

CONSTRUCTION

ANNUEL OUVRAGES D'ART 2011

MODERNE



ÉDITO

Les bâtiments en béton armé sont les monuments historiques du xx^e siècle. On pense à Notre-Dame du Raincy, Saint-Joseph au Havre, la villa Savoye ou Notre-Dame de Royan. Les architectes des Monuments Historiques s'emploient aujourd'hui à restaurer et à transmettre ces monuments de béton : ainsi les halles du Boulingrin à Reims et les unités d'habitation de Le Corbusier à Marseille sont actuellement en chantier. On sait moins que dès la fin du xix^e siècle, le Service des Monuments Historiques, avec ses architectes, fut précurseur de l'utilisation du béton armé pour la restauration des monuments et pour la construction des édifices publics. Je pense à Anatole de Baudot, plus proche collaborateur d'Eugène Viollet-le-Duc, créateur dès 1887 de « L'École de Chaillot », où sont enseignées les techniques contemporaines de restauration pour la formation des architectes du patrimoine. On lui doit les premiers édifices publics en béton armé, l'église Saint-Jean-de-Montmartre, le lycée Victor Hugo (Paris 4^e) et le théâtre de Tulle. Citons aussi ces pionniers du béton : Charles-Henri Besnard, constructeur inspiré de l'église Saint-Christophe-de-Javel, Henri Deneux, qui reconstruisit en béton la charpente de la cathédrale de Reims, Yves-Marie Froidevaux, qui utilisa des poutres précontraintes selon le procédé Freyssinet pour reprendre en sous-œuvre la façade de l'abbatiale du Mont-Saint-Michel. Aujourd'hui, une œuvre majeure d'Eugène Freyssinet, témoin de ces temps d'invention, la halle des messageries de la gare d'Austerlitz dans le 13^e arrondissement de Paris, est menacée de démolition partielle : souhaitons qu'elle puisse être protégée intégralement en tant que monument historique.

Jean-Paul Mauduit
Architecte du Patrimoine,

Président d'honneur de l'association des Architectes du Patrimoine.



← Couverture • Autoroute A89, Loire et Rhône.
Photo : Michel Barberon

CIMbéton
CENTRE D'INFORMATION SUR
LE CIMENT ET SES APPLICATIONS

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

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

Directrice de la publication : Anne Bernard-Gély • Directeur de la rédaction : Patrick Guiraud
• Rédacteur en chef : Norbert Laurent • Rédacteur en chef adjoint : Clothilde Laute •
Conception, rédaction et réalisation : C@re-Off Paris • Directrice artistique : Sylvie
Conchon • Dessins techniques et plans : Frédéric Olivier • Pour tout renseignement concer-
nant la rédaction, tél. : 01.55.23.01.00 • La revue *Construction Moderne* est consultable sur
www.infociments.fr • Pour les abonnements, envoyer un fax au 01.55.23.01.10 ou un e-mail à
centrinfo@cimbeton.net

SOMMAIRE – Annuel Ouvrages d'art – Édition 2011



01 Pont Altiani – Haute Corse (2B)



05 Autoroute A89 – Loire et Rhône



10 Infrastructures – Principauté de Monaco



14 Littérature et ouvrages d'art



23 Halle Freyssinet – Paris (75)



27 Pont Hassan II – Vallée du Bouregreg, Rabat – Maroc



32 Pont sur l'autoroute Fès-Oujda Fès, Maroc



36 International – Grands chantiers autour du monde

Solutions béton

Les solutions techniques pour la réparation et le renforcement des ouvrages de génie civil en béton

La réussite d'un ouvrage dépend de nombreux paramètres dont le qualité de la conception, des matériaux utilisés, de la maîtrise ainsi que des différents conditions, climat, disponibilité et de maintenance. Le béton utilisé au long de son cycle de vie doit être adapté à son utilisation et être capable d'assurer les applications de réparation ou de renforcement pour garantir leur durée d'utilisation ou être de nouvelles fonctionnalités.

Des solutions techniques sont disponibles et validées, elles ont fait le preuve de leur efficacité et permettent d'assurer les performances prévues pendant la vie des ouvrages en béton structure. Il convient de choisir la solution technique adaptée à la pathologie à traiter, après un diagnostic complet et précis des dommages, de leur cause et de leur évolution.

15 Les solutions techniques pour la réparation et le renforcement des ouvrages de génie civil en béton



Extrême épure

Depuis la route principale qui relie Bastia à Bonifacio, à droite à Aléria en direction de Corte, la route s'enfonce bientôt dans un relief escarpé qui franchit le Tavignano. Au cœur de ce paysage sauvage se trouve un pont génois classé au titre des Monuments Historiques, dont l'existence remonte au ^{xiv}^e siècle. Bien que vigoureusement campé sur ses trois arches en maçonnerie, son grand âge méritait une retraite honorable d'autant que son étroitesse et son positionnement rendaient son usage difficile, voire dangereux. Son successeur s'impose par l'épure extrême de son arc en béton qui se marie avantageusement avec la beauté sauvage de ce site classé Natura 2000, et franchit avec élégance le cours de la rivière.

Texte : Delphine Desveaux



→ 1 • Le nouveau tracé laisse la part belle au pont génois et à la petite chapelle voisine, tous deux classés. 2 • Les piles en Y ont été réalisées avec des coffrages en bois.

« **L'aménagement volontariste** de la RN 200 permet de relier efficacement Corte à la Plaine Orientale, explique Loïc Morvan, ingénieur à la Collectivité Territoriale de Corse et maître d'œuvre pour le suivi des travaux. La construction du nouveau pont offrait l'occasion de supprimer l'avant-dernier point singulier de l'itinéraire », avec sa voie unique et son tracé en baïonnette, le pont génois n'offrait pas une fluidité de circulation adaptée mais « son classement au titre des Monuments Historiques en 1977 justifiait le choix d'un ouvrage ambitieux pour le remplacer ». Le nouveau tracé s'inscrit en oblique sur la rivière. Bien qu'allongeant la longueur du tablier, ce biais met en

valeur le site classé Natura 2000, le vieil ouvrage d'art et la petite chapelle voisine, elle aussi classée. Dès leur première visite en 2002, l'architecte Charles Lavigne et l'ingénieur Michel Virlogeux, tels de vieux complices, avaient projeté un pont en arc. Une réponse à la fois simple et discrète qui s'accorde à la beauté sauvage du site, à la faible dimension de la brèche, aux éléments patrimoniaux... et qui s'est transformée en évidence devant l'excellente qualité du substratum rocheux (schiste compact).

LA VALEUR AJOUTÉE

Très attentifs à ce paysage exceptionnel, les concepteurs ont cherché à dessiner un ouvrage d'une grande finesse pour mettre en valeur le patrimoine bâti. « Le dessin d'un pont répond toujours à ce qui existe autour, explique Michel Virlogeux. On esquisse toutes les solutions qui passent par la tête, et parmi la dizaine de propositions, on choisit celle qui convient le mieux. Ma réaction immédiate a été de faire un pont en arc, qui est par excellence la réponse la plus élégante et la plus symbolique. J'ai imaginé un arc assez court en croissant de lune, dans la pure tra-

dition des ouvrages de Robert Maillart¹ avec le tablier qui vient s'encasturer dans l'arc. De part et d'autre, j'ai préféré inscrire deux pilettes pour privilégier la finesse du tablier et développer l'idée de transparence ». Au final, l'ouvrage est d'une élégance rarement égalée à ce jour, avec un tablier de 60 cm d'épaisseur et des pieds d'arc de 50 cm. Tout intemporel et respectueux qu'il soit, l'arc n'en est pas moins très moderne dans l'épure de sa silhouette. De la minéralité du lieu et des appareillages en pierres des constructions voisines découle le choix du matériau, en l'occurrence un béton à hautes performances avec une précontrainte classique (pour le tablier). Au-delà de la finesse du trait, le sommet de l'arc et les quatre pilettes sont ajourés, optimisant la matière au point qu'il serait difficile d'en mettre moins. Signe de l'évolution des temps et des techniques, la découpe en ogive fait un clin d'œil aux arcs en plein cintre du vieil ouvrage tandis que l'appareillage de roches locales sur les culées lui fait écho.

¹ – Robert Maillart (1872-1940) était un ingénieur génie civil Suisse qui a révolutionné les constructions en béton armé.

L'esthétique et la recherche de légèreté, certes, mais le projet s'attache aussi à laisser la part belle au patrimoine historique. Ainsi, pour parachever la perception du site, les architectes Thomas Lavigne et Christophe Chéron ont traité avec générosité les abords en créant un point de vue sur la ravissante petite chapelle

Caractéristiques du béton

Béton : BPS C50/60 XC4(F) Dmax 10 S4 Cl 0,10
Ciment : CEM I 52,5 N CE PM-ES-CP2 NF Lafarge ciments
Filler : Betocarb HP-OG Omya France
Retardateur : Chryso Tard CHR
Superplastifiant : Chryso Fluid Optima 175
Résistance à 28 jours : 72 MPa
Rhéologie : 4 h (centrale Betag basée à l'aéroport de Bastia et acheminement par camion toupie)
Slump : 230 à 240 mm Extrêmement fluide en raison de la densité d'armatures
Corniche préfabriquée en béton noir : Bonnasabla (Lannemesan 65)

Chiffres clés
Longueur totale : 115 m 7 travées : 15-17-7-42-7-15-12
Largeur utile : 12,30 m (2 x 1 voie)
Ouverture de l'arc : 42 m
Épaisseur du tablier : 60 cm - 80 cm sous l'arc
Pile – Épaisseur voile béton : 50 cm
Durée du chantier : 18 mois



→ 3 • Les piles ne diffèrent que par leur longueur (6 m et 9 m). 4 • La finesse du tablier et les piles ajourées privilégient l'idée de transparence.

