDENT. CET OUVRAGE D'EXCEPTION, DONT LES QUALITÉS ARCHITECTURALES

NE LE CÈDENT EN RIEN AUX INNOVATIONS TECHNIQUES, A TRANSFORMÉ LE RÊVE EN RÉALITÉ.



1



2

Il y a plus de cent ans, Harilaos Trikoupi (1832-1896), Premier ministre grec élu en 1880, eut la vision d'un pont franchissant le bras de mer entre le Péloponnèse et le continent. Ce projet, véritable défi à la technologie, dut attendre le début du ^{xxi} siècle pour être réalisé. Et c'est deux jours avant l'ouverture des Jeux olympiques d'Athènes, le mercredi 11 août 2004 à 11 heures, qu'il a été inauguré et baptisé Harilaos-Trikoupis.

La construction du pont a fait l'objet d'un concours international. Il s'agissait de désigner un concessionnaire qui aurait à choisir l'entreprise, le bureau d'études et l'architecte, et c'est Gefyra qui a été choisi pour une période d'exploitation conjointe avec l'État grec fixée à 42 ans. Elle s'achèvera le 24 décembre 2039, remettant l'exploitation aux mains de la Grèce. Le projet de construction est complexe, comprenant la conception, le design, la réalisation et la maintenance de l'ouvrage. *"Les conditions de réalisation sont tellement exceptionnelles que les études techniques ont été prioritaires, reléguant au second plan l'aspect architectural"*, explique l'architecte Berdj Mikaëlian. La ligne générale de l'ouvrage est donc directement issue de la somme des contraintes liées à sa réalisation : une

zone sismique et une hauteur importante de franchissement au-dessus des flots. Ces impératifs ont conduit à la conception d'un ouvrage multahaubané d'une longueur totale de 2883 m constitué de quatre appuis posés en mer et surmontés de quatre pylônes monumentaux : un ensemble destiné à la transmission verticale des efforts. *"Mais une fois la technique définie, l'architecte reprend la main et décide de la forme finale, de manière à créer un ouvrage harmonieux s'insérant dans son environnement naturel"*, ajoute Berdj Mikaëlian. Pour aboutir à *"un quatre mâts ancré en mer"*.

● Un système de fondations original et innovant

L'ouvrage est implanté au droit du passage le plus étroit du golfe de Corinthe : une brèche d'environ 2,25 km séparant Rion, au sud, d'Antirion, au nord. L'emplacement cumule les conditions physiques difficiles. La profondeur des eaux y atteint 65 m, avec des fonds marins peu résistants, mais surtout, la présence d'une faille tectonique en fait une zone sismique. Le pont doit donc résister à des tremblements de terre majeurs ainsi qu'à l'impact d'un pétrolier de 180 000 tonnes lancé à 18 nœuds (environ 33,3 km/h) et à des vents de 250 km/h. Ces

exigences ont imposé l'étude d'un système de fondations original. Au droit des piles, l'inclusion de 120 à 194 tubes métalliques battus permet de renforcer le fond marin. D'un diamètre de 2 m, ils descendent à une profondeur de 25 à 30 m selon un maillage de 7 x 7 m. Ces inclusions n'ont pas pour rôle premier d'assurer la portance. Chacune des zones renforcées – une surface circulaire de 90 à 105 m de diamètre – est recouverte d'une couche de gravier 10/80 parfaitement nivelée d'une épaisseur de 3 m mise en place dans une fouille aménagée au fond de la mer. Les semelles des piles composent la seconde partie du système de fondations. Elles sont posées sur le remblai, mais aucune liaison physique ne les relie au sol.

Ces travaux de renforcement ont nécessité la mise au point d'un équipement off-shore spécifique. Ainsi, le groupement Gefyra – qui a comme directeur général Jean-Paul Teyssandier et comme directeur du chantier Gilles de Maublanc – a reconditionné la barge Lisa, déjà utilisée pour la construction du pont sur la Severn, au Royaume-Uni. Cette barge, pourvue d'une grue d'une capacité de 140 tonnes à 50 m, a fait l'objet d'une transformation en barge dite à "pieds tendus" qui autorise son utilisation en eaux profondes. Le principe repose sur la mise en tension de quatre chaînes verti-

CHIFFRES CLÉS

- **Longueur du franchissement : 2883 m, dont 2252 m pour le pont (répartition des travées : 286 + 3 x 560 + 286 m), 239 m pour le viaduc d'accès Sud et 392 m pour le viaduc d'accès Nord.**
- **Hauteur maximale d'un pylône : 227,20 m, dont 163,7 m au-dessus du niveau de la mer et 63,50 m sous l'eau.**
- **Largeur du tablier : 27,2 m (2 x 2 voies de circulation).**
- **Diamètre des semelles : 90 m.**
- **Volume de béton : 250 000 m³, y compris les viaducs d'accès.**
- **Armatures passives : 80 000 tonnes.**
- **Nombre de haubans : 368 unités (8 x 23 paires) pour un poids de 4 500 tonnes.**
- **Dragages : 350 000 m³.**
- **Remblais : 22 500 m³.**
- **Durée des travaux : 5 ans.**



3

4

cales fixées à un contrepoids de 750 tonnes reposant au fond de la mer. Un système de ballastage compense, en continu, les variations du niveau de la mer (+/- 40 cm) liées aux marées. Enfin, un catamaran semi-submersible est associé à la barge. Il supporte le système de guidage pour le battage des inclusions, l'étalement de la couche de gravier et son réglage.

Quatre pylônes équidistants constituent la structure porteuse de l'ouvrage. Éléments monolithiques, ils se décomposent en cinq parties – embase, pile tronconique, fût octogonal, chapiteau pyramidal et jambes supé-

rieures inclinées – et s'élèvent jusqu'à 165 m au-dessus du niveau de la mer. Leur construction a débuté à terre, à l'abri du *dry dock* ("cale sèche"), où les semelles de fondations et les amorces des piles tronconiques ont été réalisées. Ces embases – les plus grosses jamais conçues pour un pont – sont des caissons en béton armé de 90 m de diamètre pour une hauteur maximale de 13,50 m, surmontés de l'amorce de la pile tronconique : un voile circulaire à 32 facettes de 3,25 m de haut. La construction des pylônes se poursuit dans le *wet dock* ("cale humide"), zone d'eau abritée de la

houle et des courants. Chaque embase, une fois achevée dans le *dry dock*, y est acheminée par remorquage. De par leur forme, les embases présentent une stabilité très médiocre en flottaison. D'où la mise en

place d'un système de ballastage dynamique qui garantit la verticalité de l'ensemble. Complétant le dispositif, trois chaînes disposées à 120°, ancrées en mer ou fixées à terre et tendues entre 100 et 160 tonnes, permettent d'amarrer chaque embase, limitant ainsi les mouvements dus à la houle. D'une hauteur de 53 m, la pile tronconique est réalisée au moyen d'un coffrage autogrimpant sans tiges traversantes. Les bétonnages sont effectués par demi-cercles au rythme d'une levée de 1,80 m tous les deux jours. Les armatures, qui atteignent dans cette zone une densité de 250 kg/m³, sont constituées de plusieurs nappes de HA 40. Un diamètre qui interdit des recouvrements à chaque levée. Cette contrainte a conduit à mettre en œuvre des sous-ensembles préfabriqués d'une hauteur correspondant à quatre levées. Vient ensuite l'étape du déplacement, de l'échouage et du positionnement (avec

>>> 1 Au sein du *dry dock*, construction simultanée de deux des quatre semelles des pylônes du pont : embase pour l'une et amorce des piles pour l'autre. **2** Acheminement de l'embase d'une pile en direction du *wet dock*. **3** Réalisation d'une des piles tronconiques. **4** Les quatre piles préfabriquées près de la berge Nord du détroit de Corinthe ont rejoint leur position définitive où leur construction se poursuit.

>>> Le chapiteau en forme de pyramide inversée constitue l'élément le plus complexe de l'ouvrage. Ferraillé à l'extrême – 475 kg/m³ –, il présente une géométrie sophistiquée et des dimensions imposantes : 15 m de haut et 38 m de côté en son sommet.





5



6

des tolérances très faibles de +/- 10 cm en plan et +/- 2° en azimut) de l'embase et de la pile tronconique à sa place définitive. L'échouage de la base immergée des pylônes (semelle circulaire + pile tronconique) intervient lorsque les courants sont minimaux. Un système GPS assure le guidage et le contrôle des opérations. Une fois en place, le sommet de la pile tronconique émerge à 3 m au-dessus des eaux.

● Un géant marin aux pieds creux

Une des préoccupations du chantier était de restreindre au minimum la pression de l'ouvrage sur le fond marin. En fait, la poussée d'Archimède permet de compenser près de la moitié de l'effort vertical appliqué sur la semelle – la structure située sous l'eau étant creuse et vide. Ainsi, celui-ci ne dépasse pas le seuil moyen de 12 tonnes/m². Grâce à cette loi physique, le poids total du pylône M3 (le plus imposant de l'ouvrage) et la partie du tablier qui y est suspendue n'est que de 75 000 tonnes. À terre, cet ensemble pèserait le double !

La construction se poursuit en mer avec le coulage des fûts octogonaux de 24 m de section. Prolongement hors eau du cône, ces éléments sont exécutés par quarts de

section, par levées de 5,60 m au maximum. L'approvisionnement en bétons (200 m³ environ par plot) se fait par barge transportant jusqu'à quatre camions-malaxeurs en même temps.

Couronnant le fût, le chapiteau pyramidal inversé constitue l'élément le plus complexe de l'ouvrage. Ferrailé à l'extrême – 475 kg/m³ avec des densités locales de plus de 700 kg/m³ –, il présente une géométrie sophistiquée et des dimensions imposantes (15 m de haut et 38 m de côté en son sommet) qui interdisent la préfabrication des cages d'armatures. De fait, les 18 nappes de HA 40 sont assemblées barre par barre. Les 4 060 m³ de béton sont mis en place en six levées, à l'abri d'un coffrage de 2 400 m² et d'un poids de 475 tonnes.

La partie supérieure du pylône se compose de quatre jambes inclinées à 23° qui convergent pour former une structure monolithique au niveau + 230 m au-dessus du fond marin. De section carrée de 4 m de côté, elles sont creuses. L'épaisseur des voiles varie de 70 cm à 1,80 m. Se développant sur une hauteur de 35 m, la tête du pylône est constituée de deux coques en béton armé qui enserrant un noyau métallique creux. Les extrémités hautes des haubans viennent s'y ancrer. Un ensemble de 368 haubans dont la longueur varie entre 77 et 293 m,

>>> **5** La partie supérieure du pylône se compose de quatre jambes inclinées à 23° qui convergent pour former une structure monolithique. **6** La tête du pylône est constituée de deux coques en béton armé qui enserrant un noyau métallique creux. **7** D'une longueur totale de 2252 m, le tablier est construit par encorbellements successifs à partir de voussoirs de 12 m de long préfabriqués à terre. **8** Un ensemble de 368 haubans répartis en quatre groupes de 23 câbles par pylône supporte le tablier dans son intégralité.

soit quatre groupes de 23 câbles par pylône, supporte le tablier dans son intégralité. "Les haubans comportent 43, 55, 61 ou 75 torons de type HD 15 dont la résistance ultime à la traction atteint 1 770 MPa", précise Benoît Lecinq, directeur technique de Freyssinet International. Les câbles bénéficient d'un système de fixation qui permet de filtrer les efforts de flexion naturels (mouvements latéraux). Une garantie de pérennité supplémentaire pour l'ouvrage.

Le tablier se développe sur une longueur totale de 2 252 m, soit trois travées centrales de 560 m et deux travées de rive de 286 m. Il est constitué d'une structure mixte composée de deux poutres longitudinales en acier de 2,2 m de haut entretoisées tous les 4 m. D'une largeur de 27,20 m pour une épaisseur de 24 cm, le hourdis supérieur, en béton armé, est connecté à cette charpente por-

teuse métallique. Sa particularité: il est formulé sur la base d'un ciment de type CEM III. Préfabriqués à terre, les voussoirs – des éléments de 12 m de long – sont acheminés par barge jusqu'au lieu de pose. Leur mise en œuvre se fait par encorbellements successifs avec assemblage par éclissage et haubanage à l'avancement. En effet, l'originalité de ce tablier est d'être suspendu dans sa totalité à ses haubans, ce qui en fait une structure isolée du reste de l'ouvrage qui se comporterait comme une gigantesque balancelle en cas de séisme. Toutefois, dans les conditions normales d'utilisation, des bracons-fusibles assurent la tenue transversale du tablier au droit des pylônes. Ce dispositif permet d'éviter les phénomènes de balancement sous l'effet du vent. Après tout, le confort et la sécurité des usagers doivent être la finalité de toute réalisation. ■



7



8

→ Durabilité et simplicité Les bétons de “Rion”

“**L**e pont de Rion-Antirion, qui porte finalement le nom de son visionnaire, l'ex-Premier ministre grec Harilaos Trikoupis, est un ouvrage original en termes de bétons, explique François Cussigh, expert béton à la direction des innovations, techniques et connaissances de GTM Construction (filiale Vinci Construction). Il s'agit d'un des premiers chantiers sur lequel la durabilité a été le facteur déterminant dans la mise au point des formulations.” La durée de service de 120 ans exigée par le cahier des charges n'y est sans doute pas étrangère. Des fondations jusqu'au sommet des pylônes, plus de trente formules de bétons ont été employées. L'essentiel du volume a été utilisé pour la réalisation de la partie inférieure de l'ouvrage : semelles de fondations, piles coniques et chevêtres ont nécessité quelque 190 000 m³ de béton de classe de résistance C 45/55 (contre 38 000 m³ pour les jambes inclinées et le tablier). Ces bétons ont été formulés à base d'un ciment

CEM III 42,5 PM ES contenant 60 % de laitier. Une commande spéciale pour le chantier. “Cette fabrication particulière est due à l'absence de ciment de haut fourneau sur le marché local”, insiste François Cussigh. Le chantier a préféré ce ciment peu exothermique adapté aux ouvrages en milieu marin et dont l'utilisation est un gage de durabilité, d'absence de fissurations et de bel aspect de parement. Un leitmotiv présent tout au long des travaux.

● Un ouvrage à contre-courant

Le second paramètre recherché était celui de la facilité de mise en œuvre. “Les bétons devaient répondre à une double problématique, résume François Cussigh. Avoir un long maintien de rhéologie, et ce, quelle que soit la température extérieure.” Dans ce contexte technique, c'est un superplastifiant de nouvelle génération qui a apporté la solution attendue : une ouvrabilité

garantie et constante durant trois heures. Ainsi adjuvantés, les bétons pouvaient aussi bien être pompés qu'acheminés par les toupies embarquées sur des barges.

Les granulats locaux étaient d'origine calcaire, concassés en 0/20 mm. La carrière a également fourni un sable spécial qui permet de réguler le taux de fines autour de 9 %. “Nous n'avons pas utilisé de granulats alluvionnaires pour prévenir tout risque d'alcali-réaction”, reprend François Cussigh.

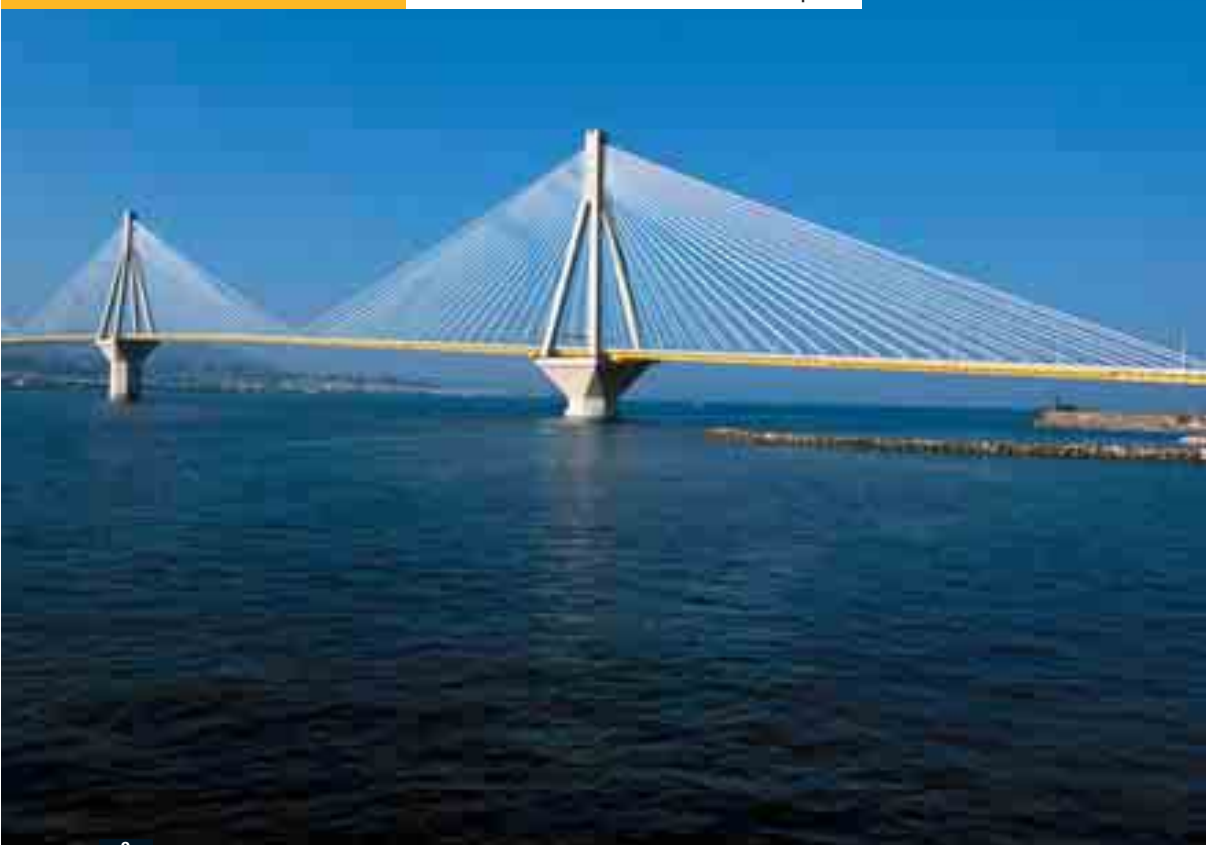
Éléments complexes, armés à l'extrême, les jambes inclinées demandaient un béton ultra-fluide. Le matériau mis en place, de classe de résistance C 60/75, présentait un étalement de 55 cm à la table à secousse. Il est formulé à partir

d'un mélange de CEM I 52,5 PM (1/3) et de CEM III 42,5 PM ES (2/3). Le premier garantit une résistance à jeune âge, tandis que le second offre une faible exothermie et une résistance à la pénétration de chlorures. Résultat concluant puisque celle-ci ne dépasse pas 1 000 coulombs à 90 joules, soit une migration très faible.

Pour la préfabrication du tablier (hourdis supérieur), la logique de durabilité et de limitation exothermique a été poussée jusqu'au bout. Le béton est en effet formulé avec un CEM III. “Nous avons réalisé un C 60/75 qui présente une résistance à 28 jours sur cylindre de 82 MPa avec un écart type de 5 MPa”, souligne François Cussigh. L'unique béton à base de CEM I est utilisé pour le clavage des voussoirs du tablier. ■

➤➤➤ Pose de l'élément de clavage d'une des trois travées principales de l'ouvrage. Le clavage final du pont a eu lieu le vendredi 21 mai 2004.





