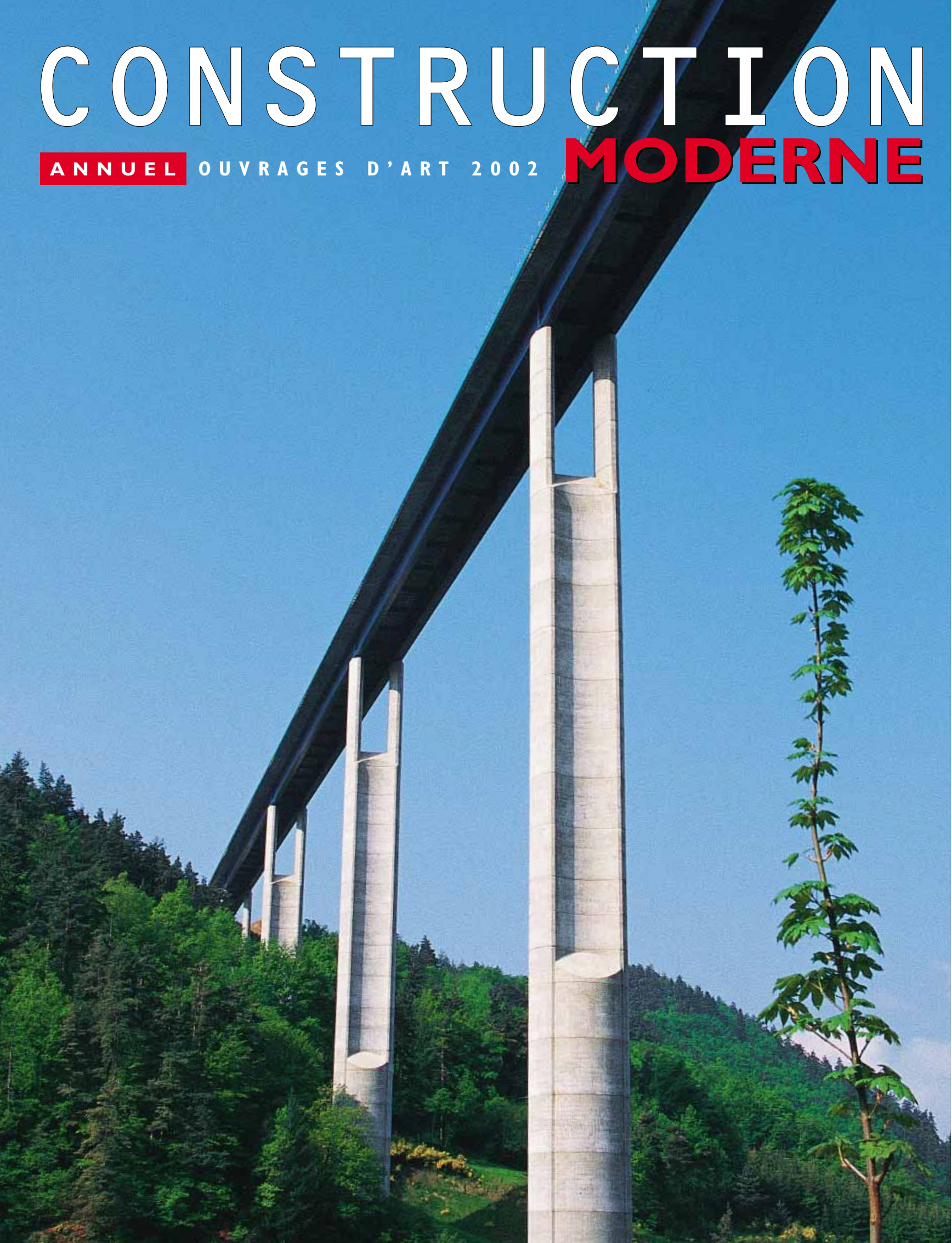


# CONSTRUCTION

ANNUEL OUVRAGES D'ART 2002

**MODERNE**





## éditorial

**D**e l'Antiquité à nos jours, les ponts ont tissé des liens par-dessus les multiples obstacles dressés par la nature. Nombre de ces ponts, témoins du génie constructif de nos ancêtres, font aujourd'hui partie intégrante du patrimoine commun. On peut en dire autant du béton, qui, de par ses qualités techniques et plastiques, offre de multiples solutions permettant de construire, mais aussi de rénover et d'adapter ces ouvrages aux conditions d'utilisation actuelles. Car dans ce monde qui est celui de l'information en temps réel, du développement des transports collectifs à grande vitesse, les bétons sont partout qui placent leurs qualités au service des ouvrages anciens ou contemporains, et ce, qu'il soit question de relever de nouveaux défis techniques, d'améliorer la circulation dans les villes, ou encore de contribuer à la préservation de notre mémoire collective.

**ANNE BERNARD-GÉLY,**  
directeur de la publication

## CONSTRUCTION MODERNE

DIRECTEUR DE LA PUBLICATION : Anne Bernard-Gély  
DIRECTEUR DE LA RÉDACTION : Roland Dallemagne  
CONSEILLERS TECHNIQUES :  
Bernard David ; Serge Horvath ; Jean Schumacher

## CIMbéton

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](mailto:centrinfo@cimbeton.net)  
• internet : [www.infociments.fr](http://www.infociments.fr)

La revue *Construction moderne* est consultable  
sur [www.infociments.fr](http://www.infociments.fr)

CONCEPTION, RÉDACTION ET RÉALISATION :  
ALTEDIA COMMUNICATION  
5, rue de Milan – 75319 Paris Cedex 09  
RÉDACTEUR EN CHEF : Norbert Laurent  
RÉDACTRICE EN CHEF ADJOINTE : Maryse Mondain  
SECRÉTAIRE DE RÉDACTION : Philippe François  
MAQUETTISTE : Sylvie Conchon

Pour les abonnements, fax : 01 55 23 01 10,  
E-mail : [centrinfo@cimbeton.net](mailto:centrinfo@cimbeton.net)  
Pour tout renseignement concernant la rédaction,  
tél. : 01 44 91 51 00

### réalisations



>>> En couverture :  
pont sur le Lignon –  
architecte :  
Charles Lavigne ;  
photo :  
Albert Bérenguier

BOSTON – Infrastructure routière

PAGES

01

**Quand l'Amérique**  
réinvente la circulation urbaine

07

Restauration des ponts

PAGES

08

**Du béton**  
pour la sauvegarde du patrimoine

10

FRANCE – Radars

PAGES

11

**Sentinelles**  
de béton au cœur du territoire

14

### perspectives

MONACO – Port de la Condamine

PAGE

15

Extention du port de Monaco  
**L'épopée continue**

ROISSY 2 E

PAGE

16

**Le béton** ultime

### solutions béton

ÉLÉMENTS PRÉFABRIQUÉS

PAGES

17

**Créativité**  
et économie

24

### rétrospective

Deux mille ans de ponts

PAGES

25

**Ponts et viaducs :**  
vingt siècles d'innovation

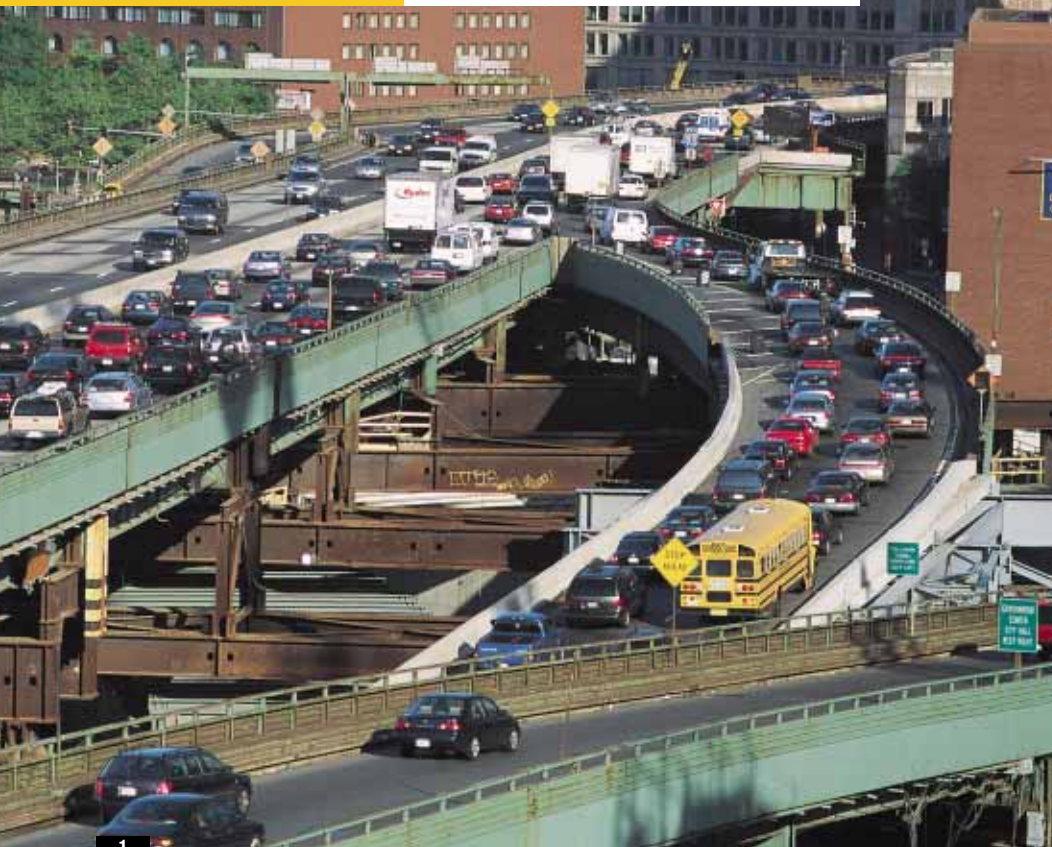
40



# Quand l'Amérique réinvente la circulation urbaine

●●● À BOSTON COMME DANS TOUTES LES GRANDES AGGLOMÉRATIONS DU MONDE INDUSTRIALISÉ, L'AUTOMOBILE RÈGNE EN MAÎTRE. LES EMBOUTEILLAGES AUSSI. DANS LES ANNÉES CINQUANTE, DÉJÀ, UNE VOIE RAPIDE AVAIT ÉTÉ CONÇUE QUI TRAVERSAIT LA CAPITALE DU MASSACHUSETTS. INACHEVÉE PARCE QUE MAL ACCUEILLIE, CETTE VOIE SURÉLEVÉE ATTEINT À SON TOUR SES LIMITES POUR DEVENIR L'UN DES AXES LES PLUS SATURÉS DES ÉTATS-UNIS. POUR EN FINIR AVEC CES EMBOUTEILLAGES QUOTIDIENS, LES AUTORITÉS LOCALES EN SONT VENUES À ENVISAGER UNE SOLUTION ROUTIÈRE GLOBALE. AU TERME DE VINGT ANNÉES D'ÉTUDES, LE "CENTRAL ARTERY/TUNNEL" EST NÉ.





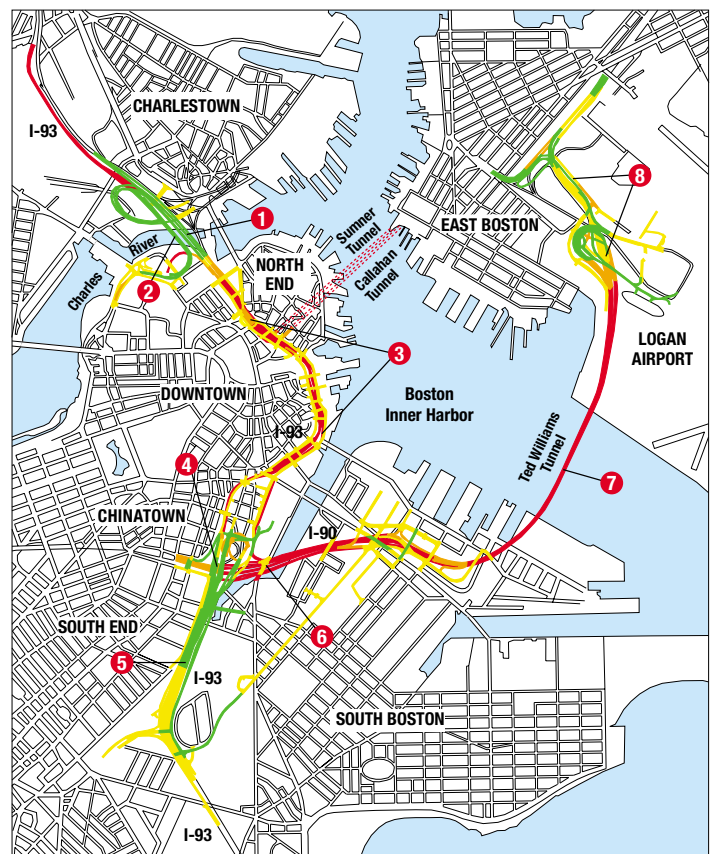
## → Historique

# La route du ciel

**V**ers la fin des années 40, les autorités de Boston mesurent l'essor de la circulation automobile et lancent la construction d'une "route futuriste dans le ciel" – une voie rapide surélevée posée sur une estacade – qui traverserait la ville. Dès l'ouverture de la première section aérienne en 1954, la "route futuriste" est considérée comme laide. En même temps, elle crée une barrière entre les quartiers, et l'espace libéré sous l'estacade s'avère difficile à exploiter. De fait, le département des travaux publics décide de faire passer dans un tunnel la section sud de la voie rapide, ce qui n'empêchera pas l'inauguration d'un second tronçon aérien fin 1956. L'ensemble de l'itinéraire est ouvert à la circulation le 1<sup>er</sup> juillet 1959.

Si la voie rapide est dimensionnée pour absorber un trafic de 75 000 véhicules par jour, elle est dès le départ difficile à gérer, du fait notamment de la présence des 27 accès répartis sur les 2 400 m de l'itinéraire. Une "ceinture intérieure" prévue initialement devait résoudre ce pro-

blème de trafic naissant, mais les difficultés de la première section ont incité les riverains de la future voie de contournement à s'opposer à sa construction. Partie intégrante d'un système de circulation inachevé, la "route du ciel" supporte aujourd'hui un trafic quotidien d'environ 190 000 véhicules. "C'est l'un des axes routiers les plus saturés des États-Unis", déclarait en 1999 Andrea d'Amato, commissaire aux Transports de Boston. La circulation génère 6 à 8 heures d'embouteillages par jour, et selon les estimations, la congestion du trafic devrait atteindre 15 à 16 heures par jour d'ici à 2010. Ce constat alarmant a poussé les autorités locales à envisager une solution routière globale. Sans précédent, le projet "Central Artery/Tunnel", d'une durée de plus de 20 ans (les études d'impact sur l'environnement datent d'avril 1983), doit être achevé en 2005. D'un montant initial de 11 milliards de dollars (12 milliards d'euros), il engloutira finalement la prodigieuse somme de 20 milliards de dollars (22,6 milliards d'euros). ■



■ Viaducs   
 ■ Transition   
 ■ Au niveau du sol   
 ■ Tunnels

- 1 Pont à haubans de la Charles River
- 2 Pont de Storrow Drive
- 3 Autoroute souterraine I-93
- 4 Échangeur routier
- 5 Mise sur viaduc de l'I-93
- 6 Partie souterraine de l'I-90
- 7 Ted Williams Tunnel (2 575 m ; caissons métalliques immergés)
- 8 Réaménagement des accès routiers à l'aéroport de Boston





## → Pont de la Charles River

# Le pont à haubans le plus large du monde

**L**e pont de la Charles River marque la limite nord du projet "Central Tunnel-Artery". Baptisé Leonard P. Zakim-Bunker Hill, il constitue une borne symbolique reliant le Boston d'aujourd'hui à son passé historique. Les pylônes du pont, en effet, sont un écho au monument dressé en mémoire de la bataille de Bunker Hill, premier grand affrontement de la guerre d'Indépendance (1775). En même temps, l'ouvrage rend hommage à Lenny Zakim (1953-1999), un homme qui consacra sa vie à la défense des droits civiques. Avec ses dix voies de circulation, le pont de la Charles River peut s'enorgueillir d'être le plus large du monde. Son tablier atteint 57 m, dont environ 8 m sont construits en porte-à-faux sur son côté est ! À l'ouest, un second pont, dit de Storrow Drive, enjambe également le fleuve. Plus petit, il accueille quatre

voies de circulation. Ces deux ouvrages d'art, qui font partie du nouveau dispositif de franchissement de la Charles River, doivent remplacer à court terme l'ancien pont métallique à deux niveaux pour six voies de circulation qui supporte le trafic de l'Interstate 93.

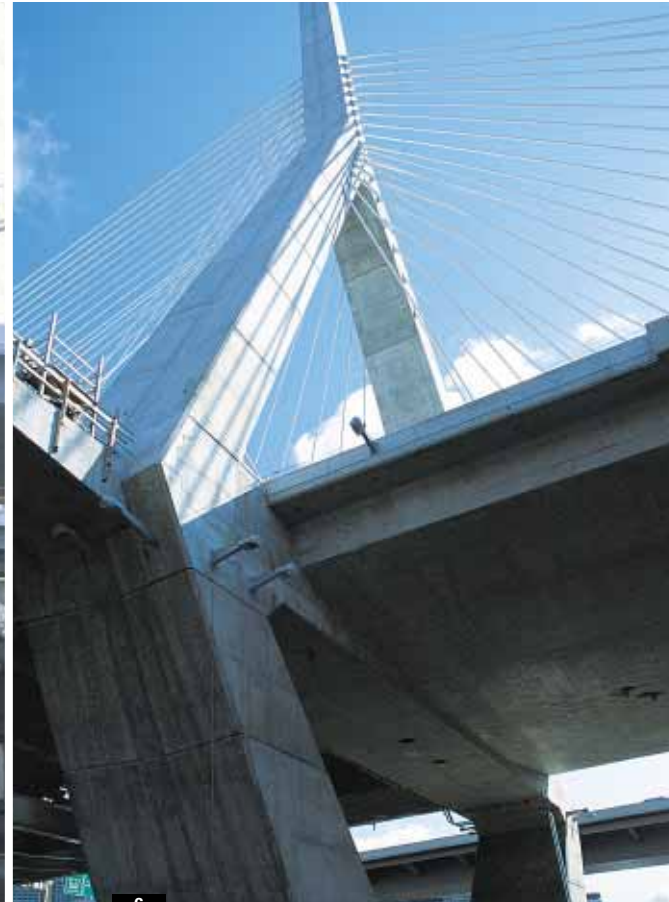
### ● Structure combinée acier-béton armé

Œuvre de l'architecte suisse Christian Menn, le pont de la Charles River constitue une première aux États-Unis. C'est le seul à ce jour à combiner des structures en acier et en béton armé. L'ouvrage se développe sur une longueur de 428,80 m. La travée centrale s'étend sur 227,10 m, tandis que les viaducs d'accès atteignent respectivement 73,70 m au sud, côté Boston, et 128 m au nord, côté Charlestown et Cambridge. La travée centrale est

constituée de deux caissons métalliques longitudinaux reliés entre eux par des poutrelles en acier disposées selon un entraxe de 6,10 m. Cette charpente est surmontée d'une dalle en béton armé participant à la rigidité et à la résistance de l'ensemble. Les viaducs d'accès sont formés de voussoirs en U d'une hauteur de 3,05 m pour une largeur de 38,10 m. Réalisés en béton précontraint coulé en place, ils intègrent dans leur partie centrale une poutre longitudinale de 3,05 m de large. Servant d'élément porteur principal, elle est renforcée par des poutrelles transversales disposées selon un intervalle de 4,57 m. Cette ossature reçoit une dalle en béton armé. L'ensemble du tablier est supporté par une série de 116 haubans dont les longueurs unitaires varient de 45 à 150 m.