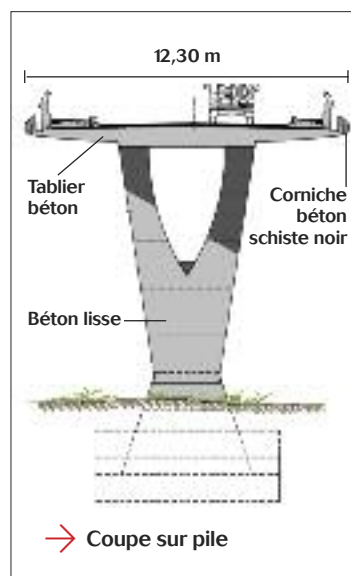
de l'autre rive, ainsi qu'un cheminement piétonnier sécurisé vers le vieux pont, qui sera restauré. Pour Christophe Chéron, c'est affaire d'évidence : « *Hormis des gestes qui demandent une forte présence, telle une sculpture pour créer un signal emblématique en pleine ville, notre appréciation des choses est d'assurer une fonction dans le respect du paysage, du patrimoine et de l'argent du contribuable. La recherche d'élégance, de transparence et de finesse en découlent* ».

Les piles sont en béton brut, comme l'arc, formulé avec des agrégats locaux pour lui conférer une teinte ocre clair en harmonie avec les constructions voisines. Le phasage a été dicté par deux contraintes principales : la capacité de production de la centrale à béton (120 m³/jour) et le risque de crue en période de fonte des neiges (élévation du niveau de 6 m en crue centennale). Grâce à l'excellente qualité du substratum rocheux, l'ouvrage est fondé sur semelles superficielles à quelques mètres au dessous du sol. Les piles ajourées ne diffèrent que par leur longueur (6 m et 9 m), les premières étant posées sur des appareils

d'appui à pot, les secondes étant encastrées dans le tablier. Leur forme en Y a nécessité un coffrage spécial en bois. Par ailleurs, la densité d'armatures passives (430 kg/m³) a imposé une phase de réglage pour autoriser le passage des trous de banches et autres éléments de bétonnage.

L'ARC ET SON TABLIER

Réalisé en août 2010 pour éviter toute montée des eaux, l'étalement de l'arc (110 tonnes) est constitué de huit poutres HEB.



Entretien

MICHEL VIRLOGEUX, *ingénieur, expert international*

Un arc épuré

Quelle a été la principale difficulté ?

Le problème essentiel résidait dans la finesse de la structure. Cet arc très mince, très léger, est très solide à condition qu'il soit soumis à une charge uniforme.

Pour créer une liaison élégante entre le tablier et l'arc, j'ai allégé la charge en perforant l'arc à l'endroit où il est le plus lourd. Ce détail, qui paraissait être un dessin d'architecte pour donner davantage de transparence à l'ouvrage, répond d'abord à cette problématique de charge.

En revanche, il a fallu épaissir l'arc au niveau des naissances² en raison de l'exiguïté de la plateforme. Et plutôt que de l'encastrer, nous avons créé une ligne d'appuis qui lui laisse une certaine marge d'articulation.

Vous venez également de réaliser avec Freyssinet Société un pont à haubans à l'entrée de Fès. Quel était l'enjeu ? (cf. article p. 8)

La société nationale des Autoroutes du Maroc construit la section Fès-Oujda et voulait un pont à haubans pour marquer symboliquement l'arrivée à Fès. Nous savions que l'offre financière la plus intéressante l'emporterait et nous n'avions pas beaucoup de temps pour répondre à l'appel d'offre.

C'est pourquoi nous avons choisi une solution simple avec un pylône central, moins onéreux qu'un mât excentré. Pour affiner sa ligne et lui donner de l'allure, j'ai dessiné un pylône en forme de V.

2 – Endroit où l'arc s'appuie sur la fondation.



5



6



7

→ 5, 6 et 7 • Avec sa découpe en ogive, la ligne de l'arc, bien qu'intemporelle, est très moderne dans l'épure de sa silhouette et l'optimisation des matériaux.

Entretien

PHILIPPE COULOUMIES et **NICOLAS MODICA**,
respectivement, *directeur technique et conducteur travaux chez CARI*

La maîtrise des parements en béton

Quel était le cahier des charges pour le parement des bétons ?

Les parements des piles et du tablier appartiennent à la catégorie des parements « fins » définis dans le fascicule 65 du CCTG et caractérisés selon la norme P 18-503.*

Quel est le retour d'expérience de ce chantier ?

Afin d'atteindre les objectifs fixés, nous avons rédigé deux cahiers de procédure de coffrage, ferrailage et bétonnage de l'arc et des piles. Un essai de convenance de pile a été réalisé afin de juger la qualité des bétons, et en particulier la vibration qui conditionne la qualité des parements et donc de la texture finale. L'essai a montré que la vibration, initialement prévue de façon externe du fait de la densité de ferrailage (430 kg/m³ pour les piles P1 et P6), devait être complétée par une vibration interne. Une cheminée de bétonnage a été installée jusqu'en pied de banche avec des tubes-guide en PVC pour guider les aiguilles vibrantes au cœur du béton et complétée d'une vibration externe.

Cette combinaison « aiguilles vibrantes et vibreurs externes » nous a permis de garantir l'homogénéité recherchée pour les parements. Le bétonnage des piles s'est déroulé en une fois (1 jour/pile).

* La norme P18-503 caractérise l'aspect de surface d'un parement en béton par 3 critères : planéité = P, texture = E, teinte = T. Chaque critère est associé à un chiffre qui correspond à un niveau croissant de qualité. On distingue la planéité d'ensemble et la planéité locale. La texture est définie par un bullage moyen, un bullage concentré ou des défauts localisés. La teinte est appréciée sur une échelle de gris comprenant 7 niveaux.

Spécialement parachevées en usine selon la courbe de l'arc, elles ont été acheminées et assemblées sur site à l'aide de tiges Mc Alloy. Le tout repose sur quatre palées tubulaires fondées dans le lit du fleuve. Dans la mesure où les branches de l'arc fusionnent dans le tablier, ces deux éléments ont été réalisés conjointement. Les caissons de coffrage sont finement assemblés avec des patins à vis avant de recueillir les armatures passives et la précontrainte (72 câbles 4T15S gainés graissés autoprotégés). Compte tenu de l'inclinaison à 60° de l'arc et de la capacité de production de la centrale à béton, le bétonnage s'est fait à l'avancement, caisson par caisson (17 m de longueur). Les pieds de l'arc sont articulés sur des lignes d'appui avec des vérins de manière à compenser les éventuelles déformations. Après la réalisation de l'arc, les travées de raccordement ont été clavées avec le tablier de l'arc et les tabliers de rives. Pour garder l'aspect minéral d'ensemble, le béton des corniches reprend la couleur du schiste noir. ■

Photos : ouverture, 6 et 7 –
Loïc Colonna ; 1 – Sébastien Aude ;
2, 3, 4 et 5 – Michel Brailion



Maître d'ouvrage :
collectivité Territoriale de Corse

Maître d'œuvre :
ingénieur, Michel Virlogeux ;
architectes, Architecture
et Ouvrages d'Art,
Lavigne et Chéron

BET ouvrages d'art :
Secoa, Bertrand Lenoir

Maîtrise d'œuvre travaux :
Collectivité Territoriale de Corse,
Direction des Routes

Entreprises :
Cari mandataire ;
Etic, appareils d'appuis
et précontrainte

Sous-traitants : SAMT,
armatures passives ; Sedes,
conception outil
de coffrage de l'arc

BET structure : Cogeci

Coût : 6,9 M€ HT



Suite de viaducs **et tunnels**

La construction du tronçon de l'autoroute A89 entre Balbigny (Loire) et La Tour-de-Salvagny (Rhône), à l'ouest de l'agglomération lyonnaise, est dans sa phase active. Longue et exigeante, sa conception a nécessité de nombreuses études en amont, mais aussi de prendre de multiples précautions pendant les phases travaux pour arriver à une insertion environnementale réussie. Long de 50 km, le projet traverse les monts du lyonnais, du beaujolais et plusieurs vallées. Un relief difficile qui justifie les nombreux et grands ouvrages caractérisant cette section. Elle compte en effet pas moins de sept viaducs, trois tunnels cumulant 5 700 m, de grands murs de soutènement. Une véritable palette d'ouvrages divers où le béton s'impose de façon naturelle.

Texte : Michel Barberon



→ 1, 2 et 3 • Avec ses 622 m, le viaduc de Goutte Vignole est le plus long du projet, mais aussi le plus haut.

La section Balbigny – La Tour-de-Salvagny de l'autoroute A89, dont l'ouverture est programmée en décembre 2012, traverse le nord du département de la Loire sur 18 km et l'ouest de celui du Rhône sur 32 km. Ces 50 km, auxquels s'ajoutent 3,5 km pour l'antenne de l'Arbresle, constituent l'ultime maillon de la liaison autoroutière « ouest – est » qui va permettre de relier la façade Atlantique (Bordeaux) à la Région Rhône-Alpes via Clermont-Ferrand. Favorisant les échanges entre la région

lyonnaise et les autres pôles européens et régionaux, ce maillon assurera aussi le désenclavement des agglomérations de Roanne et de Tarare. Il va améliorer les conditions de circulation, le confort, la sécurité et la rapidité, puisque le gain de temps entre Balbigny et La Tour-de-Salvagny est estimé à une trentaine de minutes. Maître d'ouvrage de cette réalisation, Autoroutes du Sud de la France (ASF), société de Vinci Autoroutes, en finance les 1,5 milliard d'euros, la construit et l'exploitera jusqu'en 2033, date d'achèvement de son contrat de concession.

