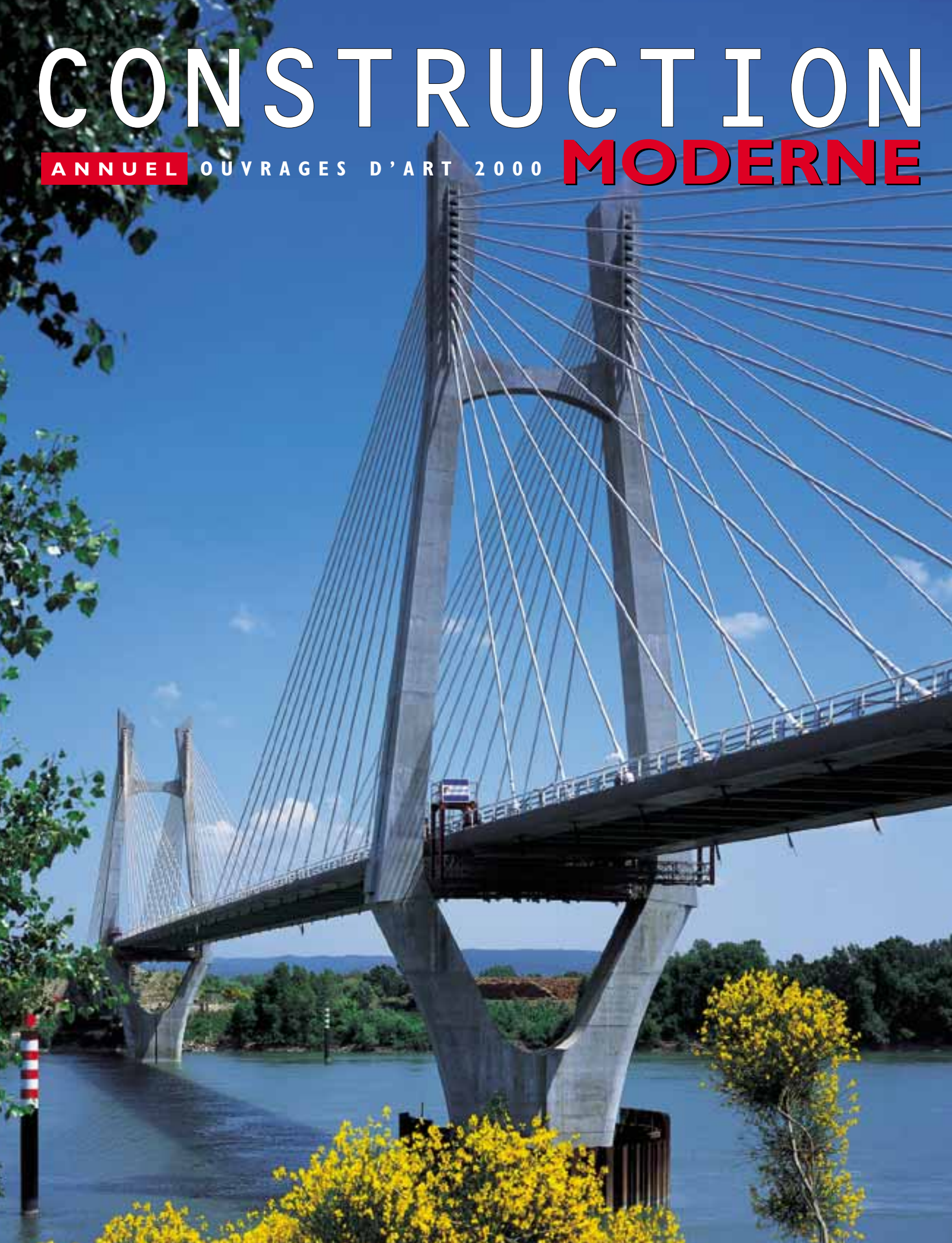


# CONSTRUCTION

ANNUEL

OUVRAGES D'ART 2000

**MODERNE**



# Sommaire – Annuel ouvrages d'art • édition juin 2000

réalisations	ØRESUND – Liaison fixe	PAGES 01 07
	<b>Des travaux d'Hercule</b> entre Suède et Danemark	
	AUTOROUTE A 89	PAGES 08 16
	<b>L'autoroute</b> sous l'emprise du paysage	

>>> En couverture :  
la liaison Beaucaire-Tarascon.

technologies béton	TECHNOLOGIES BÉTON	PAGES 17 24
	• Les éléments préfabriqués • Le béton prêt à l'emploi	

réalisations	EOLE – Ligne de RER	PAGES 25 32
	<b>Eole : symphonie</b> technique en sous-sol	
	LES PONTS HAUBANÉS	PAGES 33 39
	<b>Haubans et dalle mince :</b> la solution du juste milieu	

bloc-notes	• Livres • Forum	PAGE 40
------------	---------------------	------------



Au centre de ce numéro annuel "ouvrages d'art", un encart de quatre pages consacré à dix réalisations récentes qui ont marqué l'actualité du génie civil européen.

## éditorial

**P**résents de longue date dans les pages de *Construction moderne*, les ouvrages d'art connaissent une évolution profonde, et leur dimension comme leur intérêt dépassent maintenant ceux du simple ouvrage de génie civil. Trois raisons essentielles à cela : l'apport des architectes, tout d'abord ; ensuite le souci de plus en plus évident de respecter l'environnement, et enfin – mais ce n'est pas le moins important – l'innovation technique. Une innovation technique qui place désormais les ouvrages d'art, par le niveau de qualité et de sophistication des méthodes et des matériaux employés, à l'avant-garde de la construction. Fidèle à l'esprit de son titre, *Construction moderne* a choisi de se faire l'écho, à travers un numéro spécial désormais annuel, de cette importance grandissante des ouvrages d'art dans ce qui fait la matière même de son propos : l'architecture et la modernité.

**Bernard DARBOIS,**  
directeur de la rédaction

## CONSTRUCTION MODERNE

Revue d'information de l'industrie cimentière française

DIRECTEUR DE LA PUBLICATION : Michael Téménidès  
DIRECTEUR DE LA RÉDACTION : Bernard Darbois  
CONSEILLERS TECHNIQUES :  
Bernard David ; Jean Schumacher

## CIM Béton

CENTRE D'INFORMATION SUR  
LE CIMENT ET SES APPLICATIONS

7, place de la Défense • 92974 Paris-la-Défense Cedex  
Tél. : 01 55 23 01 00 • Fax : 01 55 23 01 10  
• E-mail : [centrifno@cimbeton.asso.fr](mailto:centrifno@cimbeton.asso.fr) •  
• internet : [www.cimbeton.asso.fr](http://www.cimbeton.asso.fr) •

CONCEPTION, RÉDACTION ET RÉALISATION :  
ALTEDIA COMMUNICATION  
5, rue de Milan – 75319 Paris Cedex 09

RÉDACTEUR EN CHEF : Norbert Laurent  
RÉDACTEUR EN CHEF ADJOINT : Pascale Weiler

Pour tout renseignement concernant la rédaction,  
contactez Aurélie Creusat – Tél. : 01 44 91 51 00  
Fax : 01 44 91 51 08 – E-mail : [acreusat@altedia.fr](mailto:acreusat@altedia.fr)



# Des travaux d'Hercule entre Suède et Danemark

●●● UNE LIAISON FIXE ENTRE COPENHAGUE ET MALMÖ, C'EST UN RÊVE VIEUX DE PLUS DE CENT ANS.

IL EST AUJOURD'HUI DEVENU RÉALITÉ. MAIS AVANT SON OUVERTURE À LA CIRCULATION DES VÉHICULES

ET DU CHEMIN DE FER, LE 1<sup>ER</sup> JUILLET PROCHAIN, LE PROJET A D'ABORD ÉTÉ L'UN DES CHANTIERS EUROPÉENS

LES PLUS AMBITIEUX. VITRINE DU SAVOIR-FAIRE EN MATIÈRE DE GÉNIE CIVIL, CE LIEN DE 16 KM MULTIPLIE LES

OUVRAGES : D'OUEST EN EST, SE SUCCÈDENT UN TUNNEL IMMERGÉ, UNE ÎLE ARTIFICIELLE ET ENFIN TROIS PONTS.



**L**e 1<sup>er</sup> juillet 2000, le "lien fixe" entre la Suède et le Danemark sera ouvert au trafic. À l'instar du tunnel sous la Manche, qui a mis fin à l'insularité de la Grande-Bretagne, la liaison du détroit de l'Øresund doit permettre à deux pays très liés par leur histoire d'entrer de plain-pied dans l'Europe. À l'échelon européen, la liaison mixte ferroviaire et routière permettra de relier à pied sec le cap Nord, extrémité septentrionale de l'Europe, à Gibraltar. Mais surtout, elle réduira considéra-

ment les temps de transport entre la Suède et le Danemark : un quart d'heure suffira à l'habitant suédois de la région de Scania pour franchir le bras de mer en direction de Copenhague, au lieu d'une heure par le ferry. Et ce, en préservant les deux chenaux de navigation.

● **Un bénéfice considérable**

Le développement économique attendu de cette liaison fixe est énorme, comparable en tout cas à la formidable expan-

>>> **1** Le pont haut offre un tirant d'air de 55 m au dessus du chenal de Flinterenden, une des deux passes navigables du détroit.

**2** Ses pylônes culminent à 204 m, ce qui en fait un record du genre. **3** Les tabliers des viaducs d'accès et du pont haut se présentent sous la forme de caissons (à structure treillis métallique) dont l'intérieur laisse le passage aux trains, tandis que le hourdis supérieur en béton précontraint supporte la circulation automobile.

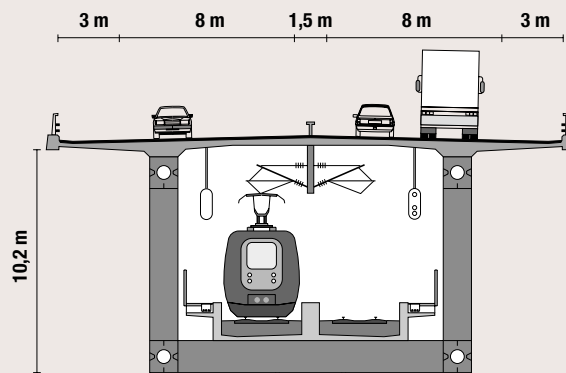
sion qui a saisi Berlin au lendemain de la chute du mur. En faisant disparaître la "fracture" maritime, la liaison devrait contribuer à l'unification d'une région déjà prospère et promise à un avenir plus radieux encore. Forte de 3,5 millions d'habitants, elle s'inscrit par exemple au huitième rang européen par son produit intérieur brut. Mais il y a mieux : alors que la croissance moyenne en Suède et au Danemark pour les cinq prochaines années est estimée à environ 5 %, la région de l'Øresund devrait atteindre le double ! C'est en tout cas le constat établi par les quatre plus grands constructeurs suédois réunis lors d'un récent séminaire. Le trafic attendu est considérable. La dernière estimation de l'exploitant est de 11 800 véhicules/jour la première année, avec une progression de 2 % par an durant vingt ans. L'acquittement du péage paiera l'essentiel des coûts de construction, soit un total de 16,5 milliards de francs.

Mais avant d'être une promesse de prospérité, la liaison aura été une grande réussite technique. Et malgré les incidents inhérents à tous les ouvrages de cette envergure, elle a permis de confirmer la capacité des chercheurs, des ingénieurs et des techniciens de la construction à maîtriser des projets titanesques.

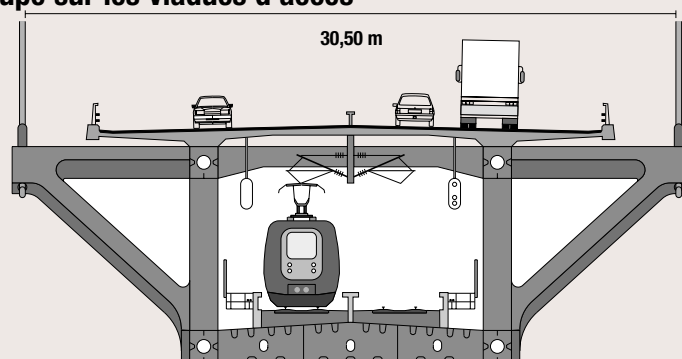
● **Succession d'ouvrages d'art sur 16 kilomètres**

Longue de 16 km, la liaison résulte de la combinaisons de trois chantiers différents. Du Danemark vers la Suède, c'est d'abord un tunnel immergé de 4 050 m qui relie la côte danoise à une mince île artificielle d'une longueur de 4 055 m. Là, les six voies de circulation retrouvent l'air libre pour franchir le reste du détroit via trois ponts successifs (7 845 m au total), doublement mixtes : à la fois ferroviaires (2 voies) et routiers (2 x 2 voies), ils font appel à l'acier et au béton. ■





III Coupe sur les viaducs d'accès



III Coupe sur le pont haut

## Trois ponts pour une liaison mixte

La partie aérienne de la liaison débute sur l'île artificielle construite au sud de l'île de Saltholm. Le viaduc d'accès Ouest, long de 3 014 m, s'élève progressivement jusqu'au pont haut. Ce dernier, un pont à haubans, est sans conteste l'ouvrage le plus impressionnant avec ses pylônes de 204 m de haut. Long de près de 1 100 m, il surplombe le chenal de Flinterenden, une des deux passes navigables du détroit, en laissant un tirant d'air de 55 m. Ce chenal, tout comme celui de Drogden du côté danois, a d'ailleurs joué un rôle déterminant dans les choix techniques. Après 3 740 m, le viaduc d'accès permet de rallier le terminal de Lernaken, au sud de Malmö, en Suède. Les viaducs d'accès Ouest et Est s'appuient respectivement sur 23 et 28 piles monolithiques. Les portées entre appuis sont de 140 m pour les parties centrales, et de 120 m près des côtes. Le pont à haubans, qui prend appui sur deux pylônes en forme de H, présente quant à lui une portée centrale de 490 m. Piles et pylônes sont en béton

armé. La structure du tablier est mixte. En coupe, la poutre treillis métallique présente une forme rectangulaire dont la partie intérieure est destinée au trafic ferroviaire et le "pont" supérieur à la circulation automobile.

### ● La préfabrication, base du principe de construction

Au droit du pont haut, les poutres treillis sont renforcées en partie haute et reprises par des consoles qui fournissent un ancrage et transmettent les efforts de traction des haubans. Les appuis des appareils de voie et la dalle supérieure sont en béton : ils sont coulés à terre et transportés solidairement aux caissons. Compte tenu de la rapidité de l'exécution des ouvrages et des impératifs de qualité à respecter, le groupement constructeur a largement recouru au principe de la préfabrication. À l'exception des deux pylônes, les éléments principaux sont préfabriqués à terre avec des précautions peu communes, sur diffé-

rents sites aux dimensions hors normes. Témoin le site de fabrication principal, implanté au nord de Malmö, qui s'étend sur quelque 1 000 m de longueur et 400 m de largeur. Il regroupe quatre grandes lignes de production : les caissons de fondation, les piles des viaducs d'accès, les supports de voies ferrées et les dalles béton du pont à haubans. Vastes, les dimensions du site sont simplement en rapport avec le nombre et l'envergure des éléments : près de cinquante caissons de fondation ont été coulés, dont les plus importants présentent une hauteur proche de 20 m pour un poids d'environ 3 000 t. Les piles sont encore plus impressionnantes avec quelque 50 m de hauteur pour un poids de 4 000 t. Les caissons sont coulés sur

deux lignes de production, par cycles de 15 jours. Les supports de voies ferrées des viaducs d'accès sont, quant à eux, coulés par sections de 20 m, puis implantés sur les caissons métalliques. D'une longueur de 140 m, ces derniers sont transportés au moyen de deux barges géantes construites spécialement pour assurer leur convoyage depuis Cadix. Le hourdis supérieur des éléments de tablier du pont à haubans est coulé *in situ* sur toute sa longueur (140 m). Pour des raisons de poids, l'épaisseur de la dalle est limitée à 20 cm. Sa résistance est améliorée par une précontrainte transversale. Le parti choisi a été d'utiliser des bétons de résistance courante (35 MPa) mais devant garantir une qualité constante et de haut niveau.

### TECHNIQUE

## Les ponts en chiffres

**Les viaducs d'approche ont consommé 33 000 t d'aciers de renforcement et de 65 000 t d'aciers de structure ; 190 000 m<sup>3</sup> de béton ont été nécessaires, essentiellement pour les fondations et les piles.**

**Le pont haut a nécessité l'emploi de 3 000 t de haubans, de 10 000 t d'aciers de renforcement, de 20 000 t d'aciers de structure et de 70 000 m<sup>3</sup> de béton, là encore affectés principalement à l'érection des fondations et des pylônes.**



1



2

La dalle supérieure du pont à haubans a été coulée sous une tente chauffée afin de garantir un niveau de température et des conditions d'hygrométrie constantes, quel que soit le climat. À l'inverse, les dalles des viaducs d'accès, fabriquées à Cadix, ont été coulées dans un bâtiment climatisé afin de les préserver des fortes températures de l'été espagnol.

#### ● Un contrôle qualité exceptionnel

Avant d'en lancer la production à grande échelle, les éléments ont été testés en vraie grandeur afin de vérifier la cohérence et la fiabilité des principes de formulation et de mise en œuvre (vibration notamment). Une des principales difficultés a résidé dans la protection des ouvrages contre les chlorures, spécialement dans la zone dite des embruns, située entre  $-2$  m et  $+6$  m par rapport au niveau de la mer. Pour éviter la corrosion des armatures, le cahier des charges déterminait une épaisseur de recouvrement minimale des fers de 8 cm. Il requérait également des bétons parfaitement "fermés", et donc exempts de toute fissuration, en particulier au jeune âge (48 h après le coulage). Pour ce faire, les bétons – dont la formulation comprend un entraîneur d'air – ont été

l'objet d'un contrôle de température poussé. Base de ce contrôle, le Temperature Monitoring System a permis de surveiller par informatique les données de températures collectées par des capteurs. Un dispositif d'alarme a même été prévu afin d'alerter l'ingénieur spécialement affecté au contrôle, y compris la nuit sur son ordinateur portable ! Un des points essentiels étant d'éviter des gradients de température trop importants ( $10$  °C maximum) entre la coulée précédente et la coulée en cours (ou entre le cœur et la surface de cette dernière), les bétons "anciens" ont été réchauffés tandis que la coulée en cours était refroidie par circulation d'eau froide dans des canalisations. La société Setec Ingénierie a grandement participé à ces opérations de contrôle et de vérification.

#### ● Dimensionnement "au plus grand"

Les éléments ont été dimensionnés en fonction des moyens de levage et de manutention disponibles. En l'occurrence, des capacités de la plus grande grue au monde, dénommée *Svanen*. Cette dernière, utilisée pour la réalisation du pont de l'île du Prince-Édouard, au Canada, a été rapatriée sur l'Ancien Continent spécialement pour la circonstance. Non sans

#### HISTORIQUE

### Les temps forts de l'Øresund

- 23 mars 1991 : les gouvernements danois et suédois s'accordent pour la construction d'un "lien fixe" dans le détroit de l'Øresund.
- 27 janvier 1992 : création de l'Øresundskonsortiet, maître d'ouvrage de l'opération.
- 1<sup>er</sup> janvier 1993 : six groupements d'entreprises sont sélectionnés pour la compétition en conception-construction.
- 17 juillet 1995 : signature des contrats avec le groupement Øresund Tunnel Contractors et avec Øresund Marine Joint Venture pour les dragages.
- 18 octobre 1995 : commencement des dragages.
- 27 novembre 1995 : signature du contrat avec Sundlink Contractors, chargé de la réalisation du pont à haubans et des ponts d'approche.
- 30 juillet 1997 : lancement de la construction du premier élément de pylône.
- 2 décembre 1997 : lancement de la construction du premier caisson de tunnel immergé.
- 16 juillet 1997 : la grue flottante *Svanen* place la première pile de pont à Lernaken.
- 3 novembre 1997 : remorquage de la première section de tablier depuis Cadix.
- 26 juin 1998 : pose de la première section du tablier du pont à haubans.
- 6 janvier 1999 : mise en place du 20<sup>e</sup> et dernier élément de tunnel.
- 8 mai 1999 : le pylône ouest atteint, trois mois après le pylône est, sa hauteur définitive de 204 m.
- 1<sup>er</sup> juillet 2000 : ouverture de la liaison au trafic.



3



4



5

avoir profité au passage d'une augmentation préalable de ses capacités de levage, portées à 10 000 t sous les câbles et 8 200 t sous l'outil de préhension qui, à lui seul, pèse 1 800 t.