Positionnés de part et d'autre de la travée principale, selon un entraxe de 6,10 m, les câbles convergent vers les terre-pleins centraux des viaducs d'accès où ils sont ancrés à raison d'un câble tous les 4,57 m. Cette disposition singulière rend l'ouvrage unique en son genre en créant un effet visuel incomparable. Pourtant, le choix n'est pas architectural mais technique. Il est lié à l'obligation de maintenir en service le pont métallique bi-niveau de l'actuelle voie rapide surélevée. En effet, la proximité des deux ouvrages est telle qu'elle interdisait l'ancrage des haubans en bordure des travées du viaduc d'accès sud. La deuxième particularité du pont de Charles River concerne les deux voies de circulation implantées le plus à l'est. Destinées à assurer la continuité du tra-

- >>> **1** Chaque jour, quelque 190 000 véhicules empruntent l'autoroute interurbaine I-93.
- 2** Le mémorial de Bunker Hill a servi de "modèle" aux pylônes du pont de la Charles River.
- 3** Petit frère du pont de la Charles River, le pont de Storrow Drive permet la desserte locale des quartiers nord de Boston.
- 4** Au nombre de 116, les haubans ont des longueurs variant de 45 à 150 m.



**>>> 5** Deux voies de circulation sont construites en porte-à-faux, à l'extérieur de la nappe de haubans. **6** Les deux pylônes en Y inversé ont une hauteur identique : 83,44 m au-dessus du tablier. Ils supportent le tablier principal à huit voies de circulation. **7** **8** La disposition singulière des haubans crée un effet visuel incomparable. Pourtant, le choix est technique, il est dû à la proximité de l'ouvrage existant laissé en service durant les travaux.

#### CHIFFRES CLÉS

### “The Big Dig” en chiffres

Le Central Artery/Tunnel de Boston, aussi appelé “The Big Dig”, apparaît comme le projet d'autoroute souterraine le plus ambitieux jamais entrepris aux États-Unis. Résumé en quelques chiffres.

- Le Central Artery/Tunnel sera capable d'absorber un trafic quotidien de 245 000 véhicules, dont 94 000 pour le Ted Williams Tunnel.
- Aux heures de pointe, la vitesse de circulation atteindra 50 km/h.
- Ramené à une seule voie de circulation, le Central Artery/Tunnel compte 259 km de chaussée répartis sur un total de 12 km de tunnels.
- Les parois moulées représentent plus de 7 925 m.
- Plus de 13,7 millions de mètres cubes de déblais ont été évacués, ce qui équivaut à 541 000 semi-remorques de 25 mètres cubes. Mis bout à bout, ils formeraient un convoi s'étirant sur 7 422 km.
- À son achèvement, en 2005, le projet du Central Artery/Tunnel devrait avoir consommé 2,9 millions de mètres cubes de béton.

fic en direction du nord entre le tunnel de Sumner et l'Interstate 93, elles sont construites en porte-à-faux, à l'extérieur de la nappe de haubans. Une configuration qui rend l'ouvrage asymétrique. La structure est uniquement solidaire des poutrelles transversales de la travée centrale. De part et d'autre, les rampes d'accès doivent reposer sur leurs propres appuis.

#### ● Des efforts supplémentaires de 50 %

Afin de réduire au minimum les charges, les panneaux formant la dalle ont été préfabriqués en béton allégé. Malgré tout, cette structure oblige les câbles latéraux est à reprendre près de 50 % d'efforts supplémentaires. Édifiés sur les berges opposées de la Charles River, les deux pylônes en Y inversé ont une hauteur identique, soit 83,44 m au-dessus du tablier. Dans la partie inférieure de l'ouvrage, l'inclinaison des jambes s'inverse pour former un V. Cette zone présente des hauteurs variables : 6,71 m au sud et 14,94 m au nord. Une entretoise placée à l'intersection des parties en V et en Y inversé

assure la liaison entre les jambes des pylônes. La différence de niveau est due à la pente de 5 % du tablier, consécutive à la proximité du pont et de la sortie de la nouvelle artère souterraine (voir “la grande fouille”). Les pylônes sont fondés sur des pieux d'un diamètre unitaire de 2,28 m pour une hauteur allant de 7,60 m à 12,20 m. Compte tenu des charges respectives transmises au sol, quatorze pieux ont été nécessaires pour le pylône sud et seize pour le pylône nord.

#### ● Une galerie entre les fondations

Troisième particularité du pont de la Charles River : la ligne Orange du métro de Boston passe entre les fondations du pylône sud. Cette configuration a nécessité la construction d'une semelle de répartition des charges. Ainsi, la sous-face de la semelle surplombe d'à peine 2,75 m le toit de la galerie du métro, tandis que les pieux de fondation, d'un diamètre unitaire de 2,28 m, passent à environ 1,50 m de ses côtés. Afin d'éviter toute transmission d'efforts horizontaux vers le tunnel, les pieux les plus proches





7



8

de la galerie du métro sont placés dans des sortes de fourreaux d'un diamètre extérieur de 2,74 m. Ce dispositif les isole et autorise les mouvements provo-

qués par l'action du vent sur le pont ou par une éventuelle secousse tellurique, la Nouvelle-Angleterre étant située dans une zone sismique modérée. ■

#### TECHNIQUE

### Les haubans du pont de la Charles River

La construction en porte-à-faux de deux voies de circulation sur le pont de la Charles River génère près de 50 % d'efforts supplémentaires dans les haubans latéraux est de la travée centrale. *“Une contrainte qui a nécessité la mise en place de câbles plus gros d'un côté du tablier”,* précise Manuel Peltier, responsable du projet pour Freyssinet, entreprise chargée de la précontrainte et de la fourniture et de la pose des haubans. Ainsi, pour répondre aux sollicitations, les résistances ultimes varient de 500 t (câbles de 19 torons) à 2 000 t (câbles de 73 torons). Les haubans bénéficient d'une protection individuelle contre la corrosion réalisée en usine. *“C'est la première fois que les Américains autorisent l'utilisation de gaines non injectées de coulis”,* poursuit Manuel Peltier. Chaque toron est enrobé de cire pétrolière puis recouvert d'une membrane en polyéthylène. Une fois posés, les câbles sont enfermés dans des gaines aérodynamiques munies d'une spire qui élimine une partie des vibrations engendrées par les effets conjugués du vent et de la pluie. Le dispositif anti-vibrations est surtout le fait des amortisseurs type IED+ (Internal Elastomeric Damper). Internes aux tubes d'ancrage des haubans, ils ont pour but de stopper la transmission des vibrations au tablier.

## → Artère souterraine “La grande fouille”

**L**e “Central Artery/Tunnel” est, dit-on, le programme d'autoroute souterraine le plus ambitieux jamais entrepris aux États-Unis. L'ensemble des terrassements génère un volume pharaonique de matériaux. L'essentiel des déblais déjà évacués a servi au remblaiement d'anciennes carrières environnantes, à l'aménagement de terrains à bâtir et à l'extension de Spectacle Island, un parc paysager implanté sur une petite île au large des côtes sud de Boston. En 2005, au moment de son achèvement, le projet devrait avoir produit plus de 13,7 mil-

lions de mètres cubes de déblais. Un chiffre record qui a valu au chantier son surnom : “The Big Dig”, autrement dit “la grande fouille”.

#### ● Fouille complexe

Le projet du “Central Artery/Tunnel” de Boston intègre la création d'une autoroute urbaine souterraine comptant 8 à 10 voies de circulation. Cet itinéraire est destiné à remplacer l'actuelle voie rapide surélevée (2 x 3 voies) implantée sur une estacade qui balafre la partie nord de la



**>>> Partie intégrante du nouveau dispositif de franchissement, le pont de Storrow Drive et ses travées de plus de 250 m de long.**





9



10

>>> **9** À partir de 2005, la traversée nord-sud de Boston se fera en souterrain. **10** L'autoroute urbaine souterraine suit en sous-cœvre le tracé de l'ancienne estacade. **11** Sept bâtiments de ventilation assurent le renouvellement de l'air dans l'ensemble des tunnels. **12** Le pont de la Charles River s'intègre parfaitement dans l'environnement urbain de Boston.

#### TECHNIQUE

### Un passage délicat

Le point le plus bas de la nouvelle artère souterraine se situe à une profondeur de 38 m : en plein cœur de Boston, l'axe sud-nord passe sous la ligne Rouge du métro bostonien. Un parcours imposé par la construction simultanée, juste sous la chaussée, du tunnel de la Silverline, une ligne de trolleybus qui reliera le port de Boston au centre-ville. Pour permettre le franchissement de cette zone délicate, une coque souterraine a été construite en taupe. Les travaux ont été réalisés à partir de deux galeries de 4,57 m de haut et 30 m de long. En premier lieu, toute la zone située sous chaque galerie a été consolidée par injection puis excavée avant d'être transformée en une massive paroi de béton de 30 m de long et de 13,70 m de haut. En second lieu, les deux voiles souterrains, distants de 21 m, ont été reliés entre eux par une série de petites galeries contiguës. Remplies de béton, elles ont permis la création d'une dalle. La coque en place, l'excavation du tunnel sous la ligne de métro a pu commencer.

ville. La densité urbaine de Boston ne laisse que peu de place pour l'établissement du tunnel. Le seul endroit disponible se situe sous l'estacade même. Cette exigüité influe sur les techniques à mettre en œuvre. Le confinement du site ne permet pas de réaliser une fouille classique tandis que la faible hauteur sous l'estacade interdit l'utilisation des pelles hydrauliques pour les travaux d'excavation. Dans ce contexte, la paroi moulée constitue l'alternative idéale. Sur l'ensemble du programme souterrain, elle se développe sur plus de 7 925 m. Elle est construite par segments de 0,91 m x 3,05 m. Les panneaux sont ancrés dans la roche à une profondeur moyenne de 36,60 m. Ils sont renforcés par des profilés métalliques verticaux. Au fur et à mesure de la construction, l'espace déli-

mité par les parois moulées – qui constitueront les piédroits du futur tunnel – est recouvert de dalles en béton intercalées de poutrelles métalliques. Cette structure disposée à même le sol s'appuie sur la partie supérieure de la paroi. Le dispositif permet de garantir la continuité du trafic sous l'estacade tout en autorisant le terrassement en sous-cœvre.

#### ● Trafic maintenu

Aux difficultés liées à la réalisation du tunnel s'ajoute la nécessité de maintenir en service la voie rapide pendant toute la durée des travaux. Cette configuration place les fondations des piles supportant l'artère surélevée dans l'emprise de l'autoroute souterraine. Ainsi, avant d'envisa-







11



12

ger toute excavation, l'ensemble des appuis originels doit être supprimé et l'ouvrage repris par de nouveaux supports n'entravant plus les terrassements. Les poutrelles métalliques disposées à même la paroi leur servent d'appuis provisoires. Sur certains secteurs, les piles originelles de l'estacade sont prolongées dans le sol, traversant l'emprise du futur tunnel pour être fondées sous le futur radier.

Au total, l'ouvrage compte pas moins de 67 files d'appui auxquelles s'ajoutent les piles des rampes d'accès et de sortie, le tout réparti sur une longueur de 2 400 m. L'ossature porteuse de l'estacade reconfigurée, l'étape finale permettant le percement du tunnel consiste à découper les anciennes colonnes de soutien, ouvrant ainsi la route aux engins d'excavation. ■

TEXTE ET PHOTOS : ANTOINE VAVEL

>>> L'ensemble de l'estacade, soit près de 2 400 m d'ouvrage, est supporté par une ossature provisoire constituée de plus de 200 appuis.

## TECHNIQUE

### Ventilation et sécurité incendie

L'essentiel du tracé du "Central Artery/Tunnel" est souterrain, ce qui nécessite la mise en place d'un important dispositif d'aération et d'évacuation des gaz d'échappement générés chaque jour par quelque 190 000 véhicules. L'air frais sera injecté par des conduites placées sous l'assise de la chaussée ou aménagées dans les voiles tandis que l'air pollué sera évacué par des gaines installées en partie haute des galeries.

Pour répondre aux besoins, sept bâtiments de ventilation sont répartis le long du tracé souterrain. Au total, 139 ventilateurs bi-directionnels et 22,5 km de gaines de ventilation permettront la bonne aération des divers tunnels. Des sondes surveilleront les niveaux d'oxyde de carbone et ajusteront la vitesse de rotation des ventilateurs.

Sur le plan architectural, les bâtiments ont été dessinés pour se fondre dans leur environnement. Certains d'entre eux sont même intégrés à des parkings ou à des immeubles de bureaux.

La sécurité face à un incendie n'a pas non plus été négligée. Pendant les étapes préliminaires de conception du projet du "Central Artery Tunnel", l'administration fédérale des routes (Federal Highway Administration) a mis en place un vaste programme d'essais et de recherches autour de la ventilation des tunnels. Pour cette opération, une centaine d'incendies de tailles et de configurations diverses ont été étudiés en grandeur réelle dans un laboratoire installé dans un tunnel désaffecté de Virginie occidentale. Les résultats ont permis de concevoir le système de ventilation du tunnel.



#### Maître d'ouvrage :

Massachusetts Turnpike Authority  
(département des routes à péage  
du Massachusetts)

#### Maître d'œuvre et bureau d'études :

HNTB Corporation

#### Maître d'œuvre délégué :

Bechtel et Parsons Brinckerhoff

#### Architecte :

Christian Menn

#### Entreprises :

groupement Atkinson et Keiwit

#### Haubanage et précontrainte :

Freyssinet

#### Coût :

86,4 M\$ (env. 90 M€)





# Du béton pour la sauvegarde du patrimoine

●●● EN RENDANT POSSIBLE AUX HOMMES ET AUX MARCHANDISES LE FRANCHISSEMENT D'UN COURS D'EAU OU D'UNE VALLÉE ENCAISSÉE, LE PONT FAVORISE LE COMMERCE ET LES ÉCHANGES JUSQU'À DEVENIR, PARFOIS, LA CLÉ ÉCONOMIQUE D'UNE RÉGION. MAIS LE PONT EST AUSSI UN SIGNE D'HARMONIE, DE PROSPÉRITÉ, D'UNITÉ. POUR TOUTES CES RAISONS, LA CONCEPTION DES PONTS A TOUJOURS STIMULÉ L'IMAGINATION DES ARCHITECTES ET DES INGÉNIEURS. ET LA RESTAURATION DES PONTS ANCIENS FAIT L'OBJET D'UN MÊME INTÉRÊT. UNE OCCASION D'APPRÉCIER LES QUALITÉS DU BÉTON EN TANT QUE MATÉRIAU IDÉAL POUR LA PRÉSERVATION DU PATRIMOINE...



**L**e pont est l'un des ouvrages d'art les plus emblématiques de l'aménagement du territoire. Objet technique d'abord, il s'est peu à peu affranchi des règles primaires de la statique (la voûte, la pile), vers toujours plus d'élancement. Pour autant, "le vieux pont de pierre" marque profondément les paysages naturels ou urbains. Cette forme archétypique semble traverser les âges. Mais les ouvrages du temps n'épargnent pas le pont le mieux construit. Chaque pont connaît une histoire particulière et subit des désordres spécifiques, où la conception et la réalisation initiales du pont n'entrent pas en ligne de compte. Dans la plupart des cas, d'ailleurs, les ponts de pierre des XVIII<sup>e</sup> et XIX<sup>e</sup> siècles sont d'une qualité remarquable, et les désordres apparaissent à la suite d'aléas imprévisibles. Cette fiabilité des maçonneries anciennes est d'autant plus notable que le trafic a considérablement augmenté au fil du XX<sup>e</sup> siècle, à la fois par le nombre de véhicules empruntant les ponts et par le poids individuel de chacun.

### ● Économie et esthétique

Autant, sinon plus parfois, que les éventuelles dégradations observées, l'adaptation de la largeur du pont aux besoins actuels rend nécessaires des travaux associant réparation et élargissement, voire la création d'un ouvrage neuf. D'un point de vue prosaïque, il est en général moins cher de restaurer en élargissant que de créer un ouvrage neuf. Pour autant, la décision de conserver un pont historique dégradé tient essentiellement à la volonté de préserver un paysage dont l'harmonie est largement liée aux qualités de la pierre. De ce point de vue, on est frappé par la capacité de nombreux ponts de pierre anciens de s'adapter au site, alors que les concepteurs ont recours à un vocabulaire formel limité aux "déclinaisons" de la voûte, en plein cintre généralement pour les ouvrages les plus vieux, et surbaissée à partir de la moitié

du XIX<sup>e</sup> siècle. Grande arche unique pour franchir une vallée encaissée ou double alignement de petites voûtes superposées : un même principe structural se présente sous des formes différentes pour s'adapter à chaque topologie.

### ● Le pont sur le Loup, à Villeneuve-Loubet

Inauguré en 1881, le pont de Villeneuve-Loubet joue un rôle important sur la liaison Nice-Grasse. Long de 100 m et large de 5 m, le tablier est porté par cinq arches surbaissées de 15 m d'ouverture. Endommagé durant la Seconde Guerre mondiale, le pont a ensuite été réparé, mais des désordres sérieux ont été observés en 1978, et des tassements importants mesurés sur les berges et le bâti ont provoqué une évolution différentielle des piles et la fissuration des arches en maçonnerie dans les années 1983 à 1992. Plus précisément, la structure présentait quatre types de désordres :

- des fissures de la voûte et des bandeaux aux naissances et aux clés ;
- des fissures à 45° des tympans à proximité des piles ;
- un basculement des consoles en béton armé (datant de 1945) ;
- des flaches sur la chaussée à la suite des tassements différentiels.

Des études approfondies ont été conduites par le SETRA (Service d'études techniques des routes et autoroutes) pour identifier précisément l'origine des désordres et pour déterminer s'il était possible de stabiliser les fondations, puis de réparer le pont.

Le dossier d'études préliminaires établi par le SETRA en 1997 a servi de base pour instruire la décision du Conseil Général des Alpes-Maritimes, maître d'ouvrage des travaux. Différentes solutions ont été envisagées, avec trois options principales : réparation avec élargissement de l'ouvrage existant, mise en place d'un nouveau tablier sur les appuis existants, et enfin construction d'un nouveau pont.