ENVIRONNEMENT SENSIBLE

Les travaux ont démarré en juin 2008, soit cinq années après la Déclaration d'utilité publique prononcée le 17 avril 2003. Mais une longue période de concertation avec les riverains et de nombreuses associations les a précédés dès 2006. L'autoroute traverse en effet des zones extrêmement fragiles sur le plan environnemental. De ce fait, les oppositions ont été vives, surtout sur l'est du projet, fort urbanisé et où existent déjà beaucoup d'infrastructures. « En arrivant en juillet 2006,

nous savions qu'il serait difficile de faire passer le projet », reconnaît Jean-Jacques Lacaze, directeur d'opération A89 pour ASF. « Très tôt, nous avons travaillé avec les services de l'État concernés et les associations de protection de la nature. Nous les avons intégrées dans la conception.

Le calage définitif du tracé dans la bande des 300 m s'est fait avec elles. Et cela a été un succès puisqu'il n'y a pas eu de blocage. Créer une autoroute respectueuse de l'environnement est fondamental et la meilleure référence est encore de faire la preuve par l'exemple. » Les responsables d'ASF n'ont ainsi pas hésité à emmener les maires des 22 communes concernées par le tracé en cours sur le tronçon précédant de l'A89, en Corrèze et dans le Puy-de-Dôme, où Jean-Jacques Lacaze avait déjà été en charge du projet. « Ils ont discuté avec ceux qui avaient vécu les travaux entre 1996 et 2006. Ils ont vu les aménagements et cela les a rassurés. » Mais pour apaiser les tensions, ASF a dû cependant anticiper et innover. Une maquette virtuelle avec imagerie en 3D a été créée pour mieux visualiser l'autoroute dans son environnement immédiat et la « mon-

trer » à ses futurs riverains. Le chantier se déroule sous de fortes contraintes écologiques car le tracé croise en particulier de nombreux cours d'eau imposant, pour leur préservation, la mise en place pendant les travaux de bassins de traitement.

DES CONTRAINTES SÉVÈRES

Plus de 120 mares ont été reconstituées, les déboisements ont été planifiés en fonction des cycles biologiques... Les travaux dans certains vallons abritant des espèces protégées ont été soumis à de sévères contraintes. C'est en particulier le cas dans celui du Boussuivre où l'autoroute s'inscrit dans un site très encaissé d'une grande richesse écologique. Pour limiter les terrassements et les impacts sur le ruisseau situé en contrebas, des caractéristiques géométriques réduites ont été adoptées et les grands talus des déblais réalisés dans des zones instables ont fait l'objet de confortements spéciaux selon la technique du clouage. Non loin de la commune de Joux, pour séparer les deux sens de circulation et les « accrocher » sur le flanc très escarpé d'une colline, c'est

Chiffres clés

Longueur : 50 km

2 x 2 voies, élargissables à 2 x 3 voies entre Tarare est et La Tour-de-Salvagny

1 aire de services dans la Loire, 1 aire de repos dans le Rhône

7 échangeurs

83 ouvrages d'art courants

16 millions de m³ de terrassements

Volume béton des grands ouvrages : 435 500 m³

Montant : 1,5 milliard d'euros

Mise en service : fin 2012



4



5

→ 4 et 5 • Chevêtres en forme de tulipe pour les six piles du viaduc du Buvet supportant deux tabliers indépendants pour chacun des sens de circulation.

la technique Terre Armée® consistant à créer de grands murs de soutènement à l'aide d'éléments préfabriqués en béton qui a été mise en œuvre. Toujours pour limiter l'impact, un ouvrage d'une centaine de mètres a été construit pour enjamber le cours d'eau du Valletier qui héberge des écrevisses à pieds blancs. Même les petits rhinolophes n'ont pas été oubliés. En collaboration avec la FRAPNA 69, la Fédération Rhône-Alpes de Protection de la Nature, aux abords immédiats de l'A89 où elles ont été repérées, ASF a créé pour ces chauves-souris protégées deux galeries artificielles en béton ! Une première en matière de travaux autoroutiers. Hormis ceux de Goutte

Vignole et du Torranchin qui sont des ouvrages mono-tablier, les cinq autres viaducs de l'A89 sont tous réalisés selon un principe identique. Ce sont des ouvrages « dédoublés », indépendants pour chacun des sens de circulation, constitués de piles en béton supportant un tablier constitué de deux poutres en acier qui soutiennent elles-mêmes une dalle en béton. « Pour notre part, nous réalisons quatre viaducs en conception – construction : Gonon et Bernard implantés dans une topographie accidentée du département de la Loire, Buvet et Brévenne dans le Rhône, créés dans un site dense, comportant trois routes, une rivière et un passage au-dessus d'une ligne SNCF qui a

imposé beaucoup de travaux nocturnes », explique Romain Thomasier, chef de Projet chez GTM TP Lyon. Cette filiale de Vinci Construction est mandataire d'un groupement réunissant Dodin Campenon-Bernard et Baudin-Châteauneuf, les terrassements étant réalisés par Vinci Construction Terrassements. « À quelques petites différences près, pour réaliser ces viaducs nous avons joué sur l'uniformité afin d'obtenir une certaine récurrence dans les études et dans les procédés de construction : les quatre ouvrages ont été abordés comme un chantier unique ».

UN SUIVI MATUROMÉTRIQUE DES BÉTONS

Fondées pour quelques-unes d'entre elles sur pieux, voire sur micro-pieux, les 28 piles à fût creux, toutes de même géométrie, sont hautes de 15 à 40 m. Elles ont été réalisées par levées de 4 m, au rythme de quatre par semaine. Leur sommet s'achève par un chevêtre haut de 7,50 m, en forme de tulipe, qui supporte le tablier. La dalle béton est lancée depuis une plateforme. « Le tablier est large de 14,50 m, son hourdis fait 27 cm d'épaisseur et nous le béton-

nons par plots de 12 m, soit 50 à 60 m³, à l'aide d'un outil dont la structure a été conçue pour prendre appui de chaque côté du plot en cours de bétonnage. Cela limite le nombre d'inserts et de réservations à venir reprendre et donne une belle qualité d'extrado ». Un suivi maturométrique du béton, consistant à mesurer sa

Tunnels et viaducs

Trois tunnels

Violay : 3 900 m
– béton projeté : 65 000 m³
– revêtement béton : 200 000 m³

La Bussière : 1 042 m

Chalosset : 750 m
Pour ces deux tunnels :
– béton projeté : 30 000 m³
– revêtement béton : 100 000 m³

Sept viaducs (de l'ouest vers l'est)

Bemand : 223 m

Gonon : 311 m

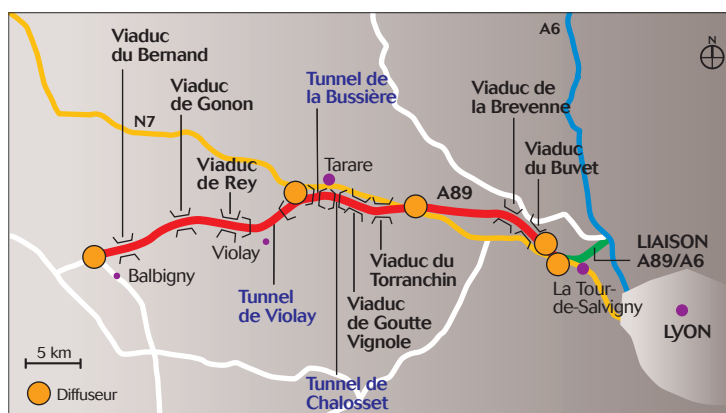
Rey : 178 m

Goutte Vignole : 622 m

Torranchin : 195 m

Brévenne : 280 m

Buvet : 240 m





6



7

→ 6 et 7 • Tunnel de la Bussière. Sur le béton projeté, mise en place de l'étanchéité avant le revêtement définitif en béton. Les deux tubes sont reliés par deux rameaux.

température dans les zones les plus sollicitées du hourdis, permet de s'assurer de l'obtention des résistances des parties en porte-à-faux et de garantir le maintien de la structure lors du décoffrage, effectué au bout de 18 à 20 heures.

DES FORMULES DE BÉTON OPTIMISÉES

Au total, 20 000 m³ de béton ont été utilisés pour les quatre viaducs. « *Un classique C35/45, mais sur lequel nous avons beaucoup travaillé pour arriver à des formules adaptées aux contraintes hivernales et aussi obtenir une montée en résistance assez*

rapide pour assurer les cycles de production », poursuit Romain Thomassier. Les entreprises, pour qui ce marché « viaducs » représente 45 millions d'euros (hors taxes), ont fait appel aux centrales à béton existantes du réseau. Dans le département du Rhône, celle des Bétons du Mont du Lyonnais (BML) située à Lozanne (Saint-Martin-en-Haut en secours). Dans la Loire, à Epercieux pour la centrale principale (Andrézieux – Bouthéon pour celle de secours). Piloté par Lafarge, le groupement est constitué de Béton Rhône-Alpes (Vicat) et de la Société auxiliaire de transports marchandises (SATM),

une filiale de Vicat, qui a par ailleurs alimenté le chantier du tunnel de Violay. Ce dernier, dont le percement a eu lieu au cours de l'été, est le plus long du projet avec ses 3 900 m. Il est constitué de deux tubes parallèles, reliés régulièrement par des *by pass* pour favoriser l'évacuation en cas de sinistre, ayant chacun une largeur roulable de 8,50 m (deux voies) et une hauteur libre de 4,75 m. Les conditions de réalisation par Eiffage TP et Campenon Bernard TP, ont été difficiles. Il traverse en effet sur quelque 140 m la faille du Gantet, un terrain très instable constitué de blocs de toutes tailles noyés dans des roches broyées plus ou moins argilisées. Ce passage a nécessité de multiples précautions. Selon les zones, le creusement en demi-section, partie haute, puis basse, a été mené avec une machine à attaque ponctuelle (fraise). Un soutènement renforcé a dû être réalisé sous forme d'un système de pré-soutènement par boulonnage du front, création d'une voûte « parapluie » et réalisa-

tion d'une contre-voûte. Les deux autres tunnels, de mêmes caractéristiques intérieures que Violay, se trouvent un peu plus à l'est et participent au contournement de Tarare. Spectaculaire car situé à flanc de colline, ce contournement se caractérise par le haut et long viaduc de Goutte Vignole, suivi de ces deux tunnels distants de 1 200 m. Spie Batignolles TPCI est mandataire d'un groupement avec Razel pour réaliser celui de la Bussière, et inversement Razel est mandataire avec Spie Batignolles TPCI pour le tunnel du Chalosset. Les deux marchés sont séparés, mais les ouvrages sont de géométrie identique. Chaque tunnel se compose de deux tubes abritant les deux voies de circulation, d'une section intérieure finie d'environ 70 m² imposant un creusement de 100 m².