9

10

→ Dispositifs antisismiques Le chaos n'aura pas lieu

Le pont Harilaos-Trikoupis a été conçu pour accepter, en cas de séisme, des déplacements différentiels en x, y ou z pouvant atteindre 2 m entre chaque pylône. Cette capacité permet de compenser l'écartement continu des rives dû à la faille tectonique qui atteint 8 mm par an, soit 80 cm en un siècle. Pourtant, "le déplacement réel calculé pour le séisme maximal est de l'ordre de 25 cm", précise Alain Pecker, P-DG de Géodynamique & Structure, bureau d'études qui a mis au point les fondations de l'ouvrage. En effet, la zone d'implantation du franchissement présente un caractère sismique : depuis 1965, le secteur a connu neuf séismes majeurs d'une magnitude supérieure à 6 sur l'échelle de Richter. Le pont a été calculé pour résister à un tremblement de terre majeur de 7, avec des accélérations du sol de 0,48 g. Un séisme qui a une période de retour de 2000 ans ! Pour garantir sa pérennité, l'ouvrage cumule les systèmes de protection antisismique dont "l'objectif n'est pas de maintenir l'ouvrage intègre, mais de limiter les

dommages tout en le rendant réparable", poursuit Alain Pecker. Le dispositif le plus impressionnant est le principe des fondations "flottantes" associées à des renforcements locaux du sous-sol par inclusions de tubes métalliques. Une première mondiale.

● Protections multiples

"Ce dispositif sert en priorité à empêcher les courbes de rupture de passer dans le sol lors d'un séisme", explique Alain Pecker. Et il pallie une éventuelle perte de résistance du sous-sol par liquéfaction. L'ouvrage est également équipé de joints de dilatation de 2,50 m de souffle en service et de 5 m sous séisme. À l'interface des deux systèmes de fondations : une couche de granulats calcaires. "Le gravier joue le rôle de fusible calibré", reprend Alain Pecker. Le choix du matériau détermine le coefficient de frottement des semelles, qui doit être très précis pour limiter au minimum les déplacements des piles."

Le tablier constitue le second aménagement antisismique d'importance. Suspendu dans

sa totalité à ses haubans, il réagirait comme une balancelle en cas de séisme. Seuls quatre amortisseurs le connectent à chacun des pylônes. Ces éléments de 12 m de long et 1 m de diamètre autorisent une course de 3 m, limitant les mouvements du tablier en cas de secousse, tout en dissipant l'énergie transmise dans la limite de 5 mégajoules. Derniers éléments de protection, des déviateurs parasismiques, dits IHD (Internal Hydraulic Damper), équipent les haubans, reprenant les déviations des câbles liées aux séismes dans une limite de +/- 5 à 10°. Avec ce système, Freyssinet International garantit des mouvements inférieurs à 10 cm à mi-longueur des câbles. Le dispositif IHD sert aussi de fusible, sa résistance étant calculée pour céder avant de surcharger les goussets d'ancrage des câbles. Enfin, les haubans utilisant des mors d'ancrage bloqués, il n'existe aucun risque de voir une clavette ou un toron se libérer du bloc d'ancrage, même en cas de distension complète du câble. ■

TEXTE : ANTOINE VAVEL

PHOTOS : VINCI CONSTRUCTION

>>> **9** Le pont Harilaos-Trikoupis permet aujourd'hui de franchir en quelques minutes le passage le plus étroit du golfe de Corinthe. **10** L'ouvrage a été inauguré le mercredi 11 août 2004, deux jours avant l'ouverture des Jeux olympiques d'Athènes.



Concédant :
État grec

Concessionnaire :
Gefyra (Vinci et cinq partenaires grecs)

Constructeur :
Kinopraxia Gefyra
(Vinci et cinq partenaires grecs)

Architecte :
Berdj Mikaëlian

Études :
Vinci Construction Grands Projets,
Ingerop, Géodynamique
& Structures, Domi (Grèce)

Consultation études :
Buckland et Taylor

Coût :
630 M€



Un pont autoroutier au palmarès des records

●●● ÉLÉGANT, ÉLANCÉ, LÉGER, PRESQUE TRANSPARENT, LE VIADUC DE LA SIOULE RÉUSSIT LE PARI DIFFICILE DE SE FONDRE DANS SON ENVIRONNEMENT NATUREL : UN SITE PROTÉGÉ, VALLONNÉ, AUX PENTES BOISÉES. IL IMPOSE POURTANT PAR SES DIMENSIONS : 150 M DE HAUT ET 990 M DE LONG. C'EST L'UN DES OUVRAGES EXCEPTIONNELS DE L'AUTOROUTE A89, AU MÊME TITRE QUE LE VIADUC DU PAYS DE TULLE OU LE PONT SUSPENDU DU CHAVANON. LE VIADUC DE LA SIOULE PEUT ÊTRE CONSIDÉRÉ COMME L'UN DES PLUS IMPORTANTS OUVRAGES D'ART ACTUELLEMENT EN CONSTRUCTION EN FRANCE.



1



2

In fine, l'autoroute A89 doit permettre de relier la façade atlantique à l'Europe centrale. En effet, entre Arveyres en Gironde et Combronde dans le Puy-de-Dôme, la construction de cette nouvelle liaison transversale est en train de s'achever. Longue de 340 km, l'autoroute mettra à l'horizon 2007 Clermont-Ferrand à trois heures de Bordeaux. Parmi les derniers lots aujourd'hui en travaux, le tronçon de 52 km reliant Saint-Julien-sur-Sancy et Combronde, qui se situe à une trentaine de kilomètres à l'ouest de Clermont-Ferrand. Implanté à peu près à mi-longueur de cette section, le viaduc de la Sioule en est l'ouvrage majeur. Ce viaduc peut en effet être considéré comme l'un des plus importants ouvrages d'art actuellement en cours de réalisation en France.

● Volonté d'intégration maximale dans le paysage

"Le viaduc de la Sioule est le fruit d'une étude argumentée avec visites sur site, résume l'architecte Berdj Mikaëlian. La démarche a permis de mettre au point un projet d'ouvrage qui a été proposé à Autoroutes du Sud de la France." Les

études ont été menées dans le cadre d'un concours réunissant architecte et bureau d'études techniques.

La volonté d'intégration maximale de l'ouvrage dans un site naturel vallonné aux collines boisées et couvertes de végétation a naturellement dicté la recherche du design général du viaduc. *"Notre souci était de bien dégager le fond de la vallée où serpente la Sioule",* explique l'architecte. D'où le choix d'un ouvrage ne comportant qu'un nombre limité d'appuis. La partie centrale du tablier est supportée par trois piles

double fût distantes de 192,50 m, ce qui donne au viaduc sa silhouette élancée. De part et d'autre, les travées dites "d'approche" sont soutenues par quatre piles monofût implantées deux à deux, sur les versants est et ouest de la vallée de la Sioule. Dans ces deux zones, l'entraxe des piles est variable.

● Grande inertie de flexion

Les piles centrales sont les plus hautes : 82 m pour P3, 119 m pour P4 et 135 m pour P5. Leur profil à deux fûts parallèles

CHIFFRES CLÉS

- Longueur du tablier : 990 m.
- Longueur maximale des travées : 192,50 m.
- Nombre de piles : 7.
- Pile la plus haute : 135 m (P5).
- Béton : 49 000 m³.
- Armatures passives : 6500 tonnes.
- Armatures de précontrainte : 1 200 tonnes.
- Délai de réalisation : 36 mois.



>>> Au nombre de sept, les piles présentent deux profils différents : trois piles double fût au centre de la vallée et quatre piles monofût implantées deux à deux sur les versants est et ouest.



3



4

>>> 1 L'ensemble des piles fait appel, pour leur réalisation, à un BHP de classe de résistance C 50/60. **2** Les piles sont construites à raison d'une levée par jour pour les piles double fût et d'une levée tous les deux jours pour les piles monofût. **3** Le tablier est construit selon la technique des encorbellements successifs. **4** Les double fût des piles centrales sont reliés à l'aide de coques de liaison de 40 cm d'épaisseur.

espacés de 10,50 m leur confère une grande inertie en flexion transversale et en torsion et permet d'assurer un encastrement efficace du tablier. Il leur offre en même temps la souplesse longitudinale nécessaire pour encaisser les déplacements imposés par les variations linéaires du tablier, mouvements résultant des dilatations thermiques, des phénomènes de retrait-fluage ainsi que des variations de température. En partie basse, les fûts de chacune des piles centrales sont reliés entre eux à l'aide de coques de liaison de 40 cm d'épaisseur coulées en place, ce qui permet d'augmenter la rigidité de l'embase des piles. La hauteur de cette liaison – dite "embase" – varie de 23,50 m sur P3 à 47,71 m sur P5. La hauteur libre des fûts dédoublés n'est donc pas identique sur les trois piles. Sur P4 et P5, elle atteint 87,30 m, tandis que sur P3 elle est de 59,30 m.

Les piles centrales double fût sont construites à raison d'une levée par jour. Les outils mis en œuvre se composent de deux coffrages intérieurs (un par fût) et d'un coffrage extérieur (un pour deux fûts). Deux jeux complets de coffrages ont été utilisés pour l'ensemble des trois piles centrales. Quant aux quatre piles d'extrémités, elles ont des hauteurs comprises entre 14 et 70 m. Leur construction suit le rythme d'une levée tous les deux jours et est réalisée à l'aide d'un coffrage semi-grimpant autostable constitué de deux demi-coquilles.

● **Semelles superficielles et puits marocains**

Les piles font appel, pour leur réalisation, à un Béton à Haute Performance (BHP) de classe de résistance C 50/60. Bien que devant supporter le gel, ce

béton est formulé sans agent entraîneur d'air : c'est sa compacité à l'état durci qui permet de résister à ce phénomène. Pour atteindre les caractéristiques souhaitées, la formule présente un rapport eau efficace/ciment inférieur à 0,4 et comprend l'ajout de fillers calcaires qui

améliorent la compacité et la maniabilité du béton ainsi que l'aspect esthétique du parement. La maniabilité du mélange et son maintien rhéologique sont assurés par l'utilisation d'un superplastifiant. À l'exception des piles P1 et P7, qui sont contiguës aux culées et réalisées

EMPLOI FORMATION

Passeport pour l'emploi

Mettre la formation au service de l'embauche. Ainsi peut être définie la démarche originale mise en place sur le chantier du viaduc de la Sioule par Sogeform, l'entité de formation de Sogea Construction, l'AFPA et le conseil régional d'Auvergne. Le programme "Passeport pour l'emploi" vise à embaucher des personnes sans activité, en leur offrant une formation complète de 490 heures. L'objectif de cette formation est de permettre l'acquisition de bons comportements professionnels; elle débouche sur un diplôme par validation des acquis de l'expérience (VAE).

Sur le chantier, la formation et l'intégration des stagiaires dans les équipes se sont déroulées en trois vagues successives. Vingt-quatre personnes, sur la trentaine de candidats présélectionnés, ont été embauchées pour la durée des travaux du viaduc. Ces jeunes professionnels resteront probablement dans l'entreprise à l'issue du chantier, si les opportunités offertes par les futurs contrats de construction le permettent.



5



6

TECHNIQUE

Les bétons soumis au gel sur papier glacé

Les bétons soumis au gel font l'objet d'un guide technique édité par le LCPC en décembre 2003. Le document "Recommandations pour la durabilité des bétons durcis soumis au gel" a été rédigé sous la conduite de Jacques Prost, chef du service ouvrages d'art-génie physique du Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées de Lyon. Il rappelle les mécanismes de dégradation des bétons soumis aux effets conjugués des cycles de gel/dégel et des sels de déverglaçage et définit les domaines d'application et les conditions d'environnement des ouvrages. Le document traite de l'élaboration des bétons en abordant les problématiques des bétons traditionnels (jusqu'à 50 MPa de résistance), des BHP (supérieur à 50 MPa), des bétons de préfabrication à démoulage immédiat et des bétons coulés sur site à l'aide d'une machine à coffrage glissant. Enfin, il précise les recommandations pour la mise au point des formules, sur la manière de conduire une épreuve de convenance et sur l'établissement des contrôles.

Recommandations pour la durabilité des bétons durcis soumis au gel,
Collection Techniques et méthodes des Laboratoires des Ponts et Chaussées
aux Éditions du Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, 38 euros.
(Voir également la présentation de l'ouvrage page 40).

sur semelles superficielles, toutes les autres piles sont fondées sur des puits marocains. Les trois piles centrales – P3, P4 et P5 – reposent sur un ensemble de quatre puits de 5 m de diamètre descendant à une profondeur de 10 à 17 m.

Les deux dernières piles – P2 et P6 – sont fondées sur monopuit de 7 m de diamètre, d'une profondeur de 14 m environ. Les semelles présentent une épaisseur de 3 m sous les piles simple fût et de 4 m sous les piles double fût.

● Construction en encorbellements

Le tablier du viaduc surplombe le fond de la vallée ainsi que le lit de la Sioule de près de 140 m. Dimensionné pour accueillir une chaussée à 2 x 2 voies de circulation, il s'étend sur une longueur de 990 m avec une courbe en plan de 1 900 m de rayon. D'ouest en est, sa pente longitudinale est de 0,7 %, tandis que transversalement la chaussée a une section en toit avec des pentes de 2,50 %.

Le tablier du viaduc présente deux profils en long différents. Dans sa partie centrale, il est de hauteur variable, passant de 10 m au droit des piles

double fût à 5,50 m à mi-travée. Dans les zones de rive par contre, le tablier a une hauteur constante de 5,50 m. Il est construit selon la technique des encorbellements successifs, encorbellements réalisés depuis chaque pile à l'aide d'équipages mobiles.

Quant aux voussoirs (250 voussoirs de fléau), ils ont une longueur courante comprise entre 2 m et 3,50 m. Les voussoirs sur piles (VSP) mesurent 15,50 m de long au niveau des trois piles double fût et 8,50 m de long au droit des piles monofût.

Le tablier est constitué d'un monocoisson précontraint à âmes inclinées avec un hourdis supérieur de 19,50 m de largeur. L'épaisseur des âmes varie de 350 à 700 mm dans les tabliers à hauteur constante, et de 350 à 550 mm pour le tablier central à hauteur variable. Le béton du tablier est un Béton Haute Performance (BHP) de classe de résistance C 70/85. Sa formulation est basée sur les mêmes principes que le béton des piles, fumée de silice en plus, ce qui permet d'assurer la compacité et la résistance au gel du matériau une fois durci.

La vallée de la Sioule dans laquelle est implanté le viaduc est située dans une zone sismique "d'activité tellurique très



- 7**
- >>> 5** Le profil à deux fûts parallèles confère aux piles une grande inertie en flexion transversale et en torsion. **6** Dans sa partie centrale, le tablier est de hauteur variable, passant de 10 m au droit des piles double fût à 5,50 m au niveau de la clef de voûte. **7** Toute la partie centrale du tablier sera supportée par trois piles double fût, distantes de 192,50 m.

faible mais non négligeable". Côté géologique, le fond de vallée présente une faille – non active du point de vue du risque sismique – qui constitue la zone de contact entre les gneiss, à l’est, et les migmatites, à l’ouest. Compte tenu de son implantation, le viaduc répond donc aux règles de construction parasismiques des ponts dits “à risque normal”.

● Un site sensible aux pollutions et aux agressions

Afin d’absorber les effets de la dilatation et d’assurer la reprise des efforts liés au vent et à d’éventuels séismes, le tablier est encastré au niveau des piles centrales et posé sur appuis glissants multidirectionnels au droit des piles monofût et des culées. Des butées anti-sismiques complètent le dispositif de protection de l’ouvrage. Placés sur les piles

monofût et les culées, ces éléments guident un tenon solidaire des voussoirs sur piles, bloquant ainsi tout mouvement transversal du tablier tout en autorisant son déplacement longitudinal. La vallée de la Sioule constitue une zone naturelle d’intérêt écologique, faunistique et floristique (Znieff). Conséquence : le site est sensible à tous les types de pollution et d’agressions extérieures. Le site de construction du viaduc bénéficie de mesures de protection de l’environnement, au même titre que l’ensemble des chantiers de l’autoroute A89. Les entreprises travaillant sur ce chantier se sont engagées à réduire au minimum l’impact de leurs travaux, un engagement qui s’est traduit par la mise en place d’un Plan de Respect de l’Environnement (PRE). Ce document détaille les interdits et les dispositions

obligatoires. Ainsi, il stipule qu’aucun rejet, quel qu’il soit, n’est autorisé dans la Sioule ni dans le milieu naturel, qu’aucun déchet ne peut être laissé sur le sol, qu’aucun feu ne peut être allumé sans autorisation et qu’il ne peut être procédé à aucun défrichage sauvage.

● Un chantier propre et respectueux de l’environnement

Les eaux doivent être toutes récupérées et dirigées vers un bassin de décantation. En ce qui concerne la flore et la faune, les zones environnantes et les zones clôturées doivent être respectées. En parallèle, l’entretien des installations doit être permanent et la pollution due aux matériels de chantier réduite au minimum. De plus, les emprises des zones de travaux sont minimisées de manière systématique. Dans ce contexte global, si le viaduc de la Sioule peut réellement être considéré comme l’un des ouvrages les plus importants de l’autoroute A89, son chantier de construction bénéficie d’une palme au titre de la propreté et du respect de l’environnement ! ■

TEXTE: ANTOINE VAVEL

PHOTOS: RÉGIS BOUCHU/ACTOPHOTO



Maître d’ouvrage :
ASF (Autoroutes du Sud de la France)

Maître d’œuvre :
Setec TPI

Architecte :
Berdj Mikaëlian

Entreprises :
Campenon-Bernard TP (mandataire),
Dodin et Campenon-Bernard Régions
Freyssinet (précontrainte)

BET structures :
Jean Müller International

Précontrainte :
Freyssinet

Coût :
48 M€



Deux doigts tendus au-dessus d'une brèche géante

●●● UN ARC PARABOLIQUE TRÈS FIN, TENDU ENTRE DEUX FALAISES DE PLUS DE 100 M DE HAUTEUR.

C'EST AINSI QU'APPARAÎT LE PONT DU BRAS DE LA PLAINE, RÉCEMMENT CONSTRUIT DANS LE PAYSAGE

GRANDIOSE DE L'ÎLE VOLCANIQUE DE LA RÉUNION. LA STRUCTURE NE TRAVAILLE PAS EN VOÛTE, MAIS

EN ENCASTREMENT SUR SES CULÉES. CONSTITUÉE DE DEUX HOURDIS EN BÉTON À HAUTES PERFORMANCES

RELIÉS PAR DES DIAGONALES MÉTALLIQUES PRÉCONTRAINES, ELLE SYMBOLISE LA DERNIÈRE GÉNÉRATION

DES CONNEXIONS ACIER-BÉTON DANS LES OUVRAGES DE GÉNIE CIVIL.

À site exceptionnel, ouvrage exceptionnel. Comment imaginer construire un ouvrage de facture classique quand on doit franchir, dans l'environnement tropical et volcanique de l'île de la Réunion, une ravine de 170 m de large, encadrée par deux falaises inclinées à 70° et hautes de plus de 100 m ? Financé par le conseil général, le franchissement de la rivière du Bras de la Plaine pour assurer la desserte de la commune de l'Entre-Deux depuis Le Tampon conduisait forcément à un pont original. Selon la volonté de l'architecte Alain Amedeo, deux doigts tendus face à face relient aujourd'hui les deux rives, dans "un site beau et fort, la montagne en fond, un plateau qui avance vers la mer, entaillé par la rivière très profonde", pour reprendre ses termes.

À l'échelle du gigantisme de la brèche qui descend de l'un des trois grands cirques de l'île, l'ouvrage est un véritable travail

d'orfèvre dans lequel a été opérée une "chasse aux kilos inutiles". Pourtant, vu de près, le pont du Bras de la Plaine en impose, avec pas moins de 17 m d'épaisseur à ses extrémités et une travée unique de 280 m !