**Responsable d'études à la division des Grands Ouvrages du CTOA-SETRA, chargé des études techniques de la restauration du pont de Villeneuve-Loubet, Philippe Vion répond à nos questions.**

*Quels sont les arguments qui vous amènent à préconiser l'emploi du béton dans le cadre de la restauration des ponts de pierre ?*

**Les ouvrages d'art anciens peuvent se trouver dépassés par les conditions actuelles du trafic routier. Il faut alors procéder à une restauration accompagnée d'un élargissement. Dans le cas d'un pont de pierre, la solution béton est la seule solution envisageable, mais les configurations peuvent varier : dalle légère coulée en place à Villeneuve-Loubet, dalle en éléments préfabriqués à Sireuil... Les avantages apportés par le béton proviennent essentiellement de son adaptation aisée à la géométrie de l'ouvrage.**

*Quelles sont les perspectives de développement pour l'avenir ?*

**Le principe de la restauration-élargissement est conditionné à la fois par la sensibilité du maître d'ouvrage et par la qualité de l'étude préliminaire et de l'expertise. Dans ce cadre, le béton avance un double argument : augmentation de la capacité d'accueil du pont (piétons et autos) et sauvegarde de l'ouvrage. Pour ma part, je suis favorable à cette solution, à condition bien sûr que l'expertise soit rigoureuse et que l'étude préliminaire garantisse la viabilité du pont.**

*Êtes-vous sensible aux arguments des nouveaux bétons ?*

**Pas systématiquement. Si nécessaire, les BHP permettent des élargissements plus grands, mais le principal intérêt des bétons spéciaux est peut-être d'ordre esthétique. Je pense aux bétons architectoniques, qui permettent de retrouver des teintes voisines de celles de l'ouvrage, au bénéfice de l'unité d'ensemble.**



**>>> Le pont sur le Loup, à Villeneuve-Loubet, remis en état et élargi pour s'adapter au trafic d'aujourd'hui.**



## TECHNIQUE

## Préfabrication pour le pont de Sireuil sur la Charente

Le pont de Sireuil est en service depuis 1886. Cet ouvrage en maçonnerie, qui repose sur cinq voûtes surbaissées de 15 m d'ouverture chacune, permet à la RD 7 de franchir la Charente. Différents désordres ayant été constatés (fracture longitudinale des voûtes, éclatement de la pierre, tassement et même basculement des appuis), un projet de restauration a été établi par la SETOA (Subdivision d'études et travaux d'ouvrages d'art), avec trois objectifs :

- renforcer les appuis pour stabiliser l'ouvrage ;
- élargir la chaussée de 5,4 m à 6 m et créer deux trottoirs de 1,10 m de large ;
- conserver et valoriser l'esthétique du pont par une conception soignée de l'élargissement.

Les travaux devaient être organisés en tenant compte de contraintes spécifiques : le renforcement des appuis en rivière ne pouvait être effectué qu'en basses eaux, tandis que la circulation des piétons et véhicules légers devait être assurée, ainsi que la passe navigable. Parmi les techniques mises en œuvre (dont on ne peut ici détailler toutes les caractéristiques), on retiendra la reconstitution en béton ton pierre des blocs épaufrés et, surtout, la pose d'une dalle préfabriquée en béton armé pour confectionner le tablier en intégrant les corniches d'élargissement en béton blanc. Cette solution a été proposée par l'entreprise (groupement SNGC et CROBAM) et approuvée par le Conseil Général de la Charente.

### >>> Le pont de Sireuil, sur la Charente, superbe exemple de restauration-élargissement.

Les études avaient montré qu'il n'y avait plus de tassements à craindre si les pompages de la station de Tines en amont de l'ouvrage étaient arrêtés, et la remise en état pouvait être réalisée sans avoir à fonder en profondeur. Dans ce contexte, la solution réparation-élargissement s'avérait la moins chère, avec l'énorme avantage de préserver la remarquable spécificité architecturale de l'ouvrage, et, au-delà, la beauté du site. Le programme comportait trois grands objectifs :

- remettre les voûtes en état ;
- élargir le tablier pour adapter le pont au trafic des années deux mille ;
- aligner l'ouvrage sur les normes de sécurité en vigueur.

Aux compétences techniques des bureaux d'études (Setra, Campenon Bernard Méditerranée, Ingerop Méditerranée) et des entreprises (SOGEA, Tama SA, Tarmac Nicoletti), a été associée la créativité de l'architecte Laurent Barbier, qui œuvrait ici en accord avec l'architecte des Bâtiments de France.

### ● Inspiration académique pour élargissement majeur

Le programme des travaux prévoyant de porter la largeur du tablier à 10 m signifiait tout simplement le doublement de la largeur initiale du pont. Confronté à un bouleversement des proportions de l'ouvrage dans un site déjà très achevé, Laurent Barbier a logiquement puisé dans un vocabulaire académique pour reconstituer l'harmonie porteur-porté caractéristique de l'ouvrage. Tous les détails ont été traités avec attention, jusqu'aux garde-corps en acier galva peints dont le motif s'inspire de l'ancien. Un béton de ciment blanc sélectionné sur témoins selon un protocole rigoureux de réception des pièces préfabriquées s'ac-

corde parfaitement avec la couleur et la texture des pierres claires du pont. Après les travaux de confortement des berges, de reconstruction des seuils et de consolidation des appuis par injection de coulis de ciment, on a eu recours à un procédé inédit avec le démontage de l'ouvrage et le "véringage" des voûtes. Les arches ont été vidées, les tympans démontés – et remontés – pierre par pierre. Les fissures à la naissance des voûtes ont été obstruées par injection de coulis de ciment.

### ● Modélisation du pont

On a procédé à une modélisation de l'ouvrage pour définir les valeurs d'efforts à appliquer pour recréer le "mécanisme" du pont par compression des voûtes. La valeur des déplacements horizontaux a été calculée (30 mm environ pour des efforts compris entre 330 et 350 t). Les vérins plats ont été mis en place par l'entreprise Freyssinet qui a également assuré l'injection dans les fissures. L'ouvrage a fait l'objet d'un suivi topométrique très précis pendant les opérations de véringage, les efforts étant appliqués par paliers successifs. Délicate, cette opération encadrée par la direction des grands travaux routiers du Conseil Général des Alpes-Maritimes a permis au pont de retrouver sa stabilité initiale dans les meilleures conditions. Une dalle en béton léger (densité 1,9) a été coulée en place sur un remblai de remplissage par l'intermédiaire d'une couche de sable protégée par un film étanche. Aujourd'hui, le pont sur le Loup a retrouvé tout son lustre, et l'entrée de la ville, toute sa majesté. Plus prosaïquement, le trafic est plus fluide que jamais. La nouvelle jeunesse de ce pont illustre l'importance d'un "outil de civilisation" dont l'impact est profondément attaché à son site. Un pont neuf apporterait bien sûr un service au moins aussi satisfaisant, mais l'harmonie du lieu aurait peut-être été perdue. ■

TEXTE : JEAN-PIERRE MÉNARD

PHOTOS : GUILLAUME MAUCUIT-LECOMTE





# Sentinelles

## de béton au cœur du territoire

●●● LES RADARS SONT DES OBJETS ATYPIQUES QUI OCCUPENT UNE SITUATION PARTICULIÈRE DANS LE PAYSAGE.

ILS NE PEUVENT DONC ÊTRE RÉDUITS À DE SIMPLES TOTEMS TECHNIQUES ET DOIVENT FAIRE L'OBJET DE VÉRITABLES

PROJETS D'ARCHITECTURE. AU COURS DES DERNIÈRES ANNÉES, L'ARCHITECTE DOMINIQUE LESBEGUERIS A RÉALISÉ

QUATRE RADARS. EN TENANT COMPTE, À CHAQUE FOIS, DE LA DIMENSION DU TERRITOIRE, DE SES CARACTÉRISTIQUES

MORPHOLOGIQUES, PHYSIQUES, MATÉRIELLES ET ESTHÉTIQUES, ET AUSSI DE L'HISTOIRE DU LIEU. LE RADAR DEVIENT

ALORS UN VÉRITABLE ÉDIFICE QUI POSSÈDE UNE DIMENSION TERRITORIALE, PAYSAGÈRE ET ARCHITECTURALE.



**P**ylônes et mâts de diverses natures, relais hertziens, radars, transformateurs électriques, etc. sont les auxiliaires anonymes des technologies de communication ou de prévision qui participent à notre vie quotidienne et à notre confort. S'ils ont été considérés pendant toute une période comme des ouvrages uniquement techniques, chacun d'entre nous souhaite aujourd'hui qu'ils s'intègrent le mieux possible dans les paysages de nos villes ou de nos campagnes. Du fait de leur nature ou de leur situation spécifique, certains de ces équipements s'inscrivent dans de véritables projets d'architecture. Ainsi, entre 1995 et 1999, l'architecte Dominique Lesbegueris a conçu et réalisé quatre projets de radars : un radar de navigation aérienne situé à Itxassou et trois radars météo respectivement installés à Sembadel, Bollène et Opoul-Périllos. Plus que de simples équipements techniques, ces ouvrages sont de véritables édifices qui ont une dimension territoriale, paysagère et architecturale. Pour chacun d'entre eux, Dominique Lesbegueris développe une réponse qui se nourrit de la dimension du territoire d'implan-

tation, des caractéristiques morphologiques, physiques, matérielles, esthétiques du site, de l'histoire du lieu...

En ce qui concerne la programmation, les quatre radars répondent à des cahiers des charges similaires : une construction verticale supportant l'antenne et abritant la ou les salles de traitement des informations, des locaux de vie pour l'équipe de maintenance, un garage, des locaux techniques divers (cuve à fuel, groupe électrogène, etc.).

#### RADAR D'ITXASSOU

**Maître d'ouvrage :**  
ministère du Logement,  
des Transports et du Tourisme –  
Service technique de  
la Navigation aérienne

**Maître d'œuvre :**  
DL & Associé/D. Lesbegueris,  
architecte – M. Cazamayou,  
architecte d'opération

**BET :**  
CBI, IGC, Sofreavia

**Entreprise générale :**  
Etchart

**Surface :** 230 m<sup>2</sup>

**Coût :**  
0,76 M€

Aucun personnel n'est présent dans ces radars. Ils sont habités de façon ponctuelle pour des opérations de maintenance pouvant durer de 2 à 4 jours environ. Contrairement aux autres, les radars de Météo France nécessitent deux salles de traitement de l'information : dans l'une les ordinateurs reçoivent les données de l'antenne et dans l'autre ils les traitent. Dans tous les cas, la ou les salles sont placées sous et le plus près possible de l'antenne, car le cordon reliant cette dernière aux installations techniques coûte très cher et doit être, par conséquent, le plus court possible.

#### ● Ouvrages exceptionnels

Du fait de leur position au sommet d'une colline ou d'une montagne, les radars sont fortement soumis aux intempéries. Exposés aux assauts de la pluie et du vent, ils doivent être d'une grande pérennité. De plus, ils ont l'obligation d'être très solides et stables afin de ne subir aucune vibration nuisible à la précision des calculs. Ils ont des structures anti-sismiques, calculées en prenant en compte des vents de 240 km/h. Pour l'architecte, le béton s'est imposé

dans les quatre projets, car à ses qualités physiques, ce matériau d'essence minérale ajoute ses qualités plastiques et de parement qui permettent de réaliser des ouvrages inscrits dans leur milieu tout en affirmant leur spécificité. Le radar de navigation aérienne d'Itxassou se dresse à une altitude de 970 m au sommet de l'Artzamendi. Dans un paysage de montagne, le site dégagé et vierge se présente comme une vaste prairie où affleure par endroits le sol

#### RADAR DE SEMBADEL

**Maître d'ouvrage :**  
Météo France

**Conducteur d'opération :**  
DDE de la Haute-Loire

**Maître d'œuvre :**  
DL & Associé/D. Lesbegueris,  
architecte – Th. Magaud,  
architecte d'opération

**BET :**  
Séchaud & Bossuyt Rhône-Alpes

**Entreprise gros œuvre :**  
Lantermoz

**Surface :** 150 m<sup>2</sup>

**Coût :**  
0,4 M€





3



4

**>>> 1 Le radar d'Ixassou se présente comme une grande sculpture révélatrice de l'histoire et de la géographie du site.**

**2 Haute de 32 m, la tour du radar de Sembadel porte la sphère du radôme, qui émerge ainsi au-dessus de la cime des sapins.**

**3 4 Le radar de Bollène est conçu comme une composition fragmentée de monolithes en béton brut. Par sa couleur et son parement le béton brut semble issu de la roche naturelle.**

rocaillieux. L'idée fondatrice du projet est d'associer la géométrie des éléments constitutifs du radar à celle d'un révélateur géométrique du lieu qui restitue le profil de la montagne tel qu'il était il y a quelques millions d'années.

**● Une sculpture entre hier et aujourd'hui**

Le projet se présente comme une grande sculpture, dont les lignes redessinent un tracé théorique de la montagne avant son érosion. Entre la montagne virtuelle des origines et celle d'aujourd'hui, l'ensemble de la construction définit un espace dans lequel elle se développe. L'ouvrage comprend une partie sculpturale, le révélateur, et une partie fonctionnelle, le radar proprement dit. Le révélateur est lui-même constitué de deux éléments. La

partie nord-ouest est une arête solide perforée de fentes verticales, tandis que la partie sud-est forme une série de mâts alignés et de taille croissante. En plan, elles s'appuient chacune sur un axe orienté, soit vers le pic d'Ezcondray au nord-ouest, soit en direction du village de Bidaray au sud-est. Le radar s'inscrit à l'intérieur de cette figure, son radôme en constituant le point culminant. Locaux de vie et locaux techniques sont regroupés dans un bâtiment linéaire qui forme socle. Un cylindre vertical abrite l'escalier et le monte-charge. La salle de traitement de l'information de plan circulaire et le radôme se dressent au-dessus de l'ensemble, portés par une série de poteaux jumelés. Tout le projet est construit en béton laissé brut. Seuls quelques éléments verticaux situés dans le champ de rayonnement de l'antenne sont réalisés en bois. Le béton brut choisi par l'architecte met

en valeur la dimension sculpturale de l'ouvrage, affirme son originalité et tisse un lien avec la roche de la montagne. Sembadel est un lieu-dit situé entre La Chaise-Dieu et Le Puy-en-Velay. Le site est à une altitude de 1 200 m. Il s'agit d'une clairière que l'on découvre au bout d'un chemin traversant une forêt de sapins. Le projet prend naissance à l'endroit où le chemin forestier d'accès débouche sur la clairière à proximité de la borne sommitale. De là le terrain descend en pente douce, tandis que l'édifice s'organise selon une figure en plan qui évoque le mouvement d'une goutte d'eau glissant sur la pente. Un mur en béton s'étire le long du chemin, son horizontale révèle la pente. Locaux de vie, garage et locaux techniques s'installent dans des boîtes qui s'accrochent sur le mur. Ce dernier se poursuit pour donner enfin naissance à la tour du radar haute de 32 m.

**● Équerre enchâssée**

Dans l'espace l'ouvrage se lit comme une grande équerre enchâssée dans le sol et faisant uniquement émerger de la cime des sapins la sphère du radôme. La

force du projet est exprimée par le mur de béton brut. D'abord soubassement, il épouse la figure génératrice, s'étire sur le terrain, accroche les volumes fonctionnels en béton recouverts d'une lasure de couleur brune, se retourne en fer à cheval, se développe verticalement et devient volume de la tour. Le radar de Bollène est implanté sur une colline dans le périmètre inscrit du village troglodytique du Barry (xvi<sup>e</sup> siècle), sur un site historique de carrières et de

**RADAR DE BOLLÈNE**

**Maître d'ouvrage :**  
Météo France

**Conducteur d'opération :**  
DDE du Vaucluse

**Maître d'œuvre :**  
DL & Associé/D. Lesbegueris,  
architecte – Permis  
d'architecture, arch. d'opération

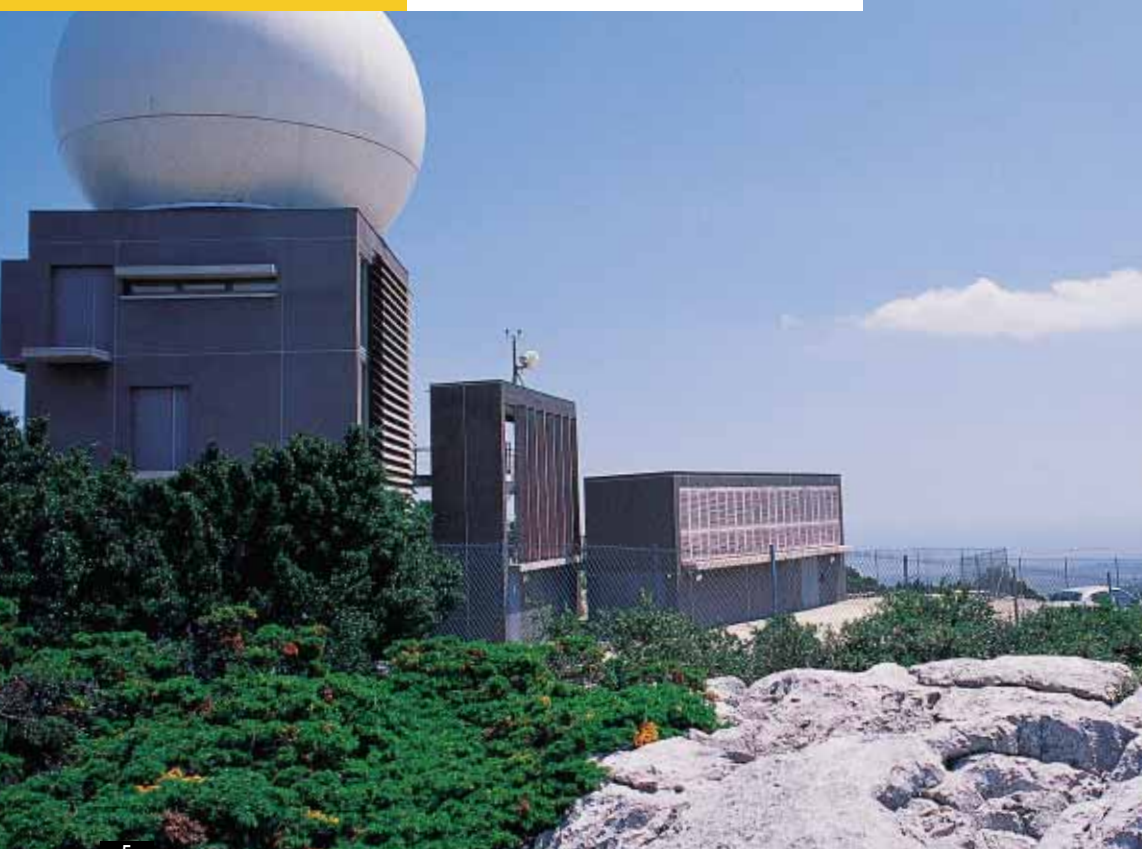
**BET :**  
Séchaud & Bossuyt Rhône-Alpes

**Entreprise gros œuvre :**  
Rivasi

**Surface :** 180 m<sup>2</sup>

---

**Coût :**  
**0,46 M€**



5

6

### >>> 5 6 Trois volumes simples installés au sommet

du mont Périllou constituent le radar d'Opoul-Périllos. Ils sont en béton recouvert d'un enduit anthracite, dont la couleur se marie harmonieusement avec la roche environnante.

caves cathédrales, situé à 309 m d'altitude. L'atmosphère du lieu est marquée par un paysage de carrières plus ou moins à l'abandon où se dressent de gros monolithes de calcaire taillés au cordeau. Le projet se développe à partir de ce contexte. L'architecte conçoit une composition fragmentée de monolithes en béton brut posés côte à côte sur le flanc de la colline, le long ou à cheval sur les ruptures de pente. Les volumes regardent vers la vallée du Rhône et le chemin d'accès.

#### ● Des volumes bien distincts

Chaque monolithe abrite un élément du programme (zone de vie, locaux techniques), ainsi qu'un escalier qui assure la liaison avec les deux salles de traitement de l'information de plan carré, surmontées du radôme. L'ensemble est porté par un jeu de poteaux rectangulaires légèrement inclinés qui s'apparentent à de fines lames sorties. La salle la plus élevée

est entourée sur trois de ses côtés par un espace de circulation extérieur servant de vigie aux pompiers pendant les périodes où les risques d'incendie de forêt sont les plus importants. Contrairement aux deux projets évoqués précédemment, ce radar est peu élevé. Chacun des différents volumes de la composition est travaillé pour donner de l'élan à l'ensemble de l'ouvrage. Dans cet esprit, les volumes s'étagent les uns par rapport aux autres dans le sens de la hauteur. Le dessin spécifique des poteaux portant la tour, le porte-à-faux de la cage d'escalier, la forme des blocs et leur disposition créent un jeu de lignes et d'équilibres qui dynamise la verticale. Toutes les parties du radar sont construites en béton brut coffré à la planche. Sa couleur grise est proche de celle des pierres environnantes. Le calepinage du coffrage et des joints donne une vibration à la matière et apporte une autre échelle de lecture des monolithes. Conception, formes et matière fabriquent un ouvrage très pertinent dans son site.