UNE GÉOLOGIE COMPLEXE

La Bussière comporte un tube nord de 1055 m et un sud de 1029 m, « casquettes » de part et d'autre comprises. Les creusements, qui avaient débuté mi-février 2010 se sont achevés les 10 mars et 4 avril. Le tunnel de Chalosset, quant à lui,



→ Sur la commune de Pontcharra-sur-Turdine, le pont-rail permettant le passage de l'A89 sous la ligne Lyon – Roanne.



→ 8 • Les « casquettes » prolongeant les deux ouvrages de la Bussière. 9 • Éléments préfabriqués en béton pour les murs Terre Armée®.

mesure au total 703 m pour le tube nord et 750 m pour le sud. Entrepris mi-avril 2010, les fins des percements ont eu lieu les 14 avril et 12 mai derniers. Menés en parallèle, par un effectif d'environ 230 personnes, les deux chantiers ont fait appel aux mêmes méthodes d'avancement, essentiellement à l'explosif. Leur réalisation a nécessité jusqu'à une quinzaine de types de soutènements différents, adaptés en fonction de la géologie rencontrée. Si les terrains, analysés après chaque tir, étaient bons, l'avancement pouvait alors atteindre 5 à 7 mètres/jour par

tube. Par contre, dans des terrains instables, nécessitant la pose de cintres, le rendement pouvait tomber à 1 mètre/jour. D'après les sondages préalables, le creusement de Chalosse dans des terrains homogènes devait s'avérer assez facile. « *Nous avons même pris trois mois d'avance que nous avons brutalement reperdus sur le dernier tiers, assez complexe et où il a fallu poser beaucoup de cintres* », explique Alexandre Dougnac, directeur de projet Spie Batignolles TPCI. Sur Bussière, les techniciens savaient qu'ils risquaient de passer une zone difficile, dite tectonisée, d'environ deux cents mètres, constituée de matériaux durs mais broyés. Ils prévoyaient même de la franchir par un creusement en sections divisées : supérieure, puis inférieure. Mais de nouvelles analyses et l'important retard accumulé les ont persuadés de poursuivre en pleine section et de travailler aussi la nuit. « *Dans de tels secteurs, on cherche surtout à aller vite pour ne pas laisser au terrain le temps de réagir.* » Au final, la géologie, meilleure que celle

attendue, associée aux dispositions d'accélération mises en place, leur a permis de rattraper et de tenir les délais. Pour les deux tunnels, 30 000 m³ de béton projeté auront été mis en œuvre, complétés par 100 000 m³ de béton pour le revêtement. Le chantier a monté sa propre centrale principale à béton, spécifique et exclusive aux deux tunnels, sur un terrain mis à disposition par ASF à Poncharra-sur-Turdine. C'est dans le même secteur, tout proche, qu'est située la centrale de secours, sollicitée ponctuellement lors de bétonnage en pointe.

DES « CASQUETTES » POUR LES TÊTES DE TUNNELS

Chacune des huit têtes de tunnels sera prolongée par une « casquette » constituant l'entrée en terre. Longs de 35 à 55 m selon les cas, ces ouvrages en béton sont réalisés à l'air libre à l'aide d'un outil de coffrage intrado (de même type que les quatre servant au bétonnage de l'intérieur des tunnels) et d'un coffrage extrado. Différence cependant, s'il n'y a pas de ferrailage mis en œuvre à l'intérieur de la galerie, le béton ne travaillant qu'en compression, la réa-

lisation des « casquettes » nécessite un ferrailage dense. Par conséquent, il faut autant de temps pour en réaliser deux que pour le revêtement d'un kilomètre de tunnel. Une fois achevées, elles seront remblayées pour s'intégrer dans l'environnement et redonner un aspect naturel aux collines. ■

Photos : Michel Barberon



→ Piles fines et élancées pour Goutte Vignolle, comme tous les autres viaducs, pour mieux s'intégrer dans l'environnement.

Maîtrise d'ouvrage : ASF, société de Vinci Autoroutes

Assistance à maîtrise d'ouvrage : Egis Route (environnement)

Maîtrise d'œuvre : Setec, Egis Route, Egis Tunnels, Egis JMI

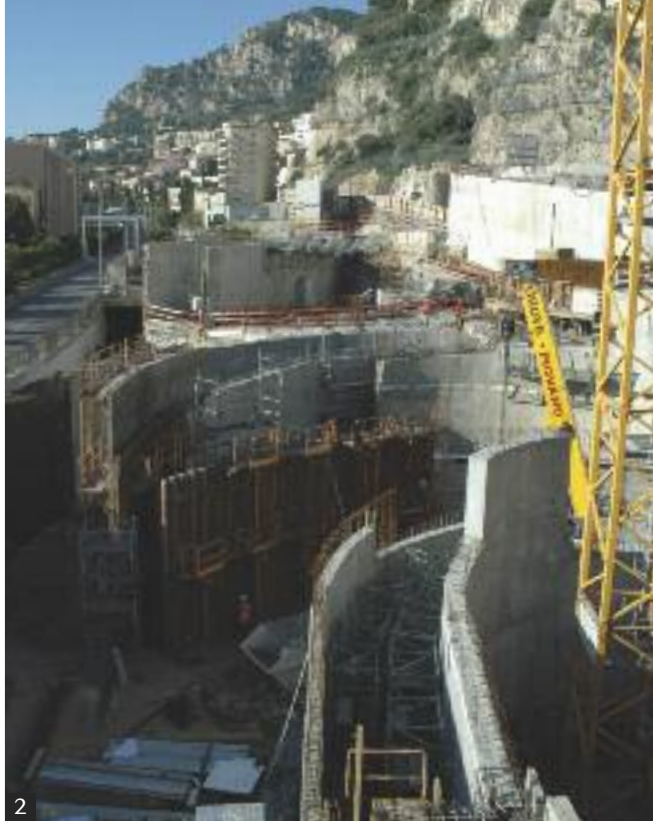
Architectes : Camborde Lamaison/Caméléon pour les gares de péage et le centre d'exploitation



Ouvrages souterrains : du lien et de la fluidité

L'ensemble des ouvrages regroupés sous l'appellation générique de « Dorsale de Monaco » vise à constituer un réseau routier partiellement souterrain comportant plusieurs sections comprises entre le Vallon de Sainte-Dévote et le Cap-d'Ail et s'insérant dans l'emprise de terrains anciennement utilisés par la SNCF. Commencés en 2000, ces travaux en cours d'achèvement se sont ainsi déroulés pendant une période de 11 ans, après avoir été engagés à la suite d'études qui se sont étalées sur 4 ans. Les raccordements vers Cap d'Ail sont programmés pour fin 2011.

Texte : Marc Montagnon



→ 1 • Avenue Prince Pierre, le chantier est complètement encastré dans la ville. 2 • Les réseaux de surface sont exécutés dans un espace extrêmement exigü.

La durée particulièrement longue des travaux s'explique par les contraintes exceptionnelles du site : un environnement exigü et intégralement construit d'une extrême densité et la volonté de réduire au minimum la gêne aux riverains, Monégasques et touristes, très nombreux à fréquenter, été comme hiver, la Principauté. Au fil des années, les nombreuses phases de ces chantiers qui aboutissent à la création de 1 335 m de tunnels et de 300 m de voiries de surface ont fait appel successivement ou simultanément à l'ensemble des techniques de fondations spéciales existantes : parois moulées, pieux forés, micropieux, injections de

consolidation, soutènements par butons, cintres et tirants actifs... Une grande partie des travaux s'est de plus déroulée de nuit pour limiter leur impact sur un environnement construit dense et proche, voire mitoyen et même ponctuellement imbriqué dans la réalisation de certains ouvrages. Schématiquement, les travaux ont concerné deux grandes catégories de réalisations : les ouvrages souterrains et les réseaux de surface.

5 TUNNELS DE 70 M À 600 M DE LONGUEUR

Les ouvrages souterrains comportent la construction d'un passage inférieur, de trois tunnels et la création d'une liaison entre la place du Canton et le Boulevard sur Voie Ferrée (BVF). Au droit de l'ancien tunnel SNCF, le passage inférieur du boulevard sur voie ferrée est constitué d'une trémie est/ouest d'une section de 4,50 par 5 m dont le gabarit est prévu pour une circulation à une voie dans le sens est/ouest.

Le prolongement du BVF entre le passage inférieur précité et le tunnel Monaco/RN 7 comporte ensuite deux ronds-points nommés Aurégliä et Canton.

D'une longueur de 600 m, ils présentent une section transversale rectangulaire de 10 m par 5 m et sont conçus pour une circulation à double sens – une dans chaque sens – avec une bande d'arrêt d'urgence et un équipement de ventilation.