L'érection des viaducs d'accès s'est faite selon une procédure répétitive : les fondations et les piles des deux ouvrages ont suivi une méthodologie de pose répétée ensuite pour les 23 appuis du viaduc Ouest et les 28 appuis du viaduc Est.

### ● Semelle béton en fondation

Les fondations des piles reposent sur le substratum rocheux en calcaire. Le fond du détroit a été dragué pour le nettoyer de ses alluvions et obtenir un fond de fouille suffisamment plan. Une semelle de béton a ensuite été coulée de manière à affiner la planimétrie en fournissant un socle dur, puis les caissons de fondation ont été immergés par la *Svanen* à leur emplacement définitif, à une profondeur maximale de 15 m sous le niveau de la mer.

Des injections de béton ont été effectuées en dessous des caissons afin d'en parfaire l'assise. De plus, l'intérieur des caissons creux – déjà lourds de près de 3 000 t – a été lesté avec du sable afin de garantir leur tenue en cas de choc causé par un navire en perdition. La base de la

pile, qui forme un ensemble monolithique avec le caisson, dépasse en effet de 4 m au-dessus du niveau de la mer. Les piles monolithiques ont, elles aussi, été mises en place au moyen de la grue géante. La liaison entre la base de la pile et le fût principal est assurée par un joint béton, complété par une injection de mortier afin de garantir un parfait remplissage des creux.

Une des opérations les plus spectaculaires a sans doute été la mise en place des fondations des pylônes du pont à haubans. Les caissons, fabriqués dans une forme de radoub du port Nord de Malmö, se présentent comme des ensembles de 40 m x 40 m pour une hauteur de 22 m et un poids unitaire de 20 000 t avant lestage. Les masses ont été soulevées au moyen de 40 vérins de 300 t et tirées jusqu'à leur prise en charge par un catamaran formé de deux barges auxiliaires, à son tour remorqué jusqu'au point d'immersion.

### ● Des pylônes de 204 m par levées de 4 m

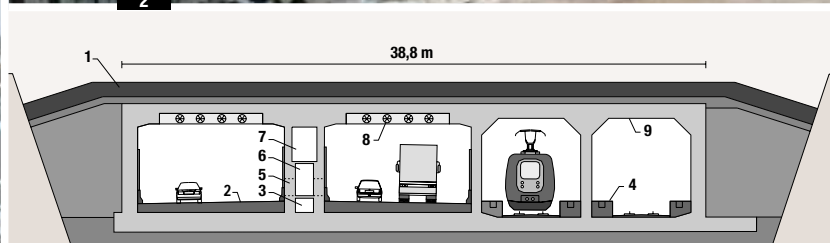
Les pylônes du pont à haubans ont été réalisés *in situ* au moyen d'un coffrage grimpant. L'érection par levées de 4 m suivait des cycles d'une semaine. Les bétons, fabriqués dans une centrale à

>>> **1** Fabriqués à terre, puis immergés en place, ces caissons de fondation seront prêts à recevoir les piles des viaducs d'accès. **2** **3** Les piles sont érigées en toute hauteur sur le site principal de préfabrication puis acheminées jusqu'au quai pour y être chargées par une grue géante. **4** La courbure des viaducs est obtenue par de légers changements d'angle des éléments rectilignes de tablier à chaque pile. **5** Les 160 haubans installés par Freyssinet participent de la tenue d'un tablier particulièrement lourd : 55 400 t pour la seule partie haubanée.

béton installée sur une barge ancrée à proximité du pylône Ouest, étaient acheminés à pied d'œuvre au moyen de ferries contenant 36 m<sup>3</sup> de béton. D'où une course contre la montre, dictée par le souci de répondre aux impératifs de qualité. En effet, l'entreprise ne disposait que de deux heures entre le départ de la centrale et le coulage des bétons. La livraison de ces derniers n'était autorisée que lorsque leur température était inférieure à 25 °C - ce qui a par exemple conduit à refroidir les granulats en été -, mais ils ne pouvaient être mis en œuvre si leur température était inférieure à 20 °C. Leur teneur en air, en eau, leur fluidité étaient aussi systématiquement contrôlées. Malgré tout, les deux premières levées du pylône Ouest présentaient une teneur en air trop importante, et leur résistance n'atteignait que 30 MPa au lieu des

35 MPa requis. Pas question de transiger avec la qualité. Il fut donc décidé de les démanteler par hydro-démolition et d'évacuer les quelque 1 000 t de béton concernées.

Dans leur partie haute, les pylônes incorporent les pièces d'ancrage des haubans, à raison d'une toutes les trois levées. Ces caissons en forme de baignoire permettent d'équilibrer les efforts entre les haubans placés en vis-à-vis. La pose des sections de tablier (6 de 140 m x 30 m et 2 de 120 m x 30 m) s'est déroulée en temps masqué, alors que la partie haute des pylônes était toujours en construction. Le planning, serré, ne souffrait aucun réaménagement. Le chantier a d'ailleurs pu être achevé sans dépassement budgétaire et dans les délais prévus, accomplissant de la sorte un réel exploit pour des travaux de cette envergure. ■



- 1 - Gravier protecteur
- 2 - Ballast en béton
- 3 - Gaine technique/câbles
- 4 - Passage piétons de secours
- 5 - Accès
- 6 - Galerie de secours
- 7 - Galerie de service
- 8 - Ventilation
- 9 - Isolation au feu

## Le plus grand tunnel immergé au monde

La proximité de l'aéroport de Copenhague a conduit à la réalisation d'un tunnel pour le premier tronçon de la liaison. La nature de la roche du détroit de l'Øresund ne se prêtant pas à l'exécution d'un forage, le maître d'ouvrage et le groupement d'entreprises sélectionné ont opté pour un ouvrage immergé. Long de 3,7 km, ce dernier relie la péninsule artificielle de Kastrup, à l'est de Copenhague, à l'île artificielle située au sud de Saltholm.

Le tube accueille sur un même plan les quatre voies de circulation automobile et les deux voies ferroviaires. Il forme ainsi le tunnel immergé le plus grand, par son volume, qui ait jamais été construit. La solution proposée par Øresund Tunnel Contractors – un groupement dans lequel Dumez-GTM a joué un rôle majeur – consiste en l'immersion de sections de 176 m d'un seul tenant. Pour les besoins de la fabrication, ces sections sont elles-mêmes constituées de 8 segments de 22 m et d'un poids unitaire de

6 800 t. La conception même de l'ouvrage est une première. Habituellement, les tunnels immergés sont enserrés par une gaine métallique qui assure leur étanchéité. Ici, les tubes de béton sont immergés directement, ajoutant au gigantisme du projet la contrainte d'une grande précision à toutes les étapes de la réalisation et de la pose. Pour ce faire, le groupement a mis en œuvre une méthodologie originale requérant des installations lourdes.

### ● Préfabrication à l'échelle industrielle

Le groupement a implanté une véritable usine dont la durée de vie était limitée aux cinq années du chantier. L'ensemble du site, sur une surface de 300 000 m<sup>2</sup>, comprenait un hall destiné à la confection des armatures et deux autres dédiés à la confection des segments de tunnel. Les segments étaient assemblés au sortir des deux lignes de fabrication, avant d'être déplacés par sections entières sui-

vant la technique des ponts poussés jusqu'au bassin bas, au niveau de la mer. De là, les sections de 176 m étaient prises en charge par quatre remorqueurs qui les acheminaient jusqu'à l'endroit prévu pour leur immersion. Partie sans doute la moins technique, l'atelier de ferrailage se distinguait par son gabarit hors du commun. Le hangar (260 m x 30 m) permettait de réaliser des cages d'armatures complètes. Une fois assemblées, les

cages étaient levées au moyen d'un outil pneumatique spécialement mis au point pour l'occasion et translattées sur un chemin de roulement jusqu'aux halls de bétonnage. La température de ces derniers était maintenue en permanence entre 11 °C et 24 °C afin de garantir des conditions de bétonnage optimales. La formulation du béton (voir encadré) a été définie de manière à limiter les phénomènes de microfissuration, préjudiciables

### TECHNIQUE

#### Le tunnel en chiffres

La construction des 3,7 km de tunnel a requis l'emploi de 700 000 m<sup>3</sup> de béton, renforcés de 60 000 t de ferrailage. Chaque section de 176 m pèse 55 000 t qui sont mises en "flottaison" dans des bassins contenant 1,2 million de mètres cubes d'eau. Étalé sur 5 ans, le chantier a représenté 3 millions d'heures de travail.

#### Formulation des bétons du tunnel immergé

<b>Ciment</b> : .....	<b>340 kg/m<sup>3</sup></b>	<b>Granulats</b>
<b>Cendres volantes</b> : ..	<b>55 kg/m<sup>3</sup></b>	<b>0/2</b> : .....
<b>Fumées de silice</b> : ...	<b>20 kg/m<sup>3</sup></b>	<b>2/8</b> : .....
<b>Eau</b> : .....	<b>121 kg/m<sup>3</sup></b>	<b>8/16</b> : .....
<b>Retardateur</b> : .....	<b>1 kg/m<sup>3</sup></b>	<b>16/25</b> : .....
<b>Plastifiant</b> : .....	<b>12 kg/m<sup>3</sup></b>	<b>Résistance</b>
<b>Superplastifiant</b> : ..	<b>1,25 kg/m<sup>3</sup></b>	<b>à la compression</b> : ....
		<b>45 MPa</b>





**>>> 1** Le tunnel résulte de l'immersion de sections de 176 m de long. **2** En coupe, il se compose de quatre principaux tubes fonctionnels. **3 4 5** Ferrailage et bétonnage sont effectués dans une usine construite par Dumez-GTM. Pour garantir leur étanchéité, les segments de 6 800 t sont coulés en continu du radier à la dalle supérieure (4), grâce à un coffrage de cinématique complexe (5).

à l'étanchéité de l'ouvrage. L'aspect monolithique des segments participait du même objectif. Chaque segment a été bétonné sans joint, soit 2 600 m<sup>3</sup> de béton (B 45) mis en œuvre en une seule phase sur moins de 30 h. Le coffrage hydraulique géant (1 150 t) destiné à la formation des tubes intérieurs était équipé sur ses faces internes et externes d'appareils de vibration permettant au béton d'atteindre les caractéristiques requises en matière de teneur en air.

#### ● Des segments de 6 800 t manœuvrés en douceur

Le soin apporté à la réalisation des segments s'est étendu à leur translation jusqu'au bassin de "flottaison". Pas question, là encore, de fragiliser les structures durant leur déplacement, au détriment de leur étanchéité, voire de leur pérennité. À mesure qu'avancait leur fabrication, les segments étaient poussés sur un lit de six

longrines fondées sur une maille de près de 1 000 pieux destinée à en assurer la stabilité en dépit de la qualité médiocre du terrain. Durant leur ripage, les segments reposaient sur 288 vérins hydrauliques chargés d'équilibrer les efforts de suspension. Six pousseurs mobiles, d'une puissance globale de 3 000 t, permettaient de déplacer en 3 h les 6 800 t d'un segment. Ces pousseurs étaient alimentés par deux centrales hydrauliques distinctes, de manière à corriger d'éventuelles déviations détectées par des capteurs à roues. Les segments mis bout à bout étaient reliés par des joints secs munis de dés de cisaillement pour limiter les mouvements de rotation. Les huit segments d'une section complète étaient maintenus solidaires par une précontrainte longitudinale provisoire. Une fois les halls de fabrication protégés par la fermeture de la porte coulissante, le bassin était mis en eau, autorisant ainsi la flottaison des sections aux extrémités préalablement

obturées par une cloison étanche. De là, un catamaran formé de quatre barges pouvait les acheminer jusqu'à leur point d'immersion, à une vitesse maximale de 3 nœuds. Le déclenchement d'une opération d'immersion était conditionné par la météo : vagues inférieures à 75 cm, vent inférieur ou égal à 10 m/s, courant inférieur à 1 m/s et visibilité minimale de 500 m. Quant à la mise en place proprement dite, on peut parler de très haute précision.

#### ● Une précision centimétrique

Préalablement à l'immersion, le fond de la souille a été réglé au moyen d'un lit de gravier concassé mis en œuvre avec une tolérance de +/- 25 mm, atteinte grâce à un guidage laser. Le positionnement des sections, quant à lui, a été assuré au centimètre près par GPS (Global Positioning System) et guidage mécanique en complément. Une pièce femelle en forme de V était fixée sur l'élément immergé, afin de guider l'approche de l'élément en cours d'immersion ballasté par l'eau de mer et doté d'une pièce mâle. La jonction s'obtenait *in fine* par la mise en action de treuils longitudinaux permettant d'écraser le joint extérieur en caoutchouc. Ce dernier n'était

définitivement écrasé par la pression de l'eau qu'après vidange de la chambre de jonction et suppression des cloisons d'extrémité.

Garantie de la géométrie finale de l'ouvrage, un dispositif de trois vérins hydrauliques de 500 t implantés sur les voiles extérieurs à proximité du joint autorisait une correction de l'alignement des sections. Un remblai de calage était ensuite réalisé afin d'assurer la tenue des éléments contre les bords de la souille. L'élément lui-même était recouvert d'une couche de 1,5 m de gravier pour le protéger des dommages éventuellement provoqués par une ancre ou le naufrage d'un navire. Enfin, l'ouvrage était définitivement lesté par la réalisation de dalles de béton de chaussée en remplacement du ballastage provisoire.

Reste que l'expérience et la répétition des opérations ont, comme souvent dans ce genre de projet, porté leurs fruits : le temps nécessaire à la production et à la mise en œuvre a été réduit de moitié entre la première et la vingtième et dernière section du tunnel. ■

TEXTE : PHILIPPE MORELLI

PHOTOS : PHOTOTHÈQUES

FREYSSINET/FRANCIS VIGOUROUX ;

DUMEZ - GTM ; PHILIPPE MORELLI



# L'autoroute sous l'emprise du paysage

●●● LE 3 MARS DERNIER, JACQUES CHIRAC, PRÉSIDENT DE LA RÉPUBLIQUE, INAUGURAIT LA PREMIÈRE SECTION DE L'A 89, UN TRONÇON RELIANT USSEL ET LE SANCY, ENTRE CORRÈZE ET PUY-DE-DÔME. IL RENDAIT AINSI HOMMAGE AU PLUS BEL OUVRAGE D'ART DU MOMENT, LE VIADUC DU CHAVANON, ET PAR LÀ MÊME AU SAVOIR-FAIRE DES ENTREPRISES FRANÇAISES. UN SAVOIR-FAIRE QUI A PU S'ILLUSTRER TOUT AU LONG DES 340 KM DU TRACÉ, RELEVANT AINSI LE DÉFI D'UNE INTÉGRATION TRÈS SOIGNÉE À UN PAYSAGE PARFOIS TRÈS ACCIDENTÉ.

L' autoroute A89 Bordeaux-Clermont-Ferrand s'inscrit dans la grande liaison transversale Ouest-Est qui reliera en 2007 la façade Atlantique au centre et à l'est de la France et, au-delà, à l'Europe centrale, via la Suisse et l'Italie. D'après Bernard Val, président d'Autoroutes du sud de la France (ASF), société à laquelle l'État français a concédé l'A 89, cette autoroute constitue un "axe essentiel du désenclavement régional, et l'opportunité de dynamiser les économies des régions concernées en favorisant de nouveaux échanges."

Au total, le maître d'ouvrage aura investi 20 milliards de francs (soit 3 milliards d'euros) sur une dizaine d'années pour la réalisation de cette autoroute, dont 30 % à 50 % auront été réinjectés dans l'économie régionale. De même, ce sont quelque 2 000 emplois directs ou indi-

rects qui auront été créés ou préservés pendant cette période, selon les estimations d'ASF. Un chiffre auquel il faut encore ajouter les 500 emplois permanents nécessaires à l'exploitation de l'autoroute.

### ● Diversité des paysages et des reliefs

Longue de 340 kilomètres, l'A 89 devrait connaître à terme un trafic de l'ordre de 10 000 véhicules par jour. D'ouest en est, son tracé débute à Arveyres (Libourne Ouest) pour se terminer à Combronde (avec un raccordement à l'A 71 qui relie Paris à Clermont-Ferrand), soit un total de quatre départements traversés (la Gironde, la Dordogne, la Corrèze et le Puy-de-Dôme). Ponctuée d'une trentaine de viaducs, l'autoroute rencontre une grande diversité de sites

## HISTORIQUE

### Les dates-clés

- 18 mars 1988 : inscription de l'A 89 au schéma directeur routier national.
- 7 février 1992 : décret de concession à ASF.
- 10 janvier 1996 : déclaration d'utilité publique de la section Libourne – Le Sancy.
- Décembre 1996 : début des travaux.
- 9 janvier 1998 : déclaration d'utilité publique de la section Le Sancy – Combronde.
- 3 mars 2000 : inauguration par Jacques Chirac de la section Usseil Ouest – Le Sancy.
- Printemps 2002 : mise en service de Tulle Est – Usseil Ouest.
- 2007 : ouverture des sections restantes.





géographiques, avec des topographies variées qui s'enchaînent depuis la plaine étendue du bassin aquitain jusqu'au pied des volcans d'Auvergne en passant par les massifs élevés du Limousin sud.

● **Réduire au minimum l'impact environnemental**

L'objectif premier du programme était de minimiser l'impact sur l'eau, le milieu vivant, le patrimoine culturel, le paysage, l'agriculture, tout en maîtrisant le bruit engendré par le trafic et les nuisances générées durant le chantier. Pour cela, des ingénieurs, des techniciens, des économistes, des paysagistes, des sociologues, des écologues, des spécialistes de la faune et de la flore, et parfois même des archéologues, ont travaillé de concert, en relation avec les associations d'usagers et de protection de l'environnement, afin de parvenir au meilleur compromis.

"Les nouvelles exigences auxquelles nous avons été confrontés sur l'A 89 ont été l'abaissement des seuils de bruit, conséquence de la loi de décembre 1992, et les contraintes de 'transparence hydraulique' imposées par la loi sur l'eau, résume Alain

Robillard, directeur général adjoint d'ASF, chargé de la construction. *Cette seconde catégorie de contraintes a eu beaucoup de répercussions sur le tracé et la conception des ouvrages d'art, en particulier pour la section comprise entre Bordeaux et Libourne.* Très plane, cette région présente un risque d'inondation élevé, témoin les événements malheureux de décembre 1999. Or, pour éviter des vignobles prestigieux dont ceux du Libournais, l'autoroute emprunte précisément la vallée de l'Isle, secteur de la plaine alluviale de l'Isle et de la Dordogne.

● **Surmonter les contraintes topographiques**

Selon les engagements de l'État, l'autoroute et ses ouvrages ne devaient pas accroître le niveau de l'eau lors des crues centennales de plus de 2 cm dans les zones habitées, et de plus de 5 cm pour le reste des zones inondables. Une contrainte qui a directement influencé la conception du viaduc des Barrails, et notamment le profil des piles. "Les crues centennales sont de 2 m, soit une élévation du niveau de seulement 1 à 2,5 %, précise Alain Robillard. Pour modéliser

>>> 1 2 **Francir des grands obstacles naturels, limiter**

**l'impact sur l'environnement : 2 contraintes respectées par les ouvrages de l'A 89 (ici, les viaducs de la Clidane et de la Barricade).**

3 **Les entreprises ont mis en œuvre des moyens de chantiers originaux. Exemple, le mât de haubannage utilisé sur le viaduc des Barrails, qui a permis de réaliser les travées au rythme d'une par semaine.** 4 **La section courbe des piles du viaduc des Barrails permet de respecter les contraintes hydrauliques.**

*l'impact hydraulique de l'autoroute entre Arveyres et Saint-Denis-de-Pile, deux communes du département de la Gironde, nous avons dû réaliser une maquette du site de la taille d'un terrain de football. Couplée à un modèle mathématique, elle a fonctionné pendant 4 jours avant de fournir les résultats de chaque simulation.* "Un outil qui a fait ses preuves, si l'on en juge par l'absence d'impact lié à la présence du viaduc des Barrails sur les crues de fin d'année.

Contrairement à ce que l'on pourrait penser, les ouvrages d'art de l'A 89 répondent avant tout à des contraintes topographiques propres à un tracé transversal qui ne suit pas les axes naturels matérialisés par les vallées. "À partir de Périgueux, les zones traversées sont très accidentées, reprend Alain Robillard. Si des viaducs comme ceux du Chavanon,

*de la Barricade ou de la Clidane frappent l'imagination, c'est avant tout parce qu'ils doivent franchir des brèches ou des gorges, situations auxquelles les autoroutes ne sont que rarement confrontées."*

● **La solution : grandes portées et matériau béton**

Combinées à la nécessité de minimiser l'impact sur la faune, la flore et le paysage (le tracé traverse de nombreuses ZNIEFF\*), ces contraintes ont amené le maître d'ouvrage à favoriser une certaine typologie d'ouvrages : des viaducs avec un nombre restreint d'appuis au sol, donc de grande portée, ce qui explique la fréquence des ouvrages exceptionnels.