Le dernier radar dessiné par Dominique Lesbegueris est installé à 700 m d'altitude, au sommet du mont Périllou, sur les bords de la Méditerranée. Vers le sud, le Canigou et le Perthus s'offrent au regard. Au pied du mont se trouve le château cathare de Périllos. Le projet est constitué de trois volumes simples, comparables à des boîtes. Ils se présentent respectivement en élévation comme un rectangle horizontal allongé sur le sol, un carré et un rectangle vertical. "Ces volumes, étagés sur la pente douce, ont des proportions qui varient dans une progression de type géométrique", précise l'architecte. Ils abritent les différentes unités fonctionnelles. Dans le plus horizontal sont installés la zone de vie et les locaux techniques. Celui qui évoque un carré contient l'escalier de liaison entre les parties et le dernier constitue la tour du radar abritant les deux salles de traitement de l'information. La vigie utilisée par les pompiers est intérieure et fait entièrement le tour de la salle la plus haute. Les trois volumes jouent avec le paysage. Leur orientation et leur disposition donnent des vues sur les éléments marquant de ce paysage, le Canigou, le Perthus, etc. Ils sont construits en béton et recouverts d'un enduit gris anthracite

choisi pour se marier avec la tonalité des roches environnantes. Ils mettent en scène un passage progressif du sol jusqu'à l'antenne. Leur géométrie fabriquée par le béton est accompagnée par le jeu des volets en bois pour le volume horizontal, des pare-vent verticaux pour celui abritant l'escalier, des brise-soleil horizontaux pour la tour du radar. ■

TEXTE : NORBERT LAURENT

PHOTOS : GUILLAUME MAUCUIT-LECOMTE

#### RADAR D'OPOUL-PÉRILLOS

**Maître d'ouvrage :**  
Météo France

**Maître d'œuvre :**  
DL & Associé/D. Lesbegueris,  
architecte – D. Monetti,  
architecte d'opération

**BET :**  
Séchaud & Bossuyt  
Rhône-Alpes

**Entreprise gros œuvre :**  
Catalane Construction

**Surface :** 180 m<sup>2</sup>

**Coût :**  
3 MF HT



## → Extension du port de Monaco L'épopée continue

Trois années de travaux pour mettre en œuvre quelque 90 000 m<sup>3</sup> de béton hautes performances ! Jamais, de toute l'histoire du génie civil appliqué à l'off-shore, l'homme n'aura marqué la mer d'une telle emprise. Chronique d'une œuvre colossale.

**D**estinée à doubler la capacité d'accueil du site, l'extension du port de la Condamine est arrivée au terme de ses travaux de génie civil durant le mois d'août. Mais il faudra attendre 2007 pour que tous les aménagements du port et les superstructures soient achevés. La première phase de ce programme titanesque aura nécessité trois années d'intense activité et trois sites de préfabrication : La Ciotat et le Port autonome de Marseille pour le lot 1 (caissons en BHP préfabriqués du terre-plein et de la contre-jetée) et Algésiras, en Espagne, pour le lot 2 (digue flottante). Mais une telle entreprise, absolument inédite, ne pouvait être exempte d'aléas. À preuve, le lot 2. "Le cahier des charges est extrêmement contraignant, explique Frédéric Martareche, directeur

de projet chez Bec Frères. L'ouvrage doit remplir simultanément plusieurs fonctions, ce qui impose de répondre à des exigences qui n'avaient encore jamais été superposées." Destiné à recevoir du public, l'ouvrage justifie des précautions extrêmes en matière de sécurité et de qualité. Ouvrage flottant, il doit résister à des efforts bien plus importants qu'un bâtiment "à terre", d'autant qu'il a été conçu pour une durabilité de 100 ans, soit bien au-delà de ce qui est habituellement requis dans l'off-shore. Sa conception en double-coque garantit la flottaison en cas de choc accidentel. Conséquence : ce "bateau" en béton de 350 m de long et pesant 163 000 tonnes après ballastage est précontraint dans les trois dimensions, à l'aide de câbles atteignant 200 m. Il mobilise une densité d'armatures passives et de pré-

contrainte encore jamais atteinte. Au total, 13 000 tonnes d'acier arment le corps de ce monstre ! Ce qui explique que la préfabrication, menée par 60 ingénieurs et 700 personnes, ait enregistré un retard d'une année. Parallèlement, le planning du lot 1 a lui aussi été dépassé, mais sans grande conséquence, la protection du port contre la houle n'étant assurée que par la présence simultanée de tous les ouvrages.

### ● Difficultés surmontées

"Bien que la construction du terre-plein qui sert d'ancrage à la digue flottante se soit déroulée sans remise en cause des choix techniques initiaux, le dernier élément n'a été remorqué et implanté qu'en novembre 2001, explique Olivier

Cuchet, chef de section au service des travaux publics de Monaco, responsable du projet. En revanche, la réalisation des appuis de la contre-jetée a été plus problématique." En fait, des problèmes de sols présentant une faible densité et une trop grande perméabilité, qui ont nécessité plusieurs tentatives successives de confortement. De plus, le principe de liaison entre le quai et la contre-jetée a été revu : les blocs de béton empilés et immergés ont été remplacés par un caisson d'enracinement, plus complexe à concevoir et à mettre en œuvre. Son implantation a été menée en juin 2002, autorisant ainsi le remorquage et l'arrimage de la contre-jetée dans la foulée (juillet 2002). Achevée fin juin 2002, la digue, ballastée pour une meilleure stabilité, a pris la mer en août, pour arriver à Monaco au terme d'un voyage de deux semaines. Avec comme point d'orgue l'arrimage sur le terre-plein.

La liaison articulée fait appel à une rotule de 700 tonnes munie d'un dispositif de fusible en cas de séisme, "afin que la digue n'entraîne pas les caissons du terre-plein", explique Olivier Cuchet. Une autre particularité d'un projet unique au monde – la construction d'une digue flottante est une première – et servi par un haut degré de compétence à tous les niveaux : "J'ai été frappé par la qualité de tous les participants, des fournisseurs à la maîtrise d'ouvrage. Il est vrai que ce chantier exceptionnel méritait cela", conclut Frédéric Martareche. ■

TEXTE : JEAN-PHILIPPE BONDY

PHOTOS : DR



1



2

>>> 1 Le caisson de contre-jetée en sortie de souille à La Ciotat. 2 La digue flottante à Algésiras, au cours des terrassements du "bouchon" de la souille.

## → Roissy 2 E : le béton ultime

Des difficultés d'interface entre le béton et la couverture, associées à des exigences esthétiques, ont amené les entreprises à côtoyer l'exceptionnel au quotidien. Tour d'horizon en compagnie de Philippe Barbez, directeur de travaux, et de Laurent Boutillon, ingénieur principal méthodes.

“ **L**e prototype, ce n'est pas la section témoin réalisée à l'attention des architectes, mais l'ouvrage tout entier ! Jamais nous n'avions fait quelque chose de comparable.” Philippe Barbez, directeur de travaux chez GTM Construction, résume ainsi deux années d'efforts de recherche, de modélisation et d'optimisation, pendant

lesquelles les possibilités du béton ont été poussées à l'extrême. Constituée de 154 anneaux d'une longueur développée de 50 m conjuguée à une grande finesse (30 cm d'épaisseur), l'enveloppe de la nouvelle aérogare de Roissy 2E, qui s'étire sur 620 m, a donné bien du fil à retordre à l'entreprise. Première difficulté : résoudre des problèmes d'interface avec les autres corps d'état. Il fallait parvenir à aligner à 15 mm près – la tolérance exigée pour poser la verrière – des éléments en béton dont la souplesse, conjuguée au poids propre, engendrait une déformation de 7 à 9 cm une fois mis en position. À cette déformation, calculable, venait s'ajouter une déformation aléatoire provenant de la reprise des nécessaires jeux de montage au niveau de la fixation des arcs métalliques sur les coques béton. L'utilisation de platines "anti-pianotement" et les ajustements rendus possibles par un savant équilibrage

des contraintes ont permis d'assurer une quasi-absence de "désaffleure". Bref, un parfait exemple des problèmes de compatibilité de déformabilité rencontrés lors de l'association de structures souples "arachnéennes" à une verrière, ouvrage de grande raideur du fait de la rigidité intrinsèque du verre. Et qui ne se résout pas en imposant des tolérances de plus en plus faibles au gros œuvre.

"Le problème, c'est qu'un défaut d'alignement d'un centimètre sur la voûte intérieure est aussitôt perceptible à l'œil, alors que cela correspond à une flèche de seulement 1/5 000 par rapport à la longueur développée d'un anneau, précise Laurent Boutillon, ingénieur principal méthodes à la direction technique de Vinci Construction Grands Travaux. C'est infinitésimal : exiger 1/1 000, c'est déjà un challenge". Résultat : la présence permanente de trois géomètres a été exigée pour assurer un suivi de toutes les

phases, depuis le coffrage jusqu'au réglage final. Autre contrainte, qui n'est pas sans incidence sur les premières, la variabilité intrinsèque d'un béton préfabriqué *in situ*. Hygrométrie, température, conditions de mise en œuvre, dispersions liées à une production industrielle, "tous ces éléments font que, dans le meilleur des cas, on ne connaît qu'à 10 % près le module de Young du béton, d'où des écarts dans la déformation des coques", ajoute Laurent Boutillon. Ces paramètres ont aussi des répercussions sur la teinte du béton. Solution : placer côte à côte des éléments préfabriqués successivement, pour limiter les variations. "Nous avons employé la 'maturométrie' pour avoir une uniformité de teinte, ce qui est original, cette technique étant habituellement utilisée pour suivre la résistance du matériau", conclut Philippe Barbez. ■

TEXTE : JEAN-PHILIPPE BONDY

PHOTOS : VINCI CONSTRUCTIONS

### CHIFFRES CLÉS

- 6 avril 2000 : ordre de service.
- Décembre 2000 : présentation du prototype.
- Mars 2001 : démarrage de la préfabrication.
- Mai 2001 : début de la pose.
- 3 juin 2002 : décintrage de la dernière coque.



>>> **1 2** Un total de 154 anneaux préfabriqués en béton ultramince obéissant à des contraintes extrêmes d'aspect et de géométrie, acheminés et implantés selon une logique industrielle pour respecter les délais de chantier.



# solutions

## Créativité et économie

●●● DIVERSITÉ DE L'OFFRE, PERTINENCE DES OUVRAGES À BASE

D'ÉLÉMENTS PRÉFABRIQUÉS, QUALITÉ DES PRODUITS, AUTANT D'ARGUMENTS

QUI PLAIDENT EN FAVEUR DE LA PRÉFABRICATION. ET AUTANT

DE RAISONS, POUR *CONSTRUCTION MODERNE*, D'APPORTER DE NOUVEAUX

ÉCLAIRAGES SUR UNE OFFRE QUI CONTINUE DE S'ÉLARGIR.

LES PROFESSIONNELS EN TÉMOIGNENT. POUR ALAIN SPIELMANN, L'ENJEU

SE SITUE À DEUX NIVEAUX, L'UN INTELLECTUEL, L'AUTRE ÉCONOMIQUE.

POUR VU LE KHAC, DU CTOA/SETRA, L'ACCENT DOIT ÊTRE MIS SUR

LA COMMUNICATION ET L'EFFORT DE PROMOTION SOUTENU DONT

LES PRÉFABRICANTS DOIVENT NÉCESSAIREMENT FAIRE PREUVE.

MAIS QUOI DE MIEUX, AU FINAL, QU'UN PANORAMA DES OUVRAGES

LES PLUS RÉCENTS POUR APPORTER LA PREUVE DES ATOUTS ESTHÉTIQUES

PROPRES AUX OUVRAGES EN ÉLÉMENTS BÉTON PRÉFABRIQUÉS ?



### → Béziers

Solution économique et élégante pour le pont de Ribaute.

p. 19



### → Viaduc de Digoin

Des éléments de béton préfabriqué pour franchir la Loire

p. 21



### → Lagord

Des écrans acoustiques aux qualités exceptionnelles.

p. 23



### → Haute-Savoie

Un ouvrage d'art très particulier en haute montagne.

p. 23

## → Préfabrication : une offre adaptée aux besoins

Qu'il s'agisse des structures ou des superstructures, la préfabrication totale, en France, plus d'un millier de sites dont plus de 42 % sont dédiés aux besoins du génie civil et des travaux publics. Cette offre est, bien entendu, adaptée aux besoins de l'ensemble des acteurs de la profession, à commencer par les maîtres d'ouvrage et les maîtres d'œuvre, naturellement soucieux de qualité, de compétitivité, de pérennité et d'esthétique. Mais ces qualités ne suffisent pas à résumer la pertinence de l'offre. Il faut aussi évoquer la facilité de réalisation, la rapidité, la souplesse, la diminution des nuisances, ou encore les délais. Cette étude, qui ne peut prétendre à l'exhaustivité, s'efforcera de présenter les atouts des structures et des superstructures en éléments béton préfabriqués, en indiquant à chaque fois, dans la mesure du possible : l'état de l'offre ; les progrès ; les améliorations qu'elles apportent aux ouvrages d'art...

### → Structures : une offre diversifiée

#### ● Ponts à poutres PRAD\*

De par leur conception, ces ponts à poutres présentent de nombreux avantages : rapidité de mise en œuvre, esthétique, réduction des coûts, sécurité, etc. Avec des

\* Ponts à poutres préfabriquées, précontraintes à fils adhérents.

portées maximales de l'ordre de 30 à 35 m, ils s'adaptent aisément à la plupart des ouvrages courants. Leur technicité éprouvée – le comportement monolithique de l'ouvrage optimise sa résistance et sa ductilité – fait des ponts PRAD à plusieurs travées rendues continues une solution séduisante à plus d'un titre. Et notamment grâce aux économies qu'ils permettent de générer – la hauteur du tablier de l'ouvrage peut, par exemple, être réduite de 10 % par rapport à celle d'un tablier à travées isostatiques –, au nombre réduit de leurs appareils d'appui, ou encore à leur entretien simplifié. Preuve de sa pertinence en matière d'ouvrages d'art, ce type de solution est accepté par la SNCF pour la réalisation des ponts-rails (TGV Sud-Est).

#### ● Dalles pour les hourdis de ponts

Il s'agit là de dalles préfabriquées d'épaisseur variable, posées soit sur des poutres béton, soit sur des poutres métalliques (bipoutres, principalement). Ce qui permet d'éviter l'utilisation d'un équipage mobile pour réaliser le hourdis, comme dans la solution en béton coulé en place. Dans ce cas de figure, une fois les dalles posées, seules les zones de clavetage sont à couler en place. Le gain de temps et l'économie sont appréciables. Une application originale de cette solution a été réalisée sur l'échangeur de Frais-Vallon, à Marseille. Le tablier de 330 m de long est constitué de deux nervures hautes en

béton préfabriqué. Le hourdis a été préfabriqué en dalles pleines de 25 cm d'épaisseur de 2 m de long et de 8 à 11 m de large (12 à 14 tonnes/dalle).

#### ● Piedroits, dalles et éléments pour passages inférieurs

Les piedroits peuvent être préfabriqués pour la réalisation de galeries techniques (simples ou doubles), de passages inférieurs de type PICF\*\* ou PIPO\*\*\*, etc. Selon les portées, les traverses supérieures peuvent être réalisées en BA ou en BP, encastrées ou non sur les piedroits. Un nouveau concept de poutres-dalles précontraintes, en forme de T renversé, permet de franchir 25 m de portée. Le béton de clavetage entre les éléments préfabriqués apporte à la dalle un caractère monolithique.

#### ● Les cadres

L'offre industrielle dans cette catégorie d'équipements est importante. Grâce à la modulation des dimensions, certains préfabricants peuvent proposer plus de quarante sections. Les cadres conviennent pour de nombreuses utilisations : ouvrages hydrauliques, passages inférieurs à gabarit réduit, galeries techniques, etc.

\*\* Passage inférieur en cadre fermé.

\*\*\* Passage inférieur en portique ouvert.

#### >>> 1 Exemple d'utilisation de poutres de type PRAD sur un pont de l'autoroute A 64.

#### 2 Le hourdis de l'échangeur de Frais-Vallon (Marseille) en cours d'assemblage.







3



4



5

### ● Les murs de soutènement

Utilisés pour retenir des terres, les murs de soutènement préfabriqués se divisent en deux types principaux : voile seul ou voile et semelle (monobloc). Leur hauteur est généralement inférieure à 7 m pour les ouvrages d'art courants. La paroi verticale, ou "voile", peut être renforcée par des contreforts pour les éléments de grande hauteur. Les parements des voiles sont souvent traités pour en améliorer l'esthétique (cannelures, parements lavés, sablés...).

### → Superstructures : le "plus" esthétique

Si pour tous ces équipements, les avantages sont identiques à ceux des structures, il demeure que la préfabrication permet de réaliser des pièces de forme, de couleur et de parement très spécifiques, qu'il serait très difficile, voire impossible de réaliser sur place (le savoir-faire dans ce domaine est primordial).

### ● Les corniches de tabliers de ponts

La corniche est la plus commune des superstructures. Elle assure la protection du bord des dalles du tablier et apporte la touche finale à l'ouvrage. On y fixe les garde-corps et autres équipements. Apparues après la dernière guerre, les corniches ont connu un véritable essor avec la généralisation des étanchéités sur les ouvrages d'art et le remplacement des parapets par des garde-corps. Si rien n'empêche de couler en place des corniches, on retiendra qu'elles sont préfabriquées dans 90 % des cas. Elles sont proposées en béton gris ou de

couleur et, très souvent, traitées de manière spéciale (gravillons lavés, cannelures, etc.). Sur certains ouvrages sont ajoutés des éléments qui font office d'écrans anti-bruit. C'est le cas sur les ouvrages du TGV Méditerranée, par exemple. D'autres ouvrages sont équipés de corniches en béton associées à d'autres matériaux – alu, CCV (béton de fibre de verre très mince) – de formes très variées. La pose des corniches et des garde-corps est normalisée. Elle fait l'objet d'un guide technique du SETRA afin que soient respectées des normes de conception, des critères esthétiques et des pratiques de mise en œuvre.

### ● Les écrans acoustiques ou murs anti-bruit

Les murs anti-bruit ou écrans acoustiques sont destinés à protéger les populations des nuisances sonores provenant des infrastructures routières et ferroviaires. Leur rôle est double. Il consiste à atténuer le bruit transmis à l'environnement et à limiter le bruit réfléchi vers la source. On les classe généralement en deux grandes familles : les écrans réfléchissants d'une part, les écrans ou murs absorbants d'autre part.

Du fait de leur performances acoustiques, le succès de ces derniers va grandissant. Les écrans anti-bruit peuvent présenter une faible inclinaison par rapport à la verticale et remplir parfois une fonction de soutènement. Ils sont souvent réalisés en parement absorbant, constitué de béton poreux, bois, pouzzolane, billes de liège, argile expansée, etc.

Outre leurs performances anti-bruit, les écrans cultivent désormais le "beau". Ils peuvent être mixtes, pour donner un peu d'originalité. Sur des zones de grande longueur, on va par exemple intercaler des zones translucides avec des poteaux aux parements très spécifiques.

>>> **3** Construit au moyen d'une solution PRAD, le pont de Ribaute, à Béziers, affiche d'élégantes corniches en béton blanc préfabriquées. **4** Mur anti-bruit à Saint-Jory, près de Toulouse.