Ils sont suivis par le tunnel de connexion T2 sur le prolongement du BVF à la sortie de Fontvieille vers le BVF Est, comportant lui-même deux ouvrages dits T2 bis et T2 ter.

D'une longueur de, respectivement 85 m et 130 m, les tunnels T2 bis et T2 ter ont une section de 4,50 m par 5 m et sont dimensionnés pour une circulation à sens unique : une voie depuis le T2 vers le BVF et une voie vers le rond-point Canton.

Le tunnel de connexion du BVF est prolongé sur l'avenue de Fontvieille par l'ouvrage TFT, d'une longueur de 250 m et d'une section de 4,50 m par 5 m, dans l'objectif d'une circulation à sens unique à une voie depuis le BVF vers Fontvieille.

Ensuite, le tunnel de connexion de la place du Canton au boulevard Charles III (T33) a une longueur de 200 m et une section transversale de 4,50 m par 5 m avec une circulation à sens unique à une voie depuis

la place du Canton jusqu'au boulevard Charles III. Enfin, la liaison entre la place du Canton et le BVF a une longueur de 70 m et une largeur d'environ 12 m afin de permettre une circulation à double sens.

RÉSEAUX DE SURFACE : 5 PHASES DE TRAVAUX

La réalisation des réseaux de surface est tout aussi complexe pour des raisons identiques à celles évoquées précédemment.

De plus, les travaux étant entrepris à l'air libre, les entreprises doivent les exécuter dans des conditions perturbant au minimum la vie quotidienne des riverains, tant en ce qui concerne les nuisances sonores et la poussière engendrées par les mouvements des camions de chantier, notamment pour l'approvisionnement en béton, qu'en ce qui concerne les vibrations apportées aux constructions mitoyennes du chantier, dans un contexte de densité de circulation des piétons et des voitures particulièrement importante. Les réseaux de surface s'articulent principalement autour de la création d'une voie entre l'avenue du 3 septembre et l'ancien pont Wurtemberg,

Chiffres clés

Pieux forés : 7 590 ml

Micropieux : 11 200 ml

Tirants actifs : 18 000 ml

Clouage : 4 500 ml

Butons : 380 unités

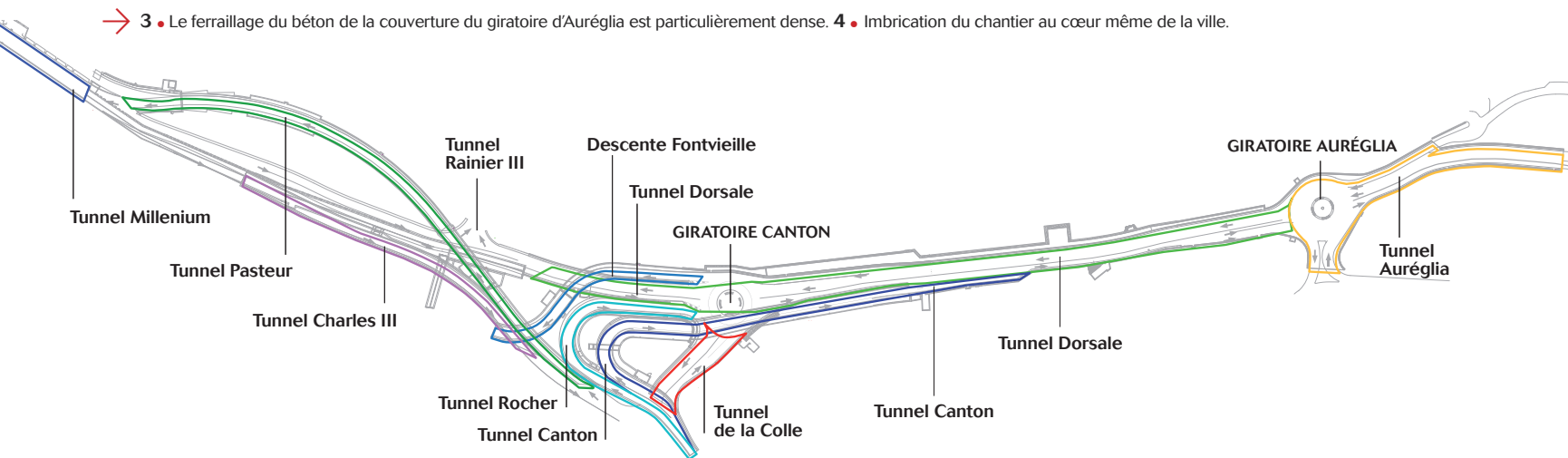
Cintres métalliques : 102 unités

Bétons : 63 000 m³

Armatures passives : 6 730 t



→ 3 • Le ferrailage du béton de la couverture du giratoire d'Aurégli est particulièrement dense. 4 • Imbrication du chantier au cœur même de la ville.



→ Plan de réparation des voies souterraines.

d'une longueur de 300 m, d'une largeur de 9 m, autorisant deux voies de circulation, depuis Cap-d'Ail vers Monaco et retour.

Cette voie sera partiellement intégrée dans le rez-de-chaussée des immeubles Millenium et Villa Pasteur : le BVF ainsi prolongé est raccordé aux voies existantes par des giratoires qui assurent la connexion avec les quartiers riverains.

Ces giratoires sont au nombre de quatre :

– **Giratoire entrée ouest** de la Principauté, permettant notamment d'assurer les échanges entre l'avenue du 3 septembre, le tunnel descendant et la route de désenclavement

ouest de Fontvieille, avec une emprise de 32 m de diamètre.

– **Giratoire Canton 1**, d'une emprise de 40 m de diamètre destiné à remplacer le carrefour existant et permettre de calibrer la voirie en regard des besoins du futur schéma de circulation.

– **Giratoire Canton 2**, en souterrain, permettant un échange complémentaire à celui de l'ouest de la Principauté.

– **Giratoire Aurégli**, également en souterrain, réalisant la connexion du quartier de la condamine au boulevard du Larvotto ainsi que la desserte du débarcadère à un niveau inférieur de + 30NGM de la gare SNCF. Ce giratoire a une emprise de 30 m de diamètre.

Le giratoire Aurégli a nécessité une emprise dans le tréfonds de la rue des Agaves et une partie des délaissés SNCF ainsi que sur une portion des terrains occupés par l'ancienne Caserne des Carabiniers de la rue Grimaldi.

UNE PLANIFICATION COMPLEXE

La chronologie des travaux d'infrastructures routières a été intimement liée, à l'est, à la libération des emprises depuis la mise en service de la nouvelle gare SNCF et, à l'ouest, au désenclavement de Fontvieille, ainsi qu'à la réalisation du tunnel descendant. La planification en 5 phases successives, plus une phase complémen-

taire en cours, du calendrier de réalisation des infrastructures routières illustre l'extrême difficulté à laquelle ont été confrontées les entreprises pour l'exécution des travaux.

La première phase comportait le prolongement du boulevard du Larvotto entre son extrémité actuelle et le pont de la rue de La Turbie :

- Construction d'une galerie technique;
- Démolition de l'ancienne caserne des Carabiniers de la rue Grimaldi ;
- Construction, sur l'emprise des voies SNCF, d'une voie provisoire de l'avenue Prince Pierre jusqu'au tunnel montant, liaison qui devrait décharger de façon sensible le boulevard Charles III et le passage au niveau du pont Wurtemberg ;



→ 5 • Ouvrage de la dorsale intégré aux constructions existantes. 6 • Le giratoire souterrain Canton en direction de Cap-d'Ail.

– Construction de la trémie pour la voie de circulation est/ouest au droit du tunnel SNCF actuel ;

– Construction du giratoire Aurégliia. Il a ensuite été procédé au raccordement de la nouvelle voirie sur la rue Grimaldi avec la réalisation de deux ouvrages.

La construction de la liaison entre le carrefour Aurégliia et la tête d'entrée du tunnel Monaco/RN7 comprenant

les ouvrages de liaison à la place du Canton a nécessité deux phases :

– La première (phase 2 du projet) dite « Prince Pierre » comprenant la voirie souterraine, la refonte de l'avenue Prince Pierre et le désenclavement de l'impasse du Castelleretto et de la rue Augustin Vento.

– La seconde (phase 3 du projet) dite « Rainier III » comportant la voirie souterraine, le rond-point souter-

rain Canton et le raccordement au tunnel T7.

Enfin, le tunnel « TFT » a été construit, pour assurer la continuité de la circulation, dans le sens est/ouest, entre la nouvelle voirie, d'une part, et le boulevard Rainier III et l'avenue de Fontvieille, d'autre part. Ces travaux sont achevés et les voies en service.

RACCORDEMENT VERS CAP-D'AIL FIN 2011

Une quatrième phase a comporté la construction, essentiellement en souterrain, de la voie de sortie vers Cap-d'Ail – Îlot Pasteur (T33). Les travaux sont également achevés.

La dernière phase du projet (phase 5), actuellement en cours, concerne la restructuration de la voirie autour des îlots Charles III et Pasteur. Elle est conditionnée par la réalisation des infrastructures projetées sur l'emprise des terrains libérés pour certaines liaisons : les raccordements en direction de Cap-d'Ail sont programmés pour fin 2011. Enfin, une phase complémentaire relative à l'extension de la production de chaud et de froid de Fontvieille vient de démarrer. ■

Photos : ouverture – Vicat, Service des Travaux Publics de Monaco

La centrale de BPE « invisible » de Fontvieille

La centrale de Fontvieille qui fournit les bétons est une installation de l'entreprise monégasque EMT. Totalement invisible de l'extérieur et parfaitement intégrée dans l'environnement urbain, elle se caractérise par un seul bâtiment d'une surface au sol de 195 m², construit en béton armé, de 35 m de hauteur, abritant l'ensemble de 2 centrales à béton.