● Une innovation incontestable pour les experts

L'histoire de ce pont a commencé avec un appel d'offres européen restreint. Déclaré lauréat en 1998, le groupement associant l'atelier d'architectes Amedeo Padlewski et associés à Jean Muller International (JMI) et Scetauroute International, tous deux filiales du groupe d'ingénierie Egis, avait arrêté le principe d'un arc tendu entre les falaises. Une solution qui s'était vite imposée lors de la visite du site. Sauf que, contrairement à un arc classique, celui-ci ne devait pas travailler en voûte. Discontinu en son milieu, il est en fait encastré sur ses culées et dessine une large parabole

soumise à un "effet d'arc" par vérinage au moment du clavage.

Mais la grande originalité du pont du Bras de la Plaine réside dans son épaisseur. En effet, à un tablier classique a été préférée une solution sans précédent, faisant du projet une innovation incontestable pour les experts en ouvrages d'art. "Ce pont représente la dernière génération des connexions acier-béton", explique Jean-Pierre Viallon, directeur au bureau d'études de Bouygues Travaux Publics. Allusion aux poutres à treillis en béton, avec diagonales en béton armé, du pont de Bubiyan, au

CHIFFRES CLÉS

- Volume de béton : 8 200 m³.
- Précontrainte : 225 tonnes.
- Armatures passives : 1 450 tonnes.



>>> 1 L'ouvrage, qui comporte une seule travée de 280 m, a été construit par encorbellements successifs à l'aide de deux équipages mobiles à partir des culées, par tronçons de 12,70 m.



2

TECHNIQUE

Deux hourdis en BHP (B 60) ferrailés à 220 kg/m³

Le pont du Bras de la Plaine fonctionne comme une poutre Warren de hauteur variable, dont la membrure est le siège d'un effet d'arc, après clavage à la clé. Les charges appliquées à la structure produisent simultanément une flexion de la poutre treillis et une compression du hourdis inférieur. Le hourdis supérieur présente en section des épaisseurs de 0,27 à 0,85 m. Le hourdis inférieur présente un intrados parabolique de 661 m de rayon, discontinu sur environ 15 m à la clé. Sa section est rectangulaire sur les culées et progressivement nervurée en sous-face en se rapprochant de la clé, pour arriver à 0,2 m d'épaisseur. Il est soumis à des efforts de compression élevés, générés par le moment de flexion à mi-travée. Tous les efforts sont repris en encastrement sur les culées.

Cette distribution des efforts a exigé une maîtrise totale des bétons en termes de rhéologie et de fluage dans le temps. En amont, le Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC) a donc mené des travaux extrêmement poussés sur les formulations. C'est un BHP de 60 MPa de résistance caractéristique à 28 jours qui a été choisi pour les deux hourdis, avec une densité de ferrailage de 220 kg/m³. Le volume total de béton représente 2 395 m³, soit, sur les 280 m de portée, une épaisseur moyenne théorique de 0,72 m. Dans les culées, on retrouve du béton B 60 et du béton B 35 avec une densité de ferrailage moyenne de 160 kg/m³. Les deux consoles du hourdis supérieur du tablier sont précontraintes. Ancrés par groupes de quatre à l'about de chaque voussoir, des câbles 12 ou 19T15 Super de classe 1 860 MPa sont repris à l'arrière des culées et dessinent, en plan, des arêtes de poisson.

- >>> **2** Le tablier mixte acier-béton d'une portée de 280 m franchit une ravine de 170 m de large, à plus de 100 m de haut, au moyen de deux fléaux construits par encorbellements successifs.
- 3** La structure est composée de hourdis en BHP reliés par un treillis de diagonales métalliques. **4** Avant clavage, le tablier a été soumis à un effort de compression de 5 500 tonnes afin de créer un effet d'arc.

Koweït (1983), qui avait été suivi du treillis à diagonales en béton précontraint du viaduc de Sylans sur l'autoroute A40 (1990), puis des treillis à diagonales métalliques, mais sans précontrainte, des viaducs du Boulonnais sur l'autoroute A16 (1998). "Nous avons construit une structure constituée alternativement de diagonales tendues et comprimées, qui font monter et descendre les efforts tout au long de l'ouvrage", précise l'ingénieur. La nouveauté, c'est que les diagonales tendues sont précontraintes, alors que jusqu'à présent les treillis métalliques étaient reliés au béton par de simples connexions passives."

constituées de tubes en acier. En réalité, hormis la taille de la brèche, la seule contrainte pour les bureaux d'études et les entreprises de construction était d'arriver à reconduire l'effort tranchant dans le sens longitudinal. "Au final, l'épaisseur moyenne du pont a pu être divisée par deux par rapport aux structures classiques", observe Jean-Pierre Viallon, pour qui cette structure "légère", qui permet de dégager des économies sur les fondations, demande maintenant à être expérimentée sur des viaducs à plusieurs travées. Le but étant de pouvoir un jour concurrencer les ouvrages d'art à haubans.

La précontrainte des diagonales est assurée par une paire de câbles comprenant 10 à 17 torons. Les ancrages sont situés dans les hourdis inférieur et supérieur. En contrepartie de cette conception, le chantier s'est révélé complexe. "Les méthodes de construction ont été excep-

● Une structure aérienne

Le pont offre une transparence inégalée pour de telles dimensions, en dépit de diagonales exceptionnellement grandes



tionnelles, convient Jean-Pierre Viallon. Nous avons conçu deux équipages mobiles dimensionnés pour les éléments de rive les plus importants de l'ouvrage. Le poids de l'outil coffrant (150 tonnes) représentait environ 80 % du poids du béton qu'il devait porter."

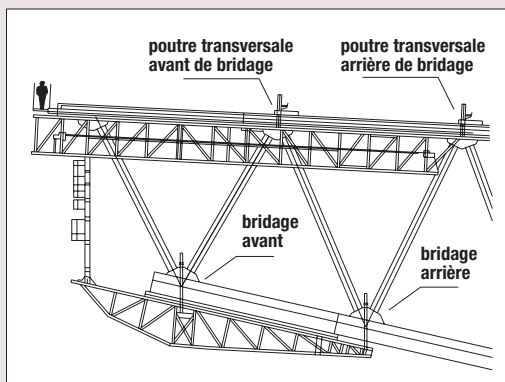
En raison des difficultés d'accès en rive droite, le plus gros du chantier s'est installé en rive gauche, notamment la centrale à béton. L'alimentation des coffrages était assurée par un blondin d'une portée entre mâts de 415 m, les mâts mesurant 35 m de haut et le tout offrant une capacité de

charge de 8 tonnes. Pour les culées, les opérations étaient assez simples : exécution des voiles par levées de 6,90 m de haut par plots horizontaux de 10 m, coulage de la dalle supérieure par prédalles posées à mi-portée sur des appuis provisoires. Pour le tablier, les équipages mobiles

ont permis de progresser symétriquement à partir des rives, par trames de 12,7 m. Là encore, les ingénieurs ont fait preuve d'imagination. Avant d'effectuer l'ultime coulée de béton, huit vérins horizontaux ont été positionnés sur une poutre transversale construite à cet effet. L'idée étant

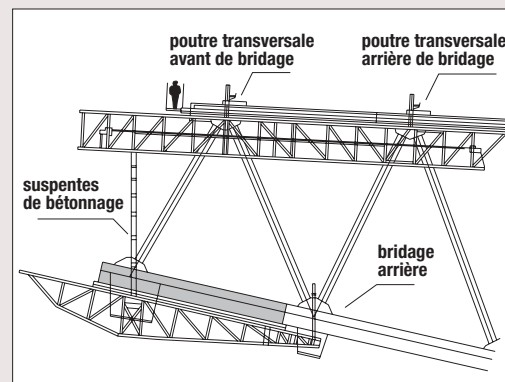
III Principe de bétonnage et de translation de l'équipage

Coulage du plot supérieur



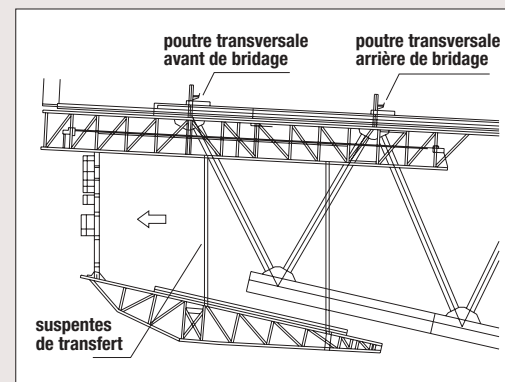
Le tablier du pont a été construit au moyen de deux équipages mobiles d'un poids unitaire de 150 tonnes. Après la mise en place d'une paire de diagonales comprimées, l'outil coule

Coulage du plot inférieur



d'abord 12,7 m de hourdis supérieur. Une paire de diagonales tendues est alors à son tour mise en place, puis l'outil coule 12,7 m de hourdis inférieur. En partie haute, l'équipage mobile

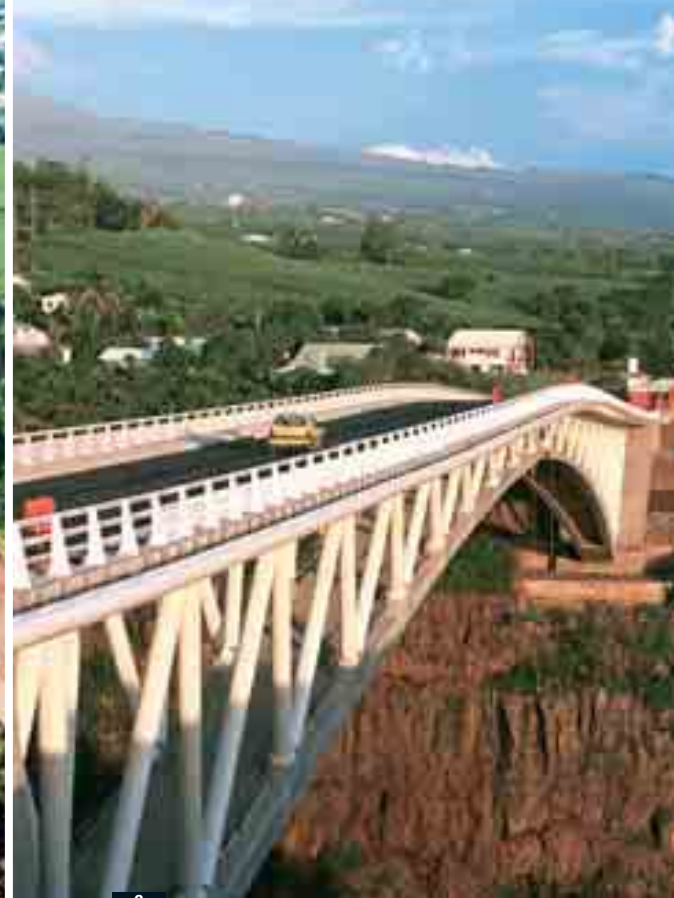
Transfert de l'équipage inférieur



fonctionne comme un tiroir, le coffrage et la charpente venant s'appuyer sur le béton réalisé. En partie basse, le coffrage et la charpente se déplacent à l'aide de suspenes de transfert.



5



6

>>> **5** Le pont qui relie les deux rives du plateau est discontinu en son milieu, encastré sur ses culées. Il travaille en arc.

6 Le cintrage de l'ouvrage a été obtenu par l'introduction d'une compression artificielle avant le clavage.

ENTRETIEN

avec Alain Amedeo, architecte DPLG, de l'Atelier Amedeo Padlewski et associés.

Quel rôle joue l'architecte dans un projet aussi technique ?

Dès que nous avons été agréés pour concourir, les ingénieurs de Jean Muller International et moi-même sommes aussitôt partis à La Réunion. Nous avons adopté une démarche intellectuelle originale, en décidant de partir à la découverte du site chacun de son côté, puis de confronter ensuite nos réflexions. Il se trouve qu'à partir d'un même paysage, l'ingénieur et l'architecte ont eu la même intuition.

Quelle est l'idée fondatrice du pont du Bras de La Plaine ?

Le bureau d'études excluait l'hypothèse d'un appui intermédiaire dans la brèche et, pour ma part, je souhaitais conserver autant que possible le côté sauvage de cette magnifique ravine. Par un concours de circonstances intéressant, les notions de technique et d'esthétique se sont rejointes sur l'idée d'un arc fin, tendu entre les deux rives. De plus, compte tenu de la hauteur des falaises, il fallait éviter de construire des appuis trop bas. C'est pourquoi nous avons opté pour le principe de culées massives aux extrémités, et d'un chantier en porte-à-faux au-dessus du vide.

En son milieu, le hourdis inférieur de l'arc est interrompu. Pourquoi ?

Tous les efforts de l'ouvrage étant pris en charge aux extrémités, l'arc ne travaille pas du tout en voûte. Pour moi, la meilleure façon de montrer qu'aucune force ne transite d'un bout à l'autre dans le hourdis inférieur était d'interrompre celui-ci sur une quinzaine de mètres à la clé. C'est un des éléments essentiels du pont, la signature de la structure d'une très grande finesse.

de développer 5 500 tonnes de compression dans les fléaux pour les redresser et provoquer un effet d'arc compatible avec les déformations différées du béton. "Procéder par cintrage n'aurait pas permis de résoudre le problème des déformations horizontales, et concevoir des poutres pour assurer la continuité aurait, à l'inverse, créé un effort horizontal supplémentaire", précise Jean-Marc Tanis, directeur de Jean Muller International. Grâce à la solution choisie, provisoire puisque les vérins ont été par la suite retirés, le tablier du pont est correctement cintré, les efforts de compression introduits artificiellement avant le clavage venant compenser les efforts ultérieurs de flexion et de fluage. De cette manière, l'ouvrage est finalement soumis à un moment de basculement plus faible et, par voie de conséquence, les culées reprennent des moments d'encastrement moins importants. ■

TEXTE: PHILIPPE GUÉRARD

PHOTOS: SERGE GÉLABERT



Maître d'ouvrage :
Conseil général de la Réunion

**Maître d'œuvre
(conception et contrôle
d'exécution) :**
JMI et Scetauroute

Architecte :
Atelier Alain Amedeo,
Padlewski et associés

Entreprises :
Bouygues Travaux Publics,
DTP Terrassements

Sous-traitant :
VSL

Coût :
15 M€

solutions

Les BFUP : des structures élancées qui laissent place à l'imagination

●●● LES BÉTONS FIBRÉS À ULTRA HAUTES PERFORMANCES

RÉUNISSENT TOUS LES QUALIFICATIFS REQUIS EN TERMES

MÉCANIQUES ET ESTHÉTIQUES : RÉSISTANCE, DURABILITÉ,

COMPACITÉ EXTRÊME, LIBERTÉ DES FORMES ET DES TEXTURES.

CE NOUVEAU MATÉRIAU PERMET D'INVENTER DE NOUVELLES

FORMES PLUS LÉGÈRES QUI N'ONT DE LIMITE QUE LA CRÉATIVITÉ

DES ARCHITECTES.



→ Suisse

À Lauterbrunnen, la réfection d'une passerelle
au cahier des charges très contrôlé **p. 21**



→ Séoul, Corée

Une passerelle remarquable relie la capitale
à une île aménagée en jardin **p. 22**



→ Calgary, Canada

Des abris en forme de coquilles
dans une gare futuriste **p. 23**



→ Sakata-Mirai, Japon

Une passerelle piétonne d'une grande finesse
de 50 m de long **p. 24**

→ Des qualités esthétiques indéniables pour des bétons ultra performants

DEPUIS LE DÉBUT DES ANNÉES QUATRE-VINGT-DIX, LES BFUP APPARAISSENT PROGRESSIVEMENT SUR LES CHANTIERS LES PLUS AUDACIEUX. PARTICULIÈREMENT RÉSISTANTS, PLUS RENTABLES ÉCONOMIQUEMENT, PLUS FACILES D'EMPLOI POUR UN GAIN DE TEMPS ÉVIDENT, LEUR UTILISATION DEVRAIT RAPIDEMENT SE GÉNÉRALISER.

Les BFUP. Prononcez "B-Fup". Cet acronyme désigne les Bétons Fibrés à Ultra Hautes Performances. Ultra hautes performances ? Jugez plutôt : leur résistance caractéristique à la compression est supérieure à 150 MPa ; elle peut atteindre 250 MPa ! À ce niveau de performances, les BFUP dépassent largement leurs prédécesseurs – les Bétons à Hautes Performances (BHP) –, dont la résistance en compression était en général comprise entre 50 et 80 MPa. En écho à ces résistances hors du commun, les structures réalisées en BFUP s'allègent. Pour l'architecte, c'est la possibilité de créer, d'inventer de nouvelles formes plus fines et élan-

cées. Rudy Ricciotti, l'un des premiers architectes à avoir utilisé ces bétons de nouvelle génération, est séduit par la possibilité qui s'offre à lui de "réduire la matière". D'autant qu'en ce qui concerne la qualité des parements, les BFUP présentent d'excellents résultats, en particulier grâce à la finesse de leur granulométrie. Enfin, et ce n'est pas le moindre de leurs avantages, les BFUP ne redoutent pas l'épreuve du temps, même dans un environnement agressif. Leur secret, nous y reviendrons, est un coefficient de perméabilité extrêmement faible, dix fois moindre que pour un béton classique.

● Compacité extrême du matériau

Les recherches ont démarré au début des années quatre-vingt-dix et les premiers chantiers ont été réalisés en 1997 et 1998 en France, dans les centrales

nucléaires de Cattenom et Civaux, et au Québec, à Sherbrooke, avec la construction d'une passerelle piétonne. En quelques années, les performances des bétons se sont considérablement améliorées, tout d'abord intrinsèquement (résistance, durabilité), mais aussi parce que leur étude à des échelles toujours plus réduites a permis de mieux appréhender leur comportement. Surtout, comme le fait remarquer l'expert international anglais Adam Neville, les recherches ne tendent plus seulement à atteindre un nombre record de mégapascals (MPa). Certes, cette recherche d'une résistance en compression toujours plus grande a conduit à la création de matériaux exceptionnellement résistants. Vu au microscope, un BFUP présente une matrice granulaire très fine associée à des éléments encore plus fins, les ultra fines, fumées de silice par exemple. Résultat : le matériau est d'une compacité extrême et les

>>> 1 La passerelle de Sherbrooke (Canada) est construite avec des éléments préfabriqués en BFUP. La poutre inférieure présente une section de 18 x 40 cm. Le hourdis supérieur est une dalle nervurée dont l'épaisseur en partie courante est de 30 mm. 2 Gare ferroviaire souterraine de Monaco. Sur les piédroits de la voûte des quais, la compacité des panneaux de BFUP autorise une densité importante de perforations : de quoi absorber les surplus acoustiques.



PROJET

Le Mucem de Rudy Ricciotti

Lauréat du concours pour la construction du futur Musée national des civilisations de l'Europe et de la Méditerranée dans le vieux port de Marseille, l'architecte Rudy Ricciotti, avec RCT Architectes, a conçu un projet qui tire pleinement parti des qualités des BFUP.

La structure d'abord, qu'il qualifie "d'ossature de forme organique", est composée, entre autres, de poteaux verticaux de section variable, de planchers élancés, sans oublier une "passerelle" de 50 m de portée, criblée de perforations.

L'habillage architectural est tout aussi audacieux : constitué d'éléments de 5 m x 2,50 m pour seulement 3 cm d'épaisseur, il s'agit d'une mantille ajourée "tel un morceau de corail" développée sur trois des faces du bâtiment. La découpe, volontairement irrégulière, ne sera pas le fruit du hasard puisqu'elle participe de la conception bioclimatique du projet voulue par l'architecte. Reste encore à déterminer la couleur et le taux de perforation de la mantille.