**5** Viaduc du Chavanon, sur l'A 89.

Les écrans acoustiques s'adaptent même aux particularités architecturales régionales. Ainsi, en région toulousaine, on trouve des zones d'aspect brique rouge, réalisées au moyen d'un béton à base de pouzzolane. L'aspect final tient donc à la diversité des parements : gravillons sablés, lavés, etc.

### ● Les prédalles coffrantes ou prédalles de coffrage

Elles sont parfois utilisées pour réaliser les hourdis des tabliers de ponts à poutres (PRAD, VIPP ou mixtes), lorsque le vide entre les poutres est supérieur à 60 cm environ. Elles peuvent être rendues collaborantes si nécessaire, mais elles sont le plus souvent utilisées comme coffrage perdu.

### ● Parements de piles en béton poli

Si le béton poli est très employé dans le bâtiment, il l'est tout autant sur les fûts des piles des ouvrages d'art, qui y gagnent une appréciable originalité. Tous les aspects sont autorisés – marbre, granit, etc. –, et toutes les couleurs, toutes les créations sont possibles. ■

PHOTOS : GUILLAUME MAUCUIT-LECOMTE, PHOTO 2 : DR

ENTRETIEN AVEC ALAIN SPIELMANN

## « Les avantages de la **préfabrication** sont nombreux »



POUR L'ARCHITECTE ALAIN SPIELMANN, SPÉCIALISTE DES OUVRAGES COMPLEXES ET DES OUVRAGES D'ART, CONSTRUIRE EST D'ABORD UN PLAISIR... IL NE FAIT D'AILLEURS AUCUN MYSTÈRE DE SON ATTACHEMENT À CE MÉTIER QU'IL DIT EXERCER "LE PLUS PLEINEMENT POSSIBLE, MAIS AVEC EXIGENCE ET HUMILITÉ", ET NOUS EXPLIQUE EN QUOI LES ÉLÉMENTS PRÉFABRIQUÉS PEUVENT CONTRIBUER À LA CRÉATIVITÉ ET À L'ORIGINALITÉ.

**Construction moderne :** Depuis votre première réalisation, en 1966, votre activité s'est résolument orientée vers les ouvrages d'art. Est-ce l'origine de votre attrait pour les problèmes constructifs ?

**Alain Spielmann :** Mon parcours est l'illustration d'un goût constant pour les constructions, pour les ouvrages d'art, pour les ponts. Après avoir été sollicité et avoir dessiné plus d'une centaine de ponts, il était naturel que je m'intéresse à tous ces problèmes constructifs de type préfabrication ou géométrie. Pour moi, la construction est étroitement dépendante de la conception d'une ossature.

**C. M. :** Vous évoquez la préfabrication. Ce procédé de construction permet-il à l'architecte que vous êtes de faire preuve de créativité et d'originalité dans le domaine spécifique des ouvrages d'art ?

**A. S. :** Il m'est difficile de répondre à cette question ! L'important est de proposer des projets et d'écouter ensuite les réactions du public et des utilisateurs. Mais il peut y avoir contradiction entre originalité et adaptation au site. C'est pourquoi notre bataille, aujourd'hui, doit se situer à deux niveaux, l'un intellectuel, l'autre économique. Concernant la maîtrise des coûts, les services du ministère de l'Équipement ont rationalisé la conception

de certains ouvrages d'art, facilitant ainsi la mise au point des passages inférieurs et supérieurs tout en optimisant les calculs. Résultat, les ouvrages peuvent être à la fois élégants et peu coûteux. Le travail accompli par le SETRA dans ce domaine s'est montré déterminant.

**C. M. :** Comment situez-vous les ouvrages d'art français dans leur environnement européen ?

**A. S. :** Les concepteurs ont fait preuve d'un grand dynamisme au cours de ces vingt dernières années. C'est toute une génération d'hommes qui a œuvré pour créer des ouvrages d'art qui se distinguent par leur originalité et leurs qualités exceptionnelles. L'Allemagne a également joué un certain rôle, par la remise en état, après la guerre, des ponts sur le Rhin. Mais je n'ai pas vu un tel foisonnement, une telle diversité ailleurs qu'en France, bien que depuis une dizaine d'années, on assiste à des créations dignes d'intérêt en Espagne, en Suisse, au Danemark, en Suède, en Grande-Bretagne, en Belgique... Ces pays se lancent dans l'aventure franchement, sans complexe, ce qui est plutôt sympathique.

**C. M. :** Le préfabriqué reste moins répandu que le "coulé en place". Pensez-vous que les habitudes de la discipline pourraient évoluer ?

**A. S. :** Avec le béton coulé en place, la difficulté majeure consiste à obtenir des parements corrects et des finitions de qualité. Nous sommes dépendants de l'offre des cimentiers, mais aussi des intempéries et des plannings d'exécution. La difficulté de couler en place m'a amené à imaginer des kits préfabriqués et à mettre au point différents procédés. Nous avons développé des systèmes avec des bétons dits polis, par exemple, parce que le polissage coûte désormais moins cher. Nous proposons également la réalisation de piles dont les peaux seront coffrées, avec un mode opérationnel très simple. Conséquence : l'élément coulé en place, visible, est relativement réduit en surface et devient indépendant des problèmes de délai et de temps. Nous avons pu le vérifier lors de l'installation de la déviation de Gien.

**C. M. :** Outre l'esthétique et le gain de temps, des économies d'échelle sont-elles possibles ?

**A. S. :** Il y a un surcoût financier, faible et quantifié : de 1 % à 5 %. En échange, les avantages sont nombreux ; c'est propre, rapide, et surtout nous disposons d'une nouvelle génération de ponts. Ils respectent les calculs et toutes les

indications traditionnelles du SETRA, en intégrant les trois données essentielles : aspect du parement, planning et insensibilité au temps. Bien sûr, il ne s'agit là que d'une approche, d'une contribution. Je ne cherche pas à convaincre, mais à résoudre un certain nombre de questions. Ces solutions ont fait leurs preuves sur des ouvrages que nous avons conçus, lesquels ont été recopiés ailleurs...

**C. M. :** Quel avenir voyez-vous pour la préfabrication ?

**A. S. :** Elle a de grandes capacités à résoudre bien des problèmes. À Gien et au port de Gennevilliers, nous avons réalisé des murs de soutènement complètement préfabriqués. Le fini est magnifique ! Mais il est primordial que l'esthétique soit dominée par la qualité du produit et avant tout par ses qualités structurelles. Les nouveaux bétons hautes performances, et notamment les bétons de fibres métalliques, promettent des développements immenses. Néanmoins, je plaide pour une approche ouverte et pour la diversité des matériaux, lesquels seront utilisés de façon différenciée, en exploitant au mieux leurs capacités. Allié à d'autres matériaux ou même mixte dans sa propre composition, le béton préfabriqué devrait apporter une régénération d'où naîtront des solutions encore inconnues à ce jour... ■

PROPOS RECUEILLIS PAR JOCELYN DERID  
PHOTOS (PR. 20-21) : ALAIN SPIELMANN ARCHITECTE

### VERBATIM

#### L'élément déclencheur : c'est le site !

Selon Alain Spielmann, les idées doivent être liées au site. C'est l'élément déclencheur. "Il faut que la structure de l'ouvrage puisse s'y installer, simplement. D'où l'intérêt de trouver la forme et l'ossature adaptées." Avec ses "bracons", l'architecte souhaite exprimer la tension des lignes : "Je ne me soumetts pas à l'esthétique. J'essaie de révéler un site et de proposer le projet le plus simple, celui qui inspire..."





1



2



3



4



5



6



7



8



9

>>> 1 Pont de la Grande Ravine en construction à la Réunion (photo-montage). 2 3 4 Viaduc de Digoin. 5 Contournement de Châteauroux. 6 Franchissement de voie ferrée à Gien.

7 Parement en béton préfabriqué sous un franchissement à Talmonse. 8 9 Pont à béquilles sur le tracé de la déviation de Gien.



## → Associer architecture et préfabrication

**L**es arguments de la préfabrication sont nombreux et tangibles : qualité, technicité, esthétique, souplesse, rapidité, sécurité, etc. Ils contribuent à améliorer et à conforter son image auprès des acteurs de la profession. Certains en sont déjà convaincus, d'autres – la majorité – hésitent encore. Souvent pour des raisons économiques, mais aussi par méconnaissance des atouts des structures préfabriquées par rapport aux ouvrages coulés en place.

### ● Une gamme de produits qui répond à toutes les attentes

L'industrie du béton est désormais capable d'offrir une gamme de produits très diversifiée. Au besoin, plusieurs préfabricants peuvent intervenir sur un chantier spécifique. Notons également que depuis quelques années, et grâce aux bétons modernes, l'aspect de surface des produits a pris une importance considérable. Les variétés de béton les plus récentes offrent aux concepteurs une gamme infinie d'aspects, qui leur permet de créer des ouvrages répondant à tous les besoins de leurs utilisateurs. Ces besoins touchent notamment à l'esthétique, cette question devenant un des critères de choix les plus importants pour de nombreux composants en béton, avant même la résistance mécanique. S'agissant de la qualité de ces composants, la qualification FIB "Qualif IB" est une garantie supplémentaire pour les clients. Elle atteste la conformité des éléments préfabriqués au référentiel technique\*.

Comparée au béton coulé en place, la préfabrication présente plusieurs avantages. En cas de grand gel, par exemple. Mais aussi et surtout en matière de coût, son organisation simplifiée, souple et rapide apportant la garantie d'une réelle compétitivité. Combinés aux garanties de qualité, ces atouts permettent au maître d'œuvre de disposer, partout en France, de produits conformes à ses attentes, sur le plan de l'aspect architectural notamment. ■

\* Le Cahier des charges des éléments industriels pour murs fabriqués en usine constitue le référentiel technique de la certification.



MUR ANTI-BRUIT – SAINT-JORY – A 62

### → Silence et élégance

**P**our faire face à un trafic en augmentation, un élargissement de l'A 62 (autoroute des deux mers) a été décidé. Situé dans une zone de fret, le premier tronçon concerné (6 km de long, depuis la barrière de péage de Toulouse-Nord jusqu'à la première sortie, Saint-Jory) a nécessité la construction d'un mur anti-bruit efficace. Efficace, mais aussi élégant, de façon qu'il s'harmonise avec l'environnement architectural. Les travaux d'étude ont abouti à une transition progressive entre milieu rural et milieu urbain, avec des panneaux anti-bruit préfabriqués colorés dans la masse qui s'accordent à merveille au décor de la Ville rose toute proche.

PHOTOS : GUILLAUME MAUCUIT-LECOMTE

Maître d'ouvrage : ASF

Maître d'œuvre : Scetauroute

Architecte : Anouk Debarre (Atelier R)

Entreprises : Razel, Nicoletti



VIADUC DU LOT - CAHORS – A 20

### → Franchissement multiple

**L**ong de 534 m, avec 11 travées dont la plus importante a une portée de 70 m, ce viaduc permet à l'A 20 de franchir le Lot, la voie ferrée Cahors-Capdenac et deux routes départementales. Cet ouvrage mixte repose sur des piles de béton avec des habillages en coques préfabriquées de béton sablé à granulats de marbre gris anthracite.

PHOTO : GUILLAUME MAUCUIT-LECOMTE

Maître d'ouvrage : ASF

Maître d'œuvre : Scetauroute

Entreprises : Dodin Sud

BET : CERT Rennes, EEG Simecsol (Labège)







ÉCRANS ACOUSTIQUES OU MURS ANTI-BRUIT – LAGORD

→ **Qualités exceptionnelles**

Obstacles lourds entre les sources de bruit et les riverains à protéger, les écrans acoustiques BBS ou murs anti-bruit, à l'instar de celui de Lagord (Charente-Maritime), présentent des qualités tout à fait exceptionnelles. Très efficaces (classés A3 et A4, et donc très absorbants), ils sont économiques, écologiques (entièrement recyclables), esthétiques et extrêmement résistants aux intempéries. Ces écrans aux multiples textures possibles (bétons de pouzzolanes, galets de couleur...) peuvent être habillés de parements. Les éléments de grande hauteur et de grande longueur sont également possibles.

PHOTO : BÉTON BOIS SYSTÈME®

**Maître d'ouvrage :** conseil général de Charente-Maritime/SEIR  
**Architecte :** SCE  
**Entreprise :** ERC Harranger, BMI Aquitaine



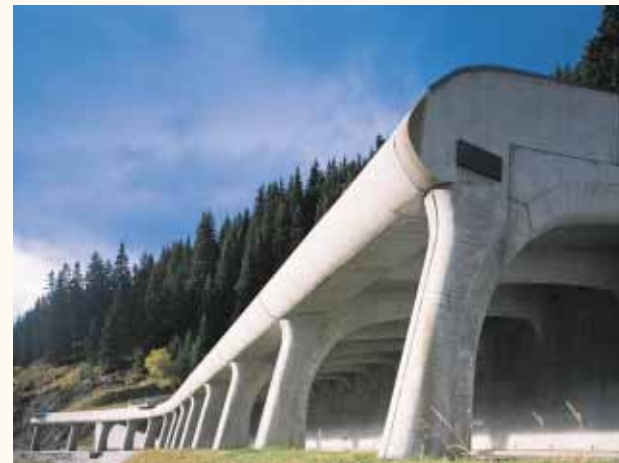
TRANCHÉE DE LA GARENNE – CAHORS – A 20

→ **Site classé et protégé**

En rive sud, le viaduc du Lot fait pénétrer l'auto-route dans la tranchée couverte de La Garenne. Cet ouvrage important est destiné à protéger le site des nuisances sonores et visuelles de l'auto-route et, en particulier, le château d'Arcambal, monument inscrit à l'Inventaire des Monuments historiques. La tranchée est constituée de deux tubes de béton en forme de voûte, le tube ouest a une longueur de 165 mètres, le tube est, de 135 mètres.

PHOTO : GUILLAUME MAUCUIT-LECOMTE

**Maître d'ouvrage :** ASF  
**Maître d'œuvre :** Scetauroute  
**Entreprises :** GPT, Maïa Sonnier, Demathieu Bard, Quintoli  
**BET :** CERT Rennes  
**Bureau de contrôle :** Scetauroute DTTS (Pringy)



PARAVALANCHE DE FLAINE

→ **Béton de haute montagne**

Il s'agit ici d'une application particulière en matière d'ouvrages d'art : le paravalanche. Construit sur le site de Flaine (Haute-Savoie) par Chazey-Bons Préfa, l'ouvrage comprend différents éléments préfabriqués : poteaux de forme ellipsoïdale (12 T/U), poutres principales et intermédiaires (24 T/U), bandeaux de façade (6 T/U), prédalles, tympans. À noter : l'ensemble de ces éléments a été "préfabriqué" en B35 GS.

PHOTO : GUILLAUME MAUCUIT-LECOMTE

**Maître d'ouvrage :** conseil général de Haute-Savoie  
**Maître d'œuvre :** conseil général de Haute-Savoie  
**Architecte :** Richard Plottier  
**Préfabricant :** Chazey-Bons Préfa  
**Entreprise :** Bianco  
**BET :** SERF  
**Bureau de contrôle :** Ingerop



MUR DE SOUTÈNEMENT – BAR-LE-DUC

→ **Éléments monoblocs**

Ce mur de soutènement matricé de 600 m de long se compose d'éléments monoblocs (semelle et voile vertical) d'une hauteur s'élevant jusqu'à 7 m. Il fait suite à un ouvrage réalisé en 1999 et dont l'aménagement donne entièrement satisfaction à ce jour. Une nouvelle tranche de 100 m a été prévue en juin 2002.

PHOTOS : DR

**Maître d'ouvrage :** État  
**Maître d'œuvre :** DDE de la Meuse  
**Préfabricant :** Bonna Sabla  
**Entreprise :** Berthold

ENTRETIEN AVEC VU LE KHAC

## Des atouts esthétiques et économiques



### DÉFINITION

#### Un organisme de référence

Le SETRA (Service d'études techniques des routes et autoroutes) est un service technique rattaché à la direction des Routes du ministère de l'Équipement. Créé en 1968, cet organisme qui compte environ 400 personnes intervient sur l'ensemble des techniques routières hors milieu urbain et tunnels. Son action est fondée sur cinq types de missions :

- élaborer la doctrine technique routière française ;
- garantir la qualité des projets ;
- promouvoir l'innovation ;
- développer des partenariats avec les autres acteurs de la communauté routière française ;
- coopérer avec la communauté internationale.

Dans ce cadre, les actions du SETRA sont nombreuses et diversifiées, ne serait-ce qu'en raison de la multiplicité de ses domaines d'intervention et de ses partenaires. Le SETRA se distingue notamment par l'élaboration de règles de l'art, de recommandations, de méthodologies, soit autant d'objets pour des publications qui font autorité. Le SETRA est également concepteur d'outils et singulièrement de logiciels comme le programme "voûte" utilisé pour les études sur la restauration des ponts.

**C. M. :** Sous quelles conditions la préfabrication pourrait-elle accroître son développement ?

**V. Le K. :** Par un effort constant de sensibilisation et de communication ! Les concepteurs doivent être informés de toutes les possibilités offertes par la préfabrication et de ses atouts économiques, ce qui suppose un effort de promotion soutenu. Car contrairement à ce que peuvent penser certains acteurs, préfabrication n'est pas toujours synonyme de répétition. ■

PHOTO (PONT PRAD SUR L'A 64) : GUILLAUME MAUCUIT-LECOMTE

LA PRÉFABRICATION DANS LES OUVRAGES D'ART NE CONNAÎT PAS ENCORE LE DÉVELOPPEMENT AUQUEL ELLE PEUT NATURELLEMENT ASPIRER. POURQUOI ? QUE PEUT-ON FAIRE POUR Y REMÉDIER CONCRÈTEMENT ? QUELS SONT SES PRINCIPAUX ATOUTS ? LES RÉPONSES DE VU LE KHAC, DU CTOA-SETRA.

**Construction moderne :** Quels sont les facteurs qui freinent, selon vous, le développement de la préfabrication dans les ouvrages d'art ?

**Vu Le Khac :** Ils sont multiples. Cette situation s'explique à la fois par des raisons économiques et peut-être par un manque d'information sur les possibilités offertes par la préfabrication au regard des ouvrages coulés en place, mixtes ou en acier... Il y a aussi certaines réticences de la part des maîtres d'ouvrage qui arguent du fait que la préfabrication nécessite plus de contrôles.

**C. M. :** Pensez-vous qu'il faut alléger ces schémas de contrôle ?

**V. Le K. :** Les contrôles exercés sur le produit, de sa fabrication à son intégration dans l'ouvrage final, sont-ils trop lourds, trop contraignants ? Il faudra sans doute regarder tout cela d'un peu plus près. Il s'agit de faire en sorte que ces contrôles, qui sont au demeurant très efficaces, soient plus faciles à accepter par les intervenants.

**C. M. :** Comment améliorer la situation en France, plus précisément ?

**V. Le K. :** Même si il y a encore une certaine facilité à utiliser du béton coulé en place, on observe depuis peu, chez les maîtres d'ouvrage, un certain intérêt pour la préfabrication. Ils acceptent de plus en plus souvent des variantes composées d'éléments préfabriqués dans les

ouvrages dont ils ont la charge. Il faudra donc que les préfabricants soient très attentifs à la nature de cette demande, de manière à proposer une offre pertinente, économiquement et techniquement.