"La solution du béton s'est imposée \* Zone naturelle d'intérêt écologique faunistique et floristique.



3



4

pour la réalisation de la plupart des ouvrages, poursuit Alain Robillard. Ce matériau permet de réaliser des tabliers à inertie variable qui offrent de grandes portées, avec un nombre de piles limité, tout en demeurant dans le cadre des contraintes budgétaires."

### ● Des ouvrages d'art économiques à l'usage

Autre facteur d'économie souligné par le directeur général adjoint des Autoroutes du sud de la France, la faible exigence du béton en matière de dépenses d'entretien, contrairement au métal. Ramené à une durée de vie d'un siècle, cet avantage prend toute sa valeur. Une économie qui n'exclut ni la prouesse technique ni les qualités esthétiques. "Les ouvrages dans leur ensemble font appel à des technologies avancées, notamment des bétons hautes performances, dont l'aspect a été particulièrement soigné, complète Jean-Marc Tanis, directeur général de Jean Muller International (JMI) et directeur du département ouvrages d'art de Scetauroute, intervenu en tant que maître d'œuvre et concepteur des viaducs. " Par leurs choix, les Autoroutes du sud de la France ont favo-

risé l'innovation technique." Jean-Marc Tanis donne même une dimension plus large à son propos : "Les ouvrages d'art de l'A 89 traduisent, en ces temps symboliques marqués par l'année 2000, l'expression la plus achevée en matière d'art de l'ingénieur et d'architecture appliqués aux grands ouvrages. Elle a demandé une réflexion approfondie pour les phases de conception, tant du point de vue technique que de l'intégration à l'environnement." Résultat : des réalisations hors du commun, comme le viaduc du Chavanon, la "vedette" de l'A 89, ou encore le viaduc de Tulle, impressionnant par sa hauteur.

### ● L'A 89, une vitrine de la technologie française

Ces ouvrages d'art, au sens littéral du terme, sont l'expression du degré de compétence exceptionnel des bureaux d'études et des entreprises de travaux publics français. Il faut d'ailleurs rendre hommage au maître d'ouvrage qui n'a pas hésité à participer au risque résultant du choix délibéré de l'innovation, et qui a ainsi offert à la technologie française une "vitrine" dont l'impact a déjà dépassé nos frontières. ■

## → Le viaduc des Barrails : le plus long

Édifié sur la section libournaise de l'A 89 à Arveyres, à l'intérieur d'un méandre de la Dordogne, le viaduc des Barrails assure le franchissement de la RN 2089 et de la voie de chemin de fer Paris-Bordeaux, elle-même bâtie sur un viaduc, dit des "Cent Arches".

Composé de deux tabliers parallèles larges de 11 m portant chacun deux voies de circulation de 3,5 m, l'ouvrage est peu élevé (16 m au maximum). En revanche, le viaduc des Barrails détient le record de longueur des ouvrages d'art de l'autoroute A 89 : 1 460 m. Un chiffre qui explique le nombre important de voussoirs préfabriqués (1 038). D'un poids compris entre 43 et 50 t, ces voussoirs ont été mis en place de façon originale à l'aide d'un mât de haubanage provisoire. Cette méthode de pose très rapide a permis d'atteindre la cadence d'une travée par semaine (34 travées au total, d'une longueur comprise entre 28 m et 50 m). Ce rythme permettra d'assurer la livraison du viaduc en juillet 2000, après 29 mois de travaux (y compris terrassements et réalisation des remblais). Un soin parti-

culier à été apporté à la finition des piles en béton, habillées d'un parement de béton préfabriqué de couleur sable. De section courbe, elles respectent les contraintes hydrauliques, l'objectif étant de ne pas entraver l'écoulement de l'eau en cas d'inondation engendrée par la crue de la rivière.

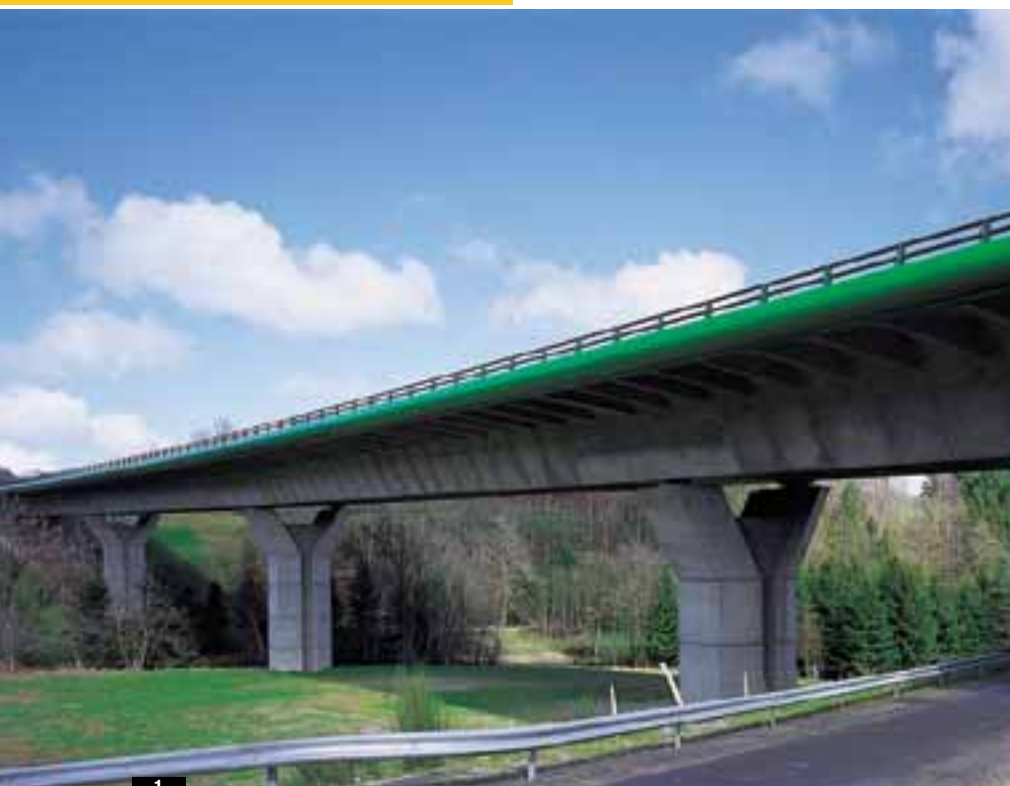
Reste que la principale difficulté du chantier aura été la pose de la travée surplombant la voie SNCF, menée durant les rares plages horaires "hors trains" disponibles sur cette ligne ferroviaire à fort trafic. ■

**Maîtrise d'œuvre :**  
Scetauroute – Jean Muller  
International

**Architecte :**  
Berdj Miakaelian

**Entreprises :**  
Campenon Bernard SGE,  
Campenon Bernard Ouest,  
Quillery

**Coût :**  
217 MF HT  
33 millions d'euros



1



2

## → Viaduc de Tulle : une courbe en suspension

Ce sera un ruban de béton de 19,50 m de large et de 850 m de long, juché sur des piles culminant à 150 m. À cheval sur les communes d'Angles et de Naves, il enjambera la vallée de la Corrèze d'un pas de géant grâce à des travées qui atteignent 186 m. Actuellement en phase de démarrage, cet ouvrage, malgré des dimensions qui frisent le record, se veut discret, voire "transparent" : les piles dédoublées dégagent un jour important (15 m), et le tablier monocaïsson en béton précontraint affiche une hauteur variable de 10 m au niveau des appuis à seulement 4 m entre les piles. Jouant avec la lumière, la section creuse en demi-olive des deux piles centrales fait écho au tracé entièrement courbe (rayon en plan de 1 350 m), qui offrira aux automobilistes la plus belle perspective sur le viaduc. Conséquence de cette courbure : l'ouvrage a dû être calculé à l'aide d'un modèle tridimensionnel aux éléments finis. La grande hauteur et le profil particulier des piles a justifié, pour apprécier la stabilité aéroélastique de l'ouvrage, une étude de comportement aux vents turbu-

lents. Une maquette a été réalisée afin de mener des tests en soufflerie, dont les résultats ont alimenté les programmes de calcul. Construit en BHP (B 60) par encorbellements successifs, le tablier du viaduc de Tulle demandera aux entreprises de maîtriser une flèche importante (30 cm) engendrée par des porte-à-faux de 90 m. Il sera achevé au printemps 2003, au terme de 34 mois de travaux. L'ouvrage sera le plus remarquable et le plus remarqué de l'A 89... après le viaduc du Chavanon. ■

**Maîtrise d'œuvre :**  
Scetauroute

**Concepteur :**  
Jean Muller International

**Architecte :**  
Charles Lavigne

**Entreprises :**  
GTM, Chantiers Modernes,  
Fougerolles-Borie

**Coût :**  
**210 MF HT**  
**32 millions d'euros**

## → La Sarsonne : grande largeur et dévers de 4 %

Situé entre Ussel et Saint Exupéry-les-Roches, en Corrèze, le viaduc de la Sarsonne est un ouvrage de 218 m de long pour 23 m de large qui permet la circulation de deux voies descendantes et de trois voies montantes. Constitué de 68 voussoirs courants de 2,55 m de longueur et de trois voussoirs sur piles (hauteur de 15 à 18 m), le tablier de type monocaïsson à hauteur constante comprend quatre travées de 42, 60, 64 et 52 m. Il est précontraint longitudinalement (précontrainte interne et externe) et transversalement à l'aide d'un câble placé à chaque jonction (tous les 2,55 m), du fait de l'importante largeur de chaussée.

Le profil en long est incliné de 3,65 %, avec une pente transversale de 4 %, un dévers imposé par la courbure du tracé (rayon de 1 150 m), afin d'éviter le village d'Enraygues. L'inclinaison est obtenue par l'utilisation de chevêtres en V asymétriques. La technique de construction par encorbellements a permis de ne pas utiliser un échafaudage reposant sur le sol, préservant ainsi le ruisseau et ses

bordures arborées. L'utilisation du béton précontraint présente l'avantage d'alléger les structures et de limiter le nombre des piles, ce qui facilite l'intégration de l'ouvrage dans le paysage.

Un volume de 6 700 m<sup>3</sup> de béton a été coulé sur le chantier, qui s'est étalé sur 18 mois. Les délais ont été respectés grâce à l'emploi de superplastifiants nouvelle génération accélérant la montée en résistance du béton, qui ont permis de décoffrer 20 heures après le coulage au lieu de 36 heures. ■

**Maîtrise d'œuvre :**  
Scetauroute

**Architectes :**  
Charles Lavigne et Alain Montois

**Concepteur :**  
SEEE

**Entreprise :**  
ETPO

**Coût :**  
**40 MF HT**  
**6,1 millions d'euros**



3



4

## → Les Bergères : une portée exceptionnelle pour un viaduc poussé

Édifié sur une brèche d'une profondeur de l'ordre de 40 m, sur le territoire de la commune d'Aix, dans le département de la Corrèze, le viaduc des Bergères est l'unique ouvrage poussé de la section Ussel-Le Sancy. Mais ce n'est pas là son unique particularité, puisqu'il présente aussi une courbure très importante, d'un rayon de 1 300 m.

Chacune des quatre piles – la plus haute culmine à 33 m – repose sur une semelle superficielle ancrée sur un massif de 30 micropieux. Quant au tablier de l'ouvrage, long de 282 m pour une largeur de 20 m, il se compose de cinq travées d'une longueur comprise entre 42,5 m et 65 m. Ce tablier est constitué de voussoirs à inertie constante (4 m de hauteur) poussés par tronçons de 13 m au fur et à mesure que s'effectuait leur coulage au sol, à l'aide d'un avant-bec de 40 m. *"C'était la première fois qu'un caisson pesant plus de 35 t/m franchissait une portée de 65 m avec un avant-bec de cette dimension"*, précise Bernard Souchon, directeur du chantier. Une solution choisie pour éviter les appuis provisoires,

susceptibles de dégrader l'environnement. Pousser un tel tablier n'était donc pas un mince exploit technique, surtout quand on sait que le rapport entre la longueur de l'outil et celle des travées est considéré comme la limite technique actuelle... À la fin du chantier, ce sont 10 400 t qui ont été déplacées, avec un effort de 700 t au décollage. Notons encore – pour l'anecdote – qu'afin de faciliter le glissement du tablier, il a été fait appel à des plaques de téflon lubrifiées avec... du produit vaisselle. ■

**Maîtrise d'œuvre :**  
Scetauroute

**Architecte :**  
Philippe Loupiac (Atelier 13).

**Entreprise :**  
Sogea, Croiset-Pourty, Rogard

**Durée du chantier :**  
20 mois

**Coût :**  
50 MF HT  
7,6 millions d'euros

>>> **1** Sur le viaduc de la Sarsonne, l'utilisation de superplastifiants de nouvelle génération a permis de décoffrer le béton 20 h après le coulage. **2** Les chevêtres en V asymétriques du viaduc de la Sarsonne permettent d'obtenir un dévers nécessaire pour respecter la courbure du tracé, d'un rayon de 1 150 m. **3** Pour le viaduc des Bergères, le choix d'un tablier mis en œuvre par poussage a permis de coffrer le tablier au sol, pour assurer une qualité de réalisation exceptionnelle et limiter l'impact sur le milieu naturel de la brèche, les travaux se déroulant en altitude. **4** Du fait du porte-à-faux important pendant le poussage, le tablier en béton du viaduc des Bergères a été renforcé par une précontrainte provisoire qui lui a permis de supporter son propre poids.



1



2

>>> **1** La formulation du béton des deux piles centrales du viaduc de la Barricade en “double voile” a permis de concilier finesse, résistance et qualité de parement. **2** Edifié sur 5 piles afin de préserver la vue sur le paysage, le viaduc de la Clidane surplombe de 80 m le fond du vallon. **3** **4** Un tablier à suspension axiale et des piles en V renversé, d’une exceptionnelle qualité de parements, confèrent au viaduc du Chavanon une extrême légèreté visuelle.

## → Viaduc de la Barricade : une travée centrale de 150 m

Situé entre les communes d’Aix et de Merlines, en Corrèze, le viaduc de la Barricade empreinte son nom à un ruisseau situé 80 m en contrebas. Proche du viaduc de la Clidane de par l’utilisation de piles en double voile et de fléaux à épaisseur variable, cet ouvrage est moins long (420 m). Les piles ont été construites par levées de 4,20 m à l’aide d’un coffrage grim pant. Quatre travées (60 m, 110 m, 150 m et 100 m) composent le tablier, un monocaïsson de béton précontraint de 20 m de large réalisé par encorbellement à partir des voussoirs sur piles, à l’aide d’équipages mobiles. À noter, les voussoirs des piles centrales ont été coulés en continuité de la pile où ils sont encastrés. Une faille importante rencontrée lors des

travaux a nécessité de purger le terrain, tandis que les fondations des piles (4 ou 6 m de diamètre) étaient portées de 10 à 22 m. Le chantier a duré 26 mois. ■

**Maîtrise d’œuvre :**  
Scetauroute

**Concepteur :**  
SEEE

**Architectes :**  
Charles Lavigne et Alain Montois

**Entreprises :**  
Demathieu et Bard

**Coût :**  
80 MF HT  
12,2 millions d’euros

## → Viaduc de la Clidane : transparence et légèreté

Situé entre les communes de Messeix et de Bourg-Lastic, dans le département du Puy-de-Dôme, à quelques kilomètres à l’ouest de l’échangeur du Sancy, le viaduc de la Clidane surplombe de 80 m le fond du vallon éponyme. Outre le ruisseau, l’ouvrage enjambe aussi la voie ferrée reliant Bordeaux à Clermont-Ferrand. Quant au dessin de ce viaduc, c’est le respect du site boisé, partie intégrante d’une zone naturelle d’intérêt écologique faunistique et floristique (ZNIEFF de type 1), qui a motivé le choix d’une solution sobre, simple, et avant tout discrète.

Long de 540 m et large de 20 m, le tablier à épaisseur variable est un monocaïsson en béton précontraint coulé en place qui présente un rayon de courbure constant de 2 500 m, édifié par encorbellements successifs sur cinq piles seulement, afin de dégager au maximum le paysage (six travées de 43 m, 86 m, 132 m, 112 m, 92 m et 74 m).

Hautes de 70 m, les deux piles centrales occupent une emprise au sol de 11 m par 7 m. Elles ont été conçues sur un

principe de “double voile” (1,50 m d’épaisseur) qui allie finesse et élancement, moyennant une composition du béton particulièrement élaborée. La formule a été stabilisée et le rapport eau/ciment diminué grâce à un superplastifiant de nouvelle génération. Autre avantage, l’obtention d’une bonne régularité de la qualité esthétique des parements. Malgré la légèreté apparente de l’ouvrage, 20 100 m<sup>3</sup> de béton auront été nécessaires à sa réalisation, menée en 26 mois. ■

**Maîtrise d’œuvre :**  
Setec TPI

**Concepteur :**  
SEEE

**Architectes :**  
Charles Lavigne et Alain Montois

**Entreprises :**  
Spie Batignolles, Nord France,  
Spie Citra

**Coût :**  
110 MF HT  
16,8 millions d’euros





3



4

## Viaduc du Chavanon : un pont emblématique entre le Limousin et l'Auvergne

**P**remier pont suspendu édifié en France depuis trente ans, le viaduc du Chavanon, mis en service le 4 mars dernier, est l'ouvrage phare de l'A 89. Pour marquer le 2 000<sup>e</sup> kilomètre d'autoroute construit par ASF, mais aussi pour souligner le passage entre le Limousin et l'Auvergne, le maître d'ouvrage s'est offert un viaduc exceptionnel, qui marquera incontestablement son époque. Ses armes : une architecture novatrice faisant appel à une suspension axiale, et une exigence de finition hors du commun.

### ● Un modèle de viaduc

Vitrine technologique offerte à l'ingénierie française, ce viaduc est aussi un vecteur d'image pour le maître d'ouvrage, désireux d'offrir aux usagers une vision de l'autoroute fondée sur de nouvelles valeurs autres que le strict fonctionnel.

Un pari plus que réussi : à la fois majestueux, élégant et original, l'ouvrage fait preuve d'une réelle transparence, et répond donc au souci de limiter l'impact de l'autoroute sur la vallée sauvage du Chavanon, classée ZNIEFF.

### ● Suspension axiale et dalle béton

Cette apparence de légèreté est le résultat du choix effectué par Jean Muller International, concepteur de l'ouvrage, d'un pont suspendu de 360 m de long et de 300 m de portée, avec un tablier droit accroché non pas latéralement, mais en partie centrale. Cette solution a été retenue pour sa capacité d'intégration au site, sur le plan esthétique comme sur le plan technique, les massifs d'ancrage des câbles porteurs offrant la possibilité de se fixer au rocher (roche métamorphique de bonne qualité), moyennant d'impression-

nants massifs de fondation rayonnants en béton qui reprennent 12 000 t (poutre curviligne en béton ancrée au sol par 43 tirants enracinés à 50 m de profondeur). Autre atout, la double suspension

axiale, constituée de 122 torons, offre aux automobilistes une vue dégagée sur la vallée ; en contrepartie, elle a exigé du tablier, très large (22 m), une rigidité suffisante pour résister aux efforts de

### TECHNIQUE

### Un parement beau comme un marbre poli

*“La volonté du maître d'ouvrage d'obtenir une géométrie et une finition parfaites a déterminé la méthode de mise en œuvre des pylônes : un béton coulé dans un parement en béton préfabriqué poli servant de coffrage perdu. En termes d'aspect, le résultat est proche de la perfection. Il tient au soin remarquable apporté par le préfabricant, qui a mis au point une technique de moule ‘vrillable’ répondant à la géométrie complexe des piles. Chaque élément présente un aspect splendide, résultat d'un polissage en sept passes. L'arrondi dans les angles est parfait, ainsi que le traitement des joints. Lorsque l'on est au pied du viaduc, on ne peut s'empêcher de le caresser, comme une colonne de marbre antique. Ce matériau est très sensuel.”*

**Jean-Vincent Berlotier**, architecte



1



2

>>> ■ 1 Réalisé sur la rive, le tablier a été “lancé” à l’aide de suspentes successives. Le maintien de sa stabilité latérale a été assuré par 2 appuis arrière. ■ 2 Montés sur une ossature métallique, les panneaux de béton préfabriqués de la “pointe” du pylône peuvent se démonter pour faciliter la maintenance de la double suspension.

torsion. C’est pourquoi l’acier a été écarté, au profit d’un monocoisson mixte faisant appel à une dalle de béton B 40 de 22 cm d’épaisseur, précontrainte transversalement. Cette dalle a été coulée selon un phasage très étudié pour ne pas imposer d’efforts trop importants à la charpente métallique. “La mise en œuvre du béton et des superstructures a provoqué un abaissement du tablier de 2,70 m, valeur qui correspondait à quelques centimètres près à nos calculs”, souligne Alain Palacci, de GTM Construction.