"L'utilisation de béton fibré à ultra hautes performances permet de réduire la matière, autorise la 'dématérialisation', explique Rudy Ricciotti. Ce qui a permis de répondre à la nécessaire sensibilité qu'appelle le site. Un site violent, déroutant, minéral et monoculturel qui suscite l'effacement de la structure du musée face aux pierres massives du fort des Jacobins." Avec, en parallèle, l'exploration d'un champ expérimental de la matière. "Il y a la sémantique du béton, celle de l'acier. Peut-être faut-il en inventer une nouvelle, spécifique aux BFUP, plus proche de la fonderie, pour des matériaux qui permettent une écriture technologique et architecturale nouvelle."



pores réduits à leur strict minimum. Si le dosage en ciment est élevé (plus de 750 kg/m³), le rapport E/C (eau/ciment) est fortement réduit. Il atteint 0,15 (contre 0,45 pour un béton classique) grâce aussi à l'utilisation de superplastifiants. Reste alors à introduire la ductilité nécessaire aux matériaux de structure. Et c'est le rôle que jouent les fibres, notamment utilisées dans les BFUP, qui sont longues de 12 à 20 mm et ont un diamètre de 0,1 à 0,3 mm. En quantité suffisante, à savoir 160 à 240 kg/m³ de béton, elles ne se contentent pas de rendre au matériau un comportement ductile ; elles augmentent significativement sa résistance à la traction. Avec des valeurs comprises entre 8 et 10 MPa, il devient possible de s'affranchir d'armatures passives classiques, et donc des contraintes de forme et de mise en œuvre inhérentes au ferrailage.

● Durabilité exceptionnelle

Les BFUP possèdent des caractéristiques de durabilité remarquables. La raison est simple : ils présentent une porosité capillaire extrêmement faible grâce à leur microstructure très compacte. Un seul chiffre : le coefficient de perméabilité à l'eau d'un BFUP est de 1,5 %, soit dix fois moins qu'un béton classique. Et les résultats sont tout aussi éloquentes, qu'il s'agisse de la perméabilité à l'oxygène ou de la diffusion des ions chlorures. Si, pendant longtemps, aucune méthode normalisée ne permettait de quantifier la durabilité du béton, ce n'est plus le cas aujourd'hui, grâce, en particulier, aux travaux réalisés dans le cadre des "recommandations provisoires" pour l'emploi des BFUP élaborées sous la maîtrise de l'AFGC et du Setra (voir encadré p. 20). Les premiers retours d'expériences confirment les orientations prises dans ces recommandations. En particulier, les poutres en BFUP, qui ont remplacé la structure métal-

>>> **3** **Projet du futur musée national des civilisations de l'Europe et de la Méditerranée à Marseille conçu par l'architecte Rudy Ricciotti, avec RCT Architectes. L'utilisation de BFUP permettra d'habiller d'une mantille ajourée trois des faces du bâtiment.**

lique corrodée des aérofrigoriférants des centrales nucléaires de Cattenom et de Civaux, s'accommodent très bien de cet environnement extrêmement agressif. Mieux. En cas de faible fissuration, des expériences montrent que les BFUP sont capables de "s'autocicatriser" du fait de la présence dans le matériau d'un "réservoir" de particules de ciment non hydraté. En cas de pénétration d'eau, celles-ci s'hydratent, entraînant l'autocicatrisation des fissures.

● Un matériau esthétique pour les plus imaginatifs

Mais au-delà de ces qualités d'ordre mécanique (résistance, durabilité...), les BFUP présentent des qualités esthétiques indéniables. L'utilisation de fibres polymères permet la réalisation d'éléments architectoniques, avec une qualité de parement exceptionnelle. Ajoutez à cela une quasi-totale liberté de forme puisqu'il n'y a pas de contraintes de ferrailage. Il est possible de réaliser des éléments très minces et de les teinter dans la masse. Les BFUP peuvent donc être considérés comme un nouveau matériau. Les applications architectoniques en façade sont quasi infinies. Là encore, cela est possible car la résistance mécanique des BFUP autorise des calepinages intégrant des panneaux d'habillage légers et de grandes dimensions. Des panneaux dont

TECHNIQUE

Des recommandations pour l'emploi des BFUP

En première approche, ce petit guide bleu ne paye pas de mine. Et son intitulé austère – BFUP, recommandations provisoires – ne reflète pas la richesse des informations qu'il contient. Car le génie civil français est en pointe dans le domaine des BFUP et ce recueil est un condensé des réflexions des meilleurs spécialistes hexagonaux réunis au sein d'un groupe de travail BFUP.

Ce guide s'appuie sur les recommandations concernant les bétons de fibres métalliques publiées par l'Afrem (Association française de recherche et d'essais sur les matériaux de construction) en 1995 et sur le cahier des charges établi par EDF pour les poutres en BFUP utilisées pour les centrales de Cattenom et de Civaux. Ces "recommandations provisoires" couvrent trois volets : la caractérisation du matériau BFUP (lois de comportement, contrôle qualité, modes opératoires de mise en œuvre...), la conception et le calcul de structures en BFUP et, enfin, la durabilité. La durabilité dont il est question ici concerne le matériau et non l'ouvrage.

Car la durabilité d'un ouvrage est établie au cas par cas, en fonction de sa destination, de la classe d'exposition à laquelle il sera soumis pendant sa durée de service et des conditions d'exploitation de l'ouvrage. Le groupe BFUP, animé par Jacques Resplendino – chef de la DOA (Division ouvrages d'art) du CETE (Centre d'Études Techniques de l'Équipement) de Lyon –, a rassemblé des experts de l'AFGC (Association Française de Génie Civil) et du SETRA (Service d'Études Techniques des Routes et Autoroutes).

Cette collaboration marque la volonté des services techniques du ministère de l'Équipement de participer activement aux réflexions préreglementaires tout en favorisant la recherche et l'innovation dans le domaine du génie civil. D'ailleurs, des expérimentations ont été menées sur l'ouvrage réalisé dans le cadre de la déviation de Bourg-lès-Valence (26) et le groupe a pu valider ses travaux.



>>> **5** L'avent de la barrière de péage du viaduc de Millau a été dessiné par l'architecte Michel Herbert. Lorsque tous les éléments sont assemblés, la structure présente une section entièrement gauche. Elle est en forme d'aile de parapente géante. **6** À l'occasion de la rénovation des structures internes des aéroréfrigérants de la centrale nucléaire de Cattenom, 270 poutres et 2 376 poutrelles préfabriquées en BFUP ont été mises en œuvre.



on peut dire qu'ils bénéficieront d'un moulage de haute précision. En effet, la consistance des BFUP est telle qu'elle permet de reproduire fidèlement les plus petits détails : finesse des arêtes, précision des courbes et des arrondis, impression des formes, mise en relief... De plus, rien n'empêche de recourir à des techniques de traitement de surface plus traditionnelles telles que le sablage. Ajoutons à cela un bon comportement anti-graffiti du fait de l'absence de porosité capillaire et l'on comprend que les BFUP s'adaptent à toutes les situations. Ainsi qu'à toutes les imaginations.

● Une prédilection pour la préfabrication

Malgré l'utilisation récente des BFUP, les projets les plus audacieux sont en cours de réalisation. À commencer par le Mucem de Marseille (musée national des civilisations de l'Europe et de la Méditerranée), conçu par l'architecte Rudy Ricciotti, qui constituera un élément phare de la future Cité de la Méditerranée. Fort de son expérience sur la passerelle de la paix à Séoul, l'architecte fait appel aux BFUP en structure, en particulier pour des poteaux verticaux de section variable et une "passerelle" ; et en tant qu'élément architectural pour une audacieuse mantille de 3 cm d'épaisseur à la découpe irrégulière qui viendra réaliser la peau de l'ouvrage. Autre projet innovant : la barrière de péage du viaduc de Millau, plus précisément son avent dessiné par l'architecte Michel Herbert. Cet ouvrage est composé de 53 coques alvéolaires préfabriquées de 28 m de long, 1,80 m de large et de seulement 20 à 85 cm d'épais-

seur ! Lorsque tous les éléments sont assemblés, la structure présente une section entièrement gauche, à la fois courbe dans le sens transversal et torsadée longitudinalement. Elle est en forme d'aile de parapente géante telle que l'a imaginée l'architecte.

Les Bétons Fibrés à Ultra Hautes Performances s'élaborent à partir d'un "premix", mélange granulaire-ciment-ultra fines, auquel on adjoint la stricte quantité d'eau nécessaire. Le tout en respectant des temps et des conditions de malaxage bien précis. Seul point à surveiller : celui du retrait, en particulier celui dit "endogène". Généré par l'hydratation du ciment, ce phénomène se produit d'autant plus facilement quand le rapport E/C est faible, ce qui est le cas des BFUP. L'expérience a montré qu'un traitement thermique compense ce retrait. C'est pourquoi les BFUP ont une prédilection pour la préfabrication. Bien entendu, un BFUP peut être coulé en place sur chantier. Ainsi, il a été utilisé pour réaliser des colonnes composant la structure des trois nouveaux bâtiments du Musée national de la Reine Sophie à Madrid, conçu par Jean Nouvel et Julio Medem. Il remplit des colonnes métalliques creuses de 16 m de haut et de 32 cm de diamètre qui supportent les planchers des bâtiments. Preuve que l'utilisation des BFUP n'a comme limite que l'imagination des architectes. Les qualités esthétiques, les performances exceptionnelles des BFUP et leur durabilité offrent la possibilité de nouveaux domaines d'application et de nouvelles structures pour la construction d'ouvrages de Génie Civil. ■

TEXTE : STAN GETZEN

PHOTOS : 1 ET 2, DR – 3, R. RICCIOTTI – 5, EIFFAGE TP – 6, DR



PASSERELLE DE LAUTERBRUNNEN – SUISSE

→ Une réfection très contrôlée

De mémoire d'habitant de la petite commune suisse de Lauterbrunnen, l'ancienne passerelle a toujours été là. Sa structure se fond dans le paysage alpin pur et naturel de l'Oberland Bernois. Plébiscité par les amateurs d'air pur, le climat dans la région de Lauterbrunnen n'en est pas moins rude.

Construite en 1930, elle n'en est pas à sa première opération de réfection. Le bureau d'études Huggler Ingénieurs SA a élaboré un cahier des charges draconien dont les quatre points principaux sont : réaliser un revêtement présentant une épaisseur réduite et un gain de poids, de façon à préserver la structure existante et à permettre le recouvrement du béton par une couche d'étanchéité ; qu'il bénéficie d'une haute résistance mécanique ; et que les éléments préfabriqués soient suffisamment courts et légers pour permettre une mise en



œuvre aisée. La réponse à ces contraintes a consisté à réaliser des éléments en BFUP de 1,76 m de largeur, 76 cm de longueur pour seulement 4 cm d'épaisseur. Neuf mètres cubes de BFUP contenant des fibres métalliques et des fibres organiques ont été nécessaires à la réalisation de ces dalles. Légers, ces éléments n'ont pas nécessité de moyens de levage particuliers.

PHOTOS: DR

Maître d'ouvrage: commune de Lauterbrunnen

Bureau d'études: Huggler Ingénieurs SA (Interlaken)

PONT ROUTIER – BOURG-LÈS-VALENCE (26)

→ Des tabliers en BFUP réalisés en trois jours

La réalisation de la déviation de Bourg-lès-Valence, dont l'ouverture a eu lieu en novembre 2002, a permis aux chercheurs d'approfondir leurs connaissances sur les BFUP. En effet, la réalisation de deux passages supérieurs dans le cadre de la charte de l'innovation ouvrage d'art du SETRA (Service d'Études Techniques des Routes et Autoroutes) a permis de valider en grandeur réelle les procédures de caractérisation des BFUP et les principes de calcul qui figurent dans le guide des recommandations provisoires (voir page ci-contre). Il s'agit de deux passages supérieurs de 45 m de longueur attribués dans le cadre d'un appel d'offres sur performances. Les profils en travers de ces ouvrages se composent de cinq poutres de 2,50 m de large rappelant la forme de la lettre



grecque H. Celles-ci présentent une épaisseur d'âme de 12 cm, une épaisseur de dalle de 15 cm pour une hauteur totale de 90 cm. La liaison entre les cinq éléments est réalisée en BFUP coulé en place, de manière à assurer la continuité mécanique transversale sans recourir à de la précontrainte.

En outre, aucune dalle n'est nécessaire entre les éléments préfabriqués et la couche de roulement.

Résultat : ces "tabliers" en BFUP ont été posés en trois jours ! Intéressant donc dans le cas d'un franchissement d'une ligne ferroviaire ou d'une autoroute sous circulation.

PHOTO: DR

Maître d'ouvrage: DDE de la Drôme

Maîtres d'œuvre: DDE de la Drôme, Setra, Cete

Entreprise: Eiffage TP – Quillery



PASSERELLE DE LA PAIX – SÉOUL (CORÉE)

→ Un arc effilé au-dessus d'un bras de rivière

Première grande référence en matière de Béton Fibré à Ultra Hautes Performances et véritable vitrine technologique, la passerelle de Seonyu à Séoul, baptisée passerelle de la Paix, permet aux piétons de traverser un bras de la rivière Han pour se rendre sur une île aménagée en jardin. Un projet qui a vu le jour dans le cadre d'une mission de coopération entre la Corée du Sud et la France.

L'ouvrage est remarquable par son arche précontrainte en BFUP de 120 m de portée à laquelle s'accrochent de part et d'autre deux passerelles d'accès. Elles mènent à la partie supérieure de l'arche qui a été déviée horizontalement de six degrés pour permettre aux usagers de la découvrir. La coupe transversale de l'arche ressemble à la lettre

grecque H et le BFUP a permis de limiter la matière à son strict minimum pour plus de finesse. Pour preuve, le tablier comporte une dalle de 4,30 m de large et seulement 3 cm d'épaisseur, raidi tous les 1,225 m par des nervures transversales. Le hourdis s'appuie sur deux âmes de 1,30 m de hauteur dont les angles ont été arrondis en partie inférieure.

La passerelle de la Paix est constituée de six éléments, six voussoirs préfabriqués de 20 m de longueur dont la mise en œuvre s'effectue à l'aide de tours d'étalement. Sur chaque rive, on assemble trois éléments – une demi-arche en somme – que l'on met en précontrainte. Une fois les deux demi-arches en place, un clavage de 52 cm de longueur assure la continuité de l'ouvrage. L'arche est précontrainte longitudinalement par un câble 12T15 en partie haute de chaque âme et deux câbles 9T15 en partie basse. Malgré son élancement, elle ne comporte aucune armature passive. Ni en partie courante, ni même dans les zones

dites "de frette", zones où les câbles de précontrainte viennent s'ancrer.

Les essais ont montré que la résistance en compression atteignait 203 MPa pour une résistance en flexion supérieure à 44 MPa ! Les 22,5 m³ de BFUP nécessaires à chaque voussoir sont coulés en une fois dans un moule muni de vibreurs où sont disposées des pièces de polystyrène pour obtenir les formes attendues. Le BFUP permet de répliquer fidèlement la micro, voire la nano structure du moule, d'où un état de surface de grande qualité. Le béton subit un traitement thermique. L'intérêt de ce traitement est triple : d'abord, il augmente les caractéristiques mécaniques du béton, ensuite, il densifie sa microstructure pour une meilleure durabilité et enfin, il limite le retrait (particulièrement le retrait dit "endogène"), voire l'annule.

PHOTOS: Lafarge/Philippe Ruault

Maître d'ouvrage: ville de Séoul

Architecte: Rudy Ricciotti



GARE FUTURISTE – CALGARY (CANADA)

→ À l'abri sous les coques

Les habitants de la banlieue sud de Calgary, au Canada, peuvent désormais s'abriter sous l'une des vingt-quatre coques de béton blanc de la gare de Shawnessy, une des deux nouvelles gares prévues dans le cadre de l'extension de la ligne ferroviaire en direction de la banlieue sud de la ville. Ses concepteurs – le cabinet CPV Group Architects and Engineers de Calgary – ont joué la carte de la créativité architecturale pour ces abris à passagers érigés sur les quais en forme de coquilles et dessinés par l'architecte Enzo Vicenzino.

Chaque coque ainsi que les montants, les colonnes et les poutres des abris, ont été préfabriqués en Béton Fibré à Ultra Hautes Performances. Même les gouttières qui courent au bas des arches sont faites de ce

matériau et conçues pour supporter le poids d'une personne. Car outre la grande liberté artistique octroyée par ce matériau, les concepteurs ont optimisé le projet pour tirer pleinement parti de la grande résistance structurelle. La mise au point des coques était sans conteste le point le plus délicat de la conception de la gare. La double courbure de chacune d'elles a nécessité une fine analyse aux éléments finis, la géométrie définitive ayant été obtenue en jouant sur les rayons de courbure, les épaisseurs... Pour vérifier les résultats obtenus, des tests minutieux ont été menés à l'institut de technologie du Massachusetts, aux États-Unis, avec des outils de calcul habituellement réservés à l'aéronautique. Ensuite, un prototype de coque grandeur réelle a été soumis à divers tests au centre des technologies innovantes de Calgary afin de comparer son comportement aux prévisions des modèles numériques. Car de par leur situa-

tion géographique, les coques doivent résister à une charge élevée de neige ainsi qu'aux efforts de soulèvement du vent. Résultat : des éléments de 5,1 x 6 m, extrêmement fins avec seulement 20 mm d'épaisseur. La très faible porosité du matériau, qui le rend "virtuellement imperméable", a séduit l'équipe de conception, soucieuse de l'aspect maintenance du projet. Par exemple, les coques de Shawnessy, très faciles à nettoyer, nécessitent peu d'entretien et offrent aussi une remarquable longévité. La nécessité d'un matériau n'accrochant pas les salissures se justifie d'autant plus que, de nuit, les coquilles participent à l'éclairage indirect de la gare en servant de réflecteurs à la lumière émise à partir des quais.

PHOTOS : Lafarge, DR

Maître d'ouvrage : ville de Calgary

Architecte : cabinet CPV Group Architects and Engineers Ltd.

HABILLAGE DE PONT – VILLEPINTE (93)

→ Des bandeaux décoratifs de faible épaisseur

Sur l'autoroute A170, le pont répondant au nom de Passage Supérieur 7 présente une particularité esthétique intéressante. Ses piles, culées et murs en retour sont habillés d'éléments en Béton Fibré à Ultra Hautes Performances teinté dans la masse. Pourquoi ce choix plutôt qu'une matière plastique, une plaque de métal ou un béton armé comme cela se pratique couramment ?

Cette dernière solution n'était pas envisageable car les engravures prévues au coulage des piles et des culées étaient de trop faible profondeur, seulement 20 mm. Il fallait donc mettre en œuvre des éléments résistants de très faible épaisseur. Le choix de bandeaux décoratifs en BFUP s'imposait donc. Tous les éléments préfabriqués sont prévus pour être facilement transportables. Les éléments droits sont coulés à plat, les éléments courbes coulés à champ, puis fixés dans les engravures. Le maître d'ouvrage – la DDE de Seine-Saint-Denis – a été séduit par la bonne résis-



tance aux chocs des éléments ainsi que par le bon comportement de ce type de béton en cas d'applications de graffiti. Non pas qu'il soit antigraffiti, mais parce qu'il présente de bonnes caractéristiques de "nettoyabilité" du fait de sa très faible porosité.