Elle comprend ainsi principalement :

- 7 silos à granulats d'une capacité totale de 680 t ;
- 6 silos à ciment et cendres volantes d'une capacité totale de 340 t ;
- 8 bascules Arpège à granulats, ciment, eau et adjuvant ;
- 2 malaxeurs Teka THZ d'une capacité unitaire de 2,5 m³ fini.

L'alimentation en granulats s'effectue par un tapis transporteur commun aux deux centrales d'une capacité de 100 t/h.

Le ciment a été fourni par l'usine de La Grave de Peille de Vicat. Il s'agit d'un CEM I 52,5 N CE PM-CP2 NF, ciment pour travaux à la mer (NF P15-317), et à teneur en sulfures limitée pour béton précontraint (NF P 15-318).



Maître d'ouvrage : Principauté de Monaco, représentée par le service des Travaux Publics

Maître d'œuvre : Groupement Coyne et Bellier – Setec TPI

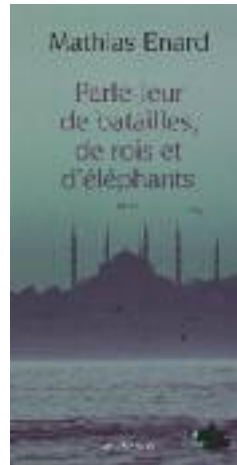
Bureau de contrôle : Socotec

Entreprises :
Rond-point Canton : JB Pastor, Sitren, Eiffage TP ;
Tranchée couverte et pont : JB Pastor, Sitren, Eiffage TP ;
Tranchée couverte et rond-point Canton : SGM, GTM, Botte Fondations ;
Raccordements place du Canton : Sitren, Eiffage TP ;
Tunnel T33 : Richelmi, GFC, Solétanche Bachy

Montant des travaux :
180 M€ TTC



MAYLIS DE KERANGAL,
Naissance d'un pont,
Verticales, **Prix Médicis 2010**



MATHIAS ENARD,
Parle-leur de batailles, de rois et d'éléphants,
Actes Sud, **Goncourt des Lycéens 2010**

Deux romanciers à la rencontre des ponts

Texte : Clothilde Laute

Littérature et architecture ne sont pas sans se retrouver sur bien des points. En revanche essayer de se fondre dans l'esprit du concepteur et de l'ingénieur d'un ouvrage d'art a été une singularité de la rentrée littéraire 2010. Maylis de Kerangal et Mathias Enard ont signé deux textes étonnants et remarquables pour leur justesse.

Dans *Naissance d'un pont*, Maylis de Kerangal a choisi de raconter la construction d'un pont et les transformations que cela va apporter à la fois au paysage et dans la vie des personnages. De même, dans *Parle-leur de batailles, de rois et d'éléphants* de Mathias Enard, le personnage de Michel Ange parcourt un chemin intérieur qui accompagne sa découverte de la cité, les changements qui interviennent dans sa réflexion et l'acte créatif du projet de franchissement qui se met en place.

Le pont, sujet romanesque doté d'une forte symbolique dont il est difficile de s'affranchir. Il véhicule inévitablement l'idée de limite, de trait d'union,

de lien social, de lieu de passage, d'espace intercalaire. Chez Mathias Enard, Michel Ange conçoit au cours de sa réflexion que « *l'ouvrage qu'on lui demande n'est pas une passerelle vertigineuse, mais le ciment d'une cité, [...] Un pont militaire, un pont commercial, un pont religieux. Un pont politique. Un morceau d'urbanité.* » (p.35). C'est une sorte de vision totale du pont et de sa symbolique, qui n'est pas absente de ces deux textes et qui fait partie intégrante de la réalité du travail des concepteurs contemporains (cf. interview Michel Virlogeux p. 2).

ANTAGONISMES

Si *Naissance d'un pont* adopte en grande majorité le point de vue de l'ingénieur qui dirige un chantier gigantesque, (vision qui s'oppose à celle du concepteur), Maylis de Kerangal reconnaît une certaine fascination pour l'aventure humaine hors normes mais aussi pour la transformation du site et la question de l'inscription de l'ouvrage dans un paysage. Or c'est justement l'opposi-

tion de ces deux approches qui font l'un des points forts du roman : la réalité sauvage et concrète du chantier face au geste formel. Le point de vue de celui qui réalise est particulièrement intéressant avec ses préoccupations techniques, humaines, économiques : « *il était désolé mais la symbolique de l'ouvrage – le trait d'union, le passage, le mouvement, blablabla – lui passait au-dessus de la tête* » (p.69). A contrario, le roman de Mathias Enard donne à saisir la vision du concepteur, son travail créatif, les circonstances qui vont faire naître le « trait », le dessin conceptuel et l'esthétique du pont. « *Michel Ange n'est pas ingénieur. C'est un sculpteur. On l'a fait venir pour qu'une forme naisse de la matière, se dessine, soit révélée* » (p.57). Deux visions antagonistes que l'ouvrage d'art doit pourtant réconcilier. On notera aussi la fascination qu'exerce sur Maylis de Kerangal un certain vocabulaire technique, propre à traduire la réalité du chantier, et le travail sur la langue qui lui est consacré. L'auteur accorde également une attention particulière à

l'élaboration du béton – on peut même dire des bétons – sous la houlette d'un personnage féminin atypique, responsable de la production du béton sur site, qui explique très bien que « *le béton est une cuisine très compliquée, [...] on pense toujours qu'il s'agit d'un matériau basique mais c'est une substance étonnante, joueuse* »... Et si un roman offrait cette belle image du béton ?

LE TRAVAIL DE CRÉATION

Il existe sans doute une analogie entre l'écriture, avec le travail de la phrase qui se construit et l'ouvrage en construction. Penser un ouvrage, penser la matière nécessite des mots, et en cela on peut rapprocher la démarche de l'architecte de celle de l'écrivain. Quant à se détacher totalement de la symbolique du pont, cela semble impossible. Un trait d'union, un lieu de passage, le projet comme art de la transformation (des hommes, du paysage, de la société), comme résultante d'expériences diverses qui font la richesse de la vie... et de la littérature. ■

Solutions béton

Les solutions techniques pour la réparation et le renforcement des ouvrages de génie civil en béton

La **durabilité d'un ouvrage** dépend de nombreux paramètres dont la qualité de sa conception, des matériaux utilisés, de sa réalisation ainsi que des diverses conditions d'usage, d'exploitation et de maintenance. Le béton résiste au temps qu'il fait et au temps qui passe. Mais les ouvrages en béton peuvent nécessiter des opérations de réparation ou de renforcement pour augmenter leur durée d'utilisation ou offrir de nouvelles fonctionnalités.

De nombreuses solutions techniques sont disponibles et maîtrisées, elles ont fait la preuve de leur efficacité et répondent à l'ensemble des problèmes potentiels rencontrés sur les matériaux ou sur les structures. Il convient de choisir la solution technique adaptée à la pathologie à traiter, après un diagnostic complet et précis des désordres, de leurs causes et de leurs évolutions.

Texte : Patrick Guiraud

Quelques principes clés

La réussite des travaux de réparation et de renforcement des ouvrages en béton nécessite un travail en commun d'experts et le respect de quelques principes clés de base.

→ Les gestionnaires d'ouvrages doivent développer une **démarche rigoureuse**, selon une approche d'**ingénierie de la durabilité**, en trois étapes :

- connaissance précises du patrimoine d'ouvrage ;
- diagnostic de l'état des ouvrages, évaluation des opérations de maintenance et de réparations nécessaires ;
- hiérarchisation des priorités d'entretien et programmation des opérations.

→ Les **travaux** de réparation ou de renforcement des ouvrages sont **extrêmement exigeants**.

Ils nécessitent une grande expertise au niveau :

- du diagnostic de la structure : toute réparation sans un diagnostic préalable ou issue d'un diagnostic erroné est vouée à l'échec ;
- du choix de la solution technique mise en œuvre et des produits et matériaux utilisés ;
- de l'exécution et du contrôle des travaux.

→ Le maître d'ouvrage doit définir les **objectifs à atteindre** par la réparation et les **contraintes à respecter** lors de la réalisation des travaux.

Après réparation, en liaison avec son maître d'œuvre et l'entrepreneur, il doit fixer les consignes particulières de surveillance et d'entretien de la structure.

→ Les **projets** de réparation ou de renforcement d'ouvrage **réussis** présentent les caractéristiques communes suivantes :

- un **diagnostic*** scrupuleux et précis des causes de détérioration ;
- un **choix adapté** des techniques et des produits de réparation ou de renforcement ;
- une **préparation** complète et méticuleuse **du support** ;

- une application correcte des matériaux par des **entreprises compétentes et expérimentées** ;

- un respect des **consignes de sécurité** et de santé et des **exigences environnementales** pendant la réalisation des travaux.

→ Une structure ou une partie d'ouvrage en béton ne peut être parfaitement réparée ou renforcée que si son **état** a été **parfaitement évalué** et que les causes des désordres ou des dégradations ont été clairement et précisément identifiées par des experts qualifiés.

→ La réparation ou le renforcement d'une structure ou de parties d'ouvrage en béton font appel à des **techniques** et procédures **spécifiques** qui nécessitent le recours à des entreprises spécialisées et à du personnel compétent.

→ La détermination des risques de corrosion (chlorures, carbonatation) ou d'attaques (gel, dégel, actions chimiques) que va subir l'ouvrage ou la partie d'ouvrage au cours de sa durée d'utilisation, traduite par la notion de classes d'exposition, est essentielle pour anticiper et éviter des désordres potentiels et pour choisir la technique et les produits de réparation adaptés.