### ● Les pylônes, éléments-clés

Le choix de la suspension a conditionné la forme générale des pylônes, pièces monumentales en forme de V renversé d’une hauteur de 70 m. La section des jambes évolue en fonction de la hauteur : c’est un triangle isocèle dont la base et la hauteur varient respectivement de 4,40 m et 5,20 m en tête à 8,50 m et 2 m en pied. “J’ai proposé une forme vrillée en réponse à une exigence structurelle, à l’image des os du corps qui permettent de transférer des efforts d’une direction à une autre”, explique l’architecte Jean-Vincent Berlottier. Cette géométrie assure une transition entre une

orientation longitudinale au sol, parallèle au tablier, et une orientation transversale en tête, nécessaire à la reprise des efforts de la suspension.” Ingénieur et projecteurs ont calculé chaque élément de coque pour obtenir un parfait paraboloïde hyperbolique.

### ● Une œuvre collective

Bien qu’innovante, la conception du viaduc du Chavanon s’est appuyée sur l’expérience des nombreux partenaires : concepteur, architecte et entreprises.

“Nous avons utilisé un logiciel développé pour la réparation du pont de Tancarville”, explique Alain Palacci. Dans un même ordre d’idées, la technologie de la suspension du stade de France fait appel à des outils et des méthodes similaires.” Il n’est donc pas étonnant que l’ouvrage fasse l’unanimité, et qu’il soit si abouti. “Si j’avais à le refaire, je ferais exactement les mêmes choix”, conclut Jean-Vincent Berlottier. ■

TEXTE : JEAN-PHILIPPE BONDY

PHOTOS : GUILLAUME MAUCUIT-LECOMTE ; ASF/MICHEL GARNIER

### TECHNIQUE

## Des butons actifs pour compenser le poids des pylônes

**“Contrairement à une pile normale, les jambes des pylônes du viaduc du Chavanon sont inclinées. À mesure qu’on coulait le béton B 60, l’augmentation de masse engendrait une force transversale de plus en plus élevée. Il était donc impossible de maintenir l’écartement initial des jambes avec des butons classiques. Nous avons donc opté pour des butons horizontaux actifs équipés de vérins, espacés verticalement de 5 m, qui permettaient de réagir dynamiquement aux variations d’effort, et donc de conserver la position angulaire (20°) avec une extrême précision.”**

**Alain Palacci**, directeur du bureau d’études de GTM Construction



### CHIFFRES-CLÉS

10 000 m<sup>3</sup> de béton

1 000 t d’acier passif

740 t pour la suspension

140 000 h de travail

210 MF HT

(32 millions d’euros)

**Maître d’ouvrage :**  
Autoroutes du sud de la France

**Maîtrise d’œuvre :**  
Scetauroute, Jean Muller International

**Concepteur :**  
Jean Muller International

**Architecte :**  
Jean-Vincent Berlottier

**Préfabricant :**  
Morin Système Architectonique

**Entreprises :**  
GTM, Cimolai, Baudin Châteauneuf

# technologies

## Les éléments préfabriqués

●●● LES ÉLÉMENTS EN BÉTON PRÉFABRIQUÉS ENTRENT DE PLUS EN PLUS MASSIVEMENT DANS LA CONCEPTION DES OUVRAGES D'ART. UN SUCCÈS QUI S'EXPLIQUE POUR PLUSIEURS RAISONS, LIÉES À LA COMPÉTITIVITÉ ET À LA SIMPLICITÉ DE MISE EN ŒUVRE D'UNE TECHNIQUE TRÈS AU POINT.

## Le béton prêt à l'emploi

●●● AUTRE VOLET DE L'OFFRE BÉTON EN MATIÈRE D'OUVRAGES D'ART, LE BÉTON PRÊT À L'EMPLOI FAIT ACTUELLEMENT LA PREUVE DE SES QUALITÉS SUR L'UN DE NOS CHANTIERS AUTOROUTIERS. LES PROCÉDURES DE RÉALISATION EXTRÊMEMENT RIGOUREUSES MISES EN PLACE PAR LES DIFFÉRENTS OPÉRATEURS SONT LA GARANTIE DU SUCCÈS DE CETTE TECHNIQUE D'AVENIR.



## → De la **préfabrication** dans les tabliers de **ponts**

**LA TECHNIQUE DU BÉTON PRÉFABRIQUÉ EST DÉJÀ BIEN CONNUE. MAIS SES PROGRÈS SONT PERMANENTS, ET SON OFFRE DANS LE DOMAINE DES PONTS, ROUTIERS OU FERROVIAIRES, SE FAIT TOUJOURS PLUS PERTINENTE. SES ATOUTS MAÎTRES : PERFORMANCES, FACILITÉ ET RAPIDITÉ DE MISE EN ŒUVRE, ÉCONOMIE.**

**C**'est juste après la guerre, durant les années de la reconstruction (1945-1955), que se mettent en place les premiers procédés d'industrialisation. Le bâtiment, secteur alors en expansion rapide, en est le premier bénéficiaire. Au début des années soixante, lors du lancement du programme autoroutier français, l'administration est amenée à établir une typologie des ponts destinés au rétablissement des voies de communication "coupées" par la construction des autoroutes. Cette typologie va permettre la recherche d'une certaine standardisation des études – voire d'une industrialisation –, favoriser l'utilisation des possibilités offertes par l'informatique, développer la transformation des techniques de conception et de construction pour augmenter les performances et les cadences, et enfin proposer un recours très systématique au béton précontraint. Le Setra (Service d'études techniques des routes et autoroutes) est témoin et acteur de cette évolution rapide et importante

des techniques de conception et d'exécution. Le nombre important d'ouvrages à projeter, à calculer et à réaliser dans des délais très courts, le manque de personnel qualifié et le développement rapide des ordinateurs de grande capacité poussent le Setra à mettre au point des "dossiers pilotes" et à concevoir des programmes de calcul automatique pour chaque type d'ouvrage. Parmi les types d'ouvrages dits "courants", par exemple, l'utilisation de poutres préfabriquées précontraintes pour le franchissement de portées comprises entre 10 et 50 m va se généraliser.

### ● **Le tournant des années soixante-dix**

Ce sont les années soixante-dix qui verront le véritable essor de la préfabrication de poutres précontraintes par prétension, pour des raisons conjoncturelles : d'abord la reconnaissance officielle de cette technique, mais aussi la crise économique et le coût croissant de la main-d'œuvre qualifiée. Ses atouts en termes de fabrication et de mise en œuvre vont par ailleurs favoriser son développement – performance des bétons réalisés en usine, garantie assurée d'une bonne qualité des produits et prix compétitif, mais aussi suppression des cintres du tablier, possibilité de diminuer significativement les délais d'exécution pour les ouvrages réalisés sans interrompre la circulation, et diminution des nuisances qu'engendre toute mise en chantier. Les industriels vont peu à peu s'adapter à des exigences du marché de plus en plus draconiennes en matière de règlements, de qua-

lité et de prix. Aujourd'hui, le pont à poutres sous chaussée posées sans étai, solidarisiées par un hourdis coulé en place sur des coffrages perdus non participants, est devenu une solution classique pour des franchissements pouvant aller jusqu'à 35 m de portée. La technique type PRAD (ponts routes à poutres préfabriquées précontraintes par adhérence) appliquée aux ouvrages à travées indépendantes et de portée moyenne (jusqu'à 30 m environ) a évolué dans les années quatre-vingt. Initialement réservé à la confection de travées indépendantes, l'emploi de ces poutres précontraintes a été étendu à des ouvrages constitués de plusieurs travées avec solidarisation, en béton armé au niveau de la dalle au droit des piles. La continuité apparente est obtenue par la dalle : les poutres de deux travées adjacentes arrivant sur une même pile restent appuyées sur deux lignes d'appuis distinctes, nécessitant la présence d'un chevêtre d'appui de 1 m d'épaisseur au minimum.

### ● **Deux principes structurels spécifiques au moment de la construction**

Les nouvelles connaissances en matière de béton, de dimensionnement et de calcul ont permis la réalisation d'ouvrages à plusieurs travées avec des travées adjacentes placées en continuité mécanique par solidarisation en béton armé dans une entretoise (ou chevêtre de continuité) au droit des piles intermédiaires. Par la suite, au cours de la construction, deux modes de structures apparaissent :

1. D'abord, une structure isostatique. Les poutres reposent sur des appuis provisoires dont la distance entre axes est égale à la portée de calcul. La section résistante transversale du tablier est uniquement constituée par les poutres, qui supportent leur propre poids, celui des coffrages perdus et celui de la dalle (le hourdis) en phase de coulage.
2. Ensuite, une structure hyperstatique. Les poutres et le hourdis associés constituent la section transversale résistante de l'ouvrage. Ils supportent les charges appliquées lors du transfert du tablier, du poids des superstructures et des charges de service. La portée de calcul est alors égale

**>>> Une entretoise unique permet le transfert des charges du tablier sur quatre appareils d'appui.**





**>>> 1** Après ouverture du banc de pré-fabrication, les aciers actifs sont relâchés pour mettre la poutre en précontrainte.

**2 3** Les différentes poutres sont transférées et stockées sur le parc de l'usine, en appui sur des madriers.

à la distance entre axes des appuis définitifs. Un certain nombre d'ouvrages sur les autoroutes A 10, A 11, A 71 et A 64 (ex-RN 117) ont été réalisés suivant cette technique. Simplicité et rapidité de mise en œuvre, adaptabilité aux exigences esthétiques, maîtrise des délais et des coûts : les ponts à poutres préfabriquées ont de nombreux atouts. Dans leur conception, d'abord. Avec des portées possibles de 30 m à 35 m, les ponts à poutres peuvent aussi s'adapter à des ouvrages présentant une géométrie complexe, par exemple une courbure en plan (jusqu'à 15 fois la portée sans disposition particulière), une largeur variable (en jouant sur l'entraxe des poutres et les encorbellements du hourdis) ou un biais inférieur à 70 degrés (jusqu'à 50 degrés). En construction, ensuite : la préfabrication des poutres en usine garantit le respect des délais d'exécution, la diminution de la durée du chantier (fabrication des poutres en temps masqué) et une meilleure qualité (existence de plans d'assurance-qualité dans toutes les usines), d'où une meilleure pérennité des ouvrages. Sur le chantier, l'utilisation de poutres préfabriquées permet de s'affranchir des problèmes de brèches par la suppression des étaitements et des échafaudages ainsi que des cintres. Ceux-ci sont parfois nécessaires lorsque le sol de fondation est de mauvaise qualité, ou pour maintenir un gabarit de circulation sous l'ouvrage, ou encore en cas de franchissement d'un obstacle (grande hauteur, ruisseau, voie ferrée, etc.).

#### ● Mise œuvre aisée et rapide

La pose des poutres préfabriquées se fait dans la majorité des cas avec des grues courantes, dans des délais très courts, ce qui ne nécessite que de brèves interruptions de la circulation lorsque le pont franchit une voie en service. La pose sur appuis provisoires (cas des

ouvrages hyperstatiques et de certains isostatiques) nécessite un étaieement limité aux extrémités des poutres servant à la réalisation de l'entretoise sur appui. Quant à la pose sur appuis définitifs (cas de la plupart des ouvrages isostatiques), elle supprime les risques de tassement des étaieements ou de déformation des cintres lors du bétonnage de la dalle – le hourdis – sur les poutres.

#### ● Un ensemble d'avantages qui intéressent tous les domaines

Enfin, dans l'usage quotidien et l'entretien du pont comme dans sa bonne intégration au site, les ponts PRAD à plusieurs travées rendus continus apportent nombre d'avantages supplémentaires, la continuité permettant un gain à la fois technique, économique et esthétique :

- le recentrage des descentes de charges entraîne une diminution des moments sollicitants, ce qui réduit l'emprise des fondations ;
- la présence d'une seule ligne d'appuis permet une réduction de la largeur des piles, tout comme elle offre une grande liberté sur le plan architectural en rendant possible la suppression des chevêtres d'appui pour améliorer la transparence de l'ouvrage et lever les contraintes liées au gabarit ;
- la hauteur du tablier de l'ouvrage peut être réduite de 10 % par rapport à un tablier à travées indépendantes ;
- le comportement monolithique de l'ouvrage rendu continu améliore sa résistance et sa ductilité vis-à-vis des efforts dynamiques et lui confère une meilleure capacité à dissiper l'énergie en cas de séisme ;
- la suppression des joints de chaussée intermédiaires, ou de la dalle de continuité sur pile intermédiaire, assure un meilleur confort des usagers, au même titre que l'absence de festonnement du tablier ; celui-ci est habituellement provoqué par les libres déformations par fluage du béton des tabliers à travées isostatiques, qui sont ici empêchées par la mise en continuité mécanique des travées ;
- la réduction du nombre d'appareils d'appui, disposés sur une seule file sur les piles au lieu de deux, facilite l'entretien lors du vérinage pour les vérifier et éventuellement les remplacer. ■

#### TECHNIQUE

### PRAD-EL, calculer pour vérifier

Dans le courant de l'année 2000, le Setra va mettre à la disposition des divers utilisateurs des cellules ouvrages d'art (DDE, CETE, BET, etc.) le programme de calcul PRAD-EL, destiné à la vérification des tabliers PRAD à travée unique ou à travées multiples. Très performant, ce programme couvre un domaine d'emploi assez large, puisqu'il peut être utilisé tant pour les ponts-routes que pour les ponts-rails. Il suit les règlements actuels (fascicule 61, titre II du CCTG, BAEL et BPEL versions révisées 1999) et permettra la prise en compte des normes européennes dès leur mise en vigueur (charges permanentes : EC1 – partie 2, charges d'exploitation sur les ponts EC1 – partie 3).

Plusieurs techniques interviennent dans la conception et la réalisation des tabliers PRAD :

- la précontrainte par prétension ;
- la mise en œuvre de bétons traditionnels et hautes performances ;
- le traitement thermique ;
- la construction par phases ;
- la mise en continuité mécanique des travées, après la pose des poutres.

Les phases de construction ainsi que les déformations différées (fluage, retrait et relaxation) et leurs conséquences dans la redistribution des efforts dans le tablier sont prises en compte par un calcul incrémental. Le fluage du béton est supposé linéaire et le principe de la superposition est donc applicable ; la rhéologie est celle du BPEL (version révisée 1999) pour les bétons traditionnels ou les bétons hautes performances.



PONT DE RIBAUTE – BÉZIERS

## → Solide, économique... et plus rapide

Ce pont à six travées rendues continues, toutes de portées différentes, présente un profil en long en pente variable et un alignement non rectiligne. Il franchit une route départementale et une voie SNCF. Lors de l'appel d'offres, la solution PRAD a été préférée à la technique plus classique du pont à poutrelles enrobées, usuellement utilisée pour le franchissement des voies ferroviaires, mais qui s'est révélée trop chère. Parfaitement respectueuse du cahier des charges en matière de sécurité et de coût, elle a permis de procéder à la construction du pont dans un délai plus court sans remettre en cause l'aspect architectural du projet, grâce, en particulier, au maintien de la forme des piles. Celles-ci présentent un seul fût à largeur variable et à parements ouvragés. Les corniches en béton blanc qui règnent sur la hauteur du tablier masquent la présence des poutres et soulignent la simplicité et l'élégance du pont.

PHOTOS : GUILLAUME MAUCUIT-LECOMTE

**Maîtrise d'ouvrage et maîtrise d'œuvre :** conseil général de l'Hérault

**Assistance maîtrise d'œuvre études :** CETE Méditerranée

**Architecte :** Forissier cabinet Intervia (ex-Urba 9)

**Entreprise :** BEC Frères, agence de Lunel

**BET :** Sud Études de Pignan (34)

**Poutres PRAD :** Feder Béton Bédarieux (34)

**Montant total de l'opération :** 12 MF

**Montant de l'ouvrage :** 5,3 MF



## TECHNIQUE

### Un nouveau type de pont-rail pour le TGV Est

Après une quinzaine d'années d'exploitation du réseau TGV, la SNCF a convié entrepreneurs et industriels de la préfabrication en béton à participer au projet de maîtrise d'ouvrage et de maîtrise d'œuvre du futur réseau TGV Est, sur le thème suivant : comment réduire le coût et le délai de construction d'une plate-forme ferroviaire par une nouvelle conception des ouvrages d'art courants ? En 1996, après étude d'une trentaine de conceptions nouvelles, la SNCF a procédé à une première sélection faisant apparaître l'intérêt économique et la fiabilité des ponts-rail à travées continues composés de poutres précontraintes par fils adhérents, procédé déjà utilisé sur certains réseaux étrangers. Avant de s'engager, la SNCF a entrepris des essais de fatigue, en partenariat avec la FIB. Elle voulait s'assurer de la capacité de ces poutres à supporter les charges ferroviaires sur la durée de vie théorique d'un ouvrage. Menée par le CERIB, l'étude a permis de valider le procédé. Par la suite, en 1998-1999, une étude théorique de "sensibilité" sur un exemple concret a permis de valider l'intérêt de ce type d'ouvrage et de fixer des hypothèses de calcul de dimensionnement.

Ce nouveau type d'ouvrage courant Ra-PPAD (ponts rails à poutres préfabriquées précontraintes par adhérence) devrait réduire les coûts d'investissement et d'exploitation, ainsi que le délai d'exécution de la plate-forme ferroviaire, tout en respectant les critères techniques et réglementaires de sécurité, de régularité et de confort. Le double intérêt de la solution hyperstatique retenue tient à l'impact restreint des aléas climatiques et géotechniques et à la séparation physique des ateliers de terrassement et de réalisation des ouvrages d'art. D'autre part, le monolithisme simplifie la maintenance puisqu'il permet de stabiliser le ballast et de réduire les contraintes portant sur les rails au droit des appuis.

● ● ● suite p 21



LES OUVRAGES D'ART DE LA PYRÉNÉENNE (A 64)

### → Un maître mot : la souplesse

L'ex-RN 117 qui relie Muret à Saint-Gaudens a changé de statut : hier voie nationale, elle est devenue voie autoroutière (A 64). Pour maintenir le réseau routier croisant son tracé, des franchissements ont été nécessaires. Ils ont été dessinés par les architectes Faup et Zirk. Sur le tronçon Muret – Martres-Tolosane, d'une longueur de 38 km, 9 d'entre eux partagent les mêmes caractéristiques structurelles. Tous ont été construits suivant la technique des ponts PRAD hyperstatiques. Celle-ci s'est adaptée aux divers cas de figure rencontrés – le biais, par exemple, ne présentant pas un obstacle à son utilisation – et a permis la réalisation des ouvrages en position définitive (sans surgabarit) en limitant les nuisances pour les usagers de la voie : la mise en place des poutres s'est effectuée par cycles d'interruption de la circulation de 7 minutes par poutre.

La continuité mécanique du tablier a permis la réalisation de 2 fûts rectangulaires par pile sans chevêtre en tête, et de réduire le nombre d'appareils d'appui sur les piles à 4 (pour un total de 28 poutres) et à 3 sur les culées. Les poutres ont été jumelées sur les travées principales, réduisant ainsi leur nombre sur les travées de rive, et autorisant un coffrage du hourdis à l'aide de prédalles. Si les techniques de construction utilisées sont différentes, l'unité dans le traitement architectural des ouvrages a été maintenue. L'utilisation de la technique des ponts PRAD hyperstatiques est venue relayer cette volonté et a donné aux architectes la possibilité de jouer sur les détails constructifs. Par exemple, la mise en relief des entretoises sur pile, tout en facilitant leur réalisation, souligne la différence de teinte avec le béton des poutres ; de même des encorbellements de 0,50 m, qui réduisent la hauteur vue du tablier par un effet d'ombre et améliorent la transparence des ouvrages.

TEXTES : PIERRE PASSEMAN, INGÉNIEUR D'ÉTUDES AU CERIB

PHOTOS : GUILLAUME MAUCUIT-LECOMTE

#### Neuf ponts type PRAD

Six échangeurs ou demi-échangeurs : Muret Sud ;  
Le Fauga ; Mauzac ; Noé ; Capens ;  
Lavelanet-de-Comminges

Rétablissement : CD 43c à Muret ; RD 62 à Marquefave  
RD 10g à Lafitte

Maîtrise d'ouvrage : État

Maîtrise d'œuvre : DDE de la Haute-Garonne

Architectes : Faup et Zirk

Entreprises : BEC Frères ; Castells Frères ;  
Chantiers modernes ; Mas ; Razel

BET : Sud Études ; SETI ; EEG

Délais d'exécution : 7 à 8 mois par ouvrage





1



2



3

>>> **1** Chaque centrale est tenue de se conformer à un plan d'assurance-qualité pour la fourniture de béton destiné à des ouvrages d'art.