PHOTOS : Eiffage TP

Maître d'ouvrage : DDE 93

Architecte : Alain Spielmann



PASSERELLE PIÉTONNE SAKATA-MIRAI – JAPON

→ Design innovant et qualités techniques

La passerelle piétonne Sakata-Mirai, située dans la région de Yamagata, remplace un ancien pont en béton qui franchissait depuis quarante ans la rivière Niita dans la ville de Sakata. Cet ouvrage franchit en une seule travée la rivière.

Construite en octobre 2002, la passerelle piétonne de Sakata-Mirai peut être considérée comme une immense poutre caisson à inertie variable de 50 m de long. Elle est constituée d'éléments préfabriqués perforés de 2,40 m de large qui ont été assemblés par une précontrainte extérieure. Les perforations ne sont pas le fruit du hasard. En effet, elles permettent de réduire sensiblement la prise au vent de la structure. De plus, le BFUP utilisé a permis des épaisseurs beaucoup plus fines. Par exemple, le hourdis supérieur des caissons ne mesure que 5 cm d'épaisseur. L'alliance du béton fibré hautes performances et de la précontrainte extérieure confèrent à la structure une légèreté certaine : un ouvrage similaire en béton ordinaire aurait pesé trois fois plus lourd. À noter que



le maître d'ouvrage a particulièrement été séduit par les qualités de durabilité du BFUP utilisé.

La communauté scientifique japonaise ne s'y est d'ailleurs pas trompée. En reconnaissance de son design innovant et de ses qualités techniques, la passerelle piétonne Sakata-Mirai a été récompensée par

plusieurs prix dont celui de l'institut japonais du béton et de l'association japonaise de l'ingénierie du béton précontraint.

PHOTO: DR

Maître d'ouvrage: Maeta Construction Industry

Conception: Taisei



POUTRE-AQUEDUC – ANNET-SUR-MARNE (77)

→ Chantier rapide et sobre

Sous l'impulsion du maître d'ouvrage RFF (Réseau Ferré de France), le chantier de la ligne ferroviaire à grande vitesse LGV Est a donné lieu à plusieurs expérimentations. Ainsi, sur le lot 18 à hauteur d'Annet-sur-



Marne devait être réalisée une poutre "pont-canal" en béton armé de 27 m de longueur destinée à faire traverser le canal aux eaux de ruissellement en provenance de la plate-forme ferroviaire. La solution de couler en place un béton armé – solution tout à fait classique – aurait nécessité des moyens de coffrage lourds, placés à l'aplomb du canal de l'Ourcq. Car le poids de l'ouvrage aurait approché les 150 tonnes. L'option retenue par RFF a consisté à préfabriquer

l'ouvrage en Béton Fibré à Ultra Hautes Performances en trois éléments de 8,85 m coulés dans un moule en bois. Premier avantage : le poids de l'ouvrage est divisé par trois puisqu'il n'atteint plus que 42 tonnes, d'où une plus grande souplesse de pose, sans aucun étaieement. Les éléments sont assemblés sur le site à l'aide de câbles de précontrainte. L'ensemble est alors mis en place en une seule opération à l'aide d'une grue. Compte tenu des qualités intrinsèques des BFUP, en particulier leur très faible porosité, cette solution a permis de s'affranchir d'une étanchéité.

L'option BFUP a permis de réduire significativement les délais du chantier. Conformément au souhait de l'architecte, le BFUP devait offrir une couleur de béton brut, proche de celle des corniches de l'ouvrage contigu. Pour assurer l'homogénéité de l'ensemble, la poutre pont-aqueduc a bénéficié du même principe de modénature que les corniches courantes, en l'occurrence trois inclusions filantes de couleur noire.

PHOTOS: DR

Maître d'ouvrage: Réseau Ferré de France (RFF)

Architecte: Alain Spielmann



Une fine équerre mise en place par rotation

●●● LE NOUVEL OUVRAGE QUI FRANCHIT LE VAR À HAUTEUR DE PUGET-THÉNIERS, DANS LES ALPES-MARITIMES, DOIT RÉPONDRE À UNE RÈGLE INCONTOURNABLE : AUCUN APPUI EN RIVIÈRE EN RAISON DE SON CARACTÈRE IMPÉTUEUX ET IMPRÉVISIBLE. LA SOLUTION HAUBANÉE S'EST RAPIDEMENT IMPOSÉE. MAIS SI LE DESSIN DU PONT PRIVILÉGIE LA SIMPLICITÉ ARCHITECTURALE AU REGARD D'UN SITE TRÈS CONTRASTÉ, PLUSIEURS TRAITS TECHNIQUES LE CARACTÉRISENT, À LA FOIS SUR SON FONCTIONNEMENT STRUCTUREL ET SUR LA CONCEPTION DE SES HAUBANS. CONSTRUIT EN RIVE, LE TABLIER A ENSUITE ÉTÉ TOURNÉ AU-DESSUS DE LA RIVIÈRE.

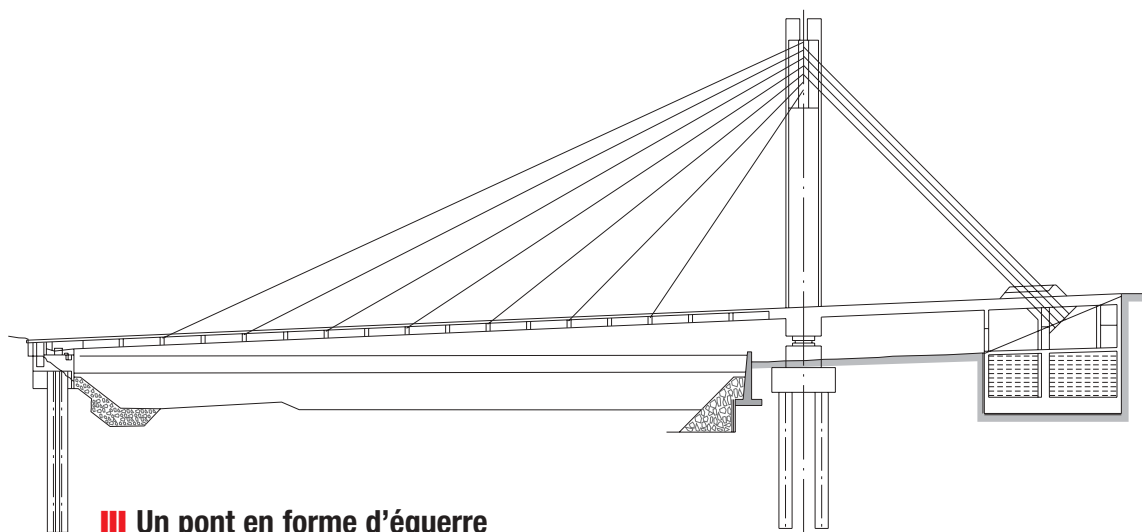


1

Une vallée austère sur la route de Digne à Saint-Raphaël, un site urbain, un climat rude, une rivière capable de crues soudaines et dangereuses comme celle de 1994... Le cahier des charges du pont de Puget-Théniers, dans les Alpes-Maritimes, était pour le moins très particulier. En 1999, le conseil général a décidé de réaliser un nouveau franchissement du Var, en remplacement d'un ouvrage datant de 1888 à treillis métallique à voie unique de circulation, limité à 3,5 tonnes et décomposé en trois travées reposant sur deux piles implantées en rivière. Ouvrage dont la structure en acier commençait, de surcroît, à montrer des signes inquiétants de corrosion. D'où la nécessité de reconstruire un pont en dégageant complètement le lit du Var.

● Un site délicat en zone sismique

Le maître d'ouvrage a d'abord arrêté le principe d'une implantation à 50 m en aval de l'ouvrage existant, car à cet endroit une large plate-forme située en rive droite permettait d'accueillir les installations du chantier. La conception du projet a été confiée au Service d'Études Techniques



III Un pont en forme d'équerre

des Routes et Autoroutes (Setra) du ministère de l'Équipement. Avec deux objectifs : des formes simples et un coût raisonnable. *"La vallée est située en zone sismique, une attention toute particulière devait donc être portée aux appuis et aux fondations"*, relate Philippe Vion, directeur de projet au Setra. Des incertitudes sur la géologie du site ont nécessité des investigations afin de déterminer très précisément où se trouvait le substratum rocheux sous le lit du Var, et de repérer d'éventuelles failles. C'est la société EEG Simecsol qui s'est vue confier cette mission. Résultat : le sol se compose d'une couche de limons argileux d'environ 10 m d'épaisseur qui repose

sur des marnes calcaires fracturées, inclinées entre 50 et 80°. Ce profil imposait des fondations sur pieux.

● La solution haubanée

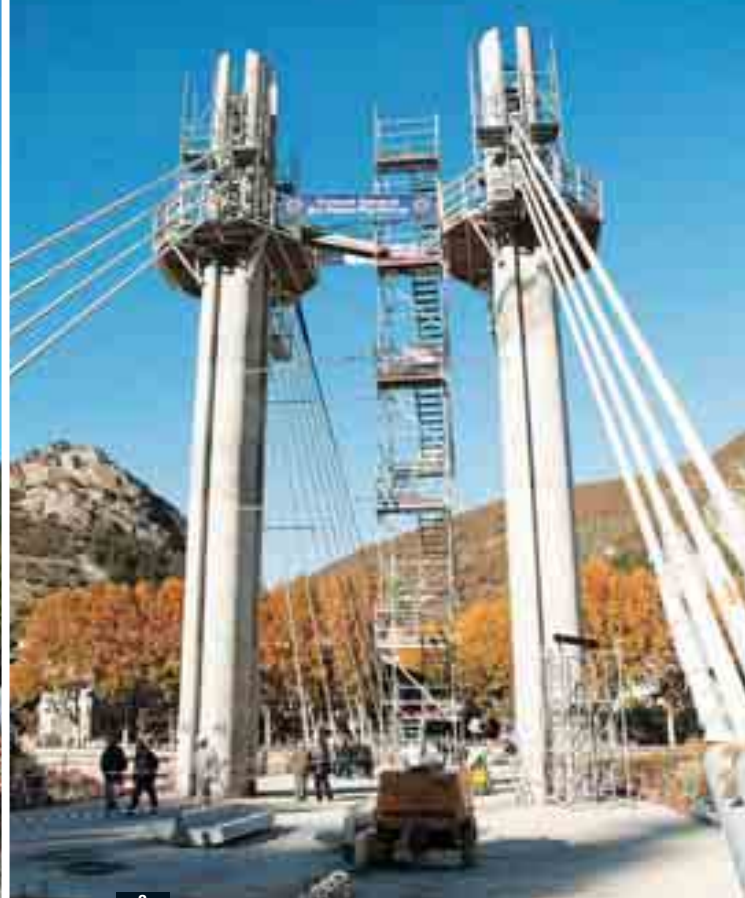
En 2001, en réponse au concours, cinq projets ont été reçus par la maîtrise d'ouvrage, dont un arc et plusieurs solutions haubanées, sans aucun appui en rivière. Le conseil général des Alpes-Maritimes a opté pour le tablier en béton précontraint haubané asymétrique proposé par l'architecte Laurent Barbier : une travée principale de 66 m, une travée latérale de 16 m dite "de décharge" encastrée dans une grosse

culée arrière implantée en rive droite, et deux pylônes de 25 m de haut. *"Mon projet est à la fois très ordinaire et truffé de petites astuces, explique le lauréat du concours. Il fallait introduire à la fois de la force dans l'ouvrage, en raison du site très contrasté qui l'entoure, et du raffinement, pour qu'il s'accorde avec la ville de Puget-Théniers qui est en plein développement."*

Véritable "étalon visuel", le dessin retenu est justifié par l'équilibre, sur le modèle d'une équerre, entre une règle horizontale reliant les deux rives (le tablier) et deux crayons verticaux (les pylônes). *"Le site était déjà très déterminé, mais il fallait malgré tout apporter une sorte de double*



2



3

>>> **1** Le nouveau franchissement du Var est assuré par une équerre, dont la travée principale mesure 66 m de long.

2 Le haubannage du tablier est repris par deux pylônes conçus comme des crayons verticaux. **3** Les deux nappes de haubans parallèles dessinent des harpes convergentes vers le sommet des pylônes. En arrière, elles sont retenues par huit haubans eux-mêmes ancrés dans une culée faisant contrepoids.

détente, un élan sur la rivière”, estime Laurent Barbier. Pour éviter au maximum de faire obstacle à la rivière en crue, le tablier est extrêmement fin. Il se caractérise par une pente longitudinale de 4 %, ce qui est très élevé pour un ouvrage routier.

La travée principale est portée par deux nappes latérales comptant chacune sept haubans dessinant des harpes convergentes vers le sommet des pylônes. Ces nappes sont retenues, en arrière, par deux groupes de quatre haubans, parallèles cette fois, et ancrés dans la culée. “Le tablier est entièrement porté en rive droite par l’intermédiaire des pylônes qui reportent tous les efforts dans la culée”, résume Michel Placidi, directeur technique du groupe Razel, l’entreprise qui réalise actuellement les travaux. Cette culée est une grosse boîte en béton pleine qui fait office de lest ou de contrepoids et, sur la rive opposée, on ne trouve

qu’un appui simple. “En théorie, le “nez” de la travée principale, en rive gauche, ne transmet même aucune charge verticale. Ainsi, l’esthétique et l’effort se confondent, et la “lecture” de la structure, comme disent les spécialistes, est évidente.

● Des câbles à toron unique

Le profil en travers du pont fait apparaître la finesse et la transparence des structures, patentées sur l’élévation. La section se compose d’un hourdis de 22 cm d’épaisseur. Elle est portée par deux poutres longitudinales de 90 cm de haut et de 2 m de large, entretoisées par des poutres transversales espacées de 3,6 m. Les ancrages des haubans sont implantés une poutre sur deux, c’est-à-dire tous les 7,2 m. Entièrement en béton, la structure est précontrainte par des câbles longitudinaux 19T15s. Le nombre de torons dans

ENTRETIEN

Trois questions à Laurent Barbier, architecte DPLG.

Ce pont est d’une grande simplicité. Quel a été votre parti pris ?

En raison de l’âpreté du site et du caractère assez rude de la région, j’ai voulu un ouvrage raffiné et minimaliste, capable de fonctionner comme un étalon visuel. J’ai recherché l’équilibre entre les éléments verticaux et horizontaux : les pylônes sont conçus comme des crayons verticaux et le tablier comme une règle blanche, l’ensemble dessinant une équerre toute simple.

N’est-ce pas curieux d’opter pour des haubans en montagne ?

Souvent, il est vrai, les ponts à haubans sont construits dans des estuaires ou des vallées relativement larges. À Puget-Théniers, le Var est dominé de toutes parts. Il fallait un élan sur le fleuve, avec suffisamment de tension, de force et de netteté géométrique. En même temps, c’est le seul obstacle transversal de la vallée entre Digne et Nice. La structure haubanée permet d’éviter l’effet “barrière” qu’aurait créé, par exemple, un bow-string.

Comment avez-vous caché la déviation des haubans en tête de pylône ?

Je ne voulais surtout pas avoir de “Coton-Tige”, avec des dispositifs volumineux au sommet. L’idée a donc été de dissimuler au maximum le passage des câbles dans les pylônes. Grâce à un assemblage de quatre caissons creux, les systèmes de déviation sont presque invisibles, de même que les servitudes d’éclairage. Mon objectif était d’éliminer toute ligne verticale qui aurait pu concurrencer les pylônes. En revanche, j’ai souhaité renforcer la nervosité de ces derniers en les concevant comme des faisceaux de nervures verticales.

chaque hauban augmente le long du profil en long, du pylône jusqu’à l’extrémité de la travée principale, pour atteindre le chiffre de sept paires, ce qui permet d’homogénéiser l’effort de compression dans le tablier dû au haubannage.

Les haubans de Puget-Théniers marquent l’une des principales innovations du projet. En association avec leur fournisseur, les entreprises ont proposé de recourir à des câbles à toron unique. Le principe est simple : au lieu de torsader six fils autour



4



5

d'un fil central pour constituer un câble T15, comme c'est habituellement le cas, puis d'assembler ces câbles par groupes de 15 à 37 pour former un hauban, chaque hauban est ici obtenu directement par torsion de 60 à 90 fils galvanisés. "C'est la première utilisation de ce type de hauban en France", se félicite Michel Placidi. À Puget-Théniers, la protection des haubans est assurée par une injection à la cire pétrolière effectuée en usine. Et contrairement aux ancrages traditionnels à clavette, l'ex-

trémité des haubans à toron unique est traitée sous forme d'un épanouissement, toron par toron, au moyen d'un culot conique rempli ultérieurement de résine.

● La rotation : une opération délicate

Toujours dans le souci de préserver le lit de la rivière, le chantier en cours se déroule entièrement à terre, alors qu'il avait été initialement envisagé un passage à gué

>>> 4 Pour éviter l'effet "Coton-Tige", l'architecte a dissimulé le passage des câbles à l'intérieur de la structure en béton précontraint. Les pylônes ont été exécutés par coffrage grim pant.