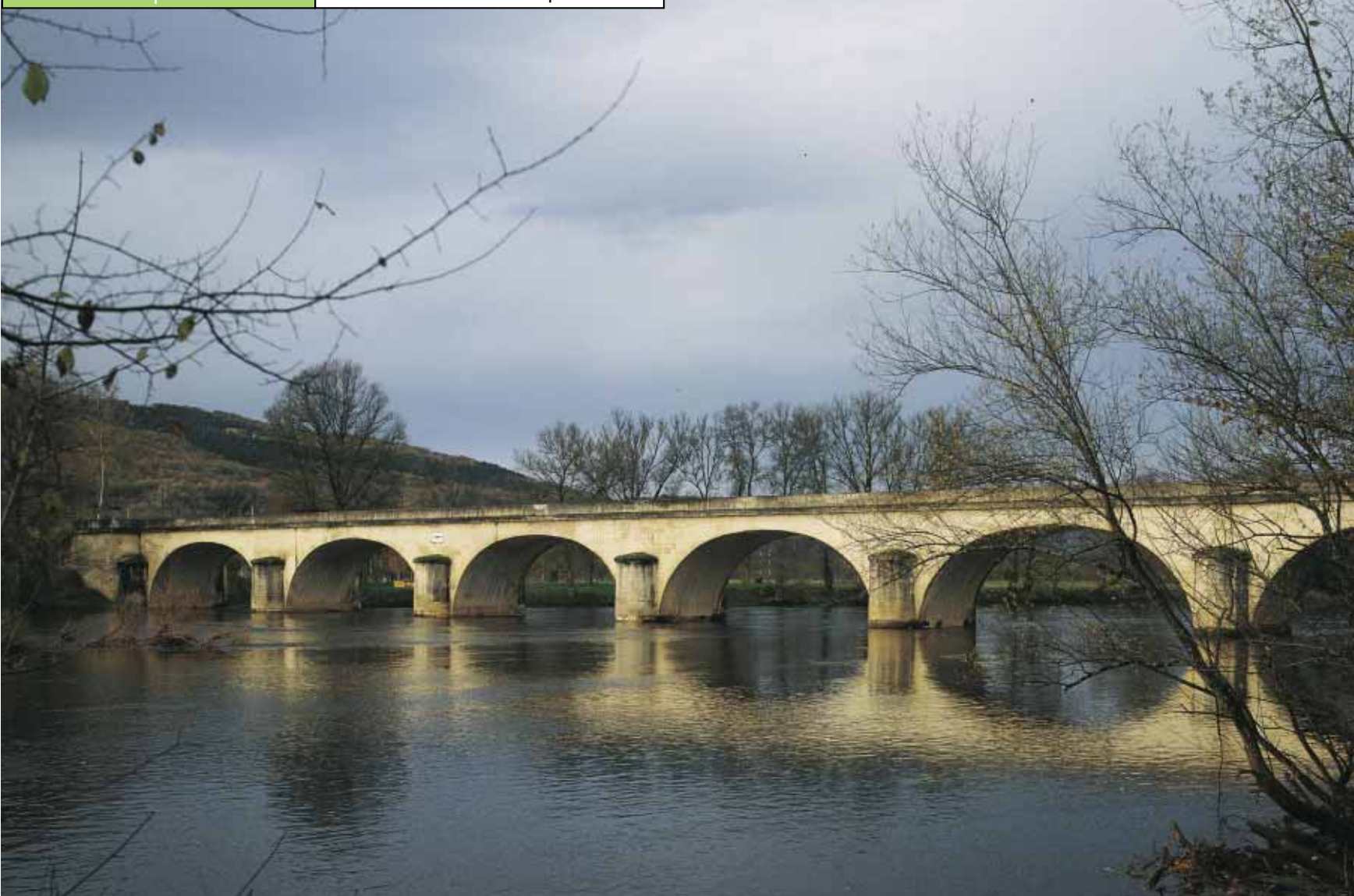
**C. M. :** La préfabrication est-elle compatible avec l'esthétisme ?

**V. Le K. :** La créativité en matière de préfabrication existe et, bien évidemment, elle influe sur l'esthétique d'un ouvrage dans son ensemble. Pour les éléments de superstructure – corniches, prédalles, parements de piles, etc. –, c'est déjà un acquis ! Aujourd'hui, plus que par le passé, les maîtres d'ouvrage sont conscients de l'importance du facteur esthétique. Ils acceptent désormais de payer un petit peu plus pour améliorer l'aspect des ouvrages. Mais il ne faudrait pas que ces surcoûts éventuels dépassent une certaine limite, au risque de changer la nature même de l'ouvrage par rapport à la conception initiale. Ce qui créerait inévitablement un problème. Rappelons à ce propos que la France est l'un des pays qui fait le plus d'efforts en Europe en matière de conception technique et esthétique dans les ouvrages d'art...

**C. M. :** En quoi consistent les préconisations du SETRA ?

**V. Le K. :** L'attention de l'Administration – et celle du SETRA en particulier – en direction des acteurs du monde des ouvrages d'art est permanente. Concrètement, cela se traduit par des actions méthodologiques (doctrine, documents et logiciels) qui ont été établis par le SETRA à leur intention. Par ailleurs, nous leur demandons, à chaque fois que cela leur est possible, de ne pas condamner *a priori* la préfabrication.





# Ponts et viaducs : vingt siècles d'innovation

●●● ÉVALUER LE NOMBRE DE PONTS ÉDIFIÉS DEPUIS L'ÉPOQUE ROMAINE JUSQU'À NOS JOURS EST UNE TÂCHE IMPOSSIBLE. LES PLUS ANCIENS, DATÉS DU I<sup>ER</sup> SIÈCLE DE NOTRE ÈRE, NE SONT PLUS QU'UNE CENTAINE AUJOURD'HUI EN FRANCE, MAIS LE MOYEN ÂGE NOUS A LAISSÉ DE TRÈS NOMBREUX TÉMOIGNAGES DE LA PRÉCOCE HABILITÉ DES HOMMES. RICHE DEPUIS TOUJOURS EN BÂTISSEURS DE GÉNIE, LA FRANCE RASSEMBLE D'AILLEURS UN PATRIMOINE EXCEPTIONNEL EN MATIÈRE D'OUVRAGES D'ART. VALEUR TECHNIQUE, INTÉRÊT HISTORIQUE OU QUALITÉS ESTHÉTIQUES, *CONSTRUCTION MODERNE* DRESSE UN "CATALOGUE RAISONNÉ" DES PONTS LES PLUS REMARQUABLES DE L'HEXAGONE.

**E**n matière de ponts, la France dispose d'un patrimoine exceptionnel. On y dénombre quelque 270 000 ouvrages, et il n'est pas une région qui ne possède au moins un exemple de ces chefs-d'œuvre trop souvent méconnus. Au total, le nombre des ouvrages classés Monuments historiques s'élève à 220, celui des ouvrages inscrits à l'Inventaire à 400. Parmi eux, une centaine de ponts de l'époque romaine et une large proportion de ponts du Moyen Âge.

## → Les ponts romains

Le pont en maçonnerie, de pierre ou de brique, est une invention romaine. Sa construction fut rendue possible par l'invention de la voûte, dont le modèle le plus ancien, daté de 200 ans avant J.-C., se trouve à Pergame, en Grèce. Absente des civilisations orientales – même en Égypte, où l'on utilise exclusivement le linteau, dont la portée est limitée –, la voûte amène un bouleversement capital dans l'histoire de l'architecture, du génie civil, et dans l'évolution de l'Occident. La civilisation romaine fut à son apogée à l'époque des Antonins et notamment de Trajan (53-117), empereur à qui l'on doit de nombreux ouvrages, dont le pont d'Alcantara sur le Tage, fameux entre tous. Sous l'administration des Antonins sont établis 150 000 km de routes, dont 80 000 km de grands itinéraires, ainsi que de spectaculaires aqueducs.

Parmi les ponts romains les mieux conservés figurent le pont Flavien à Saint-Chamas, qui a gardé ses deux arcs de triomphe, celui de Sommières sur le Vidourle, et l'aqueduc dit "pont du Gard" qui date du 1<sup>er</sup> siècle. Le pont Julien, à Apt, est considéré comme l'un des plus beaux ouvrages romains de France, de même que celui de Vaison. Les Romains construisent leurs ouvrages d'art les plus importants avec des pierres de grande dimension, assemblées sans mortier. Ils utilisent également la brique, notamment pour les aqueducs. Mais ils bâtissent aussi en maçonnerie, c'est-à-dire avec des pierres plus petites que celles dites "de taille". Ces pierres sont assemblées avec un "mortier" composé de sable et de chaux, mortier parfois capable de durcir sous l'eau, quand on incorpore au sable et à la chaux de la terre de Pouzzoles, la "pouzzolane". Ainsi établies, les techniques de maçonnerie ne changeront plus avant le début du 19<sup>ème</sup> siècle.

**Photo d'ouverture – Pont de Souillac. 1. Pont du Gard, 1<sup>er</sup> siècle ap. J.-C.**

**2. Pont Julien, l'un des plus beaux ponts romains de France, sur le trajet de la voie Domitienne, près d'Apt. 3. Pont de Valentré, à Cahors ; le plus beau pont fortifié de France ; mis en service en 1380. 4. Pont Saint-Esprit, dans le Gard, mis en service en 1309. 5. Pont de Rohan, à Landernau, dernier pont habité en France, classé Monument historique. 6. Pont Neuf sur la Garonne, à Toulouse, mis en service en 1632. 7. Pont Henri-IV, à Châtellerault, mis en service en 1611. 8. Pont Neuf de Paris, mis en service en 1614.**

## → Les ponts du Moyen Âge

À partir du 6<sup>ème</sup> siècle, évêques, abbés et grands propriétaires fonciers s'efforcent d'établir des chemins. Au 7<sup>ème</sup> siècle apparaît en France le premier texte relatif aux travaux de voirie. Il sera confirmé par un regain d'attention sous Charlemagne, à la fin du 8<sup>ème</sup> siècle. À compter des 9<sup>ème</sup> et 10<sup>ème</sup> siècles, les chemins des pèlerins en direction de Compostelle se dessinent, la construction de nombreux ponts est entreprise sur les anciens tracés des voies romaines. Parmi les ponts médiévaux importants, étonnants ou spectaculaires, citons le pont de Belcastel sur l'Aveyron ; le pont de Saint-Affrique ; le pont de Confolens, dans la Charente ; le pont Saint-Jacques à Parthenay, à l'extrémité duquel se trouve une porte fortifiée, le pont de l'Eygues, à Nyons, dans la Drôme, avec une arche unique de grande portée. Le pont Saint-Esprit sur le Rhône, avec ses dix-sept arches, est le plus long des ponts du Moyen Âge. Sa mise en service eut lieu en 1309, après quarante-cinq ans de travaux. Les ponts Saint-Étienne et Saint-Martial sur la Vienne à Limoges sont de la fin du 11<sup>ème</sup> siècle. Le pont de Beaugency, sur la Loire, du 15<sup>ème</sup> siècle. Le pont Valentré à Cahors, terminé en 1380, reste le plus beau pont fortifié de France avec ses trois tours. Citons encore le pont Saint-Bénézet, à Avignon (1352), qui fut l'un des plus importants ouvrages du Moyen Âge. Le pont de Rohan à Landernau, réalisé au 16<sup>ème</sup> siècle, sera le dernier pont habité en France. Mais cette liste des ponts les plus remarquables du Moyen Âge serait incomplète s'il n'était fait mention du pont de la Truyère à Entraygues-sur-Truyère, du pont Vieux d'Espalion et du pont Vieux d'Orthez.

## → De la Renaissance à la création des Ponts et Chaussées

L'organisation du premier service des Postes aux Lettres en France par Louis XI (1423-1483) rend nécessaire l'amélioration des routes et des ponts. Un siècle plus tard, en 1583, Henri III prend un édit relatif à "l'entretien des chemins publics et des arbres qui les bordent". En 1599, la charge de Grand Voyer de France, créée par Henri IV, est confiée à Sully. De nombreux ouvrages apparaissent. Parmi les plus remarquables de la Renaissance figurent le pont Coudé à Brantôme et le pont Neuf sur la Garonne à Toulouse. Commencé en 1544, terminé en 1632, il est, avec ses tympans évidés, l'un des plus majestueux ouvrages du temps avec le pont Henri-IV de Châtellerault, le Pont-Neuf de Paris et celui de La Charité-sur-Loire. Le pont-château de Chenonceaux, sur le Cher (1531), est un ouvrage tout à fait particulier, unique au monde par son ampleur et sa qualité : assimilable à un pont habité, il diffère cependant de ceux de Paris et d'autres grandes villes, dont les maisons disparurent toutes à la fin du 17<sup>ème</sup> siècle. Avec l'arrivée de Colbert en 1661 à la charge de Principal ministre, apparaît une véritable politique routière. Un corps d'ingénieurs est établi à la fin du règne de Louis XIV, et le 3 mai 1710, un arrêté fixe la largeur et les modalités de plantation des routes royales. Tout au long





1



2



3



4



5



6



7



8



9



10



11



13



12



14



**9. Pont de la Concorde**, considéré comme l'un des plus beaux ponts de Paris et mis en service en 1792. **10. Pont de Nemours**, sur le Loing ; conçu par Perronet, il se distingue par un élancement prodigieux, exemplaire des progrès accomplis en matière de ponts en maçonnerie. **11. Pont de Souillac**, sur la Dordogne, mis en service en 1824. **12 et 13. Aqueduc de Roquefavour**, mis en service en 1847 pour l'alimentation en eau de la ville de Marseille. **14. Pont-canal de Béziers**, mis en service en 1856 ; il permet au canal du Midi de franchir l'Orb et sa "cuvette" atteint 8 mètres de largeur.

du XVIII<sup>e</sup> siècle, le réseau des routes françaises, aussi droites et larges que possible, s'accroît. Le chiffre de 25 000 km est atteint sous Louis XV. Les plantations constitueront, jusqu'à la fin du XX<sup>e</sup> siècle, l'une des particularités esthétiques des routes françaises, qui feront l'admiration de tous.

En 1743, Daniel Louis Trudaine est nommé intendant des Finances, chargé des ponts et des chaussées. En 1744, il crée le Bureau des dessinateurs du Roi, bureau auquel il donnera Jean Rodolphe Perronet pour directeur en 1747 et qui deviendra en 1775 l'École des ponts et chaussées lors de sa réorganisation par Turgot. Les milliers d'ingénieurs qui en seront issus développeront une incomparable culture technique et esthétique de la route, et construiront des ouvrages d'art de tous ordres, sans équivalent dans le monde.

## → Les ponts de l'époque classique

Les ouvrages élevés durant les XVII<sup>e</sup> et XVIII<sup>e</sup> siècles sont très nombreux. Parmi eux, le pont de Régémortes – du nom de l'ingénieur qui l'édifia –, à Moulins, mis en service en 1763. Long de 302 m, il compte dix-sept arches et fait l'objet d'intéressantes innovations techniques (pieux, caissons, radiers). Autre ouvrage significatif du souci esthétique et environnemental des ingénieurs du XVIII<sup>e</sup> siècle, le pont des Belles-Fontaines à Juvisy-sur-Orge. Mais on peut aussi évoquer le pont de Gien sur la Loire, terminé en 1734, le grand pont de Blois, conçu par l'architecte Jacques Gabriel et mis en service en 1735, le pont Wilson – ancien "pont de pierre" – à Tours (1778), le pont d'Orléans, terminé en 1760, le pont Cessart à Saumur, mis en service en 1770. Parmi les plus remarquables des ouvrages de Perronet, hormis l'ancien pont de Neuilly, il faut citer ceux de la Concorde et de Nemours. Le XVIII<sup>e</sup> siècle consacra ainsi quelque 800 millions de livres aux routes, ponts et autres canaux.

Le XVIII<sup>e</sup> siècle vit aussi la construction d'aqueducs et de ponts-canaux, tels le pont-aqueduc de Carpentras, édifié entre 1720 et 1724, riche de 147 arcades et réalisé "à la romaine" en pierre de taille. Mis en service en 1772, l'aqueduc Saint-Clément qui alimente Montpellier est long de 880 m. L'aqueduc de Roquefavour (390 m), mis en service en 1847 pour l'alimentation en eau de Marseille depuis la Durance, comporte trois niveaux. L'aqueduc de l'Horloge à Saint-Chamas est du Second Empire, de même que l'aqueduc d'Arcueil (375 m).

## → L'invention du ciment

L'époque révolutionnaire ayant laissé à l'abandon les routes et les ponts, l'empereur Napoléon fera construire trois ponts à Paris : le pont d'Iéna, le pont d'Austerlitz et le pont des Arts, premier ouvrage métallique réalisé en France. Quelques grands ouvrages sont aussi réalisés sous la Restauration (1815-1830). À Bordeaux, la construction du pont de Pierre est un véritable exploit. Terminé en 1822, après deux ans de travaux seulement, il compte dix-sept arches sur la Garonne pour une longueur de 486 m, soit quatre fois plus que le plus long pont de Paris, le Pont-Neuf. Le pont de Libourne, qui lui ressemble, fut achevé en 1825, le pont Neuf de Limoges, en 1840.

Le pont de Souillac, sur la Dordogne, mis en service en 1824, tient sa renommée de Louis Vicat qui y expérimente alors la chaux hydraulique ou ciment artificiel, procédé qui va révolutionner la construction des ponts et des ouvrages d'art, dont les techniques étaient restées inchangées depuis les Romains.

Sous le règne de Louis-Philippe (1830-1848), un nouveau type d'ouvrages se répand : le viaduc de chemin de fer. Les viaducs sont d'abord en maçonnerie. Le premier, mis en service en 1840, est celui de Meudon-Val-Fleuri. Celui de Nîmes, le plus long de France – 1 569 m – est terminé en 1845. En Normandie, les viaducs de Barentin (480 m) et de Mirville (524 m) sont achevés en 1844. L'extraordinaire viaduc de Saint-Chamas, construit par Paulin-Talabot pour le réseau PLM en 1848, présente une série de voûtes imbriquées deux à deux qui dégagent des tympans ; long de 365 m, il compte une quarantaine d'arches de forme ogivale. Le viaduc de Chaumont, sur la ligne Paris-Bâle, fut terminé en 1856. C'est le viaduc en maçonnerie le plus spectaculaire de France : 50 m de haut, 600 m de long, trois étages, cinquante arches de 10 m d'ouverture avec des piles biaisées en talais et des piles-culées tous les 60 m.

Les nombreux ouvrages d'art en maçonnerie réalisés pour les chemins de fer sous le Second Empire ne doivent pas faire oublier ceux qui furent édifiés pour les routes. Par exemple le pont d'Hendaye sur la Bidassoa, remarquable par la qualité et la profusion du décor ; le très spectaculaire pont de Luz-Saint-Sauveur, bâti à la demande de Napoléon III sur le gave de Pau et dont l'arche unique de 42 m d'ouverture s'élève à 62 m au-dessus de la rivière ; ou encore le pont Neuf d'Albi, qui se distingue par ses triples tympans accolés.

### MÉMENTO

#### Le grand essor du chemin de fer

- 1840 – Premier viaduc ferroviaire à Meudon, Hauts-de-Seine.
- 1844 – Premier viaduc ferroviaire en briques (pont Austreberthe) à Barentin, Seine-Maritime.
- 1863 – Premier viaduc métallique (viaduc de Busseau) à Ahun, Creuse.
- 1874 – Premier grand ouvrage en béton non armé (aqueduc de la Vanne) à Pont-sur-Yonne, Yonne.