**2** La tenue au transport et la permanence de la maniabilité du béton sont des atouts que maîtrisent parfaitement les centrales à béton françaises. **3** Pour s'affranchir des difficultés structurelles propres à chaque chantier, les camions peuvent être équipés de tapis de mise en œuvre.

## → Béton prêt à l'emploi : une offre cohérente et compétitive

**I**NCONTOURNABLE DANS LA MAJEURE PARTIE DU PAYS, ET POUR TOUS LES TYPES DE CHANTIERS, L'OFFRE BPE EXCELLE EN MATIÈRE D'OUVRAGES D'ART. D'AUTANT QUE LA PLUPART DES CHANTIERS RÉALISÉS EN FRANCE SE SITUENT À MOINS DE 30 KILOMÈTRES D'UNE CENTRALE.

**E**n quelques années, les fabricants de béton prêt à l'emploi ont effectué un bond en avant technique qui leur permet aujourd'hui de répondre à toutes les demandes des maîtres d'ouvrage. Si les principes fondamentaux restent acquis, les centrales ont appris à traiter aujourd'hui le béton dans ses formes les plus évoluées, depuis les bétons hautes performances (BHP), de plus en plus souvent requis, jusqu'aux bétons autoplaçants, en passant par les bétons de ciment blanc. Des compétences acquises par l'adaptation permanente des sociétés de BPE aux marchés et aux procédures de certification. En matière d'ouvrages d'art, la généralisation des plans d'assurance-qualité requis par les maîtres d'ouvrage permet aujourd'hui aux centrales de BPE d'assurer une traçabilité complète du béton. Ce qui signifie qu'en cas de problème sur une toupie, tous les éléments sont disponibles pour remonter à la source et déterminer l'origine du défaut, comme c'est maintenant l'usage dans la grande majorité des secteurs industriels.

### ● Des contrôles permanents

Outre ces procédures d'agrément – agréments permanents pour la conformité aux normes et ponctuels pour les plans d'assurance-qualité –, toutes les précautions sont prises assez haut en amont pour assurer le bon déroulement des chantiers. Ainsi, avant chaque réalisation, les centrales et leurs laboratoires procèdent à la formulation des bétons et réalisent des bétons d'essai, le tout étant ensuite fourni au maître d'œuvre pour contrôle et validation. Une fois les formules et les plans d'assurance qualité acceptés, et à

quelques semaines du démarrage effectif du chantier, ce sont des bétons de convenance qui sont réalisés afin de corroborer les résultats précédemment obtenus et de vérifier, notamment, la tenue des bétons au transport. Lorsque le chantier est en cours, les contrôles se poursuivent, tant au sein de la centrale, dans le cadre des procédures d'autocontrôle précisées dans le plan d'assurance-qualité, que sur le chantier, par la réalisation d'essais pour quasiment chaque toupie ou par la réalisation d'éprouvettes testées par des contrôleurs indépendants, mandatés par le maître d'œuvre. L'ensemble de ces procédures permet aux centrales d'assurer une grande régularité dans leur production. Les assurances ainsi fournies s'expriment aussi dans le cadre des bétons hautes performance, produits de plus en plus demandés par les maîtres d'ouvrage.

La plupart des centrales de BPE sont aujourd'hui à même d'offrir des bétons à 60 MPa de résistance garantie, soit une résistance moyenne de 70 à 75 MPa. Le tout avec des bétons dont les caractéristiques de maniabilité sont maintenues jusque dans le coffrage, par le biais d'études préalables sur les adjuvants et le ciment, et aussi du savoir-faire des fabricants de BPE.

### ● Des moyens techniques

Pour répondre aux demandes des entreprises et des maîtres d'œuvre, les centrales disposent également de ressources pour s'adapter. Au sein des grands réseaux de BPE, et au cas où aucune centrale fixe ne serait installée à proximité, les fournisseurs de BPE disposent le plus souvent de matériels pour implanter des centrales temporaires directement sur les chantiers à condition que les volumes soient suffisants, comme cela s'est produit pendant la construction du TGV Sud-Est. Généralement, les fournisseurs de BPE disposent d'une palette d'outils pour faciliter la mise en œuvre du béton sur des chantiers difficiles d'accès : le pompage, par exemple, ou encore l'acheminement par tapis roulant. De même que la production de béton a suivi les autres secteurs industriels en matière de traçabilité, elle a également développé une gamme de services qui va aujourd'hui beaucoup plus loin que la seule livraison d'un matériau brut... ■





1



2

## → A 29 : le BPE comme seul fournisseur

LES PREMIERS TRAVAUX DE L'AUTOROUTE A 29 ONT DÉBUTÉ AU COURS DE L'ÉTÉ 1999. LES ENTREPRISES DE BÉTON PRÊT À L'EMPLOI LOCALES FOURNISSENT LA TOTALITÉ DES BÉTONS MIS EN ŒUVRE DANS LES OUVRAGES D'ART.

**E**n cours de réalisation, l'autoroute A 29 reliera dans quelques années l'embouchure de la Seine au nord de la France. La liaison Amiens – Saint-Quentin est actuellement en construction et compte deux tronçons totalisant 55 ouvrages d'art, depuis le franchissement des autres autoroutes jusqu'au rétablissement de routes départementales et de voies de moindre importance, pour un total de 36 900 m<sup>3</sup> de béton qui seront fournis par deux entreprises de béton prêt à l'emploi. Sur toute la longueur du tracé, le béton est produit dans cinq centrales de béton prêt à l'emploi situées à Amiens (deux centrales), Péronne, à mi-chemin (deux centrales), et à Saint-Quentin (une centrale). Chaque ouvrage reste dans la limite imposée en termes de temps de transport du béton prêt à l'emploi.

### ● Sur place, un coordinateur entre les centrales et l'entreprise

Pour mieux assurer la coordination des centrales, un coordinateur spécialement dédié a été dépêché sur les lieux pour gérer les relations entre entreprise et centrales, depuis les plannings jusqu'à la gestion des problèmes pouvant survenir sur le chantier. Pour parer à toute éventualité, et notamment aux pannes, les plans d'entretien des centrales ont également été renforcés, la maintenance étant assurée par des entreprises extérieures. Une évolution nécessitée par le chantier de l'autoroute et les cadences qu'il génère, mais également par la mise en place des 35 heures. Chaque centrale a

atteint une capacité de production de 30 à 35 m<sup>3</sup> par heure. Par ailleurs, ces centrales ont également renforcé leur flotte de toupies et recouru à des entreprises spécialisées dans le pompage en cas de nécessité.

### ● Des contrôles scrupuleux

Durant toute la durée du chantier, les opérations sont placées sous haute surveillance. Les matériaux sont contrôlés, puis les *process*, le chargement, jusqu'à la livraison sur site. Ensuite, ce sont les entreprises qui sont contrôlées : ferrailage, vibration, mise en place. De nombreuses formulations de béton ont dû être mises au point, en BCN (béton à caractéristiques normalisées, B 30 et B 35 ou B 28 et B32, pour les ouvrages sous maîtrise d'œuvre SNCF) et en BCS (béton à caractéristiques spécifiées, pour les semelles notamment). Au total, près de 35 formulations différentes ont été mises au point. Notons d'autre part que toutes les centrales amenées à intervenir sur le chantier devaient être agréées NF.

Dans le cas de Péronne 2, une centrale installée spécialement pour le chantier, c'est la réalisation de bétons de convenue qui a permis son homologation spécifique pour ce chantier, en dépit de son manque d'ancienneté qui lui interdisait de prétendre à la norme NF. De plus, avant le démarrage du chantier et pour satisfaire aux conditions requises par le maître d'œuvre, chaque entreprise a dû fournir des plans d'assurance qualité dont la véracité et la conformité au marché étaient contrôlées. Des bétons d'étude étaient réalisés, analysés ensuite par des contrôleurs extérieurs mandatés par le maître d'œuvre, et enfin il était procédé à une série de bétons de convenue pour chaque type de béton et pour chaque centrale. Ils ont permis notamment de vérifier la conformité de l'évolution des bétons lors du transport, des mesures étant effectuées à T 0, T + 15 minutes, T + 30 et T + 60, de façon à pouvoir garantir une marge suffisante. Sur le chantier, l'entreprise chargée de



3

>>> 1 Les 55 ouvrages d'art du tronçon

Amiens-Saint-Quentin de l'A29 ont été coulés avec du béton issu de 5 centrales BPE.

2 Avec le plan d'assurance-qualité, des éprouvettes sont réalisées puis analysées soit par un contrôleur extérieur mandaté par le maître d'œuvre, soit par le fournisseur du BPE.

3 Chaque toupie livrée sur le chantier fait l'objet d'un contrôle : le slump test.

la mise en œuvre du béton assurait le suivi de la qualité. Les bons étaient contrôlés, la date de départ vérifiée, et des cônes étaient réalisés pour vérifier que la plasticité du béton était conforme aux demandes et aux normes.

### ● Difficiles franchissements

La gestion de tels chantiers est parfois soumise à des contingences particulières liées à la configuration du site. Parmi les points les plus sensibles de cette nouvelle autoroute, le double franchissement de la ligne TGV et de l'autoroute A 1 était sûrement le plus délicat : plusieurs



1



2



3

>>> **1** Un camion-pompe achemine le BPE une vingtaine de mètres en contrebas.

**2** Les plans d'assurance-qualité imposent un suivi continu du béton et permettent une traçabilité totale du matériau.

**3** Les centrales BPE disposent du savoir-faire pour répondre à tout type de demande du maître d'ouvrage.

ouvrages d'art devaient être construits à l'intérieur d'un périmètre relativement restreint pour permettre d'une part le franchissement de ces obstacles, et d'autre part les raccordements entre les deux autoroutes. Un chantier aux multiples contraintes puisque, dans le cadre du franchissement de la ligne SNCF, sous maîtrise d'ouvrage du transporteur ferroviaire, les entreprises ne pouvaient accéder aux abords immédiats de la ligne à grande vitesse que la nuit, à partir du moment où l'électricité était coupée, et ce, pour 4 heures seulement. La sécurité, on s'en doute, justifiait ces contraintes.

Ainsi, chaque nuit, la centrale de Péronne attendait le feu vert des entreprises avant de mettre ses installations en route. Une fois l'accord obtenu, deux toupies se relayaient pour porter le béton sur le chantier et permettre ainsi le coulage des pieux, à raison de deux par nuit et ce, dans un laps de temps très court. Exécutée très près de la ligne SNCF, cette opération nécessitait l'intervention d'une pompe car les camions ne pouvaient descendre jusqu'au lieu de travail à cause du dévers de la rampe d'accès. Ils se postaient donc au sommet des culées et le béton était acheminé une vingtaine de mètres plus bas grâce au bras articulé du camion-pompe.

### ● Une multitude de franchissements

À terme, les cinq centrales à béton en activité le long de l'autoroute auront livré la totalité des bétons utilisés pour la construction des ouvrages d'art de ce tronçon, avec pour chacun d'eux des spécificités dans la formulation et la mise en œuvre. Les ouvrages à construire pour franchir l'autoroute A 1 poseront par exemple de sérieux problèmes d'organisation, qui concernent jusqu'aux centrales à béton. La difficulté, en effet, sera de réaliser les deux ouvrages sous circulation de l'autoroute A 1. Seules les deux voies rapides seront neutralisées. Pour éviter tout risque d'accident, les conducteurs sont spécialement formés et particulièrement sensibilisés au respect du plan de circulation pour accéder au chantier. À la demande du maître d'œuvre, ce seront ainsi toujours les mêmes chauffeurs qui travailleront aux livraisons de ces chantiers, avec des camions en parfait état de marche pour éviter toute panne et, par conséquent, tout risque d'accident. ■

TEXTE : YANN KERVENO

PHOTOS : YANN KERVENO, GUILLAUME MAUCUIT-LECOMTE

Maître d'ouvrage : SANEF

Maîtrise d'œuvre : Scetauroute

BPE : Orsa Bétons, Unibéton

Gros œuvre ouvrages d'art : Norpac, Quille, SGTN, GTM, Demathieu et Bard, Botte Sade

### TECHNIQUE

## Le viaduc de la Somme

Long de 460 m, le viaduc de la Somme est un des ouvrages phares de l'autoroute A 29. Constitué de neuf piles et de deux culées, il franchit le canal du Nord, la Somme et un marais. Six piles sont donc plongées dans l'eau. La portée maximale du tablier mixte sera de 58 m (franchissement du canal) pour une portée moyenne de 47 m. Dans leur grande majorité, les piles sont composées de pieux et de semelles (1,30 et 1,60 m de diamètre), sauf pour deux d'entre elles, composées de deux pieux, de deux fûts et de chevêtres. Les pieux les plus profonds plongent à 37 m sous le niveau du sol. Pour pouvoir travailler sans problème d'accès, le viaduc de la Somme a nécessité la construction d'une estacade de 260 m de long pour permettre la circulation des engins, et notamment des toupies. Une fois terminé, le viaduc aura nécessité la mise en œuvre de 1 000 tonnes d'armatures, de 9 000 m<sup>2</sup> de coffrages et de 5 000 m<sup>3</sup> de béton prêt à l'emploi.



>>> Afin de pouvoir travailler dans le marais, une estacade provisoire a été construite.

Elle a permis aux engins de circuler, notamment aux toupies venant livrer le BPE nécessaire au coulage des piles du viaduc.



# Eole : symphonie technique en sous-sol

●●● CINQUIÈME DES LIGNES DE RER, LA TOUTE NOUVELLE LIGNE E MATÉRIALISE UN VÉRITABLE PRODIGE : RÉALISER EN PLEIN CENTRE DE PARIS UN TUNNEL DE 3 KM ET DEUX GARES ENTERRÉES AUX DIMENSIONS ÉQUIVALENTES À TROIS FOIS LA CATHÉDRALE NOTRE-DAME, C'EST D'ABORD UNE GAGEURE ; QUANT À ORCHESTRER LA MULTIPLICITÉ DES INTERVENANTS ET LA PLURALITÉ DES TECHNIQUES EN RÉUSSISSANT LE MARIAGE DU GÉNIE CIVIL ET DE L'ARCHITECTURE, C'EST MÊME UN AUTRE STADE... CELUI DE L'AVENTURE HUMAINE.



**E**ole est mort le 14 juillet 1999. Il a symboliquement disparu lors de son ouverture au public, laissant la place à la ligne E du RER. Dernière des grandes artères parisiennes de transport ferroviaire, la ligne nouvelle relie pour le moment Villiers-sur-Marne et Chelles à la gare Saint-Lazare en passant par la station Magenta, construite entre la gare de l'Est et la gare du Nord. Destinée à désengorger la ligne A du RER, la liaison a vocation à être prolongée vers l'est jusqu'à Tourna-en-Brie et vers l'ouest depuis Pont-Cardinet, sans qu'aucune date, toutefois, n'ait été arrêtée pour ce dernier prolongement. Dans sa configuration actuelle, la nouvelle ligne procure un gain de temps d'une demi-heure entre ses gares terminus et Paris-Saint-Lazare. Mais plus qu'une simple liaison, elle est un nœud de correspondance cardinal pour les usagers des transports parisiens.

Depuis les gares Haussmann-Saint-Lazare et Magenta, le voyageur se voit proposer 10 correspondances de RER (RER A, RER B, RER D) ou de métro (lignes 3, 4, 5, 9, 12, 13 et 14, autrement dénommée Météor) ainsi qu'un accès souterrain aux grandes lignes banlieue de la gare de l'Est et de la gare du Nord.

Mais plus qu'un simple lieu de passage, les deux gares souterraines forment un espace porteur d'une véritable identité qui concrétise le mariage entre génie civil et architecture. Enfin, ces deux gigantesques volumes enterrés, au même titre que le tunnel, représentent un véritable défi technique. Un défi d'autant plus difficile à relever que leur réalisation a dû composer avec un contexte géologique assez tourmenté.

#### ● Le terrain : un sous-sol particulièrement diversifié

Entre les gares Haussmann-Saint-Lazare et Magenta, les gares, le tunnel et les puits de ventilation s'inscrivent dans des terrains d'une grande diversité. Depuis la surface jusqu'aux points les plus profonds, se succèdent des couches irrégulières de remblais et des éboulis argilo-marneux, des marnes infragypseuses de 6 à 10 m, des sables de Monceaux ou sables verts, des marnocalcaires de Saint-Ouen sur 12 à 18 m, des sables de Beauchamp avec présence d'argile, des marnes et caillasses avec calcaire grossier sur 10 à 16 m, des calcaires grossiers durs ou tendres sur 12 à 18 m ou encore des sables supérieurs et de la fausse

glaise avec une présence de lignite. Au total ce sont près de 200 forages qui ont été pratiqués avant le lancement des travaux afin d'avoir une connaissance aussi complète que possible des terrains rencontrés. Mais cette campagne de sondages n'a pas empêché quelques surprises, voire des arrêts de chantier. Pourtant, ce tracé en profondeur à – 30 m du niveau du sol avait été choisi notamment pour réduire l'impact du chantier en surface, et la technique du creusement mécanisé par un tunnelier à pression de boue pour sa capacité à réduire les tassements de surface. Quant à l'excavation au tunnelier, elle s'imposait aussi par un coût au mètre linéaire près de deux fois inférieur à celui des techniques classiques pour une galerie de 2 km, tout en autorisant des cadences 5 à 10 fois supérieures. À titre d'exemple, le creusement des

1 700 m de la première galerie – qui pour sa part n'a rencontré aucun écueil majeur – a pu être réalisé en 386 jours de travail. Au terme de l'opération, et donc après la pose de 1 245 anneaux, soit quelques 7 500 voussoirs en béton préfabriqué, le tunnelier a été démonté et réacheminé jusqu'à son point de départ pour commencer la seconde galerie. Mais la géologie et l'hydrogéologie du site ont largement conditionné le choix des dispositions techniques adoptées pour les deux gares.

#### ● Une excavation d'envergure menée progressivement

La réalisation des gares s'est déroulée pas à pas, afin d'éviter une décompression trop brutale des terres. Précisons à ce sujet que le volume des matériaux extraits s'élève à environ 1,3 million de

- **1** La ligne E du RER offre un accès rapide au cœur de Paris à partir de l'Est de l'Ile de France. Elle déleste en cela la ligne A.
- 2** La légèreté des escaliers et des équipements contraste volontairement avec la massivité des structures. **3** Les volumes monumentaux de ses gares souterraines favorisent un écoulement fluide des flux d'usagers. **4** Les voûtes empruntent à l'écriture romane, un style auquel les architectes se réfèrent explicitement.



3



4

mètres cubes, et ce, pour construire près de 150 000 m<sup>3</sup> avec une emprise accordée par la ville de Paris limitée 2 000 m<sup>2</sup>. Pour limiter les perturbations "en surface", les deux tiers des matériaux ont été évacués par voie souterraine, au moyen notamment d'une bande transporteuse capable d'emporter 1 500 m<sup>3</sup> par jour. Pas question, donc, d'envisager de tels mouvements de terre sans un confortement parallèle des terrains.

#### ● Le jet grouting à l'honneur

En premier lieu, les deux gares ont largement recouru au *jet grouting*. La technique consiste à injecter le terrain au moyen d'un mélange d'eau et de ciment à haute pression afin de créer des colonnes de béton. Dans le cas de la gare de Haussmann-Saint-Lazare, c'est un total de 1 600 m de colonnes (1,20 m de diamètre et 6 m de profondeur moyenne) qui ont été réalisés de la sorte. L'objectif était double : améliorer la cohésion des sols, en supprimant les travaux d'injection classiques, et ceinturer la zone par un rideau étanche. Le radier de la gare se situe en effet en dessous de la nappe phréatique (voir encadré p.31). À Magenta, près de

3 000 colonnes ont été coulées par la méthode du jet double, créant ainsi un véritable bouclier pour permettre aux machines à attaque ponctuelle d'intervenir en toute sécurité.

À l'instar de la plupart des puits destinés à être conservés, les gares ont toutes deux utilisé la technique de la paroi moulée. Des voiles de béton coulés dans le sol, en particulier, ont servi à créer une enceinte résistante pour les 2 400 m<sup>2</sup> à ciel ouvert du hall Caumartin, au-dessus de la station Haussmann-Saint-Lazare. Les deux ouvrages sont entièrement enfermés dans une enveloppe étanche. Sur un béton de propreté de 10 cm d'épaisseur, trois couches sont successivement mises en place : un feutre antipoinçonnement qui protège l'extrados, une membrane PVC 20/10 qui assure l'étanchéité proprement dite et une autre (17/10) qui protège l'intrados. L'ensemble du complexe est recouvert d'une chape de protection de 3 cm d'épaisseur, coulée avant le bétonnage du radier.