→ La gestion optimale d'un patrimoine d'ouvrage et la volonté de ne pas dégrader le niveau de service imposent désormais de passer d'une logique de maintenance curative à une **logique de maintenance préventive**.

En effet, la pérennité d'une structure en béton nécessite une maintenance adaptée au cours de l'ensemble de sa durée d'utilisation.

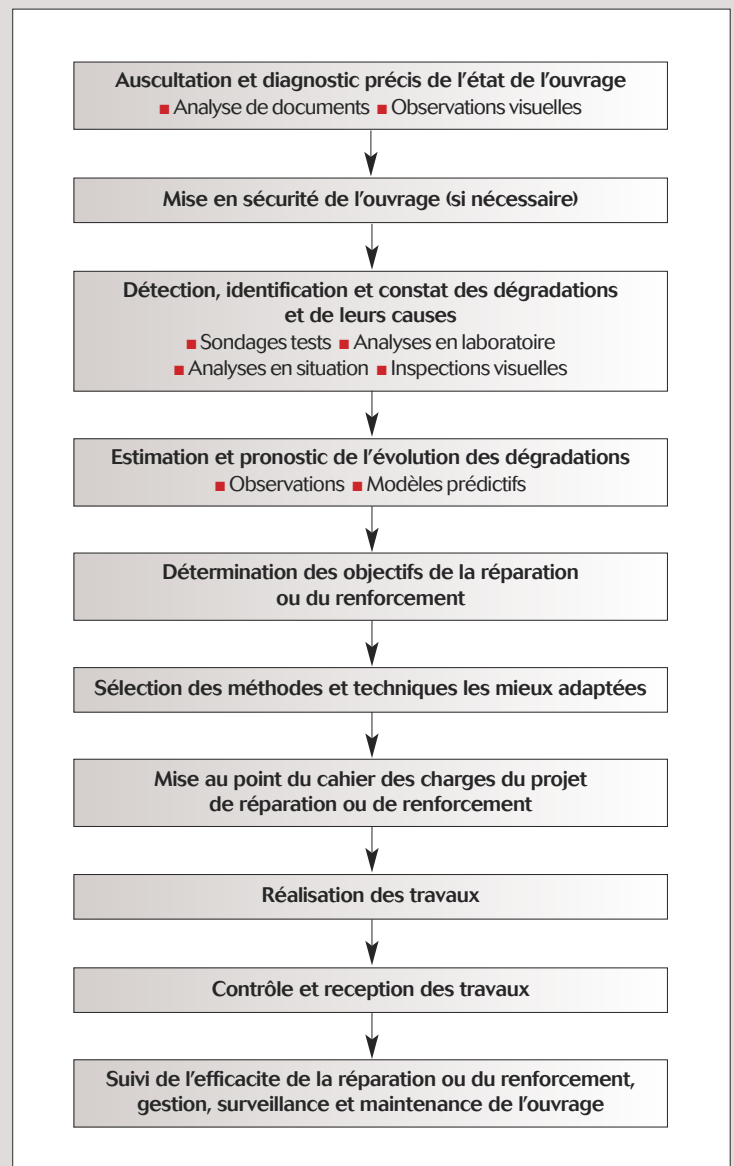
→ Le choix de la technique de réparation ou de renforcement ne peut se prendre qu'après un **diagnostic précis** de la structure et

une détermination des causes et de l'étendue des désordres. Il doit répondre à des objectifs précis préalablement définis résultant souvent d'un compromis visant à satisfaire de nombreuses exigences et contraintes : économiques, environnementales, esthétiques, d'exploitation de l'ouvrage, de gêne aux usagers... qu'il convient de hiérarchiser.

→ Il est toujours plus simple et plus économique **d'entretenir de manière préventive** les ouvrages et donc de protéger un ouvrage d'une agression, d'anticiper des risques de désordres et de pathologies que d'en traiter les conséquences. ■

* Un guide technique sur les méthodes de diagnostic des structures en béton est en cours d'élaboration (partenariat : CEFRACOR – OEILVIF – AFGC – STRRES).

Synoptique des étapes clés pour la réparation et le renforcement d'ouvrages en béton



Différentes solutions techniques de réparation et de renforcement des ouvrages en béton

Les diverses solutions techniques permettent :

- un traitement esthétique ;
- un renforcement ou une réparation non structurel ;
- un renforcement ou une réparation structurel.

		Esthétique	Non structurel	Structurel
P. 18	Réparation de désordres superficiels	X	X	
P. 18	Traitement des fissures		X	X
P. 19	Réparation et renforcement des structures par des armatures passives additionnelles		X	X
P. 19	Renforcement des structures par précontrainte additionnelle			X
P. 20	Réparation des ouvrages en béton armé dégradés par corrosion des armatures		X	X
Sous rabat	Protection des bétons par application de produits à la surface du parement	X	X	
Rabat	Béton projeté		X	
P. 22	Réparation et renforcement des structures en béton au moyen de matériaux composites		X	X

Les guides du STRRES

Le Syndicat National des entrepreneurs spécialistes de Travaux de Réparation et de Renforcement de Structures (STRRES) met à disposition sur son site www.strres.org une collection de guides techniques (téléchargeables en ligne) qui synthétisent les règles de l'art en matière de réparation et de renforcement d'ouvrages en béton, en métal et en maçonnerie (12 guides sont disponibles sur le site du STRRES, 7 nouveaux guides le seront d'ici fin 2011). Chaque guide traite d'un domaine spécifique, relatif à la réparation des ouvrages et s'adresse systématiquement aux trois principaux acteurs : prescripteur, entrepreneur, contrôleur. Les guides sont regroupés en quatre grandes familles :

- FABEM : béton et maçonnerie ;
- FAFO : fondation ;
- FAME : métal ;
- FAEQ : équipements.

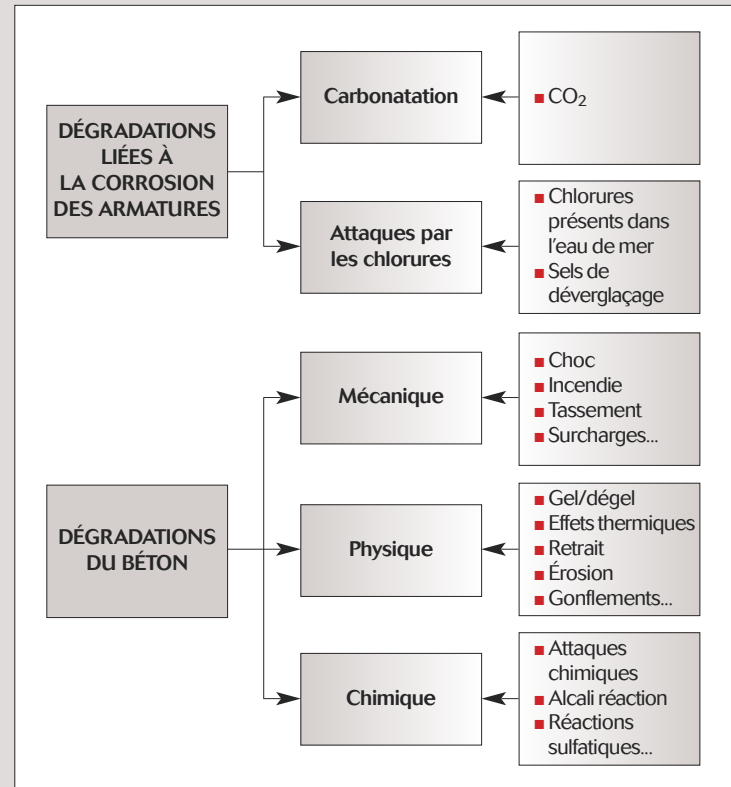
Chaque guide s'appuie sur les normes en vigueur et détaille, pour la technique

qui le concerne, les points suivants :

- les définitions des termes et des techniques ;
- les documents de référence ;
- la préparation de l'opération ;
- le choix des produits et matériaux ;
- le transport et le stockage des produits et matériaux ;
- les matériels à utiliser ;
- les modes opératoires ;
- les essais et contrôles à effectuer (épreuves de réception, d'étude, de convenue et de contrôle) ;
- les principales règles d'hygiène et de sécurité à respecter ;
- la gestion des déchets ;
- le plan d'assurance de la qualité (PAQ).

Nota : Le STRRES prépare la création d'un système de qualification des entreprises désigné sous le terme « certificat de spécialité » qui sera attribué par une commission paritaire extérieure au syndicat. Ce certificat va permettre de labéliser les acteurs de la réparation des

Principales causes de dégradations des bétons armés ou précontraints



ouvrages pour chaque famille de spécialité et offrira une assurance supplémentaire vis-à-vis de la qualité d'exécution des travaux.

Terminologie

■ **Contrôle de réception :** le but est de vérifier que les produits et matériaux livrés sont conformes et qu'ils sont transportés et stockés conformément aux exigences du marché.

■ **Épreuve de convenue :** le but est de vérifier la conformité de la mise en œuvre des matériaux et des produits de réparation ou de renforcement par l'entreprise dans les conditions de réalisation des travaux.

■ **Contrôle d'exécution :** le but est de vérifier qu'à tout instant du chantier l'exécution des travaux est conforme aux spécifications du marché, complétées par les enseignements tirés de l'épreuve de convenue. ■

Liste des guides relatifs aux ouvrages en béton

FABEM 1	Reprise des bétons dégradés
FABEM 2	Traitement des fissures par calfeutrement, pontage et protection localisée
FABEM 3	Traitement des fissures par injection
FABEM 4	Protection des bétons
FABEM 5	Béton projeté
FABEM 7	Réparation et renforcement par armatures passives additionnelles
FABEM 8	Réparation et renforcement par précontrainte additionnelle



Document de référence :
guide technique du STRRES
FABEM 1
Reprise des bétons dégradés

Réparation des désordres superficiels

Si les désordres de la partie d'ouvrage en béton sont superficiels et si les armatures ne sont pas corrodées, l'opération de réparation comprend :

- une préparation de surface avec élimination du béton dégradé et de toute trace de pollution ;
- le traitement éventuel des armatures contre les risques de corrosion ;
- la reconstitution de l'enrobage des armatures et de la géométrie de la

pièce par un ragréage manuel ou mécanisé avec du béton ou un mortier technique de réparation adapté ou par projection de béton ;

- la mise en œuvre d'un revêtement de protection ou à caractère esthétique sur les surfaces traitées.