5 Après préfabrication en rive, le pont a été mis en place au-dessus de la rivière par rotation autour de l'un de ses pylônes : 4 000 t à tourner de 90°, une opération spectaculaire !

et l'utilisation d'un cintre et d'un platelage en encorbellement pour couler le tablier en place, avant de le précontraindre puis de le haubaner. Les entreprises ont décidé d'opérer parallèlement à la rive, où le tablier de 4000 tonnes au total est bétonné et haubané, avant d'être mis en place par rotation au-dessus du Var. Cette opération délicate et très spectaculaire s'est déroulée autour du pylône amont qui a servi d'axe de rotation, le pylône aval étant pendant ce temps-là translaté sur des appuis en Téfalon, le long d'une longrine circulaire. Cette méthode est celle qui avait été employée en 1991 pour le pont à haubans de Gilly-sur-Isère (154 m), dessiné par l'architecte Jean-Vincent Berlotier et construit à l'entrée d'Albertville pour les Jeux olympiques de 1992. À l'époque, Razel était déjà aux commandes, en groupement. La rotation de 90° avait duré moins de six heures. ■

TEXTE : PHILIPPE GUÉRARD

PHOTOS : OUVERTURE ET 5 – CHRISTIAN HAMON, DR



Maître d'ouvrage :
Conseil général
des Alpes-Maritimes

Maître d'œuvre :
Direction des services
techniques du département
des Alpes-Maritimes

Conception et contrôle :
Setra

Architecte :
Laurent Barbier

Entreprises :
Razel (mandataire)
et Carillon (ex-Nicoletti)

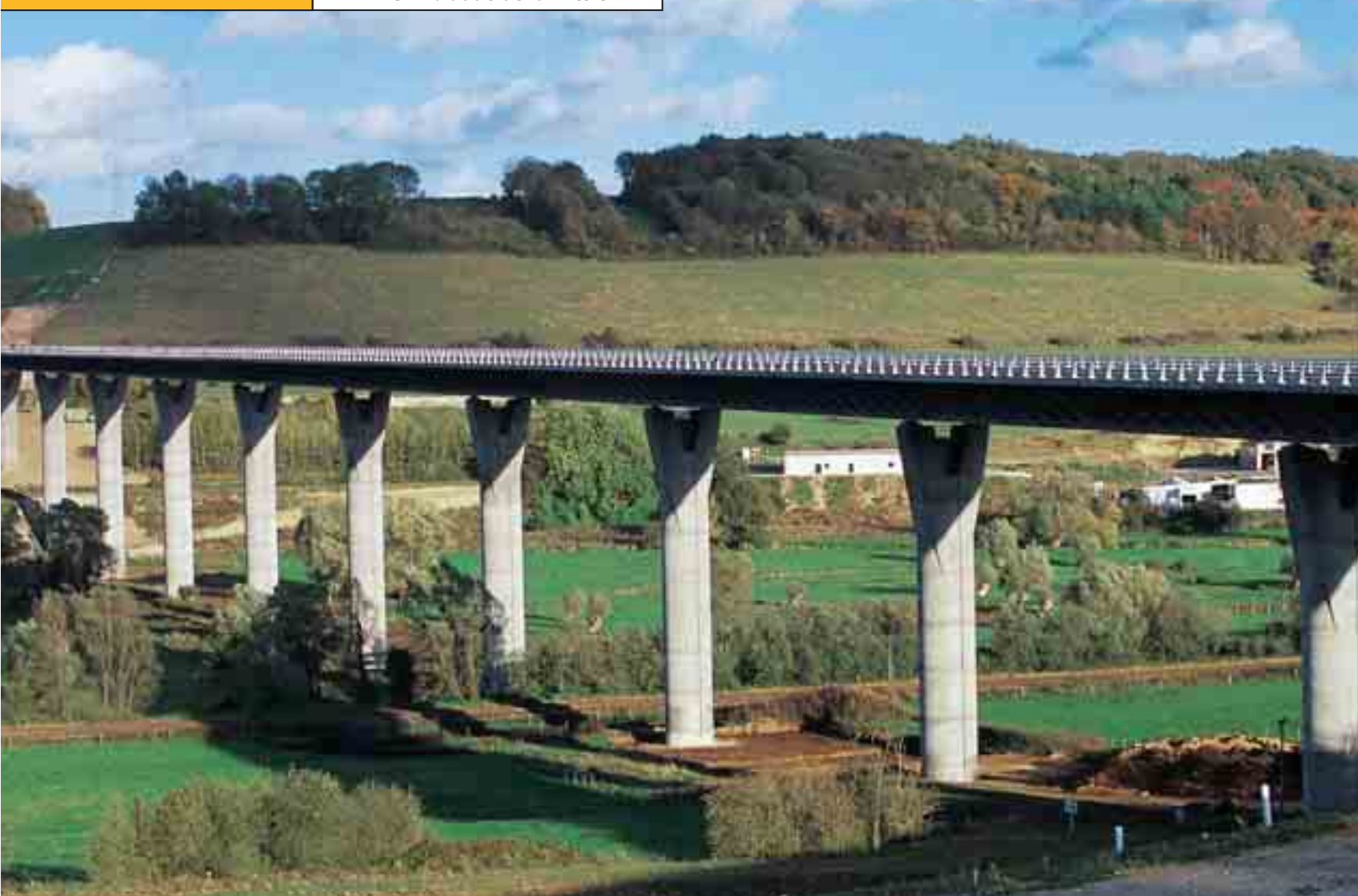
Coût :
5,5 M€

TECHNIQUE

Un béton B 60 sans fumées de silice

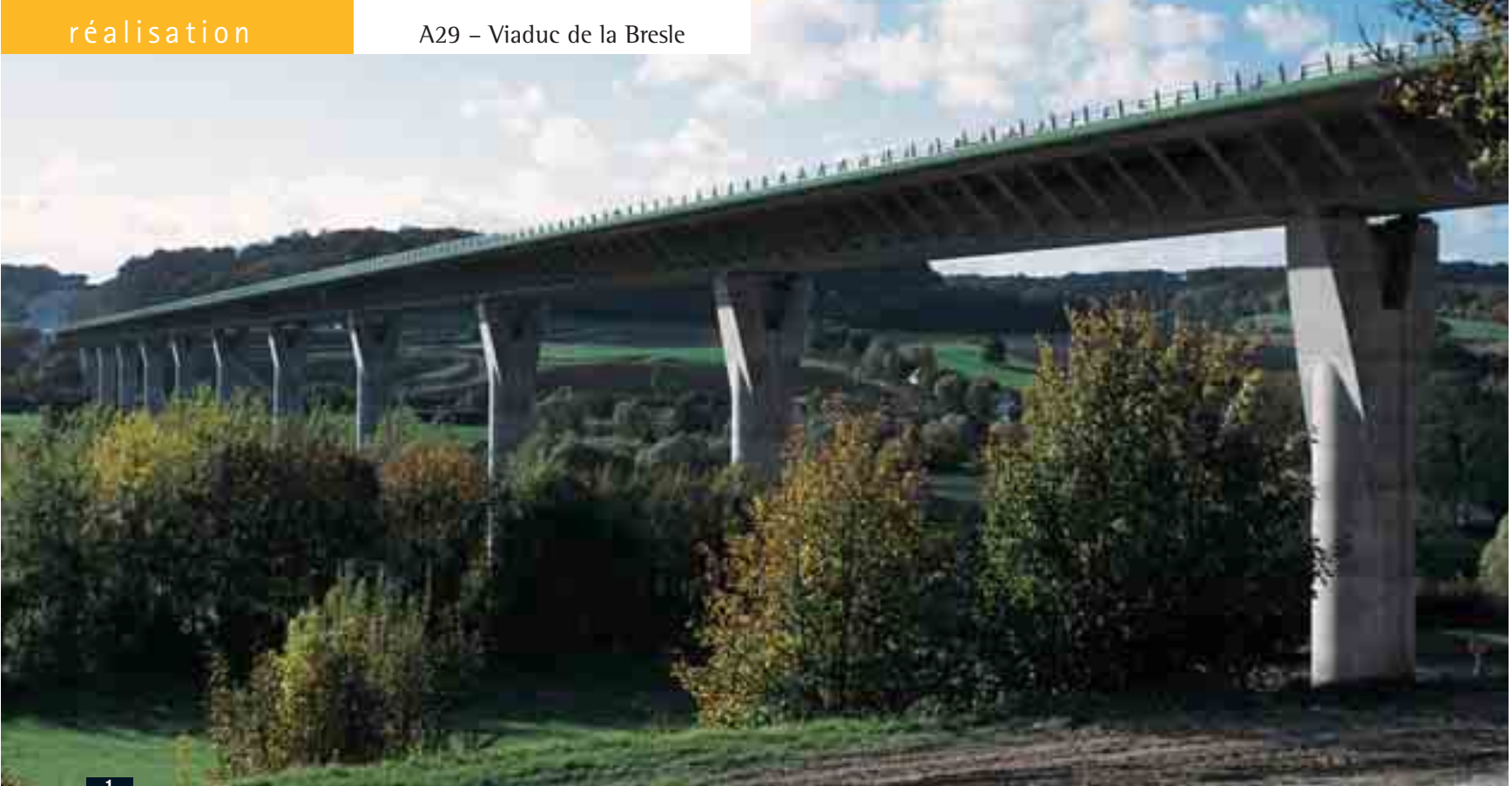
À Puget-Théniers, le tablier et les pylônes du pont à haubans sont réalisés en Béton à Hautes Performances de 60 MPa. Comme toujours lorsque le choix de cette classe de matériau est requis, la question de l'emploi de fumées de silice s'est posée. Car en réduisant la quantité d'eau contenue dans le béton afin d'accroître sa résistance, l'introduction de fines dans une formulation contenant des agrégats courants permet d'augmenter la fluidité et de combler davantage les pores du béton.

L'entreprise Razel se fournit sur place à une centrale de béton prêt à l'emploi. Le ferrailage est très classique, même si la densité est élevée pour tenir compte du risque sismique pris en compte conformément aux règles AFPS 92, notamment dans les culées, les appuis et les pylônes.



Une structure légère et respectueuse de l'environnement

●●● ACTUELLEMENT EN PHASE FINALE DE CONSTRUCTION SUR L'A29 AU SUD-OUEST D'AMIENS, LE VIADUC DE LA BRESLE EST LE FRUIT D'UN VÉRITABLE PARTENARIAT ENTRE ARCHITECTE ET INGÉNIEUR. DANS UN SITE SENSIBLE, L'OUVRAGE FRANCHIT UNE VALLÉE DE PLUS DE 700 M AU MOYEN D'UN CAISSON MONOCELLULAIRE EN BÉTON PRÉCONTRAIT, DONT LES ENCORBELLEMENTS SONT REPRIS PAR DES BRACONS LATÉRAUX EXTÉRIEURS. PORTÉ PAR DOUZE PILES OBLONGUES ÉPANOUIES EN TÊTE DE FÛT, LE TABLIER EST PRÉFABRIQUÉ EN RIVE PUIS MIS EN PLACE PAR POUSSAGE. UN PROJET INSPIRÉ PAR LE VIADUC DU SCARDON, CONSTRUIT EN 1997 PAR LA MÊME ENTREPRISE.



1

On ne change pas une équipe qui gagne ! Sept ans après son inauguration, le viaduc du Scardon (1 km de longueur) – construit sur l'autoroute A16 entre Paris et Calais –, voit s'élever, mois après mois, son petit frère : le viaduc de la Bresle (756 m de longueur). Comme en 1997, c'est l'entreprise Razel qui est aux commandes du chantier, sous maîtrise d'ouvrage de la Société des autoroutes du nord et de l'est de la France (SANEF). À quelques dizaines de kilomètres de la vallée du Scardon, le viaduc de la Bresle est situé sur le tracé de l'autoroute A29, entre Neufchâtel-en-Bray et Amiens, à la limite des départements de la Seine-Maritime et de la Somme sur la commune de Lafresguimont-Saint-Martin. Comme son aîné, il traverse un environnement exceptionnel marqué, selon les responsables de la SANEF, par le "calme, la quiétude, la sérénité et l'absence d'agressivité". Cette particularité est à l'origine du lancement d'un concours européen en "conception-réalisation" imposant des contraintes d'implantation et de protection de l'environnement (protection de la zone Natura 2000) aux cinq équipes concurrentes qui réunissaient entre-

CHIFFRES CLÉS

- Surface : 14 800 m².
- Volume de béton : 7 700 m³.
- Épaisseur moyenne : 46 cm.
- Précontrainte longitudinale définitive : 162 000 kg.
- Ratio de précontrainte longitudinale : 21 kg/m³.
- Précontrainte transversale (4T15) : 68 700 kg.
- Précontrainte antagoniste de poussage : 167 000 kg.
- Durée de réalisation : 22 mois.

- >>> **1** Inspiré du viaduc du Scardon de l'autoroute Paris-Calais, le viaduc de la Bresle s'étire sur 756 m de longueur.
- 2** Ses neuf travées se succèdent à 38 m au-dessus du terrain naturel. **3** Son tablier présente une structure en caisson précontraint renforcée de bracons latéraux et ses piles, de section oblongue, s'épanouissent en tête.

prises, bureaux d'études et architectes. Une démarche conceptuelle particulièrement efficace pour adapter l'ouvrage à son site et aux contraintes environnementales, dans le respect de l'économie générale du projet.

● Le choix d'une solution "tout béton"

Associé à l'architecte Charles Lavigne, l'entreprise Razel a été retenue pour sa solution "tout béton", qui présentait l'avantage d'une technique maîtrisée alliée à une recherche esthétique évidente. "Nous avons pris le parti d'un ouvrage fiable et économique, discret dans son site et d'une architecture contemporaine sans effet de mode, pour que les riverains et les usagers puissent s'approprier le projet, dans l'instant mais aussi dans la durée", explique Christophe

Chéron, architecte associé à Charles Lavigne. D'où l'idée d'une structure en caisson précontraint avec des bracons latéraux, qui permet une réalisation par poussage "absolument respectueuse de la vallée, économique par la reconduction d'un module de base" coulée en rive, et "idéalement proportionnée tant par l'élancement que par le balancement des travées". Le profil en long du viaduc de la Bresle passe 38 m au-dessus du terrain naturel et aligne neuf travées courantes de 61,2 m de portée. L'accostage sur les versants est assuré à chaque extrémité par deux travées de rives de longueur dégressive, respectivement 57,8 et 44,2 m. En fond de vallon, le terrain est très marécageux et présente des caractéristiques de portance assez médiocres. Chacune des douze piles du viaduc est donc fondée sur quatre pieux de 1,60 m



3

4

de diamètre forés sous boue bentonitique sur des profondeurs comprises entre 15 et 33 m. Semblant *"jaillir du sol avec élan"*, conformément aux vœux de l'architecte, les piles dessinent des formes rondes et souples qui enrobent la lumière et font référence au caractère humide de la brèche.

Leur épure est largement inspirée, là encore, de celle du viaduc du Scardon. Toutes identiques, sur des hauteurs variant de 12 à 38 m, les piles présentent une section oblongue à la base et s'épanouissent en tête par un léger

évasement qui rappelle les deux branches d'un arbre et ressemble à une tulipe. Il est constitué de plots en béton qui émergent progressivement du chevêtre, en s'écartant progressivement vers le haut. L'exécution des fûts de pile s'effectue au moyen d'un coffrage outil monté sur galets, formé de deux demi-coquilles et d'un noyau central. Les cages d'armatures, entièrement préfabriquées au sol, sont mises en place à la grue. Le bétonnage est réalisé par levées de 4 m de haut. *"Et en tête de pile, souligne Paul Aublanc, direc-*

teur des grands ouvrages de génie civil chez Razel, un outil coffrant spécifique a été conçu, composé de quatre pétales" pour réaliser le bétonnage de ces formes originales.

● Un caisson monocellulaire à hauteur constante

La grande prouesse technique du chantier est relative à la mise en place du tablier par poussage. Celui-ci est conçu à partir d'un caisson monocellulaire de 19,64 m de largeur – 2 x 2 voies de

circulation – avec une hauteur constante de 4 m, comprenant deux âmes en béton verticales de 35 cm d'épaisseur et deux hourdis – supérieur et inférieur – en béton. Les encorbellements du hourdis supérieur sont supportés par des bracons en béton. Le tablier représente une épaisseur moyenne de béton de 0,46 m. Il est précontraint dans le sens longitudinal par des câbles 27T15 extérieurs au béton, complétés en travée par des câbles éclisses 12T15 intérieurs, ainsi que par une précontrainte transversale. Déjà éprouvé avec le viaduc du Scardon, le principe général de construction est simple. Le tablier est préfabriqué en vingt-six tronçons unitaires de 30,6 m sur une aire aménagée à cet effet derrière la culée ouest de l'ouvrage.

"Chaque tronçon est exécuté en cinq phases successives", souligne David Boutry, ingénieur méthodes chez Sceaurooute : coffrage, ferrailage et bétonnage du hourdis inférieur et des deux âmes latérales pour dessiner un "U" ; mise en place des bracons extérieurs en béton préfabriqués ; coffrage, ferrailage et bétonnage du hourdis supérieur ; mise en tension des câbles de précontrainte transversale et longitudinale, puis pose des équipements.

>>> Le tablier est mis en place par poussage. Le caisson progresse par tronçons de 30,6 m sur des cycles de quatre jours. Sa translation est assurée par des selles en acier graissé sur lesquelles glissent des patins Téflon/Inox.





>>> Le viaduc de la Bresle a été construit à l'issue d'un concours européen en "conception-réalisation" imposant des contraintes importantes en terme d'implantation et de protection de l'environnement (zone Natura 2000).

Point particulier : la liaison entre les bracons et les hourdis. En partie basse, les bracons sont scellés avec un coulis d'injection à base de ciment et prennent place dans des événements réservés dans les âmes. En partie haute, ils sont repris dans le hourdis supérieur lors de son béton-

nage grâce à des aciers en attente. Au final, ils travaillent en compression, encastrés sous l'encorbellement et simplement appuyés en pied sur l'âme verticale du caisson. Sur le viaduc de la Bresle, le poussage est relativement plus simple en raison d'un tracé en plan recti-

ligne. L'opération est réalisée dans le sens de la montée, le viaduc étant incliné selon une pente longitudinale de 1,5 %. Elle se déroule au fur et à mesure de la fabrication des tronçons du tablier et représente au total une longueur de poussage de 756 m et un poids de 19 800 tonnes. Une fois en place en position définitive sur les piles, le tablier repose sur des appareils d'appui.

TECHNIQUE

Travail consensuel entre l'architecte et l'ingénieur

La réussite du viaduc de la Bresle résulte d'un travail particulièrement consensuel entre les architectes et les ingénieurs avant et pendant les travaux. Tous les choix conceptuels ont été le fruit d'une réflexion commune. C'est ainsi que le choix de la longueur des travées – des portées moyennes de 61,2 m – a été induit par la hauteur de l'ouvrage par rapport au sol (38 m), l'idée étant d'optimiser le rapport entre les portées et leur niveau au-dessus du terrain naturel. L'effet d'écran a été évité par l'unicité des fûts de pile et confirmé par la conception d'un tablier monocaisson. La douceur du site a entraîné le choix unanime d'une hauteur constante pour le viaduc. S'agissant du matériau de construction, le béton précontraint s'est rapidement imposé aux équipes de conception du fait de la grande surface du tablier. Quant à la méthode de construction par poussage, elle a également été le résultat d'un consensus permettant d'allier la qualité technique, la maîtrise des risques, l'économie du projet et la sécurité.

● Une structure performante

À quelques mois de la livraison du viaduc, programmée pour la fin de l'année 2004, les intervenants se félicitent d'ores et déjà du travail réalisé : *"Cette structure performante (le rendement mécanique atteint 0,62) et économique, parfaitement intégrée dans le site, résulte d'une bonne adéquation entre structure et méthode de construction. Elle assure un excellent niveau de qualité et garantit la durabilité et la pérennité de l'ouvrage. C'est le fruit d'une étroite collaboration et d'un véritable partenariat entre l'architecte et l'ingénieur."* ■

TEXTE : PHILIPPE GUÉRARD

PHOTOS : GUILLAUME MAUCUIT-LECOMTE



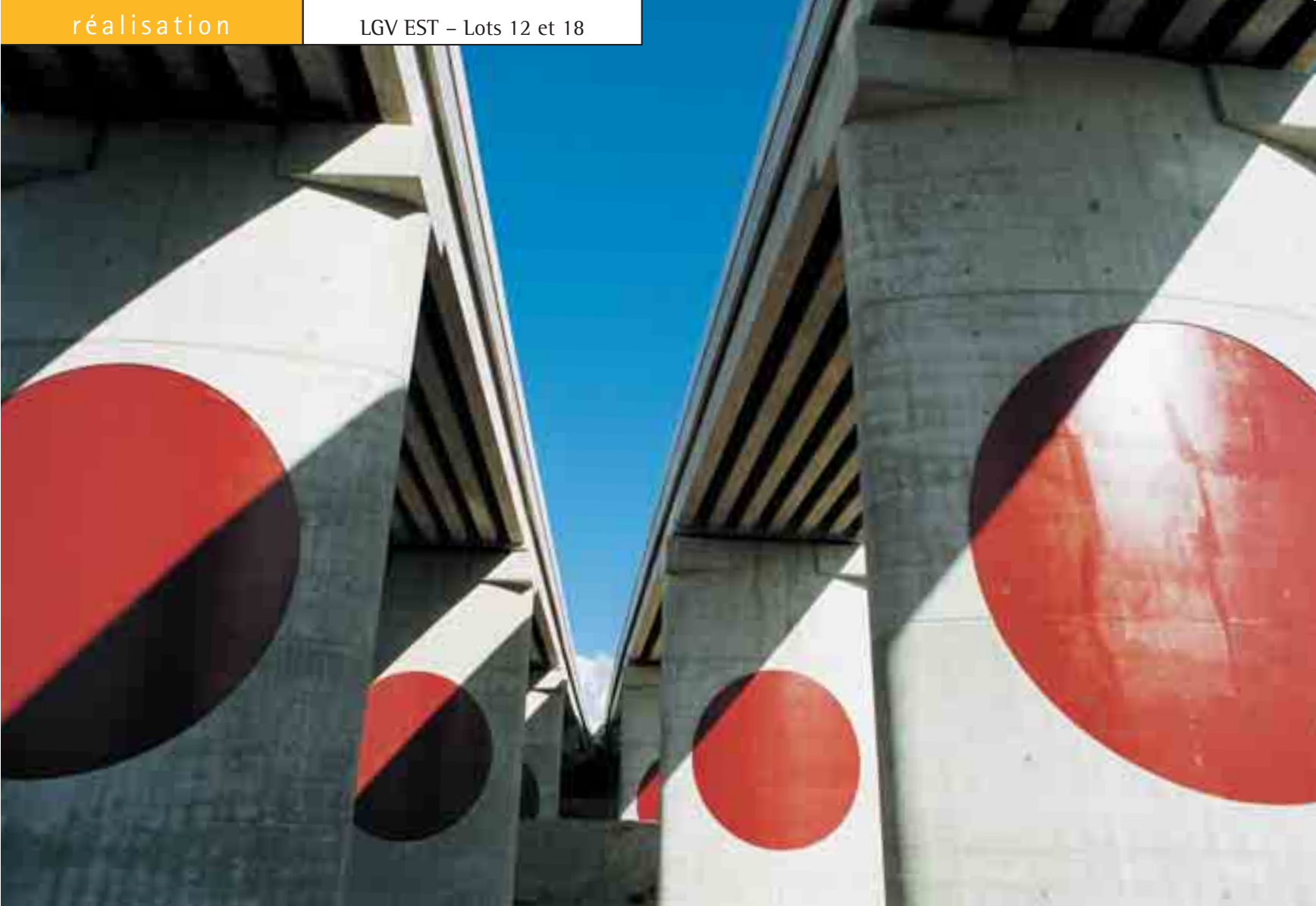
Maître d'ouvrage :
Société des Autoroutes
du Nord et de l'Est de la
France (SANEF)

Maître d'œuvre :
Scetauroute

Architectes :
AOA Architectes,
Charles Lavigne et
Christophe Chéron

Entreprise :
Razel

Coût :
23 M€



Une innovation pour les ouvrages ferroviaires

●●● LA TECHNIQUE DES POUTRES PRÉCONTRAINES PAR ADHÉRENCE, PLUS COMMUNÉMENT APPELÉES “PRAD”, VIENT ENFIN DE FAIRE SON ENTRÉE SUR LE RÉSEAU FERROVIAIRE FRANÇAIS. CINQ PONTS-RAILS SONT EN COURS DE CONSTRUCTION DANS LE CADRE DE LA RÉALISATION DE LA LIGNE À GRANDE VITESSE EST EUROPÉENNE. L’ADOPTION DE CETTE TECHNIQUE EST LE FRUIT D’UN LONG PROCESSUS D’ANALYSES, D’ÉTUDES ET D’ESSAIS QUI A CONFIRMÉ L’INTÉRÊT ÉCONOMIQUE DU PRINCIPE “PRAD” POUR LES OUVRAGES FERROVIAIRES DE RÉSEAU FERRÉ DE FRANCE.