Pourtant, bien qu'elles partagent certaines techniques, les deux gares présentent aussi de notables différences dans les méthodes de construction et le "phasage" des opérations qui ont jalonné leur réalisation. ■

#### REPÈRES

### La ligne E du RER en chiffres

- 8 gares desservies de Chelles-Gournay à Haussmann-Saint-Lazare par la branche nord du RER E.
- 9 gares desservies de Villiers-sur-Marne à Haussmann-Saint-Lazare par la branche sud.
- 3 minutes pour rallier les gares de Magenta et de Condorcet.
- 15 minutes gagnées grâce à la réalisation du tronçon central.
- 30 minutes gagnées sur un trajet banlieue est – Paris-Saint-Lazare.
- 2 nouvelles gares souterraines.
- 5 correspondances par métro ou par RER dans chacune des gares souterraines.
- 53 rames duplex accueillant 1 100 passagers assis.
- Capacité de la ligne E du RER : 30 trains/heure dans chaque sens (12 trains/heure dans chaque sens à l'inauguration).
- Coût final du projet : 12 milliards de francs (2/3 pour les travaux, 1/3 pour les rames).



## Gare Magenta : progression pas à pas

**L**ongue de 228 m, large de 50 m et haute de 15 m, la gare Magenta est construite dans les couches géologiques comprises entre les marnes et les sables de Beauchamp. Un sous-sol qui autorise des excavations plus limitées qu'à Hausmann-Saint-Lazare. Ainsi, la progression des travaux de génie civil du tunnel central et des deux galeries latérales s'est faite essentiellement de haut en bas, suivant un "phasage" plus complexe, comportant huit temps.

### ● Huit étapes dans le détail

→ **Premier acte.** – Les entreprises excavent des portions supérieures des galeries longitudinales Est et Ouest, ainsi que la demi-section supérieure de la galerie centrale Ouest.

→ **Deuxième acte.** – Après creusement et renforcement de la demi-section supérieure de la galerie centrale Est (confor-

tée par un boulonnage et un béton projeté additionné de fibres métalliques), des tubes d'acier sont foncés dans les sols afin de créer une voûte protectrice permettant l'ouverture du tunnel central.

→ **Troisième acte.** – Abaissement des galeries centrales et déplacement des travaux de *jet grouting* des galeries ouest à la galerie centrale Est.

→ **Quatrième acte.** – Achèvement de l'excavation de la galerie centrale Ouest et bétonnage de la culée creuse Est.

→ **Cinquième acte.** – Achèvement de l'excavation de la galerie latérale Ouest, avec bétonnage et boulonnage de sa voûte et coulage d'une moitié de son radier.

→ **Sixième acte.** – Application des mêmes travaux à la galerie latérale Est avec, toutefois, un bétonnage intégral de la culée pleine.

→ **Septième acte.** – Excavation et réalisation de la voûte du tunnel central selon la technique de la voûte active.

→ **Huitième acte.** – Progression vers le

### HISTORIQUE

#### Les dates-clés

- **13 octobre 1988 :** Michel Rocard, Premier ministre, annonce la réalisation d'Eole.
- **15 novembre 1991 :** déclaration d'utilité publique de la liaison.
- **14 février 1994 :** baptême du tunnelier Martine.
- **4 mai 1995 :** achèvement du premier tunnel.
- **Fin novembre 1996 :** achèvement du second tunnel.
- **Mi-janvier 1999 :** mise sous tension des installations de traction électrique.
- **14 juillet 1999 :** mise en service commercial de la branche nord, jusqu'à Chelles-Gournay.
- **30 août 1999 :** mise en service de la branche sud, jusqu'à Villiers-sur-Marne.

bas des creusements, suivie d'un bétonnage du radier central.

La voûte de la gare se situe parfois à seulement 8 m des fondations des immeubles, ce qui a entraîné de nombreuses reprises en sous-œuvre en cours d'exécution, comme à Hausmann-Saint-Lazare d'ailleurs. Une des différences majeures par rapport à cette der-

nière tient à la réalisation d'une voûte active. Cette technique consiste, après projection d'une couche de béton, à mettre en place un anneau définitif constitué de voussoirs préfabriqués. Elle autorise un gain de temps appréciable sur les travaux de confortement et de ferrailage, tout en offrant l'assurance d'une qualité constante des bétons. ■



3

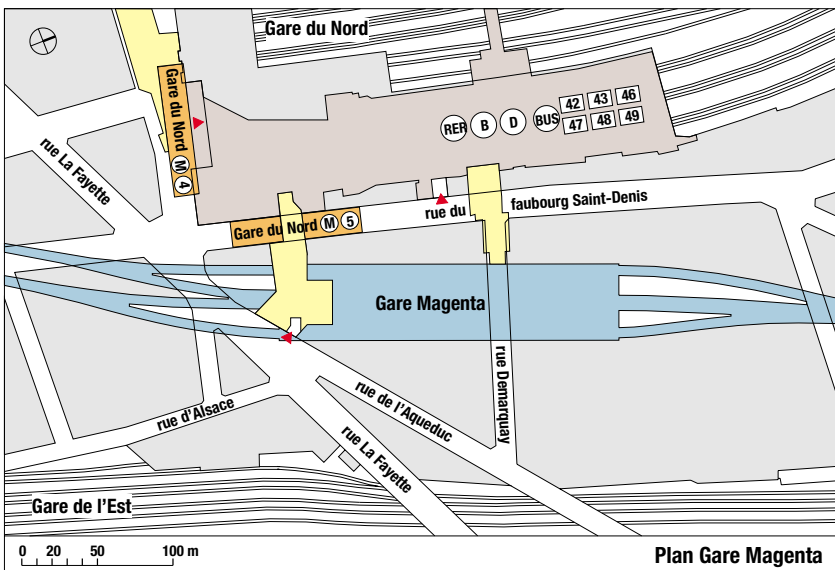


4

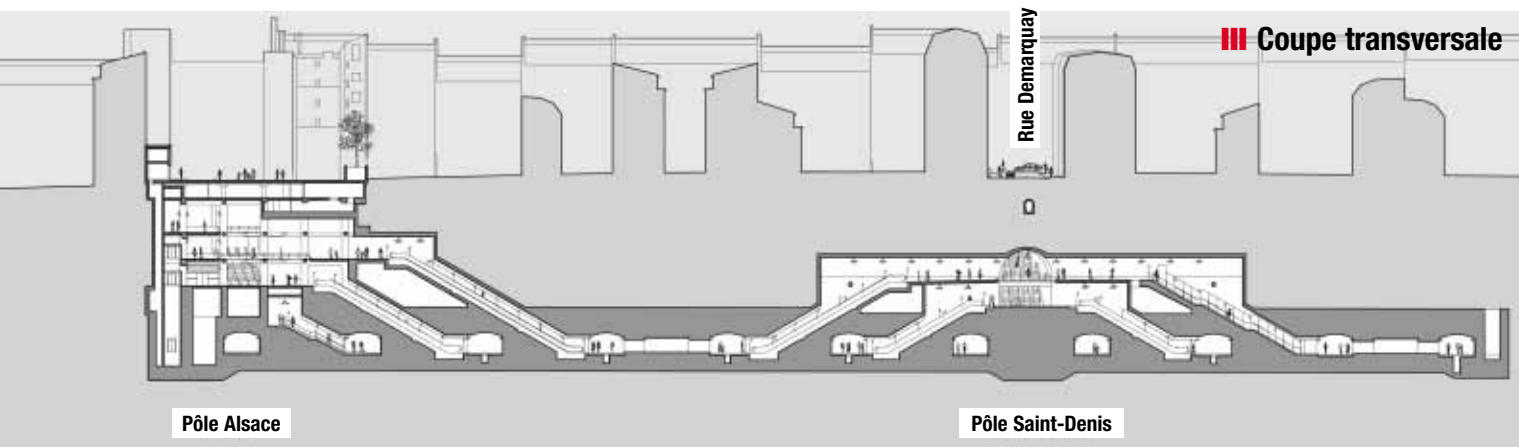


5

>>> **1** Dans la gare Magenta, comme à Haussmann-Saint-Lazare, de larges verrières procurent un éclairage zénithal qui marque le retour à la surface, à la ville. **2** Les structures apparentes participent pleinement de la ligne architecturale. Tout autant que les matériaux, elles expriment la “vérité constructive” de l’ouvrage. **3** Le traitement angulaire des poteaux comme les sections circulaires des poutres sont des éléments récurrents de l’architecture des gares. **4** Le parti pris architectural dégage de larges espaces et joue sur les textures et les couleurs des bétons. **5** La galerie centrale marie un sol en marbre avec une voûte en béton réalisée suivant la technique dite de la voûte active.



Plan Gare Magenta



III Coupe transversale

Pôle Alsace

Pôle Saint-Denis



## Gare Haussmann-Saint-Lazare : des bétons spéciaux

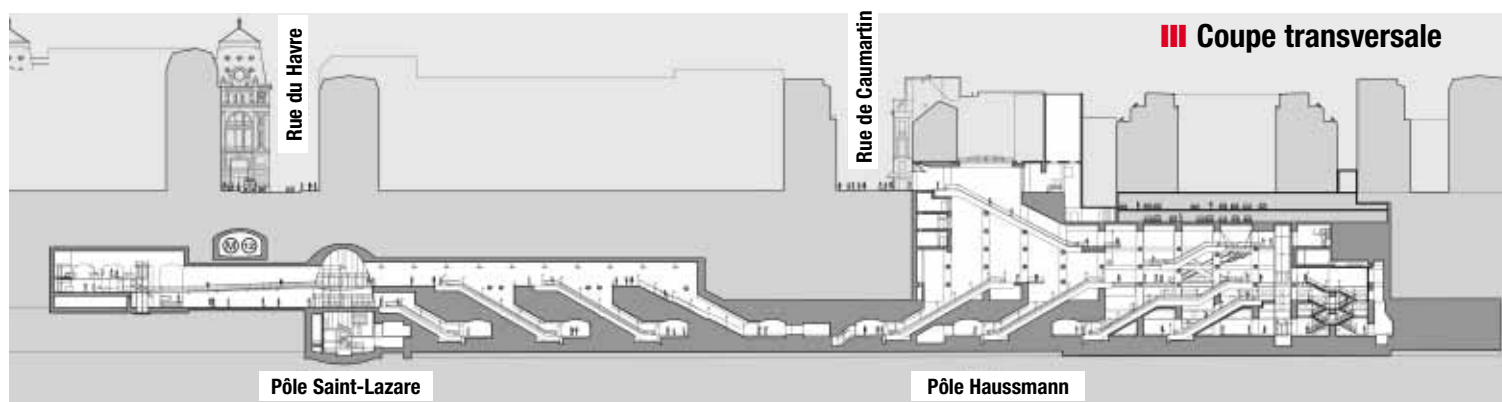
**T**out en adoptant une progression générale du bas vers le haut, les travaux de la station Haussmann-Saint-Lazare ont suivi un même principe de galeries d'extrémité provisoires dans lesquelles ont été coulées les futurs appuis, constitués de culées. Les galeries provisoires ont reçu des culées creuses de 6 m de large sur toute la longueur de la gare (225 m), formées de blocs de béton armé comprenant, tous les

20 m, des réservations pour les accès aux quais. Deux piédroits de 1,20 m d'épaisseur en béton B 30 accueillent les réservations des escaliers et des remontées mécaniques à venir. La jonction des piédroits et des culées creuses reprend des efforts importants provenant de la descente de charges (1 000 t/m) et de la poussée hydrostatique de la nappe phréatique (25 t/m<sup>2</sup>). Le changement de méthode d'excavation en cours de chan-

tier a été l'un des temps forts de l'opération. Le soutènement par des arcs métalliques cintrés a été abandonné au profit d'une méthode associant boulonnage et béton projeté par voie sèche ou humide, pour une meilleure stabilité. La voûte du tunnel central, d'une portée de 21 m, a été coulée en place par cycles de trois jours correspondant à une progression de 2,40 m. Quant aux bétons, ils ont été spécialement formulés pour supporter la

présence d'eaux agressives (ciment CHF - CEM III 52,5 PM-ES) et procurer une résistance à la compression de 20 MPa à 24 h. Notons que les bétons coulés ici ne sont pas revêtus. Ils ont donc fait l'objet d'une attention minutieuse dans leur formulation comme dans leur mise en œuvre, d'où ces protections contre les agressions par des panneaux de contreplaqué et des feuilles de plastique au moment de la mise en œuvre. ■

>>> **1** La proximité des constructions de surface a nécessité de nombreuses reprises en sous-œuvre. **2** Des poutres massives reprennent les descentes de charge des ouvrages "supérieurs" dont la masse est parfois prise en compte pour contrer les effets de poussée de la nappe phréatique. **3** **4** Le béton satiné des structures des halls cède place au béton glacé des galeries d'accès aux quais.







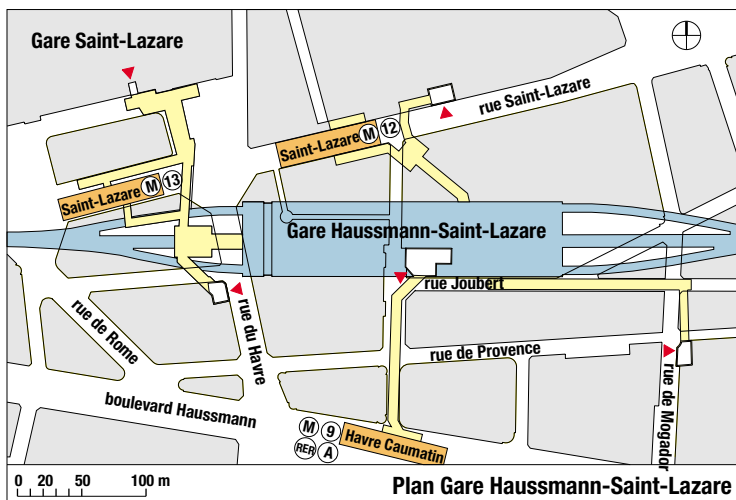
3

4

**HISTORIQUE**

**Construire Haussmann-Saint-Lazare “à pied sec”**

Les voûtes des halls Nord et Sud de la station Haussmann-Saint-Lazare se situent à la cote NGF 22, soit 10 m sous le niveau du sol et près de 2 m en dessous de la nappe phréatique libre. Maîtrise d'ouvrage et maîtrise d'œuvre ont donc décidé de rabattre cette nappe en dessous du niveau des radiers (- 5 NGF). À cet effet, 24 puits de pompage ont été utilisés qui auront permis le pompage de près de 30 millions de mètres cubes en quatre ans. “L'association du jet grouting et du rabattement a fait la preuve de son efficacité en permettant aux travaux de s'effectuer dans de bonnes conditions”, confirme Henry Weisberger, directeur technique du groupement Sogea.



**Architecture façon “grandes lignes”**

Les stations Haussmann-Saint-Lazare et Magenta marquent par leurs contrastes, avec les gares parisiennes du siècle dernier, faites de verre et d'acier, mais aussi avec les habituelles stations enterrées du transport au quotidien : espaces, matières et lumières diffèrent du modèle courant et se rapprochent plutôt des dernières nées des gares du TGV. Dues comme ces dernières à l'atelier d'architecture de la SNCF – l'Agence des gares – et à l'architecte en chef Jean-Marie Duthilleul, elles en partagent les préceptes. Elles signent ainsi une volonté d'unité dans le transport ferroviaire et donnent ses lettres de noblesse à la ligne E du RER.

● **Vérité du béton brut**

Exploiter au maximum la présence du gros œuvre a été une des idées majeures du projet. Les structures ne sont pas masquées mais au contraire mises en valeur afin d'exprimer, selon l'expression

de l'architecte, une “vérité constructive”. Cette idée de vérité se traduit par l'emploi quasi systématique d'un béton coulé en place et non préfabriqué, afin de laisser apparente la trace du travail de l'homme.

● **L'étoffe des bétons**

Le béton brut n'en devait pas moins participer d'une logique architecturale fondée sur une trilogie matériau-couleur-lumière, ses différentes teintes et textures ayant pour but de produire des lumières différentes. Onze qualités de béton ont ainsi été sélectionnées, présentant selon la nature des ciments et des granulats une large palette de teintes et de textures. Parois lisses et rugueuses alternent en fonction des espaces souterrains. Les piédroits des voûtes des quais recourent à un béton bouchardé. Les striures mécaniques laissant apparaître les sables et les granulats blancs de Jouy-le-Châtel pour éclairer la



**>>> 1** L'harmonie des gares s'appuie sur la définition et l'articulation de différents bétons. En l'occurrence, les bétons glacés des galeries, choisis pour leur douceur, croisent, en s'ouvrant sur les piédroits des quais, des bétons bouchardés piquetés de granulats blancs pour mieux réfléchir la lumière. **2** Le mœlleux des coussins acoustiques recouverts de tissus synthétiques créent une saillie s'inscrivant dans la trame des voussoirs en béton satiné.

matière en accrochant la lumière, tout en exprimant les forces reprises par ces ouvrages. Les grands ouvrages comme les voûtes des quais utilisent du béton satiné. Choisie pour sa faculté à réfléchir les lumières indirectes, cette texture est obtenue grâce au traitement des peaux de coffrage. Enfin, dans les passages étroits où le matériau est très proche des usagers, l'architecte a opté pour un béton glacé gris clair séduisant par son aspect lisse et légèrement brillant. La

technique consiste ici à mettre en œuvre un film plastique entre le béton et le coffrage. Le bois, matériau d'appoint, s'allie avec le béton pour marquer l'univers d'Eole. Présent dans les volets des accès sur rue, il revêt également le traitement acoustique des seuils souterrains de la gare de Magenta ou des correspondances RATP de Haussmann-Saint-Lazare. Il jalonne aussi le cheminement des voyageurs, notamment comme revêtement du plancher des passerelles

métalliques, dont la légèreté contraste avec la monumentalité des halls. La pierre est elle aussi présente. Marbrière, elle remplace avantageusement le traditionnel asphalté au sol ; elle apparaît aussi dans le mobilier, sous forme de bancs pour les quais de la station Haussmann-Saint-Lazare.