Paul Séjourné fut l'un des derniers grands ingénieurs fidèles à la maçonnerie. On lui doit un grand nombre de réalisations, notamment pour les réseaux ferroviaires, dont celui du PLM : pont de Sca-rassouï sur les gorges de la Roya, près de Nice, pont sur la Bévéra, près de Sospel, viaduc de la Recoumène, très élégant ouvrage sur la ligne du Puy au Monastier, pont Adolphe à Luxembourg, etc. Le pont des Catalans à Toulouse, également dit "des Amidonniers", terminé en 1911, est une autre œuvre majeure de Séjourné, dont les techniques furent adoptées par tous les bâtisseurs, comme le principe de la construction par "rouleaux", qui permet d'alléger les cintres et de diminuer les coûts.

## → Les ponts suspendus et les ouvrages métalliques

Les progrès de la sidérurgie et de la métallurgie au XIX<sup>e</sup> siècle permettent d'obtenir des fontes plus ductiles, donc moins cassantes, des fers plus faciles à travailler et plus résistants, utilisables sous forme de chaînes, de poutrelles ou de câbles. Les ponts suspendus font partie de la première génération des ouvrages métalliques. L'un d'eux, le pont sur le Drac, construit en 1826 par l'ingénieur Louis Crozet entre Grenoble et Seyssel, aura l'honneur d'être évoqué par Stendhal dans *Mémoires d'un touriste* : "J'ai admiré en passant à l'aller et au retour le fameux pont du Drac, chef-d'œuvre de Monsieur Crozet, construit bien avant les ponts suspendus de Paris qui auraient dû le copier."

À partir de 1825, les frères Seguin construisent une centaine de ponts suspendus en France. Une circulaire du 24 août 1831 entraîne la réalisation de plus de quatre cents ponts suspendus, confirmant ainsi les initiatives des Seguin sur le Rhône, mais aussi de Navier à Paris (pont des Invalides, 1825). Citons parmi les ouvrages remarquables le pont de La Roche-Bernard sur la Vilaine (1839), avec une travée de 198 m, ou encore celui de Langeais, sur la Loire, lancé en 1840 et long de 360 m.

Les catastrophes d'Angers (1850) et de La Roche-Bernard (1852) stoppent la réalisation des ponts suspendus qui ne réapparaissent qu'après 1890. À cette date, Ferdinand Arnodin substitue aux câbles à tension alternative les câbles à fils parallèles. Les suspentes sont remplacées par des tiges d'acier, et l'on utilise des haubans

### TECHNIQUE

## Révolution industrielle, Belle Époque et premiers records

- **1845 – Record de France de longueur des ponts ferroviaires en maçonnerie (viaduc de Nîmes, Gard) : 1 569 m**
- **1863 – Record de France de hauteur des piles en maçonnerie [à cette date] (viaduc de Morlaix, Finistère) : 62 m.**
- **1900 – Record du monde de longueur des ponts en béton armé [à cette date] (pont Camille-Dehogues à Châtelleraut, Vienne) : 44 m.**

obliques soulageant les câbles porteurs. Ferdinand Arnodin se fait aussi spécialiste des ponts transbordeurs lancés sur les estuaires : Le Martrou, près de Rochefort ; Nantes (1903) ; Rouen (1849) ; Brest (1896) ; Marseille.

Les ponts métalliques furent légion à la fin du XIX<sup>e</sup> siècle et au début du XX<sup>e</sup> sur les lignes de chemin de fer. Dès 1835, l'ingénieur Rémy Palonceau réalise à Paris un ouvrage unique par l'originalité des techniques mises en œuvre : le pont des Saints-Pères, dont les poutres en tôle contiennent une charpente en bois cloué de 151 m de long en trois traverses sur la Seine. Il sera détruit en 1931. Autre prouesse, le viaduc du Viaur, dans l'Aveyron, qui surplombe la RN 88 à Tauriac-de-Naucelle avec une arche de 116 m de haut et de 220 m d'ouverture, le tablier mesurant 410 m. Réalisé par la Société de construction des Batignolles, il était le plus grand arc métallique de France. On se doit enfin d'évoquer le viaduc de Garabit, long de 448 m et haut de 95 m, avec une arche centrale de 163 m d'ouverture. L'ouvrage, très connu, fut réalisé par Eiffel entre 1880 et 1884, dans une savante géométrie de poutres-treillis.

## → Du ciment au béton armé

On a vu que les techniques de construction des ouvrages d'art, inchangées depuis l'époque romaine, firent un progrès considérable avec l'invention du ciment artificiel par Louis Vicat, lors de la construction du pont de Souillac, sur la Dordogne. L'invention consiste à fabriquer de la chaux hydraulique de façon artificielle en contrôlant les composants de ce nouveau liant qu'il appelle le "ciment", alors qu'on n'employait jusque-là que des chaux aériennes et des mortiers. Louis Vicat découvre plus de trois cents sites calcaires capables de donner de la chaux hydraulique. Une première cimenterie est implantée en 1827 près de Pouilly, en Saône-et-Loire, une autre à Wassy, près d'Avallon, une autre encore près de Nemours. En 1835, Pavin de Lafarge réalise les premières installations du Teil, en Ardèche. C'est en 1840 à Grisolles, près de Montauban, que l'ingénieur François Martin Lebrun construit le premier pont monolithe en mortier de ciment. En 1851, François Coignet met au point ce qu'il nomme la "pierre artificielle", utilisée pour la construction de l'église

- 15. Pont des Invalides à Paris**, construit pour l'Exposition universelle de 1855 et mis en service en 1856. **16. Aqueduc de la Vanne**, mis en service en 1874. **17. Viaduc de Garabit**, viaduc le plus célèbre de France, classé Monument historique ; conçu par Eiffel et mis en service en 1888. **18. Pont de Châtelleraut sur la Vienne**, mis en service en 1900 ; à cette époque le plus grand pont réalisé entièrement en béton. **19. Viaduc du Viaur**, plus grand pont en arc métallique de France, mis en service en 1902. **20. Pont des Catalans** ou pont des Amidonniers, à Toulouse, œuvre majeure de Séjourné, reconnaissable à ses tympans évidés ; mis en service en 1913.





15



16



17



18



19



20



21



23



22



24



25



26



27



28



**21. Passerelle de la chocolaterie Menier**, reliant deux bâtiments de l'usine au-dessus d'un bras de la Marne, mise en service en 1906. **22. Viaduc de chemin de fer des Ponts-Neufs**, conçu par Louis Harel de la Noë. **23. Pont Sapiac**, à Montauban, reconnaissable à ses décorations Modern'style ; mis en service en 1911. **24. Pont de Boutiron**, sur l'Allier, mis en service en 1913. **25. Pont de Saint-Georges-le-Gaultier**, mis en service en 1913. **26. Pont Neuf à Villeneuve-sur-Lot**, mis en service en 1920. **27. Pont de Tonneins**, conçu en béton armé par Freyssinet ; mis en service en 1922. **28. Pont Albert-Loupe** (site classé), mis en service en 1930.

du Vésinet, puis, avec l'ingénieur Eugène Belgrand, pour l'aqueduc de la Vanne. Cependant, c'est avec la mise au point du "ciment armé", appelé par la suite à devenir le "béton armé", que l'utilisation du ciment permet de révolutionner les techniques de construction et de réaliser des ouvrages de plus en plus audacieux. Mais le premier cours sur la construction en ciment armé ne sera donné à l'École des ponts et chaussées qu'à partir de 1897 par Charles Rabut.

Parmi ceux qui firent évoluer les techniques de façon significative figure François Hennebique. En 1892, cet entrepreneur dépose un brevet de "poutre à étrier" – constituée de fers ronds, reliés entre eux par des étriers – simple à mettre en œuvre : le "béton armé". Les ouvrages réalisés par Hennebique sont nombreux. On évoquera par exemple le pont de Châtellerauld sur la Vienne, lancé en 1898-1900, d'une extrême légèreté, et qui compte trois travées et un tablier plat, l'épaisseur de l'arche à l'intrados n'étant que de 70 cm ; ou encore le pont de la Mescla sur la Tinée – un affluent du Var –, premier ouvrage à tablier suspendu. Dans la même région, mais réalisé cette fois par Armand Considère en 1908, le pont sur la Vésudie se distingue par un arc de 55 m dont la voûte ne mesure que 45 cm d'épaisseur à la clef. Le pont Sapiac à Montauban, conçu par Boussiron, inauguré en 1911, affiche pour sa part une grande élégance, sa légèreté étant accusée par les vastes tympans elliptiques placés au-dessus des piles et dès la naissance des arcs. Exemple de treillis de béton, le pont de Boutiron, près de Vichy, est exceptionnel par son état de conservation. Conçu par Freyssinet (1878-1962), il fut mis en service en 1913. Le pont de Tonneins sur la Garonne, dans le Lot-et-Garonne, est une autre œuvre de Freyssinet qui estimait d'ailleurs que cet ouvrage était le plus réussi de sa carrière. Mis en service en 1922, il comprend cinq arches séparées par des tympans à jour. Toujours dans le Lot-et-Garonne, et conçu là encore par Freyssinet et réalisé par Limousin, le pont Neuf de Villeneuve-sur-Lot fut mis en service en 1920.

Le pont de Saint-Georges-le-Gaultier dans la Sarthe, mis en service en 1913, franchit la vallée à 33 m de hauteur, de fines piles de béton portant les huit arcs du tablier. Conçue par Considère, et terminée dès 1906, la passerelle de la chocolaterie Menier à Noisiel est également célèbre par son élégante légèreté. L'arc segmentaire porte le pont couvert par de fines membrures-billetes en béton.

Louis Harel de la Noë fut l'ingénieur qui utilisa le béton armé dans les départements de l'Ouest pour les économies qu'il permettait et sa facilité de mise en œuvre sur les lignes départementales. Il en fit la démonstration pour le pont de Toupin à Saint-Brieuc, terminé dès

1905 et justement célèbre avec ses trois travées composées de piles en maçonnerie surmontées de fines piles en béton portant un tablier triangulé – une véritable dentelle de béton –, ensemble qui se distingue par une grande économie de matière.

## → Familles d'Ouvrages

La Première Guerre mondiale avait détruit 1 510 ouvrages de chemin de fer, 2 000 ponts routiers, 450 franchissements de canaux, soit au total 4 010 ouvrages. Leur remplacement donna lieu à maintes réalisations innovantes. Si l'on procède à une analyse des ouvrages en béton armé édifés à compter des années vingt, différentes "familles" apparaissent qui se distinguent essentiellement par le mode de construction et d'assemblage entre les arcs et les tabliers.

Parmi les ponts en arc à tablier supérieur, on peut citer celui de Villeneuve-sur-Lot, conçu par Eugène Freyssinet et terminé en 1920, qui détenait le record des arcs en béton armé à l'époque avec 96,25 m d'ouverture ; celui de Tonneins sur la Garonne, également conçu par Freyssinet ; le pont de la Caille, au-dessus du ravin des Ussets, en Haute-Savoie, réalisé en 1925-1928 et conçu par Albert Caquot, avec une arche unique de 132 m. Le pont Albert-Loupe à Plougastel, conçu par André Coyne avec le concours de Freyssinet, et terminé en 1930 par Limousin, est le plus important des ponts en arc à tablier supérieur de l'époque, avec ses trois arcs de 186,40 m, pour lesquels fut installé un cintre spectaculaire. Inauguré par le président Doumergue en présence de 50 000 personnes, il était prévu pour accueillir une voie ferrée placée sous le tablier qui ne fut jamais utilisée.

Le pont des Amidonniers ou des Catalans à Toulouse, œuvre de Sejourné, est aussi un ouvrage à tablier supérieur dont les cinq arches de béton reposent sur des piles en maçonnerie au-dessus desquelles se trouvent des tympans. Les ponts de Confolans-sur-Oise, de Revin, de L'Isle-sur-Tarn, de Saint-Nazaire-en-Royans (Isère), de Serrières (Ain), de Saint-Julien-de-Verdon, de La Trinité-sur-Mer, de Bellegarde, entrent dans cette même catégorie et se distinguent par leur qualité et leur ampleur.

### MÉMENTO

#### Trois records entre deux guerres

- **1923 – Record de France de portée [à cette date] des ponts en arc à tablier intermédiaire (pont de Saint-Pierre-du-Vouvray, Eure) : 131,90 m.**
- **1928 – Record du monde de portée [à cette date] des ponts en poutre continue à treillis en béton armé (pont de la Caille à Cruseille, Haute-Savoie) : 77 m.**
- **1930 – Record du monde de portée [à cette date] des ponts en arc de béton (pont Albert-Loupe à Plougastel, Finistère) : 186,40 m.**

Parmi les ponts en console dont le principe est la création de deux travées de rive faisant contrepoids aux demi-travées de l'arche centrale, on trouve le pont de la Madeleine à Nantes, l'ancien pont de Villeneuve-Saint-Georges, détruit en 1944 et reconstruit par la suite en béton précontraint.

Les ponts à tablier suspendu furent particulièrement nombreux, avec des variantes architecturales multiples. Le principe est simple : deux arcs de rive supérieurs portent le tablier. Le pont de la Vésudie au Plan-du-Var, réalisé par Caquot et Considère, tout comme le pont de Saint-Pierre-de-Vauvray, près de Louviers (détruit en 1944), record du monde de portée avec deux arcs de 132 m, conçu par Eugène Freyssinet, figurent parmi les grands ouvrages de ce type. De même le pont de Langeac, sur l'Allier. Le pont de la Coudette, à Peyrehorade, dans les Landes, sur le gave de Pau, détient le record de France des ponts à tablier suspendu avec 112 m. Conçu par Esquillan, il fut réalisé par Boussiron.

Les ponts sur appuis simples furent également nombreux : pont d'Achères, pont des Migneaux à Poissy, pont du Berriat sur le Drac près de Grenoble, pont de Pontcharra sur l'Isère... Les ponts à poutres droites à treillis sont beaucoup plus rares. À Paris, celui de la rue La Fayette, au-dessus des voies de la gare de l'Est, réalisé en 1927-1928, est la meilleure illustration de ce système de construction. Réalisé par Pelnard, Considère et Caquot, c'est un ouvrage biais de 149 m, dont les poutres qui mesurent 10,50 m de haut sont entretoisées par des croix de Saint-André savamment ferrillées. Le chantier constituera d'ailleurs une première avec l'utilisation de vibreurs pneumatiques.

## → La précontrainte

Entre 1940 et 1945, ce sont 10 153 ouvrages – 2 603 viaducs et 7 500 ponts routiers – qui furent détruits ou coupés. Les ponts de pierre furent soit restaurés, soit reconstruits à l'identique, soit remplacés par des ouvrages en béton. De nouvelles techniques utilisant la précontrainte allaient permettre de faire face au désastre et de réaliser de nouveaux exploits.

Il revient à Eugène Freyssinet d'avoir fait faire aux techniques du béton armé un progrès spectaculaire. Les contradictions techniques du béton armé – tension du métal, compression du béton – le conduisirent dès 1928 à inventer la précontrainte, mise au point au cours de la décennie suivante avec Edme Campenon. Mais ce n'est qu'après la Seconde Guerre mondiale, avec la reconstruction des ponts de la Marne, que l'expérimentation à grande échelle de la précontrainte devint possible. Pour le pont de Luzancy, Freyssinet réalisera pour la première fois des poutres-caissons précontraintes de longue portée (55 m). Le système sera ensuite utilisé pour les autres ponts à rebâtir sur la Marne : Ussy, Changis, Tribardou, Esbly, Annet. Tous reçurent un tablier de même longueur (74 m), ce qui a permis d'installer à Esbly une usine de préfabrication des voussoirs qui fut la première du genre. Tous ces ponts étaient terminés dès 1950.

Terminé en 1955, le viaduc de La Voulte-sur-Rhône, à l'époque le plus long du monde, est composé de poutres droites précontraintes en cinq traverses de 56 m, de part et d'autre des V formant les tympans pour le passage des crues au-dessus des piles. D'une rare sobriété, cet ouvrage original fut construit par Boussiron. Autre réalisation remarquable, le pont de la RN 7 à Orly, avec son tablier incliné à consoles largement accentuées qui franchit l'autoroute conduisant à l'aéroport. L'ouvrage, terminé en 1959, offre un aspect élégant et audacieux. Le pont Saint-Michel à Toulouse (326 m de long, travées de 62,50 m d'axe en axe), terminé en 1962, fut le dernier grand chantier conduit par Freyssinet. Ses vastes tympans trapézoïdaux, définis par les appuis biais, contribuent grandement à son élégance.

## → Solutions constructives et techniques nouvelles

Comme le béton armé auparavant, la précontrainte permit différentes méthodes de réalisation qui furent utilisées en fonction de la qualité des sites et des programmes, et de la compétence technique des entreprises. Les grands ouvrages des années soixante-soixante-dix procèdent de plusieurs techniques de construction. Ce sont les voussoirs préfabriqués mis en place par encorbellement, à partir des voussoirs de tête situés sur les piles, ou les voussoirs coulés en place, toujours en encorbellement. Là encore, on ne peut donner que quelques exemples parmi les plus importantes réalisations utilisant ce principe.

Premier exemple avec l'immense pont de Savines (924 m), dès 1958-1960, un ouvrage étudié par Jean Courbon qui enjambe le barrage de Serre-Ponçon avec onze travées de 78 m et deux de 38 m. La hauteur des piles creuses de section carrée varie de 15 à 43 m, le tablier étant constitué de voussoirs coulés en place. Le pont du Moulin-à-Poivre près de Brest fut construit selon le même schéma, tout comme le pont de la Pyle sur le barrage de Vouglans (385 m). Le viaduc du Magnan, à Nice, comporte d'impressionnantes piles doubles en H, mesurant 100 m pour la plus haute.

Le pont-viaduc de Gennevilliers, commencé en 1974, fut aussi un ouvrage construit par voussoirs coulés en place. Les piles prennent appui à 40 m de profondeur en moyenne, les travées sur les darses du port et la Seine sont inégales, et la hauteur des voussoirs varie de 9 m aux appuis à 3,50 m aux clés. En région parisienne, le nouveau viaduc de Commelles en forêt de Chantilly, au lieu-dit "Les Étang-de-la-Reine-Blanche", est d'une exceptionnelle qualité. Huit piles

**29. Pont de Langeac, sur l'Allier. 30. Pont de la rue La Fayette, au-dessus des voies de la gare de l'Est, à Paris, mis en service en 1928. 31 et 32. Pont de Luzancy, sur la Marne, conçu par Freyssinet ; l'un des premiers ponts en béton précontraint, mis en service en 1946. 33. Viaduc du Magnan, à Nice, mis en service en 1975 ; l'ouvrage franchit le vallon de Magnan à 110 mètres au-dessus du sol.**





29



30



31



32



33



34



35



36



37



38



39



40



losangées portent les travées de 45 m du tablier rectiligne de 398 m, réalisé avec des voussoirs de 120 tonnes reposant sur d'énormes et élégants chapiteaux biais. Le dessin du viaduc est dû à Jean Doulicier, sa réalisation aux entreprises Bouygues et Bachy. Le pont de Choisy-le-Roi (130 m), réalisé entre 1963 et 1965 en quatre lignes de voussoirs préfabriqués, se distingue par la finesse de son profil absolument plat dessiné par l'architecte Lebreton et réalisé par Campenon-Bernard.

Le pont d'Oléron, premier grand ouvrage maritime de ce type, fut réalisé par Campenon-Bernard en 1964-1966. Quarante-cinq piles portent le tablier de 2 860 m de long sur des travées de largeur variable, le tirant d'air étant de 15 m au centre sur un kilomètre. Un total de 860 voussoirs préfabriqués de 42 à 73 tonnes furent nécessaires. En 1971, les entreprises Dumez et Sacer réalisèrent sur le même principe le pont de Noirmoutier (583 m). Le viaduc de Calix à Caen, étudié par le SETRA et construit par Coignet en 1972-1974, compte quinze travées dont deux de 113 m au centre pour une longueur de 1 108 m. Les voussoirs de tête, très lourds, furent réduits dans leur longueur et segmentés, avec de nombreuses clés pour faciliter l'adhérence.