1



2

C'est presque une révolution. Cinq ouvrages de la nouvelle ligne à grande vitesse Est européenne adoptent la technique des poutres précontraintes par adhérence dites "PRAD". Pour Réseau ferré de France (RFF¹), maître d'ouvrage des opérations, l'approche est inédite. En effet, si la technique PRAD est souvent utilisée pour la construction d'ouvrages routiers et autoroutiers, deux cas seulement ont été recensés dans le domaine ferroviaire. Datant de 1946, ces ouvrages à poutres précontraintes par adhérence sont situés dans le secteur d'Achères (78). Jusqu'à aujourd'hui, ils constituaient les seuls exemples de ce type, sur un total de 29 200 ponts-rails en France. "Les sollicitations auxquelles sont soumis les ouvrages ferroviaires, en particulier ceux du réseau à grande vitesse, sont autrement plus importantes que les efforts appliqués sur les ponts routiers", rappelle en substance Gérard Lebailly, expert technique à RFF. Une contrainte qui imposait l'application du principe de précaution dans l'attente d'essais et

de calculs permettant le dimensionnement et la vérification de cette famille d'ouvrages de franchissement. "Le premier pont à voussoirs sur une ligne TGV n'est autre que le double viaduc d'Avignon sur la LGV Méditerranée", avoue Gérard Lebailly. Ce qui prouve bien que l'opérateur ferroviaire français n'est pas opposé aux technologies modernes, mais seulement prudent vis-à-vis d'elles.

● Analyse de la valeur

L'évolution de la solution PRAD trouve son origine au milieu des années quatre-vingt-dix. À l'époque, la SNCF a mené une étude approfondie sur la standardisation d'ouvrages d'art courants tels

➤➤➤ **1** Les poutres PRAD présentent un profil en I avec un épaissement rectangulaire aux abouts, nécessaire pour la reprise des efforts tranchants. **2** Le tablier double voie du lot 12 compte treize poutres PRAD contre sept sur les tabliers monovoie du lot 18. **3** Préfabriquée en usine, chaque poutre PRAD est acheminée par la route puis mise en place à l'aide d'une grue mobile. **4** Pendant toute la phase de construction, les poutres sont posées sur des appuis provisoires : boîtes à sable ou crics.

que les ponts-rails, dont la fabrication n'avait jusqu'alors bénéficié d'aucune industrialisation. La réflexion s'est organisée autour de la méthode "d'analyse de la valeur". L'objectif était d'améliorer les conditions de réalisation, de raccourcir les délais d'études et de travaux et de réduire le coût global des lignes nou-

velles en y incluant les frais liés à la surveillance, à la maintenance et à la réparation des ouvrages d'art.

Après avoir confirmé l'intérêt économique d'ouvrages constitués de poutres PRAD, la SNCF a confié à la Fédération de l'Industrie du Béton (FIB) et au Centre d'Études et de Recherche de l'Industrie



➤➤➤ Le viaduc du lot 12, qui permettra le franchissement de la vallée de la Théroutte, se développe sur une longueur de 322,42 m. Il est supporté par une série de treize piles.

1. L'entité RFF (Réseau ferré de France), qui assure la construction et l'entretien des lignes ferroviaires, a été créée en 1997.



3



4

du Béton (CERIB) le soin de réaliser des essais statiques, dynamiques, de fatigue et de rupture sur des ponts-rails intégrant ce type de structure. *“Le cahier des charges de l’opérateur ferroviaire exigeait des ouvrages multitravée hyperstatiques”*, souligne Pierre Passeman, ingénieur au département conception des ouvrages du CERIB.

● 50 millions de cycles

Les ouvrages ferroviaires PRAD ont été validés par un essai de comportement sous effet dynamique qui a été réalisé pendant 72 jours sur un pont-rail test composé de deux travées de 5,35 m mises en continuité. *“Nous avons soumis le corps d’épreuve à une série de 50 millions de cycles, correspondant à une durée de service pour l’ouvrage de 100 ans”*, résume Pierre Passeman. Les résultats des essais ont démontré un très bon comportement en service et à la fatigue ainsi qu’une sécurité structurelle satisfaisante : la résistance à la rupture est 2,8 fois supérieure aux contraintes appliquées en service.

Le principe validé, la SNCF a souhaité pousser plus avant sa réflexion afin de quantifier précisément l’économie glo-

bale de la solution PRAD. Pour ce faire, elle a passé commande d’un outil d’aide à la conception de tabliers de ce type auprès du CERIB. André de Chefdebien, ingénieur au CERIB, a coordonné cette étude paramétrée dont Pierre Passeman a assuré la réalisation pendant une année complète. *“RFF dispose à présent d’un guide de dimensionnement complet des ouvrages PRAD réunissant près de deux cents ponts-rails, résume Pierre Passeman. Ces ouvrages sont constitués de une à six travées dont les longueurs unitaires varient de 12 à 30 m pour une longueur totale de tablier toujours inférieure à 90 m.”*

● Mise en application sur une ligne à grande vitesse

Cette trame particulière équivaut à la longueur des rails utilisés pour la construction de lignes à grande vitesse au niveau des ouvrages. Dans le concept, il n’y a pas de continuité de la précontrainte, mais une entretoise et un hourdis en béton armé qui solidarissent les poutres successives, au nombre de sept ou treize en fonction de la largeur transversale du tablier (une ou deux voies). Côté structure, RFF a figé son choix sur

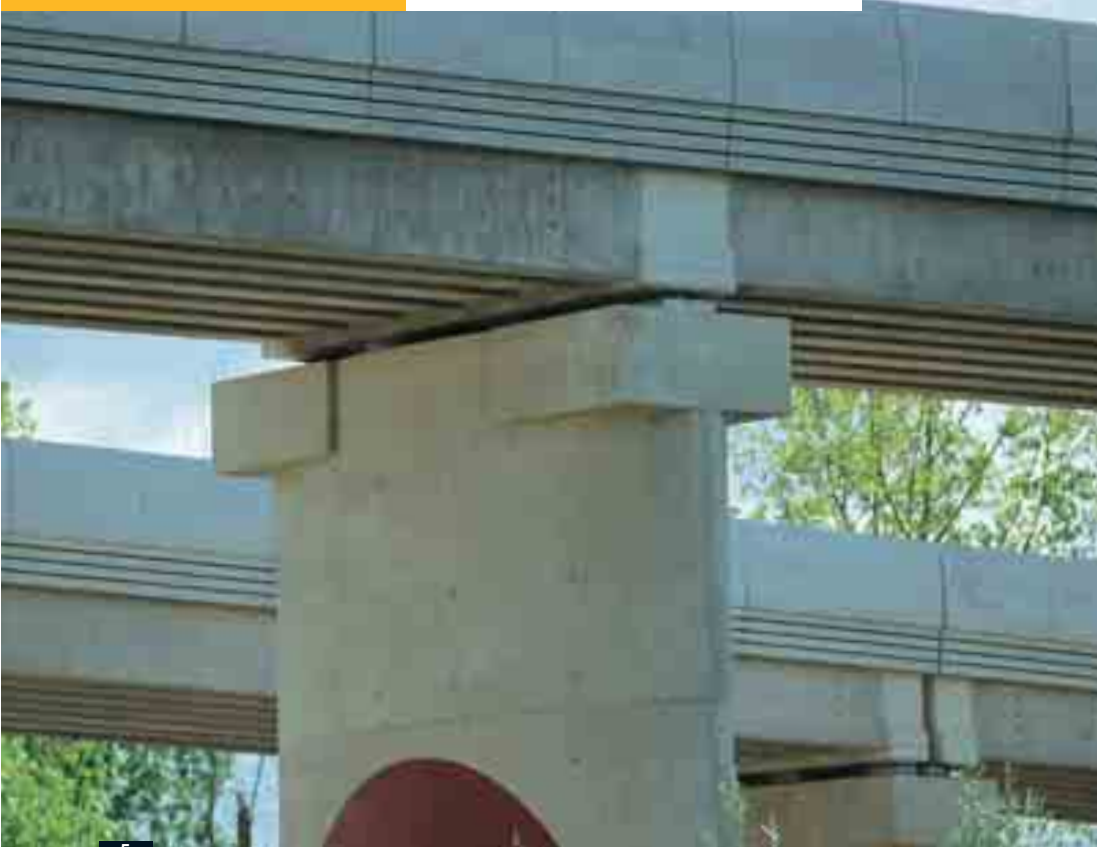
TECHNIQUE

Les ponts PRAD routiers et autoroutiers

À l’heure actuelle, seulement deux tabliers à poutres PRAD sont référencés sur le réseau ferré français. La technique constitue pourtant une solution classique pour la réalisation de ponts routiers et autoroutiers pour des portées comprises entre 10 à 35 m. Dans ce cas, les poutres PRAD présentent un espacement de 80 cm à 1 m, et le hourdis une épaisseur comprise entre 18 et 22 cm. Les poutres PRAD conviennent aussi pour la réalisation de la couverture supérieure de tranchées couvertes ou de couvertures phoniques. Les ouvrages cadres ou les portiques peuvent aussi bénéficier de cette technique. Dans ce cas, l’extrémité des poutres est noyée dans les voiles verticaux. Côté dimensionnement, le concepteur dispose d’une liberté totale. Il est possible d’optimiser le nombre de poutres, leur espacement, leur hauteur, et de jouer sur l’épaisseur du hourdis, ainsi que sur la longueur des travées. Enfin, deux types de sections de poutres sont couramment utilisés : rectangulaires ou en I, avec ou sans blochet.

des bétons de classe de résistance C 60/75 permettant d’optimiser la géométrie des poutres et donc de concevoir des tabliers plus élancés. La hauteur totale “poutres + hourdis” est ainsi limitée à 1,62 m dans le cas de travées, toutes identiques, de 22,50 m. La dernière étape franchie, il ne restait plus qu’à mettre en

application cette solution sur une ligne à grande vitesse. Chose aujourd’hui en cours sur le chantier de la LGV Est européenne où deux lots voient la réalisation d’ouvrages intégrant dans leur tablier des poutres précontraintes par adhérence. Situé près de Meaux (77), le lot 12 comprend le viaduc de franchissement de



>>> 5 Au droit de chaque pile, une entretoise de continuité

de 1,20 m de large permet la reprise des efforts tout en assurant

l'hyperstaticité du tablier. 6 Les quatre estacades du lot 18

présentent une longueur cumulée de 1 146 m.

la vallée de la Théroüanne. "Ici, la technique PRAD trouve sa parfaite justification compte tenu d'un environnement marécageux où il était difficile de mettre en place des étalements lourds", résume Yves Coquel, chef de ce lot pour la maîtrise d'œuvre SNCF. En même temps, la construction respecte la loi sur l'eau qui limite les emprises de travaux, c'est-à-dire un hectare au total pour les besoins d'accès du site de la Théroüanne.

● Des tabliers hyperstatiques

Surplombant de 8 m au maximum la vallée, le viaduc se développe sur une longueur de 322,42 m. Il est supporté par une série de treize piles. Pour respecter le cahier des charges établi par RFF, il compte quatre tabliers hyperstatiques séparés par des joints de dilatation : 89,475 m (3 x 22,50 m + 21,975 m) ; 90 m (4 x 22,50 m) ; 67,50 m (3 x 22,50 m) et 66,975 m (2 x 22,50 + 21,975 m). "Un ouvrage de type cadre de 8,47 m de long s'inscrit

dans la continuité directe du viaduc", précise Yves Coquel. Considéré comme une culée creuse, il assure le rétablissement du chemin rural dit "des Vaches". La section transversale des tabliers est constituée de treize poutres PRAD de 1,35 m de hauteur et surmontées d'un hourdis en béton armé de 27 cm coulé en place sur plaques de "bois-ciment". Au droit de chaque appui, une entretoise de continuité de 1,20 m de large permet la reprise des efforts tout en assurant l'effet hyperstatique. Seules exceptions, les entretoises implantées au niveau des joints de dilatation : elles se divisent en deux éléments de 80 cm séparés d'un vide de 25 cm. "L'un des avantages de la technique PRAD hyperstatique est de permettre la réduction du nombre d'appareils d'appui", souligne Yves Coquel. En transversal sur ce viaduc, il n'y en a que sept pour treize poutres.

À Claye-Souilly (77), le lot 18 constitue le carrefour d'interconnexion avec la ligne ferroviaire reliant les réseaux TGV Nord, Méditerranée et Atlantique. Com-

plexe, ce lot compte dix-huit ouvrages différents, dont les estacades contiguës qui permettent la traversée de la vallée de la Beuvronne en majeure partie constituée d'un marais protégé. Au nombre de quatre, ces estacades présentent des longueurs respectives de 135 m, 310,24 m, 404,48 m et 296,48 m, soit un développé de 1 146,20 m. Comme pour le viaduc de la Théroüanne, leurs tabliers sont divisés en tronçons ne dépassant pas les 90 m entre joints, avec un maximum de travées standards de 22,50 m de long. Les entretoises de continuité, larges de 1,20 m, sont hautes de 1,62 m, tout comme l'ensemble "poutres + hourdis". Chaque tablier supporte une seule voie ferrée, d'où leur section transversale réduite à sept poutres PRAD et un nombre d'appareils d'appui limité à quatre par pile.

La technique de construction utilisant des éléments préfabriqués offre plusieurs avantages (maîtrise des délais et des coûts, aspect de parement...). Et Gérard Lebaillly de conclure : "Les tabliers à poutres PRAD peuvent à présent être considérés comme une solution supplémentaire intégrée au catalogue des ponts types de RFF." ■

TEXTE ET PHOTOS : ANTOINE VAVEL



Maître d'ouvrage :
Réseau Ferré de France
(RFF)

Maître d'œuvre :
groupement SNCF-Arcadis

Entreprises :

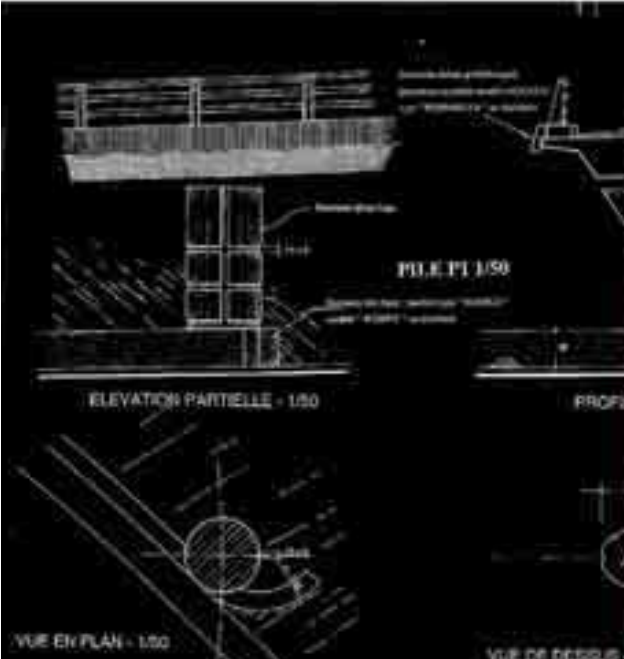
Lot 12 :
GTM Terrassement,
Deschiron, Campenon Bernard,
Chantiers Modernes,
Weiler, Eurovia et
GTM génie civil.

Lot 18 :
Eiffage (mandataire),
Fougerolle Ballot,
Appia Est et Eiffel.

Coût des travaux
(terrassements et génie civil) :

Lot 12 :
80,5 M€

Lot 18 :
64 M€



L'art du dialogue entre ingénieur et architecte

●●● L'IMAGE DE L'INGÉNIEUR, SPÉCIALISTE DU BÉTON DÉNUÉ DE FANTAISIE, ET CELLE DE L'ARCHITECTE, ARTISTE MÉPRISANT LA TECHNIQUE, SONT À RANGER AU RAYON DES CARICATURES. LE NUMÉRO SPÉCIAL *OUVRAGES D'ART 2003* AVAIT DÉJÀ MIS EN LUMIÈRE LES RAPPORTS ÉTROITS ENTRE ARCHITECTES ET INGÉNIEURS. TROIS AUTRES ARCHITECTES, SPÉCIALISTES DES OUVRAGES D'ART, RACONTENT ICI LES ENJEUX DE LEUR MISSION ET ÉVOQUENT LES RAPPORTS QU'ILS ENTRETIENNENT AVEC LEURS DIFFÉRENTS PARTENAIRES. ILS PARLENT ÉGALEMENT DE LEUR PASSION POUR LES OUVRAGES D'ART. CAR IL S'AGIT BIEN DE PASSION.