**● Un éclairage "domestique"**

La lumière est une composante majeure du projet architectural. Naturelle à l'abord de la surface grâce à de nombreuses verrières, elle devient artificielle en plongeant en profondeur. Les "tubes fluo" sont abandonnés au profit de lustres colorés sur les quais et les halls, de mâts qui balisent les galeries, d'appliques qui soulignent la trame des poteaux. La lumière affirme aussi le caractère colossal des halls en mettant en valeur le rythme des poteaux et des butons, le strict calepinage des joints, et surtout en offrant une "profondeur de champ" qui semble repousser les parois souterraines. ■



**Maître d'ouvrage :**  
SNCF – direction déléguée Eole,  
assistée des bureaux d'études  
Socotec (bureau de contrôle)  
et Méthodes et pilotage  
(planificateur)

**Maître d'œuvre études :**  
direction de l'Ingénierie  
de la SNCF

**Maître d'œuvre travaux :**  
SNCF, direction des travaux Eole

**Entreprises :**

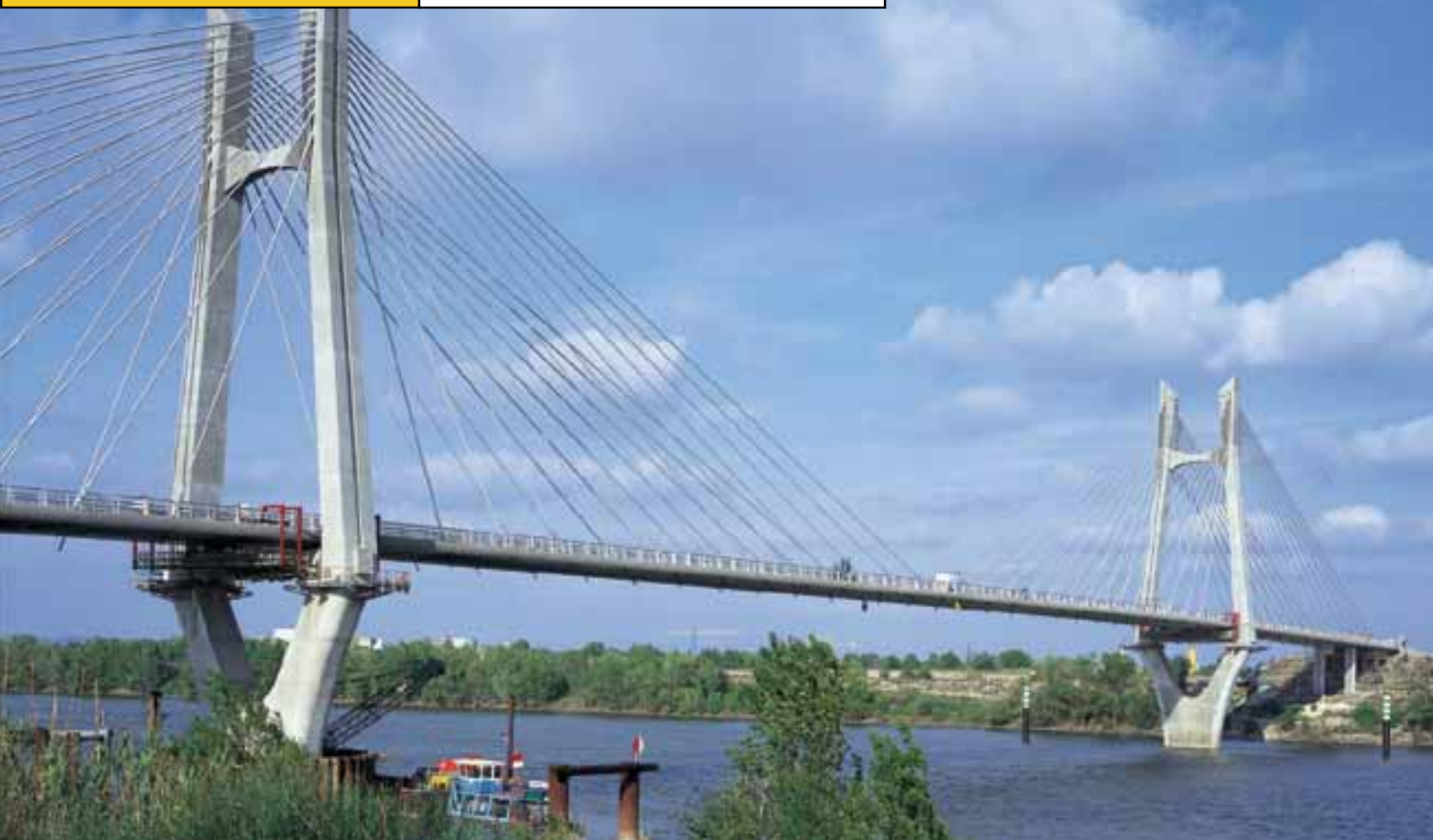
- groupement Chantiers modernes/Dumez (Magenta), DG Construction/Impreglio (tunnel) ;
- groupement Sogea avec Spie Batignolles, Bouygues, Fougerolle ; Ballot et Picot (gare Haussmann-Saint-Lazare)

**Plasticien du béton :**  
Jean-Pierre Aury



**>>> Plus de cinq années de travaux "titanesques" pour ces deux cathédrales de béton brut enfouies dans le sous-sol de Paris.**

**TEXTE :** PHILIPPE MORELLI  
**PHOTOS :** SNCF, DIRECTION DE LA COMMUNICATION  
CENTRE AUDIOVISUEL, DIDIER BOY DE LA TOUR,  
ALFRED WOLF, PHILIPPE FREYSSEIX



# Haubans et dalle mince: la solution du juste milieu

●●● EN FRANCE COMME AILLEURS, LES PONTS HAUBANÉS SE DÉVELOPPENT. DES OUVRAGES EXCEPTIONNELS À PLUSIEURS TITRES : PAR LA COMPLEXITÉ DE LEURS STRUCTURES HYPERSTATIQUES, MAIS AUSSI PAR LA RECHERCHE ARCHITECTURALE POUSSÉE QUI SOUS-TEND LEUR CONCEPTION. ENFIN, ET C'EST PEUT-ÊTRE LE PLUS IMPORTANT, LES OUVRAGES HAUBANÉS EXIGENT DE LEURS CONCEPTEURS UNE TOTALE MAÎTRISE DES EXIGENCES ET DES MÉCANISMES EN JEU. ET LE SUCCÈS Y EST TOUJOURS LE RÉSULTAT D'UN TRAVAIL D'ÉQUIPE.



**L**es ponts à haubans sont multipliés ces dernières années un peu partout dans le monde. Ce sont des ouvrages exceptionnels à plusieurs titres, par la complexité de leur structure mais aussi par la recherche architecturale poussée qui sous-tend leur conception : pylônes, tablier et nappes de haubanage doivent exprimer le concept structurel tout en s'inscrivant élégamment dans le site du franchissement. Mais la conception des ponts haubanés nécessite de la part de leurs concepteurs – ingénieurs et architectes – une grande maîtrise de leur comportement mécanique et des exigences de la technologie.

Les premiers ponts à haubans ont été construits au début du XIX<sup>e</sup> siècle. Malheureusement, la mauvaise compréhension du fonctionnement de ces structures hyperstatiques et l'ignorance des effets du vent vont provoquer l'effondrement de ces premiers ouvrages. Si le haubanage n'a pas été complètement abandonné, son rôle a été limité à la rigidification des ponts suspendus par la mise en place de haubans au voisinage des pylônes suivant les idées de John Roebling, notamment pour le pont de Brooklyn. Le Français Albert Gisclard

est allé un peu plus loin en croisant des câbles porteurs venant des deux pylônes, dans une disposition proche d'un véritable haubanage.

Les premiers ponts à haubans modernes ont été construits par Eduardo Torroja – l'aqueduc de Tempul en 1926 – et par Albert Caquot avec le pont sur le canal de Donzère en 1952, fortement inspiré par les travaux de l'Allemand Franz Dischinger ; il est à noter que ces deux ouvrages ont été construits en béton armé.

### ● Un progrès d'origine germanique

C'est en Allemagne que la technique des ponts à haubans s'est vraiment développée au cours des années cinquante et soixante, avec en particulier une remarquable série de grands ponts sur le Rhin, à Düsseldorf, Cologne, Bonn, Duisbourg... Sans oublier les constructions originales de Riccardo Morandi, et notamment le pont du lac Maracaibo, ce sont Ulrich Finsterwalder, Fritz Leonhardt et Helmut Homberg qui ont établi et fait progresser la technique et la conception des ponts à haubans. Plus récemment, Jean Müller, Jacques

>>> **1** Pont sur le canal de Douzère à Pierrelatte, conçu par Albert Caquot, mis en service en 1952. Il donnera le signal au renouveau du pont à haubans. **2** **3** Extrême minceur du tablier du pont d'Evrivos, œuvre de Jorg Schlaich, qui relie la Grèce continentale à l'île d'Eubée (à environ 100 km au nord d'Athènes).

Mathivat, René Walther et Jorg Schlaich ont apporté à leur tour des idées nouvelles qui font des ponts à haubans des structures modernes, efficaces, économiques et élégantes.

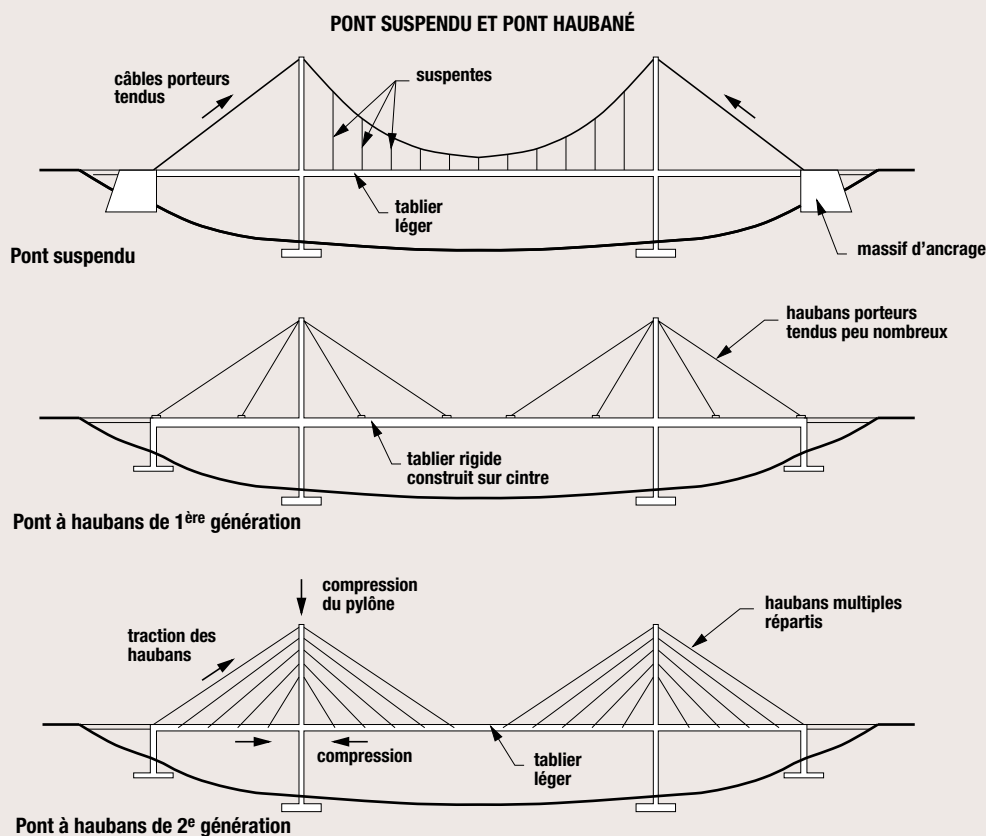
Les ponts à haubans de la première génération ne comportaient qu'un nombre limité de haubans de grande puissance, et le tablier devait avoir une grande rigidité, fonctionnant comme une poutre continue soutenue de loin en loin par des haubans qui jouent le rôle d'appuis intermédiaires. Le progrès est venu avec la construction du pont Friedrich-Ebert à Bonn par Helmut Homberg, en 1967, qui introduit la notion de haubans multiples répartis : le tablier peut être assimilé à une poutre sur un appui élastique continu, selon une image de Jacques Fauchart. Ce sera l'origine d'un foisonnement de nouvelles solutions, aussi bien pour la conception de tabliers plus souples et

plus légers que dans le domaine des méthodes où la construction par encorbellements successifs s'impose comme la plus efficace pour les grandes et moyennes portées.

### ● Les tendances modernes

La plus spectaculaire des évolutions des ponts à haubans est l'augmentation des portées franchies : avec le pont de Normandie – 856 m en janvier 1995 – les ponts à haubans commencent à entrer en compétition avec les ponts suspendus pour les très grandes portées, et le record vient d'être battu par le pont de Tatara au Japon, avec 890 m en mai 1999 ; tous les experts considèrent qu'on atteindra rapidement des portées de 1 200, voire 1 500 m si l'occasion s'en présente.

Mais l'augmentation des portées n'est pas le seul progrès observé : il faut



3

évoquer les ponts à multiples travées haubanées – dont le pont de Rion-Antirion et le viaduc de Millau seront les meilleurs exemples –, les ponts à précontrainte extradossée – imaginés par Jacques Mathivat en s’inspirant du pont du Ganter de Christian Menn, et largement développés aujourd’hui au Japon – et surtout le développement des ponts à haubans à tablier mince en béton précontraint dont le pont sur le Rhône entre Beaucaire et Tarascon est le dernier exemple.

Ce type d’ouvrage offre de bonnes perspectives de développement en France où il n’existe que peu de sites exigeant des franchissements de grande portée, si bien que c’est dans le domaine des portées moyennes – de 120 à 250 m – que les ponts à haubans doivent s’imposer par rapport à des structures plus classiques de ponts en caisson en béton précontraint ou de ponts en ossature mixte acier-béton. Pour cela, il faut réduire le coût de construction en jouant principalement sur le prix du tablier par la recherche d’un compromis optimal entre allègement et rigidité transversale, et par l’utilisation de méthodes de construction simples, rapides et généralisables.

Sans oublier les atouts esthétiques apportés par la grande minceur du tablier et l’évidence du comportement structurel, que même les profanes ressentent immédiatement en discernant les rôles des pylônes et des haubans.

● **A la recherche de la légèreté et de la simplicité**

Ulrich Finsterwalder, Fritz Leonhardt, René Walther et Jörg Schlaich ont été les précurseurs des ponts à haubans à tablier mince que nous nous sommes efforcés d’introduire en France.

Pour le premier ouvrage de ce type qui a été construit, le pont sur le Rhin à Dieppoldsau, René Walther a dessiné une dalle en béton précontraint d’épaisseur variable, de 35 cm en rive à 55 cm dans l’axe ; la largeur de la dalle est de 14 m et la portée entre pylônes de 97 m. L’élancement est ainsi de 1/200, en rupture totale avec les ordres de grandeur adoptés dans d’autres types d’ouvrages ; mais l’une des plus claires démonstrations de l’évolution des ponts à haubans, c’est l’absence de signification de l’élancement, rapport de la portée et de la hauteur structurelle du tablier.

**TECHNIQUE**

**Grands franchissements et domaine de compétitivité des ponts haubanés**

**Distance entre pylônes**

- 150 à 200 m
- 200 à 300 m
- 250 à 500/600 m
- 400 à 800 m
- 600 à 1 200 m
- Au-delà de 1 200 m

**Configuration de l’ouvrage**

- Tablier dalle mince béton précontraint
- Tablier-dalle à nervures en béton précontraint
- Tablier-caisson précontraint profil aérodynamique
- Tablier mixte acier-béton à condition d’étudier le profilage aérodynamique
- Caisson profilé à dalle orthotrope
- Pont suspendu

Le pont d’Evrivos, en Grèce, a été construit entre 1985 et 1993. Conçu par Jörg Schlaich, c’est une simple dalle rectangulaire de 13,50 m de largeur et de 45 cm d’épaisseur (sauf au voisinage des pylônes où elle est épaissie) ; avec une portée de 215 m, l’élancement atteint 1/500. Toute la rigidité de la structure vient des pylônes, dont les jambes sont des caissons carrés en béton armé d’environ 4 m de côté. Certains ont prétendu que cet ouvrage particulièrement audacieux n’assurait pas la sécurité nécessaire vis-à-vis du flambement du tablier ; mais comme

nous sommes intervenus en tant que consultants pour l’Administration grecque, et avons assuré le contrôle du projet au SETRA en collaboration avec Ingerop, nous pouvons affirmer qu’il n’en est rien, même s’il convient d’être particulièrement attentif dans la conception des détails. Les essais menés à l’Ecole Polytechnique de Lausanne par le professeur Walther le confirment s’il en était besoin. Malheureusement le règlement de calcul français du béton précontraint ne permet pas d’envisager des tabliers aussi minces et aussi flexibles, compte



**<<< La passerelle du Grand-Tressan à Bordeaux est une réalisation proche des conceptions de Walther et de Schlaich, avec un tablier-dalle extrêmement simple. L'architecte Édouard Colombani a proposé une passerelle haubanée qui fait fonction de "signal". Longue de 69 m et large de 3 m, elle enjambe les deux voies d'une rocade. Le pylône central, haut de 24 m, a la forme d'un V renversé. Il n'y a pas de liaison entre le pylône et le tablier, formé de deux poutres latérales de 0,8 m x 0,5 m dans lesquelles sont noyés les ancrages actifs des haubans, avec un hourdis de 0,25 m d'épaisseur.**

tenu des exigences vis-à-vis des états limites de service en termes de contrainte.

### ● Les applications en France

Mise en service en 1980, la passerelle de l'Illhof, conçue par Michel Placidi et Michel Mossot, et construite par Campenon Bernard à la fin des années 70, est la première application en France de ces idées. Le tablier est constitué de deux nervures longitudinales de 1,50 m de hauteur, reliées par un hourdis de 15 cm d'épaisseur et une série de pièces de pont-entretoises

espacées de 4,40 m. Malgré cette apparente complexité, la simplicité des formes a facilité le bétonnage, l'inclinaison des nervures dans le prolongement des plans de haubanage rendant même les formes intérieures autodécoffrantes. L'ouvrage, comme la passerelle de Meylan juste auparavant, a été construit sur échafaudage au sol et mis en place par rotation.

Plusieurs projets entre 1980 et 1982 ont repris ces principes mais n'ont pas été construits. Il s'agit tout d'abord du projet de pont de Cergy-Pontoise que nous avons établi avec Philippe Fraleu, du projet de Michel Placidi pour le bief

### >>> 1 À Chalon-sur-Saône, le pont de Bourgogne

**franchit une portée de 152 m entre pylônes avec un tablier mince de 1,03 m d'épaisseur maximale.**

de Nifer et du projet que nous avons conçu avec Berdj Mikaelian pour franchir l'Armançon et le canal de Bourgogne à Aisy-sur-Armançon ; tous les trois faisaient appel à une mise en place par rotation. Le projet du pont de Seyssel, que nous avons établi avec Alain Spielmann et Jean-Vincent Berlottier, faisait appel à une mise en place par poussage : le principe en a été repris pour la construction, mais avec un tablier en ossature mixte.

### ● Le pont de Bourgogne à Chalon-sur-Saône

Le projet du pont de Bourgogne à Chalon-sur-Saône a été établi avec Charles Lavigne. Son originalité réside dans la conception du tablier : il a la forme d'une dalle nervurée, mais les trottoirs sont placés à l'extérieur des nervures longitudinales et au niveau de la fibre inférieure ; on lui donne ainsi l'inertie d'un caisson de même hauteur, tout en conservant les conditions de bétonnage d'une dalle. Les deux nervures longitudinales sont reliées par le hourdis intermédiaire qui porte la

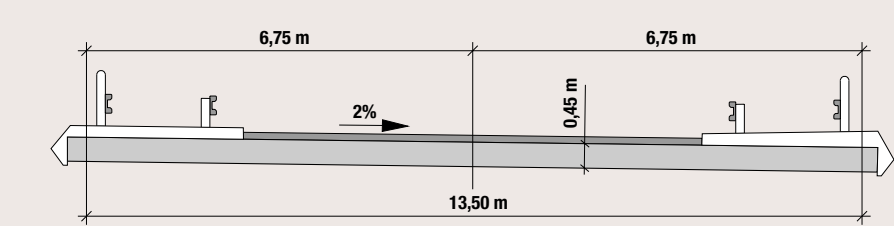
chaussée, au niveau de la fibre supérieure, et par une série de pièces de pont espacées de 3,50 m ; ces pièces de pont sont préfabriquées et précontraintes par fils adhérents pour pouvoir être directement installées dans l'équipage mobile lors de la construction des voussoirs successifs. Les nervures longitudinales sont inclinées, pour économiser la matière et faciliter le décoffrage ; les haubans – disposés dans des plans verticaux – sont ancrés dans les nervures, entre chaussée routière et trottoirs dénivelés. La forme des pylônes, particulièrement élégante grâce au travail de l'architecte, résulte des choix structurels : les têtes de pylônes, où sont ancrés les haubans, sont verticales, puis les jambes s'écartent pour faire le tour du tablier et se resserrent en dessous pour limiter la taille des batardeaux en rivière dans lesquels ont été construites les fondations. La hauteur du tablier n'est que de 1,03 m pour une portée de 152 m, ce qui correspond à un élancement de 1/250. Cela contribue à l'élégance de cet ouvrage qui a été mis en service le 14 juillet 1990. ■

TEXTE : MICHEL VIRLOGEUX

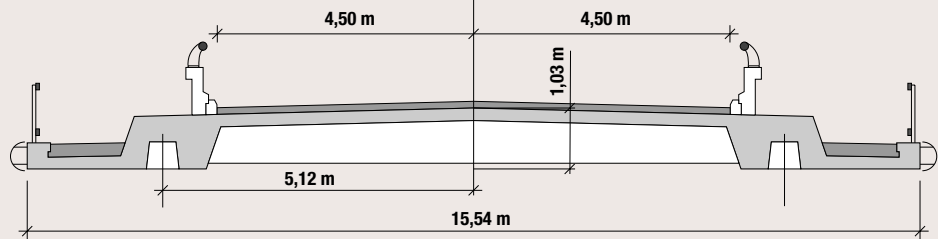
### TECHNIQUE

## L'avenir est à la durabilité et au style

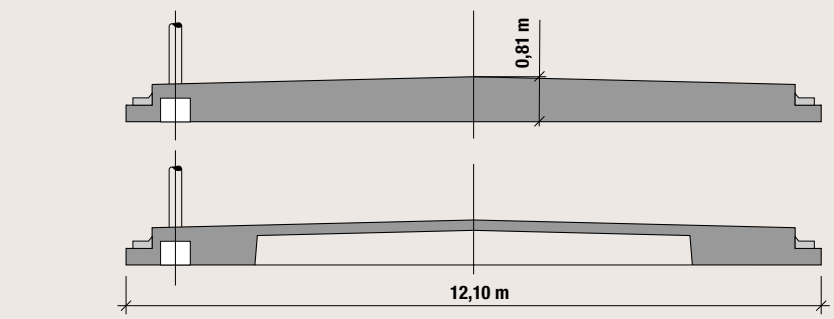
**Pour les bétons traditionnels, dont la résistance en compression est de l'ordre de 30 à 40 MPa, la conception structurelle a conduit à un allègement très significatif des tabliers. Avec les BHP (d'une résistance de l'ordre de 60 à 80 MPa), on est en droit d'attendre de nouveaux progrès. Il est probable qu'ils porteront plus sur l'amélioration de la durabilité des ouvrages que sur de nouvelles réductions significatives de l'épaisseur. L'architecte aura donc à associer des tabliers minces à des pylônes sur lesquels un important travail plastique est possible concernant la forme, la texture et la couleur des parements.**



Pont d'Evriplos coupe tablier



Pont de Bourgogne coupe tablier



Pont de Beaucaire coupes tablier



Entretien avec Michel Virlogeux, ingénieur-conseil

« Il est nécessaire de combattre les idées reçues »

**Construction moderne :** L'histoire contemporaine des ponts à haubans laisse apparaître une concurrence entre solutions béton et solutions acier. Est-ce réellement le cas ?