Le viaduc autoroutier de Cubzac sur la Dordogne, réalisé par Campenon-Bernard en 1972-1974 sur un projet du SETRA, est long de 1 160 m. Les voussoirs préfabriqués présentent ici aussi la particularité d'être à clés multiples, ou encoches à joints conjugués collés, ce qui multiplie les points de contact. Largés de 16,60 m, leur hauteur varie de 2,50 m à 5,50 m, leur poids, de 70 à 90 t.

Autre ouvrage remarquable de ce type, en Alsace cette fois : le pont d'Ottmarsheim sur le canal du Rhin à l'est de Mulhouse. Le projet établi par le SETRA et l'architecte Arzac fut réalisé par Coignet en 1975-1980. Il comprend deux tabliers séparés (430 m), et les caissons ont une hauteur de 9 m sur les piles et de 3 m aux clés.

Le pont de l'île de Ré, étudié par Charles Lavigne et le SETRA, fut mis en service en 1988, après un chantier de vingt mois seulement conduit par l'entreprise Bouygues. L'ouvrage mesure 3 km avec 24 travées de 110 m, celle du centre dégageant un tirant d'eau de 30 m au-dessus de la marée (les voussoirs préfabriqués contribuèrent à la rapidité du chantier).

Autre ouvrage construit par encorbellement de voussoirs préfabriqués, le pont de Bourran à Rodez. Conçu par le SETRA et l'architecte Fraleu, long de 325 m, il franchit la vallée à 60 m de hauteur par cinq travées. On citera aussi le pont de Tanus à Tauriac-de-Naucelle, dans l'Aveyron, sur la RN 88, conçu là encore par le SETRA et Fraleu. Réalisé par Spie Dodin et SOGEA, mis en service en 1991 et long de 572 m avec une portée centrale de 190 m et des piles de 100 m, il fut

## MÉMENTO

### Pas de pétrole, mais des records de portée

- **1974 – Record du monde de portée des ponts à béquilles en béton [à cette date] (pont du Bonhomme à Kervignac, Morbihan) : 186,30 m.**
- **1977 – Record du monde de portée des ponts haubanés en béton [à cette date] (pont de Brotonne à Caudebec-en-Caux, Seine-Maritime) : 320 m.**
- **1980 – Record du monde de portée des ponts en béton précontraint à voussoirs préfabriqués [à cette date] (pont sur le grand canal d'Alsace à Ottmarsheim, Haut-Rhin) : 171,87 m.**

le record de France de portée pour les ponts en béton précontraint. Le viaduc de Nantua, sur l'autoroute A 40, comporte deux tabliers séparés qui épousent le flanc de la montagne. Conçu par Scetauroute en collaboration avec l'architecte Maurice Novarina, le tablier à voussoirs préfabriqués repose sur des piles de section rectangulaire très minces, dégageant le paysage dans lequel l'ouvrage apporte sa monumentalité. Conçu et réalisé par GTM, sa longueur est de 1 003 m. Parmi les illustrations les plus récentes de cette technique figure le viaduc Saint-André sur l'autoroute A 40 avant le tunnel du Fréjus. Composé de 350 voussoirs de 2,20 m à 2,78 m d'épaisseur (en B80) et pesant jusqu'à 125 tonnes, le tablier (903,50 m) repose sur de fortes colonnes cylindriques par l'intermédiaire de larges chapiteaux prismatiques d'un dessin original conçu par Charles Lavigne et le SETEC. Ce viaduc a été réalisé par Bouygues en 2001-2002.

## → Expérimentation technique

Les techniques de réalisation au moyen de cintres autolanceurs avaient été expérimentés par Nicolas Esquillan avec des ponts Bailey lors de la reconstruction du pont de Lyon. Boussiron en a repris le principe, perfectionné, pour le viaduc de la Voulte. Mais ce n'est qu'en 1967 que les entreprises GTM-Boussiron-Spie-Batignolles et Fougerolle achevèrent la mise au point de ces techniques lors de la construction des viaducs de Roquebrune sur l'autoroute de la Côte d'Azur (110 travées de 33 à 40 m). Le viaduc Saint-Agnès, près de Menton, terminé en 1969, fut également construit sur le principe du cintre autolanceur.

La technique des ponts à tablier poussé avait été expérimentée dès la fin du XIX<sup>e</sup> siècle pour les viaducs de chemin de fer. Elle consiste à préfabriquer le tablier sur un emplacement situé en arrière de la culée ou de la pile, et à le pousser à son emplacement définitif au moyen de vérins. Le premier grand ouvrage routier à tablier poussé fut le viaduc de la Boivre, sur l'autoroute A 10, près de Poitiers. Réalisé en 1969-1970, il comprend cinq travées de 285 m de long. Conçu par l'architecte Spielmann et le SETRA, le pont de Roquebillière, à Cahors, fut aussi réalisé de cette façon. L'ouvrage présente des travées d'une

**34. Pont de Choisy-le-Roi**, mis en service en 1965. **35. Pont d'Oléron**, mis en service en 1966 ; le plus long pont de France (2 900 m) à l'époque. **36. Pont d'Ottmarsheim**, au-dessus du grand canal d'Alsace, mis en service en 1980. **37. Viaduc de Poncin**, mis en service en 1986 ; record de France de portée des ponts en béton précontraint à cette époque. **38. Pont de l'île de Ré**, construit par Bouygues en seulement vingt mois, mis en service en 1988. **39. Pont de Roquebillière**, à Cahors, mis en service en 1987. **40. Viaduc de Nantua**, mis en service en 1988.

## MÉMENTO

## Fin de millénaire et nouveaux prodiges

- **1987 – Record du monde de poids d'un tablier poussé [à cette date] (viaduc Jules-Verne à Amiens, Somme) : 15 300 tonnes.**
- **1995 – Record de France de portée des ponts toutes catégories (pont de Normandie à Honfleur, Calvados) : 856 m.**
- **1998 – Record de France de portée des ponts en béton précontraint construits par encorbellement (pont de Tanus à Tauriac-sur-Durance, Vaucluse) : 190 m.**

portée de 110 m, et ses piles sont constituées d'élégants fûts dédoublés. Conçu par Charles Lavigne, le viaduc Jules-Verne, près d'Amiens (943 m de long), réalisé en 1987 par Campenon-Bernard, a été mis en place par poussage. Il sera doublé en 2002 par un ouvrage rigoureusement identique. Dans la même région, le viaduc du Scardon, sur l'autoroute A 16 (1 002 m de long), conçu par Jean-Vincent Berlotier, fut réalisé par Razel. Réalisé en 1989 et conçu par Scetauroute, le viaduc de Charix (542 m de long) est constitué de tabliers poussés, avec précontrainte extérieure ; sur la courbe des neuf travées les piles s'élèvent à 60 m. Le viaduc de la Côtière à Beynost, dans l'Ain, était en 1991, au moment de sa mise en service, le plus long ouvrage ferroviaire en béton précontraint dans le monde : 1 725 m. Construit par GTM, Spie et Citra, il compte 27 travées mises en place par poussage pour la moitié de sa longueur (784 m), par encorbellement pour l'autre moitié.

Bien d'autres ponts considérables furent lancés à la même époque, sur l'autoroute A 40 notamment. Ainsi les doubles viaducs de Sylans (1 266 m) et des Glacières (214 m), dans le Jura, réalisés par Bouygues sous la direction de Pierre Richard, composés de deux tabliers parallèles constitués par un treillis en béton dont les diagonales précontraintes ont été préfabriquées. L'ensemble, qui se distingue par une esthétique architecturale d'une rare élégance, s'intègre parfaitement dans le site.

## → Ouvrages records

Depuis, les techniques de précontrainte n'ont cessé d'évoluer pour une fiabilité accrue des ouvrages et des prouesses techniques sans cesse renouvelées. Citons quelques ouvrages remarquables dans la multitude de ceux qui ont été réalisés.

Le viaduc de Verberie (1 527 m), pour le passage du TGV Nord, procède de la technique des ponts poussés ; réalisé par Dumez et Fougerolle, il compte 33 travées. L'imposant viaduc de Rogerville, sur l'autoroute A 29, en Seine-Maritime, lancé en 1994-1995, procède d'une volonté de recherche architecturale presque métaphorique avec ses piles biaises à profil variable, comme des arc-boutants gothiques. Elles portent les deux tabliers autonomes et

de niveaux décalés. Une poutre centrale repose sur les têtes des piles, les poutrelles biaises en béton armé soutenant les parties en porte-à-faux des tabliers.

Au cours des dernières années, les ouvrages d'art en béton précontraint se sont multipliés sur les nouvelles autoroutes, dans le Massif central notamment (A 75 et A 89), et pour la construction du TGV entre Valence et Marseille. Sur l'A 75, l'ouvrage le plus audacieux et le plus important fut le nouveau pont sur la Truyère, qui franchit la vallée non loin du viaduc de Garabit ; conçu par le SETRA et Michel Virlogeux, avec le concours de l'architecte Alain Spielmann, il a été mis en service en 1993. Construit par GTM-Dumez, c'est un pont à béquilles très élégant avec son tablier de 308 m et une travée centrale de 144 m d'ouverture. Les ponts de l'autoroute A 89 Clermont-Ferrand-Bordeaux présentent tous des caractéristiques innovantes. Le tracé est établi dans une région montagneuse où il rencontre de nombreuses vallées, et les ouvrages d'art y sont multiples. Citons les plus importants : le viaduc des Bergères en Corrèze (282 m) ; le viaduc de la Clidane, près de Bourg-Lastic (540 m), en béton précontraint coulé en place ; le viaduc de Sarsonne, près d'Ussel (218 m), conçu par Charles Lavigne et Alain Montois, et réalisé par SAE.

Le viaduc d'Echinghen, dans le Pas-de-Calais, sur l'A 16, mis en œuvre en 1997, est un ouvrage long de 1 288 m. Les travées du tablier treillis mixte de 5,5 à 8 m de hauteur ont été construites en encorbellement. Les quinze travées reposent sur des piles doubles réunies à leur sommet par une puissante architrave. Conçu par l'architecte Carlier, il a été réalisé par Bouygues.

Le pont du Vecchio, en Haute-Corse, présente une structure très originale : les éléments du caisson constituant le tablier sont ajourés par une savante triangulation des éléments constitutifs, la pointe du triangle étant sous le tablier. La travée centrale de 137,50 m a une hauteur variable des naissances à la clé. Il a été dessiné par l'architecte Berdj Mikaélian et construit par Razel en 1998-1999.

La réalisation de la ligne TGV Sud-Est a été l'un des grands chantiers de la fin du xx<sup>e</sup> siècle, nécessitant près de cinquante ouvrages d'art, dont cinq viaducs exceptionnels – La Grenette, Vernègues, Avignon, Ventabren, Roquemaure –, tous en béton précontraint BHP.

Le viaduc de la Grenette, situé sur une portion comprise entre Valence et Montélimar, mesure 947 m. Son tablier repose sur des piles de grande hauteur – jusqu'à 60 m –, ce qui est exceptionnel pour le TGV. Construit par poussage, il fut conçu par Michel Virlogeux et réalisé par Quillery et Spie Batignolles.

**41 et 42. Viaduc de Sylans et viaduc des Glacières, sur l'A 40, mis en service en 1988. 43. Viaduc de Verberie, sur la ligne TGV Sud-Est, mis en service en 1999.**

**44. Viaduc de Rogerville, sur l'A29, mis en service en 1996. 45. Pont sur la Truyère, mis en service en 1993. 46, 47 et 48. Viaduc de la Clidane, viaduc de Sarsonne et viaduc des Bergères, sur l'A 89 Bordeaux-Clermont-Ferrand, élément de la future grande liaison Est-Ouest ; mis en service en 2000. 49. Pont du Vecchio, en Corse, mis en service en 1999 et voisin d'un autre pont construit par Eiffel. 50. Viaduc de la Grenette, sur la ligne TGV Sud-Est, mis en service en 1999.**





41



42



43



44



45



46



47



48



49



50

**51 et 52. Viaduc de Vernègues et viaduc du Rhône**, sur la ligne TGV Sud-Est, mis en service en 1999. **53. Viaduc de Ventabren**, sur la ligne TGV Sud-Est, mis en service en 1999. **54. Viaduc Saint-André**, sur l'A 40, mis en service en 2000. **55. Pont de Pierrelatte**, premier pont haubané à tablier béton, mis en service en 1952. **56. Pont de Brotonne**, mis en service en 1977 ; record mondial de portée à cette époque. **57. Pont d'Iroise**, mis en service en 1994, voisin du pont Albert-Loupe, à Plougastel. **58. Pont sur le Rhône**, à Beaucaire, mis en service en 1999. **59. Pont de Normandie**, mis en service en 1995, record mondial de portée à cette époque. **60. Viaduc du Chavanon**, mis en service en 2000.

Très spectaculaire, le viaduc du Rhône, à l'ouest d'Avignon, comporte deux tabliers autonomes de 1 500 m de long. Les piles rondes dans le Rhône atteignent 30 m de haut au-dessus du fleuve. L'intrados du tablier est parabolique au voisinage des piles distantes de 100 m, ce qui lui donne un original profil en long, accusé par les puissants chapiteaux en forme de tronc de cône. Conçu par Michel Virlogeux avec l'architecte Blossel, il fut réalisé par GTM et Bouygues Offshore.

Le viaduc de Vernègues, au sud d'Aix-en-Provence (1 210 m), est un ouvrage très complexe : coque courbe, encorbellement sur piles, construction selon la méthode des tabliers poussés.

Très spectaculaire avec ses 1 730 m de long, le viaduc de Ventabren est le plus connu de tous ceux qui furent réalisés pour le TGV. Il comporte 36 piles hexagonales s'évasant en forme de chapiteau, sur lesquelles repose le tablier poussé. La mise en place des travées centrales a été effectuée par rotation. Il a été édifié par Spie-Batignolles, Spie-Citra et Campenon-Bernard.

Le viaduc de Roquemaure, enfin, tient son caractère exceptionnel de ses portées principales d'une longueur de 105 m, une valeur remarquable en matière de viaducs ferroviaires en béton précontraint.

## → Ponts haubanés

Les ponts suspendus contemporains sont relativement rares. On leur a substitué les ponts à haubans. La mise en service du pont de Tancarville en 1959 fut pourtant un événement. L'ouvrage réalisé par Campenon-Bernard et Baudin-Chateauneuf mesure 1 400 m, dont 960 m de tablier métallique en treillis, avec une portée centrale de 608 m. Les pylônes en béton s'élèvent à 123 m.

Le viaduc de Chavanon, à la limite de la Corrèze et du Puy-de-Dôme, inauguré par le M. Jacques Chirac le 3 mars 2000, est l'un des chefs-d'œuvre de l'A 89. Deux pylônes en béton blanc (BHF), en forme de V renversé, hauts de 70 m, portent un double câble central soutenant un tablier mixte de 300 m. C'est le premier pont suspendu réalisé en France depuis trente ans.

Le principe du haubanage fut d'abord utilisé au XIX<sup>e</sup> siècle dans les ponts suspendus pour soulager les câbles. Il sera appliqué par la suite à de nombreux ouvrages qui font intégralement appel au concept de haubanage. Le pont de Pierrelatte, sur le canal de Donzère, à Mondragon, est le premier pont haubané. Réalisé par Caquot et mis en

service en 1952, ce pont de 160 m de long est à l'origine des autres ouvrages modernes de ce type. Le pont de Saint-Nazaire, mis en service en 1975 (3 356 m) avec une travée centrale de 404 m, fut conçu et construit par les entreprises SGE et CFEM. La partie métallique est longue de 720 m. Les pylônes en V de 68 m reposent sur les piles en béton armé et portent 72 haubans en éventail. Les 52 travées des viaducs d'accès ont été réalisées par éléments poussés de 50,70 m.

Le pont de Brotonne, en Normandie, mis en service en 1977, se distingue par sa passe centrale de 50 m de tirant d'air et de 320 m de large. Conçu par Jean Muller, Jacques Mathivat et Auguste Arzac, il présente des mâts en béton ancrés sur des soubassements de 10 m de diamètre fondés à 10 m de profondeur. Ces mâts, encastrés dans le tablier au sommet des piles de 50 m, surmontent ces piles de 70 m, soit une hauteur de 120 m au-dessus de l'eau. Une selle d'appui de 3 m de rayon porte les 21 haubans. Le tablier fut construit par éléments en béton précontraint coulés en place. Sa longueur est de 1 278 m.

Le pont d'Iroise, à Plougastel, mis en service en 1994, double le pont Albert-Loupe, réservé dorénavant aux piétons et aux cyclistes. Conçu par Sogelerg, le SETRA et l'architecte Terzian, construit par Razel, il comporte deux pylônes de 115 m avec un haubanage axial en demi-éventail, le tablier en béton précontraint ayant été mis en place par poussage et par encorbellement pour la passe centrale.

Long de 2 140 m, le pont de Normandie constitue une réalisation exceptionnelle dont la travée centrale mesure 856 m. Conçu par le SETRA, SOFRESID et SOGELERG, sous la direction de Michel Virlogeux et avec le concours de Charles Lavigne, il fut réalisé par un groupement d'entreprises pilotes comprenant Bouygues, Campenon-Bernard, Dumez, GTM, Quillery et SOGEA. Commencé en 1988, il fut inauguré le 22 janvier 1995. Les pylônes en forme de Y, de 206 m de haut, comportent deux jambes de 121 m. Il franchit la Seine avec un tirant d'air de 55 m pour le tablier métallique central de 624 m. Le tablier est soutenu par 184 haubans dont les plus longs mesurent 400 m de long et 168 mm de diamètre.

Le pont sur le Rhône, entre Beaucaire et Tarascon, conçu par le SETRA et CETE Méditerranée avec Michel Virlogeux et Charles Lavigne, construit par Léon Grosse, présente quelques similitudes avec le pont de Bourgogne. Les deux doubles pylônes sont réunis par une architrave et reposent sur des piles qui le doublent sous le tablier. Ils portent deux séries de haubans placés de part et d'autre de la chaussée, tandis que le tablier de 192 m de portée au centre présente une extrême finesse : 0,81 m seulement ! Ce ruban de béton soutenu par les nappes de haubanage est une illustration des constructions les plus récentes en matière d'ouvrages haubanés.

Mais le pont haubané terrestre le plus spectaculaire de France et le plus important du monde est en cours de construction à Millau pour le passage de l'autoroute A 75. Long de 2 500 m, son haubanage sera porté par sept piles en béton dont les deux plus importantes, dans le lit du Tarn, s'élèvent à 370 m. Par son audace, sa grandeur et son élégance, cet ouvrage conçu par l'architecte Norman Foster en 1996 constituera l'un des ouvrages d'art les plus significatifs du début du XXI<sup>e</sup> siècle. ■

TEXTE : MARC GAILLARD

PHOTOS : GUILLAUME MAUCUIT-LECOMTE, ©ALBERT BÉRENGUIER, BERNARD DAVID, DR





51



52



53



54



55



56



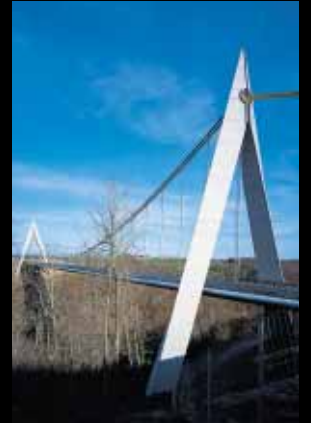
57



58



59



60