Humilité, voilà le maître mot. Interrogés par *Construction moderne*, trois architectes spécialistes des ouvrages d'art clament que le défaut serait d'en faire trop. Un ouvrage d'art doit donc rester modeste, savoir s'adapter, mais sans être médiocre. *"On ne doit pas avoir à rougir de ce que l'on va laisser aux générations à venir"*, avance Jean-Louis Jolin, architecte-urbaniste à Metz. Un principe s'impose : comprendre le site pour savoir ce que l'on peut y placer. L'objectif étant d'intégrer – et non de réaliser – des pièces majeures. *"Au départ, on s'attache à marquer le paysage, puis on apprend à aller à l'essentiel"*, enchaîne Laurent Barbier, architecte à Vanves, près de Paris. *"C'est une démarche d'apprenti."* Et d'ajouter : *"L'ouvrage d'art est à la fois un contenu et un contenant ; il se lit de l'intérieur et de l'extérieur. Il donne des échelles, crée une dimension. L'architecte est là pour donner ce côté symbolique."*

● Le dépouillement, gage de lisibilité

C'est cette dimension académique, historique, qui rend le sujet intéressant. Des ponts, il y en a depuis fort longtemps, et

les ouvrages d'aujourd'hui s'inscrivent dans une tradition. Une tradition qui nous a laissé nombre d'ouvrages anciens que l'on apprécie pour leur pureté. Dès lors, la question est comment faire pour durer, pour éviter la pièce rapportée. Au dire des architectes, il semble bien que l'élégance se gagne par la recherche de ces mêmes trames fondamentales. *"On essaie de sculpter le travail de l'ingénieur"*, poursuit Laurent Barbier. Le dépouillement serait donc un gage de lisibilité. Le dialogue de l'architecte et de l'ingénieur est manifestement la clé de toute réussite. *"Au fond, les ingénieurs apportent ce qui est nécessaire, tandis que les architectes apportent l'essentiel, c'est-à-dire que l'ouvrage soit satisfaisant"*, poursuit Jean-Louis Jolin. Car on "voit" l'ouvrage d'art plus qu'on ne le regarde. Et du fait qu'il est destiné à durer, le pont, exemple même de l'ouvrage courant, est notre bien à tous : il appartient aux générations présentes comme aux générations à venir. On comprend, dès lors, que les architectes recommandent de ne pas insister sur l'aspect décoratif, au risque de proposer une mission réductrice, à l'opposé de l'architecture au sens classique. Pierre Million, architecte à Lyon, estime même

que la signature de l'architecte n'a pas d'intérêt, l'intérêt étant de bien répondre à la question : *"On est là pour apporter un supplément d'âme, c'est tout."*

Mais comment l'architecte en vient-il à se consacrer aux ouvrages d'art ? Pour l'architecte lyonnais, l'occasion s'est présentée après six années passées à concevoir des bâtiments. Il partage alors ses bureaux avec un paysagiste qui se voit confier l'intégration d'un ouvrage. Le paysagiste oriente le projet vers l'architecte qui réalise cet ouvrage, puis d'autres, jusqu'à ne plus faire que cela. C'était il y a vingt-cinq ans. *"J'ai toujours regretté de n'avoir pas fait les Ponts et Chaussées"*, avoue Pierre Million. *"L'une des difficultés de l'architecte dans ses premières années, c'est de trouver sa place. Avec l'ouvrage d'art, j'ai trouvé la rigueur qui me manquait dans l'architecture."*

Pour Jean-Louis Jolin, tout commence en 1969. Il travaille à l'époque en compagnie d'un urbaniste auquel est confié un projet de pont sur la Sarre. L'urbaniste propose l'aide de l'architecte à son client. Quelques centaines d'ouvrages courants jalonnent ainsi la carrière de Jean-Louis Jolin, notamment sur l'A26 Chalon-Troyes, sur l'A16

Paris-Boulogne, pour la LGV Est. *"Au moment de mes études, à l'oral d'admission, on m'a donné les ponts pour sujet, précise l'architecte messin. C'était inattendu à l'époque."* Cela le serait encore aujourd'hui. Car la démarche des écoles d'architecture ne semble pas aller dans le sens des ouvrages d'art.

● La modestie, qualité indispensable

Laurent Barbier en est convaincu. Il est venu au contact des ponts par l'intermédiaire de la SAPRR (Autoroutes Paris-Rhin-Rhône), pour laquelle il réalisait des aires de service. Ce travail lui a offert l'occasion de voir bien des ouvrages, dont certains lui ont paru contestables, raison pour laquelle il a proposé son intervention. Avec succès. Depuis, les ponts occupent 80 % de son temps. Mais son regard sur la formation des architectes n'en est pas moins critique : *"À l'école, on maintient les architectes dans une échelle domestique. Le contexte n'est pas enseigné."* Autre regret formulé par Laurent Barbier : les architectes sont devenus des artistes et ont désappris à être modestes. On y revient, donc. Pour lui, l'ouvrage d'art n'est pas la création



1



2

>>> 1 et 2 Laurent Barbier a joué sur le contraste des matières pour la déviation de Clamecy (58). 3 Pierre Million aime à dire qu'il a *"trouvé la rigueur qui (lui) manquait dans l'architecture avec l'ouvrage d'art"*. 4 Les piles du viaduc de la Schwalb (57) sur la RN 62 ont été dessinées par Jean-Louis Jolin.

absolue de l'architecte. Et il peut le séduire comme le rebuter, en raison de l'aspect technique.

Pour dompter cette technique, Laurent Barbier recommande d'apprivoiser l'anatomie de l'objet, sans quoi l'on ne fait que de l'habillage. D'où l'obligation du travail avec l'ingénieur pour comprendre ce qui est fondamental. D'où aussi ces aller-retour jusqu'à l'ouvrage final: "On ne sait plus à la fin qui a apporté les grandes options de départ et cela n'a pas d'importance."

● La relation humaine, clé de la réussite

On l'aura compris, un architecte ne ferait pas forcément un bel ouvrage tout seul, l'ingénieur non plus. Mais dès lors que le maître d'ouvrage sollicite l'architecte, la partie est bien engagée. L'essentiel étant qu'architectes et ingénieurs soient désignés en même temps, condition *sine qua non* pour que le dialogue s'installe. Une étape préliminaire de sélection des idées pourra alors avoir lieu. Certains appels d'offres portent sur des équipes de maîtrise d'œuvre complètes. "On ne peut arriver à quelque chose que si ingénieurs et architectes travaillent

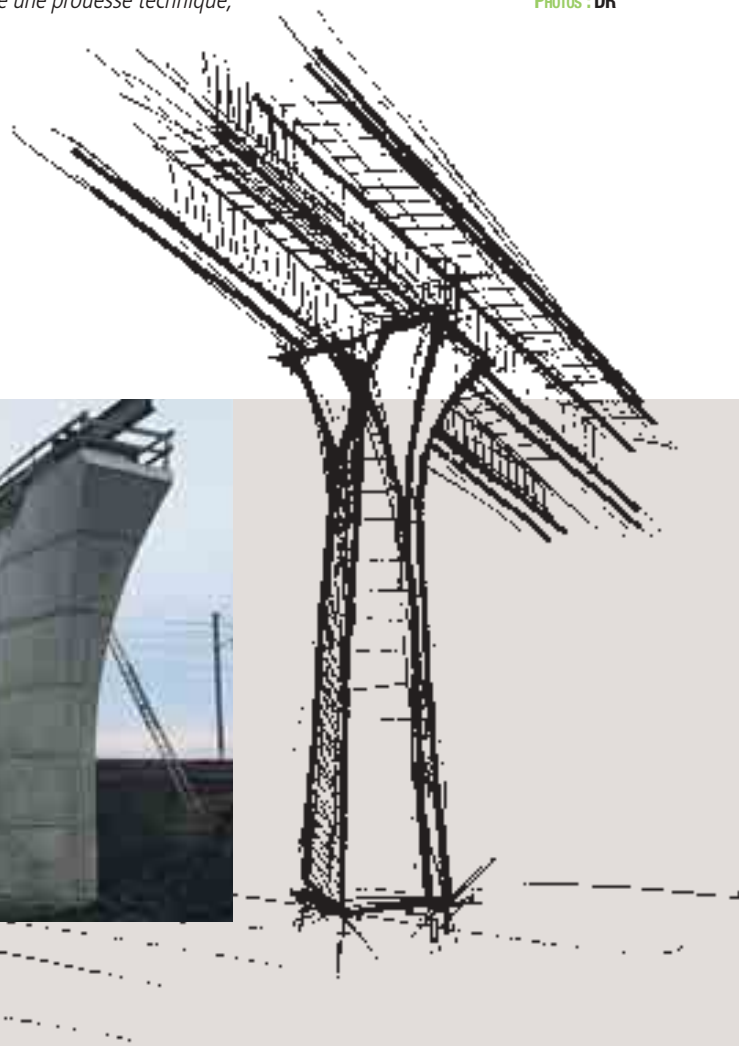
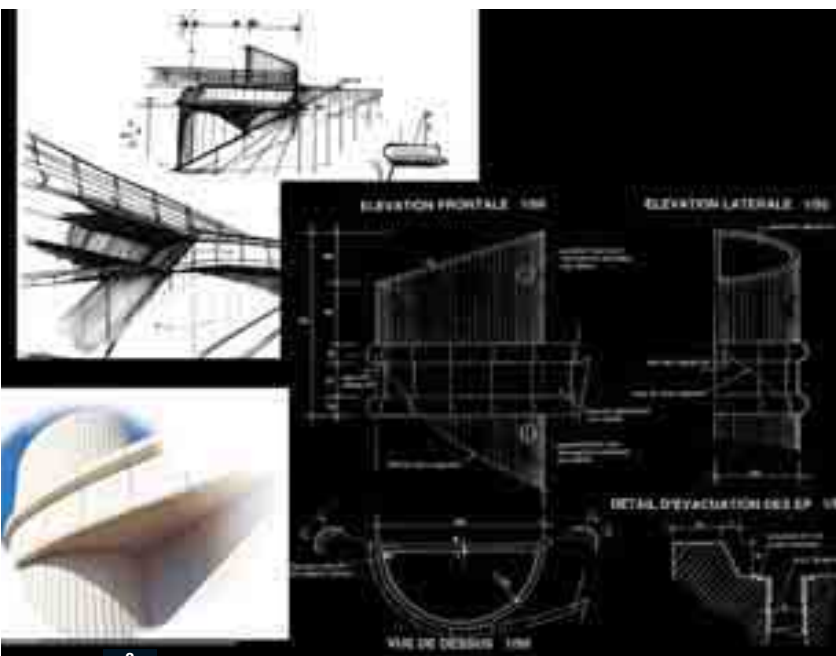
de concert, confirme Jean-Louis Jolin. Et les uns comme les autres ne doivent pas être trop figés." "Si on m'enlevait le dialogue avec les ingénieurs, j'arrêteraient, renchérit Pierre Million. C'est ce tour de table qui m'intéresse."

La relation humaine est donc la clé de toute réussite. Encore faut-il que la problématique exprimée par la maîtrise d'ouvrage soit suffisamment précise. D'autant qu'une démarche intellectuelle se fait jour et tend à modifier la donne. Car l'ère est à la communication et la volonté se fait plus pressante chez les maîtres d'ouvrage, le plus souvent aussi chez les élus, de laisser une trace de leur passage. C'est l'une des raisons pour lesquelles on fait appel aux architectes... Le phénomène tendrait à s'amplifier. Charge alors à l'architecte de faire comprendre ce qu'il faudrait faire – et ne pas faire – pour l'ouvrage. "Les élus ne doivent pas voir en l'ouvrage d'art une vitrine, reprend Laurent Barbier. C'est la source d'une ambiguïté: on sollicite l'architecte mais on ne l'écoute pas forcément quand il prône la discrétion, surtout dans les projets urbains." Au passage, on se félicitera du chemin parcouru, car l'architecte n'a plus à défendre l'intérêt de sa mission. Il ne lui reste

donc plus qu'à convaincre la maîtrise d'ouvrage, qui fonctionne souvent par référence: on a été séduit par un ouvrage, et l'on souhaite avoir le même. À l'architecte de montrer qu'il ne faut pas retenir le seul aspect cosmétique et qu'il faut au contraire s'atteler à une démarche personnelle, à un scénario propre. "Avant d'être un architecte d'ouvrages d'art, on met en scène un espace, on raconte une histoire", résume Laurent Barbier. La formule verbale, l'idée, devient donc aussi importante que le dessin. Raison pour laquelle Pierre Million recommande à l'architecte de se demander quel est le sens de l'ouvrage par rapport au tracé, et qui regarde quoi. À partir de là, d'après lui, l'architecte saura aussitôt comment l'orienter. Puis revient la question de l'humilité: "Il n'y a pas de petits ni de grands ouvrages. Quand un ouvrage fait apparaître une prouesse technique,

cela devient autre chose. Les vraies prouesses ont permis de faire parler des ponts, mais tous les ouvrages ne sont pas le pont de Normandie ou le viaduc de Millau. Quand on fait Clermont-Béziers, il y a près de cent cinquante ouvrages et pourtant, personne ne s'en souvient." Mais cette discrétion ne semble pas entamer l'intérêt de l'intervention. Et Pierre Million de conclure: "Si c'est une simple question d'habillage, je passe mon chemin." Même enthousiasme pour Laurent Barbier: "On est dans le symbole. Mais quel plaisir quand le message passe, quand l'objet gagne en âme sans nul besoin de discours explicatif!" Et s'il restait une raison de douter: "Quelles que soient les contraintes, l'ouvrage d'art est plus intéressant. Je ne me vois plus du tout faire du bâtiment", tranche Jean-Louis Jolin. ■

TEXTE : PHILIPPE FRANÇOIS
PHOTOS : DR



Livres



→ Conception des bétons pour une durée de vie donnée des ouvrages

Collection Documents scientifiques et techniques

Ce document vise à une meilleure connaissance des propriétés relatives à la durabilité du béton armé et de ses constituants et des moyens mis en place pour maîtriser cette durabilité. Il propose une méthodologie pour la mise en œuvre d'une démarche performantielle, globale et prédictive de la durée de vie des structures en béton armé.

Éditions de l'Association Française de Génie Civil (AFGC), juillet 2004



→ L'art de l'ingénieur, de Perronet à Caquot - L'innovation scientifique liée à la pratique

Hors série des Annales des Ponts et Chaussées pour le bicentenaire du Conseil général des Ponts et Chaussées

Cet ouvrage retrace près de trois siècles d'histoire des *Annales des Ponts et Chaussées*.

Éditions Presses de l'École Nationale des Ponts et Chaussées (ENPC)



→ Construire, équiper, aménager - La France, de ponts en chaussées

Bertrand Lemoine

Ce livre présente les grands travaux réalisés en France depuis le XVIII^e siècle grâce à la collaboration entre l'État et le Conseil général des Ponts et Chaussées.

Éditions Découvertes Gallimard



→ Norme Béton NF EN 206-1

Syndicat national du béton prêt à l'emploi

Rédigé par des experts du Syndicat National du Béton Prêt à l'Emploi (SNBPE) et de l'industrie cimentière, ce fascicule présente en deux parties cette nouvelle norme, avec d'un côté des commentaires et des informations pratiques, et de l'autre, la retranscription du texte de la norme.

Éditions Syndicat National du Béton Prêt à l'Emploi/ Cimbéton, 120 pages, septembre 2004



→ Paris de pont en pont

Sophie-Marguerite et Serge Montens. Photographies de Michèle Moukarzel

Ce joli livre vous donnera envie de découvrir ou de redécouvrir les trente-six ponts, passerelles et viaducs parisiens à travers des clin d'œil historiques, littéraires ou artistiques : ponts-bracelets, ponts-virgules, ponts de peintres ou ponts de poètes, ponts de cinéma... Ainsi que quelques curiosités.

Éditions Bonneton

Publications techniques Cimbéton



Europe: la nouvelle donne
Conception et réalisation des ouvrages avec les produits structuraux en béton

Ce document présente ce qui va changer pour les prescriptions relatives aux produits structuraux préfabriqués en béton avec la parution des nouvelles normes européennes. Un vademecum a également été édité. Pratique, il permettra aux utilisateurs des produits préfabriqués en béton de consulter à tout moment les références de ces nouvelles normes. ■
Référence G 58, 24 pages, gratuit.



Bétons et ouvrages d'art
La durabilité des bétons

La prise en compte de la durabilité des matériaux est désormais facilitée avec l'arrivée de nouvelles normes, guides et recommandations spécifiques. Ce guide technique est destiné aux concepteurs et gestionnaires d'ouvrages de génie civil en béton. Il synthétise les principes de prévention et les recommandations à respecter pour la prescription et la formulation de bétons de qualité, adaptés à l'agressivité de l'environnement, afin de satisfaire les exigences et concevoir des ouvrages encore plus pérennes. ■
Référence T 48, 96 pages, gratuit.



→ **Un pont chez Poséidon**

Renaud Lefebvre

Ce livre raconte l'histoire d'un chantier exceptionnel, celui de la construction du pont qui, entre Rion et Antirion, enjambe le golfe de Corinthe. Ce récit d'une utopie née au XIX^e siècle et devenue réalité au début du XXI^e siècle est nourri de quatre-vingts photos de Nikos Daniilidis. *(Voir également notre article en page 1).*

Éditions Textuel

.....



→ **Les ponts**

Angia Sassi Perino et Giorgio Faraggiana

Ouvrages d'art et nécessités de communication, les ponts, tout en faisant partie de notre environnement, transforment les paysages dans lesquels ils s'insèrent. Cet ouvrage propose quelques-uns des plus beaux exemples de ces édifices à travers le monde, depuis l'Antiquité jusqu'à nos jours. Extrêmement complexes dans leur conception, agrémentés d'une profusion de décorations, des ponts de pierre aux ponts suspendus, ils sont tous représentatifs de leur époque et des civilisations qui les ont conçus.

Éditions Gründ

.....



→ **Louis Harel de la Noë (1852-1931) – Un grand ingénieur breton**

De François Lépine et Collectif Presses de l'École Nationale des Ponts et chaussées

Ce livre présente au public ce pionnier de l'utilisation du béton armé à l'esprit créatif qui travailla plus de quarante-deux ans pour des collectivités locales de province et bâtit plus de trois cents ouvrages.

Éditions Presses de l'École Nationale des Ponts et Chaussées (ENPC)

.....



→ **Recommandations pour la durabilité des bétons durcis soumis au gel**

Collection Techniques et méthodes des Laboratoires des Ponts et Chaussées

Ce guide est destiné aux gestionnaires d'ouvrages confrontés aux conséquences des cycles gel-dégel, associés la plupart du temps aux sels de déverglaçage. Fruits de recherches récentes, ces recommandations proposent des spécifications adaptées à l'environnement des différentes régions françaises. *(Voir également l'article sur le viaduc de la Sioule et l'encadré page 10).*

Éditions du Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC)

.....



Ponts à poutres préfabriquées précontraintes par adhérence: PRAD
Les atouts de l'offre industrielle pour des ouvrages sobres, économiques et pérennes

Cette brochure permet une première approche des ponts PRAD : leur définition, les différents types de poutres, les caractéristiques des ciments et les intérêts liés à ce choix. De nouvelles perspectives sont ouvertes avec les nouveaux bétons que sont les BHP, les BAP et les BFUP. ■

Référence T 80, 24 pages, gratuit.



Béton armé d'inox
Le choix de la durée

Ce document technique constitue une synthèse indispensable des connaissances actuelles et s'adresse aux concepteurs et gestionnaires d'ouvrages en béton armé. Il est consacré à l'utilisation des armatures inox, en substitution totale ou partielle des armatures acier, afin de concevoir des ouvrages destinés à durer plus longtemps et de s'affranchir des phénomènes de corrosion, principale pathologie des ouvrages, et ce, avec des coûts de maintenance réduits au plus strict minimum. ■

Référence T 81, 112 pages, gratuit.



*Le viaduc de la Sioule. Architecte : Berdj Mikaëlian.
Photo : Régis Bouchu/Actophoto*