**Michel Virlogeux :** Dans le domaine des ponts à haubans, en effet, la compétition entre l'acier et le béton a longtemps été vive. En termes de portée, le béton a même établi deux fois le record devant l'acier : une première fois en Espagne en 1983 avec le pont Barrios-de-Luna, dit aussi pont Fernandez-Casado, d'une portée de 430 m, et ensuite en 1991 avec le pont du Skarnsund en Norvège, d'une portée de 530 m. Aujourd'hui les 800 m sont dépassés, et le béton, parce qu'il n'a pas la capacité à franchir des portées dépassant les 600 m, ne pourrait plus détenir le record. En revanche, pour des ponts à haubans ne dépassant pas des portées de 400 à 500 m, le béton reste très compétitif.

**C. M. :** En tant que concepteur de ponts, vous avez proposé des projets de ponts à haubans en France ?

**M. V. :** J'ai fait plusieurs projets de ponts à haubans qui n'ont pas été construits : Cergy-Pontoise, Boulogne-Billancourt... Pour le pont de

Bourgogne, à Chalon-sur-Saône, je me suis inspiré de travaux de Pierre Xercavins et d'une proposition non retenue de Jean Müller pour le pont de l'île de Ré. Dans mon projet, les voitures sont en haut et les piétons décalés. Ainsi, avec un tablier d'une hauteur de 1,03 m, on obtient une inertie identique à celle d'un caisson de 1,03 m. Mais le profil est beaucoup plus fin car il reste dans la logique structurelle et esthétique d'une dalle mince. Le pont de Beaucaire-Tarascon, avec ses nervures très basses, peut être considéré comme la suite directe du pont de Chalon et des ponts à tablier nervuré en béton.

**C. M. :** Le pont à haubans est une solution intéressante sur le plan architectural : l'ouvrage par lui-même est original, et c'est une occasion de mettre en valeur le paysage. Comment ces ponts sont-ils perçus par les maîtres d'ouvrage en général ?

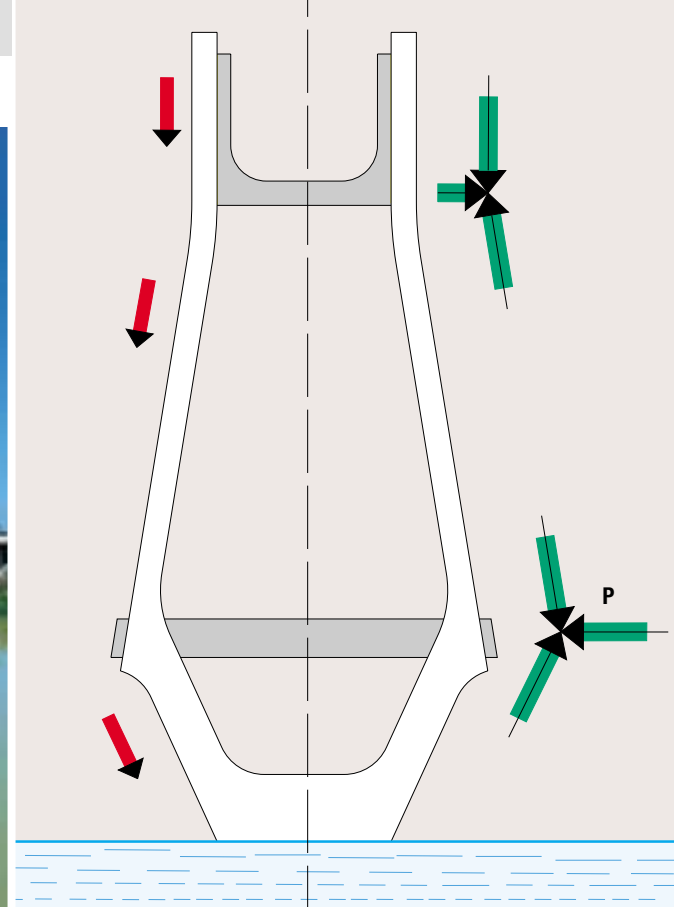
**M. V. :** Il n'y a pas de règle en la matière et les avis sont partagés. De nombreux ponts à haubans que j'ai projetés n'ont pas vu le jour car leur architecture a été rejetée de façon très subjective. Dans les années quatre-vingt, les positions étaient souvent

basées sur des *a priori*... et malheureusement les avis défavorables l'emportaient souvent. Mais depuis le pont de Normandie, il existe une sorte d'engouement pour les ponts à haubans. Certains maîtres d'ouvrage souhaiteraient même en réaliser dans des lieux où les conditions ne s'y prêtent pas du tout. Cela dit, il existe aussi des consultations où il est explicite que les ponts à haubans n'ont *a priori* aucune chance. J'ai le sentiment que les architectes responsables des sites et les représentants des milieux culturels sont opposés aux ponts à haubans parce qu'ils les voient comme des œuvres d'ingénieurs. Il existe malheureusement quelques exemples de ponts à haubans qui pèchent par leur esthétique et peuvent servir d'alibis à cette attitude négative. Dans un ouvrage de ce type, il n'y a pas de droit à l'erreur : s'il est "loupé", on ne voit plus que lui.

**C. M. :** Apparemment, il existe de nombreuses idées reçues sur les ponts à haubans. Quelles sont les plus répandues ?

**M. V. :** On dit souvent que les ponts à haubans ne sont pas des ouvrages urbains, mais plutôt des ouvrages de pleine campagne. Ce qui s'est

passé lors du concours du pont Charles-de-Gaulle à Paris est typique de cet état d'esprit. Dix équipes avaient été qualifiées. Sur les neuf projets rendus, deux seulement étaient réellement constructibles. Parmi eux, celui de Louis Arretche et de Pierre Xercavins, qui a été retenu, et celui de Jean Müller et d'Alain Spielmann, un pont à haubans semblable dans son esprit à celui que j'avais imaginé pour Boulogne-Billancourt. Je pense que le jour où un très beau pont à haubans, dessiné par un très bon ingénieur associé à un architecte de talent, aura été réalisé en milieu urbain, cela fera date. Il existe dans ce domaine des références intéressantes en Allemagne. Mais il est bien évident qu'un pont à haubans en milieu urbain et un autre en milieu "naturel" ne peuvent pas avoir les mêmes formes. Sans vouloir polémiquer, il est important de combattre certaines idées reçues comme le caractère encombrant des haubans dans le site. Au pont de Normandie, les haubans sont gris clair ; ils ne se voient même pas sous certaines ambiances de lumière. À Seyssel, les haubans sont bleu clair, et seuls le tablier et le mât ressortent. Il est aussi possible d'obtenir l'effet inverse : les haubans



du pont de Brotonne sont de couleur jaune d'or et très visibles, mais cela fait partie de l'esthétique générale de l'ouvrage. Cela montre que les concepteurs disposent d'une large latitude en matière d'expression esthétique et d'un registre varié d'effets.

**C. M. :** *Le pylône joue un rôle important dans l'esthétique générale de l'ouvrage, et son dessin est induit par la structure même du pont. Pouvez-vous nous détailler ce travail qui allie pensée technique et pensée architecturale ?*

**M. V. :** Pour chaque pylône, c'est un travail technico-architectural qu'il faut effectuer. À titre d'exemple, la forme du pont de Chalon-sur-Saône est dictée par plusieurs critères techniques : les trottoirs sont à l'extérieur des deux plans de haubanage et ceux-ci sont verticaux, pour pouvoir bénéficier d'un ancrage très simple dans la tête de pylône et dans le tablier. Ces deux choix ont dicté le dessin de l'ouvrage. Le haut du pylône doit être vertical, comme les plans de haubanage. En revanche, dans sa partie inférieure, le pylône doit faire le tour du tablier, ce qui implique d'écarter les deux "branches" du pylône. Il est donc nécessaire d'avoir une entretoise sous le niveau du tablier pour reprendre les effets de l'inclinaison. Enfin, pour ne pas avoir un batardeau trop important dans la rivière, il est indispensable de resserrer les fondations, ce qui implique la présence d'une barre. Donc,

avant de dessiner la forme définitive du pylône, on sait déjà qu'elle est déterminée par l'ensemble des choix techniques. Dans un projet conduit de façon cohérente, c'est à partir de ces données définissant l'organisation de la matière que l'architecte peut dessiner le profil du pylône et l'architecture d'ensemble de l'ouvrage.

**C. M. :** *Les ponts à haubans à dalle mince présentent-ils des avantages par rapport aux autres modes de construction ?*

**M. V. :** L'avantage majeur des ponts à dalles minces est qu'ils sont beaucoup plus économiques que les ponts à caisson. Le pont à dalle mince lutte sur le plan économique avec les ponts à ossature mixte bipoutre. Ces derniers sont en effet très performants dans le domaine des portées comprises entre 100 et 600 m. Dans le cas d'une portée élevée, de l'ordre de 400 m, les ouvrages en béton sont à armes égales avec les solutions en acier. S'il existe en plus des problèmes aérodynamiques, il faut employer des caissons et les caissons en béton sont moins coûteux que leurs homologues en acier. Pour les portées moyennes de 100, 200 ou 300 m, les caissons en béton ne peuvent aucunement concurrencer les solutions mixtes. Dans ce cas, la voie à emprunter est celle des ouvrages à dalle mince en béton. En général, un pont à haubans à dalle mince nervurée revient un peu plus cher qu'un ouvrage classique, mais le

différentiel est faible, de l'ordre de 10 % au maximum. Il en ressort que le choix d'un pont à haubans de ce type permet à un maître d'ouvrage de réaliser un ouvrage original sans que son coût en devienne pour autant exorbitant.

**C. M. :** *Dans le domaine des ponts à dalle mince, peut-on dire qu'il existe aujourd'hui deux versions, la dalle pure et la dalle nervurée ?*

**M. V. :** Oui. Par rapport à la dalle pure, la dalle légèrement nervurée a besoin d'entretoises. Cela amène un handicap économique. Tous les ouvrages qui ont des nervures longitudinales sont nervurés transversalement. À cela s'ajoute le fait que la réglementation française n'est pas favorable à la dalle. Il n'existe en France que deux ouvrages à dalle pure. Le premier se trouve sur l'autoroute A 64, il s'agit du pont de la Bidouse ; le second est à Bordeaux, sur le périphérique : il s'agit de la passerelle du Grand-Tressan, qui présente une dalle de 25 cm d'épaisseur.

**C.M. :** *La réglementation française n'est pas favorable aux ponts à haubans à dalle. Pour quelle raison ?*

**M. V. :** Parce qu'elle n'accepte pas l'existence d'une fissuration sous charge permanente. Et par définition, le béton est fissuré, même sans charge. Pour y remédier, il est nécessaire d'avoir une précontrainte partielle qui fait que sous charge

permanente et fréquente, le tablier reste comprimé.

**C. M. :** *Cette question est un peu la suite de la précédente : la controverse technique à propos de ces ouvrages est-elle fondée ?*

**M. V. :** Il est vrai qu'il existe aussi en la matière des idées reçues. Certaines personnes, par exemple, ont affirmé que les ponts à haubans à dalle mince sont instables et qu'ils ne tiennent pas. Elles n'ont apparemment pas compris les particularités de ces ouvrages. Pour les adversaires patentés des ponts à haubans à dalle mince, sous l'effet d'une charge locale il y a localement création de rotules plastiques et dans ces conditions, rien n'empêche le flambement de la poutre. La réponse consiste tout simplement à dire qu'il ne faut pas laisser la poutre en arriver à cette situation ! Il faut dimensionner la poutre afin que les rotules plastiques ne puissent pas se développer et la question est réglée. Je tiens à préciser qu'un projet de pont à dalle mince ne peut être conduit que par un concepteur chevronné et expérimenté. Sans entrer dans les détails, les essais effectués au laboratoire de l'École polytechnique fédérale de Lausanne sous la direction de René Walther montrent que les ponts à haubans à dalle mince ne présentent aucun problème de stabilité générale.

*Propos recueillis par Norbert Laurent*





2

3

# La liaison Beaucaire-Tarascon

**C**e nouvel ouvrage de franchissement du Rhône, sur le contournement par le sud des agglomérations de Beaucaire et de Tarascon, a été conçu dans le même esprit que celui de Chalon-sur-Saône, pratiquement par la même équipe, et il est construit par la même entreprise, Léon Grosse. Ses pylônes en lyre ont une forme voisine de ceux du pont de Bourgogne, mais sont plus imposants, compte tenu de la

portée plus grande : 192 m. Moins large (12,10 m), ce pont ne comporte pas de trottoirs.

## ● Une minceur exceptionnelle

Le tablier a donc une forme plus classique avec des nervures latérales reliées par un hourdis supérieur et de multiples pièces de pont, là aussi préfabriquées et précontraintes par fils adhérents. Son épaisseur n'est que de

0,81 m, ce qui correspond à un élancement de 1/240. Très mince – véritable ruban de béton précontraint soutenu par des nappes de haubanage en éventail –, parfaitement équilibré, bien proportionné, il apparaît à la fois élégant et audacieux. Avec des formes qui découlent une fois de plus de la logique des efforts, il correspond parfaitement à l'évolution la plus récente de cette famille d'ouvrages. ■

PHOTOS : GUILLAUME MAUCUIT-LECOMTE

>>> 1 Les haubans du pont de la Bidouse (A 64) sont liés à des mâts indépendants. 2 Le pylône en forme de lyre de la liaison Beaucaire-Tarascon permet de disposer les nappes de haubans dans des plans verticaux. 3 Le tablier mince est raidi transversalement par des poutres préfabriquées en béton précontraint par fils adhérents.



>>> **Finesse du tablier et puissance des pylônes : le pont de Beaucaire-Tarascon est un bon exemple de pont à haubans moderne.**

**Maître d'ouvrage :**  
conseil général  
des Bouches-du-Rhône

**Maître d'œuvre :**  
Service du pont de Beaucaire -  
Tarascon, Frédéric Edon  
et Jean - Luc Masson

**Projet et contrôle des études :**  
SETRA et CETE Méditerranée,  
Daniel Le Faucheur, Philippe Vion,  
Jacques Resplendino

**Ingénieur-  
conseil conception :**  
Michel Virlogeux

**Architecte :**  
Charles Lavigne

**Entreprises :**  
Léon Grosse - Bauland :  
Claude Letey, Philippe Bonneval,  
Pierre Mouchel

**Haubanage :**  
Freyssinet

**Préfabrication béton :**  
CPB - Yves Brugeaud

**Ingénieur structures :**  
Alain Chauvin

Livres

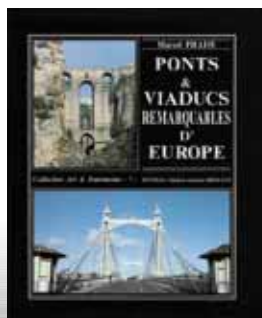


→ Les ponts modernes  
XX<sup>e</sup> siècle

Bernard Marrey

Après un premier volume couvrant les XVIII<sup>e</sup> et XIX<sup>e</sup> siècles, Bernard Marrey consacre un livre à l'histoire des ponts réalisés au XX<sup>e</sup> siècle. En effet, de nombreuses réalisations spectaculaires et reconnues en béton armé ou en béton précontraint ont marqué le siècle. Ce panorama des ponts français, qui expose aussi l'évolution des techniques de construction et de mise en œuvre, témoigne du talent et de l'ingéniosité des concepteurs de ces ouvrages. Chaque pont est accompagné d'un commentaire retraçant l'histoire, et décrivant les techniques de construction et de mise en œuvre utilisées.

Éditions Picard

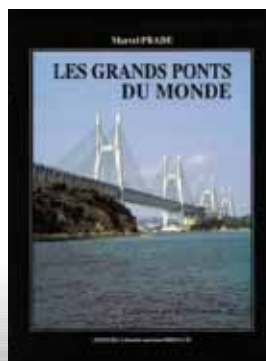


→ Ponts et viaducs remarquables d'Europe

Marcel Prade  
Collection Arts & Patrimoine

Retraçant, dans un premier chapitre, l'histoire des voies de communication et des ponts, de l'Antiquité à nos jours, l'auteur nous conduit ensuite à la découverte des ponts et viaducs remarquables des différents pays d'Europe. La présentation de chaque ouvrage est accompagnée de photos et de dessins qui illustrent le discours. Au fil des pages, ces ouvrages d'art apparaissent comme d'admirables monuments qui témoignent de l'histoire des hommes et des techniques.

Éditions Brissaud à Poitiers



→ Les grands ponts du monde (hors d'Europe)

Marcel Prade  
Collection Arts & Patrimoine

L'auteur nous présente ici, près de 300 ponts remarquables répartis sur toute la planète. A travers ce panorama, on notera que les ouvrages situés en Afrique, en Asie occidentale et en Amérique du sud sont souvent marqués à différents titres par les périodes de colonisation. En revanche, les pays d'Amérique du nord et d'Extrême-Orient ont développé leurs propres techniques. Ce livre propose un ensemble de réalisations commentées et illustrées, invitant à découvrir la diversité et les richesses des cultures techniques à travers le monde.

Éditions Brissaud à Poitiers



→ Construire avec les bétons

Sous la direction de CIMBÉTON

Conçu, rédigé et illustré sous la direction de CIMBÉTON, cet ouvrage présente les différentes techniques de mise en œuvre du béton, leurs potentialités et leur contraintes. Il aborde aussi les multiples aspects de la pensée architecturale du béton, sur le plan technique comme sur le plan formel. La première partie du livre, intitulée "Penser béton", traite des questions liées à la conception des lieux de vie et de l'architecture en béton. Elle traite également des structures et des éléments constructifs en béton sous l'angle technique et architectural, ainsi que du vaste éventail de formes et de matières offert par le béton. En parallèle, une vingtaine d'opérations exemplaires, étudiées en détail, complètent et illustrent les propos. La seconde partie du livre, "Connaître le béton", conduit le lecteur à découvrir en profondeur le béton, la gamme des bétons contemporains, la production des bétons et les performances du béton. A cela s'ajoutent une présentation des aspects réglementaires et des outils de dimensionnement. 600 illustrations ainsi que 350 schémas et dessins complètent les propos de cet ouvrage de 576 pages.

Coédité par CIMBÉTON et Le Moniteur

Forum

## Forum des associations du Génie Civil

Mettre en contact des acteurs de la construction qui, s'ils travaillent ensemble et partagent les mêmes interrogations, n'ont pas l'occasion de bien se connaître. Voilà le but de ce forum des associations du Génie civil et urbain, organisé à Lyon par trois associations :

- l'AFGC (Association Française de Génie Civil).
- l'AUGC (Association Universitaire de Génie Civil).
- l'IREX (Institut pour la recherche appliquée et l'expérimentation).

Le thème principal de ce forum concerne la qualité de vie et l'environnement de l'homme. En effet, depuis quelques années, l'émergence du concept de développement durable a fait prendre conscience de la nécessité d'intégrer la protection de l'environnement comme élément fondamental d'amélioration de la qualité de la vie : un thème qui sera abordé lors des conférences plénières, du 3<sup>e</sup> congrès universitaire et du colloque AFGC.

À Lyon les 27 et 28 juin 2000



*La liaison fixe entre le Danemark et la Suède est bien plus qu'un pont franchissant l'Øresund : c'est une succession d'ouvrages d'art où l'intelligence et le travail de l'homme sont les deux outils qui lui permettent de dépasser les obstacles dressés par la nature. On ne s'étonnera donc pas d'y voir le matériau béton figurer au premier rang des matériaux employés.*