Les produits utilisés pour la réparation des bétons dégradés sont classés en 3 catégories :

- produits et systèmes à base de

liants hydrauliques classiques ou modifiés par ajout de polymères ;

- produits et systèmes à base de résines synthétiques ;

- produits et systèmes mixtes dont le liant actif est constitué à la fois de liant hydraulique et de résines synthétiques.

Ils doivent être compatibles avec le béton de la structure et adaptés aux conditions d'environnement. ■

Traitement des fissures

Il existe 5 principales techniques de traitement des fissures. Le choix de la technique adaptée est fonction des caractéristiques de la fissuration : ouverture (microfissures, fissures fines, fissures moyennes...), profondeur, activité (fissures ouvertes, fermées, mortes, actives...), tracé, géométrie, exposition aux intempéries (fissures sèches, humides, saturées, ruisselantes...), présence d'eau libre ou sous pression... de l'état et du type de support et du délai imposé pour la remise en service de l'ouvrage.

INJECTION : elle consiste à faire pénétrer dans la fissure un produit qui va créer une continuité mécanique et/ou une étanchéité entre les parties disjointes. Elle s'applique à des fissures dont l'ouverture est au moins comprise entre 0.1 et 0.2 mm. L'injection par un produit souple permet son adaptation aux mouvements générés par les variations thermiques et hygrothermiques. L'injection par un produit rigide permet d'assurer la continuité de la matière.

CACHETAGE : il a pour but d'obturer provisoirement une fissure pendant l'injection afin de contenir le liquide injecté dans la fissure jusqu'à sa prise.

CALFEUTREMENT : il a pour objectif de colmater définitivement et en profondeur une fissure au moyen

d'un produit souple (mastic ou mortier déposé dans une engravure créée le long de la fissure) afin de rétablir une étanchéité à l'air ou à l'eau ou d'empêcher la pénétration de matières solides, mais sans bloquer les mouvements de la fissure.

PONTAGE : il est destiné à recouvrir une fissure au moyen d'un produit souple adhérent à la surface du support (revêtement, feuille préfabriquée...) afin de rétablir une étanchéité à l'air ou à l'eau ou empêcher la pénétration de matières solides en laissant libres les mouvements de la fissure.

PROTECTION GÉNÉRALISÉE : ce traitement consiste à mettre en œuvre sur la surface de la structure fissurée un revêtement qui ferme les fissures. Il est applicable lorsque la fissuration est anarchique et concerne l'ensemble du support.

Les guides **FABEM 2** et **FABEM 3** précisent les diverses recommandations pour procéder à la préparation et la réalisation de chaque technique d'injection.

Le choix des produits à utiliser est fonction de l'ouverture des fissures, de la présence éventuelle d'eau et de l'activité des fissures.

- Produits à base de liants hydrauliques avec ajouts ou modifiés par des polymères organiques.



Document de référence :
guide technique du STRRES
FABEM 2
Traitement des fissures
par calfeutrement ou pontage
et protection localisée

- Mastics à base de liants de synthèse : silicone, polyuréthane...

- Coulis à base de silicate, de polyuréthane...

- Feuilles autoadhésives ou collées.

- Résines époxydes, résines polyuréthanes...

- Gels de silice, gels en solution aqueuse...

- Joints préformés...

Les techniques de traitement de fissures comportent une étape primordiale qui est la préparation et le net-



Document de référence :
guide technique du STRRES
FABEM 3
Traitement des fissures par injection

toyage du support et des fissures : brossage, décapage thermique, aspiration, lavage à l'eau sous pression, à l'air comprimé... afin d'éliminer toute trace de laitance, de poussières, de mousses qui pourrait perturber l'efficacité de l'injection.

Différentes normes précisent les caractéristiques (mécaniques, comportement à la température, aux agents agressifs...) que doivent respecter les produits en fonction de chaque technique d'injection. ■

Réparation et renforcement des structures par des armatures passives additionnelles

Les techniques de réparation et de renforcement de structures par des armatures passives additionnelles concernent la mise en œuvre :

- d'armatures de béton armé (treillis ou cages d'armatures en acier au carbone ou en inox) ou en matériaux composites au sein de l'ouvrage après enlèvement local du béton par réalisation d'une saignée qui est ensuite rebouchée ;
- d'armatures de béton armé en métal ou en matériaux composites en surface du béton autour de la partie d'ouvrage existante et liées à celle-ci puis enrobées par un ajout de béton coulé, projeté ou contrecollé ;
- de plaques (bandes, lamelles) ou de tissus en matériaux composites collés à la surface du béton ;
- de tôles et plats collés de faibles épaisseurs (3 à 5 mm) découpées en bande de faible largeur (300 à 500 mm) et collées sur le béton par une résine époxydique (technique quasiment plus utilisée).

La réparation d'armatures passives intérieures au béton consiste à enlever le béton endommagé ou pollué et à dégager les armatures longitudinales ou transversales corrodées. Après préparation du support (nettoyage, aspiration soufflage, repiquage du béton, élimination des poussières et morceaux de béton et ragréage éventuel) et des armatures (décapage complet des armatures corrodées, par brossage métallique, repiquage, sablage, grenailage ou à l'eau sous pression, le dégagement des armatures doit se faire sur une longueur suffisante pour assurer le recouvrement des barres), les nouvelles armatures sont mises en place en respectant les dispositions constructives habituelles. Le raccordement des armatures est assuré par recouvrement, par soudure ou rabotage.

Les caractéristiques du mortier ou du béton de ré-enrobage des armatures remplacées doivent être com-

patibles avec celles du béton existant et l'agressivité de l'environnement de l'ouvrage.

Le mortier ou le béton mis en place permet de reconstituer la géométrie initiale de la partie d'ouvrage concernée et enrober les nouvelles armatures. Il est mis en œuvre manuellement ou mécaniquement dans des coffrages ou projetés, selon le volume et la géométrie de la cavité à combler. Après durcissement du mortier ou du béton, la mise en place d'un produit ou d'un système de protection est souvent nécessaire pour améliorer la durabilité de la réparation.

Nota : si l'épaisseur de la pièce n'a pas besoin d'être augmentée, les armatures de renfort peuvent être positionnées dans des encoches réalisées dans le béton de la partie d'ouvrage concernée. Un mortier ou un microbéton est ensuite mis en place dans l'encoche pour enrober les nouvelles armatures. ■



**Document de référence :
guide technique du STRRES**

FABEM 7

**Réparation et renforcement
de structures par des armatures
passives additionnelles**

Renforcement des structures par précontrainte additionnelle

Cette technique consiste à renforcer une structure à l'aide de câbles de précontrainte ou de torons gainés graissés généralement disposés à l'extérieur du béton.

La précontrainte additionnelle va introduire dans la structure des sollicitations complémentaires, qui vont compenser les défauts de dimensionnement ou de conception ou des efforts supplémentaires, que doit supporter la structure suite à des modifications des conditions de chargement ou d'utilisation.

Les nouveaux câbles ou torons doivent, en apportant de la compres-

sion, recomprimer les zones tendues, sans ajouter d'excès de contraintes dans les zones comprimées.

Cette technique permet :

- soit d'améliorer la pérennité des ouvrages ;
- soit de renforcer des ouvrages en béton (en particulier des ouvrages en béton précontraint dont les câbles présentent des problèmes de corrosion ou de ruptures de torons ou d'ancrages ou qui ont fait l'objet lors de leur dimensionnement de prise en compte de lois de fluage mal adaptées) ;
- Soit d'augmenter la capacité structurale des ouvrages (augmentation des

charges ou des trafics, modification des fonctionnalités, passage de tramways ou de convois exceptionnels).

Elle peut s'appliquer à tous types de structures existantes en béton armé ou en béton précontraint.

La précontrainte extérieure est le plus souvent constituée de câbles fixés à des bossages ancrés à la structure par des barres de précontrainte. Les câbles sont protégés par une gaine en polyéthylène injectée à la cire pétrolière.

La technique des torons graissés est beaucoup plus simple d'utilisation car elle permet la mise en tension toron par toron à l'aide de petits vérins. ■



**Document de référence :
guide technique du STRRES**

FABEM 8

**Réparation et renforcement
par précontrainte additionnelle.**

Protection des bétons par application de produits à la surface du parement



Document de référence

Guide technique

LCPC Décembre 2002

Protection des bétons par application de produits à la surface du parement

La protection des bétons vis-à-vis des agressions ou des attaques extérieures par application de produits à la surface du parement permet :

- soit de prolonger la durée d'utilisation d'ouvrages anciens pour lesquels les désordres par corrosion sont apparents mais qui ne présentent pas de dégradation structurelle ;
- soit de protéger de manière préventive des parties d'ouvrages neufs particulièrement exposées aux agents agressifs ou aux intempéries.

La protection permet de ralentir le vieillissement du béton ou d'arrêter l'évolution de la dégradation, empêchant la pénétration des agents agressifs sous forme liquide ou gazeuse.

DIFFÉRENTS TYPES DE PRODUITS

Les produits sont appliqués sur le béton durci. Ils sont de nature organique, minérale ou mixte à base de ciment et de résine organique.

Ils peuvent être appliqués en une ou plusieurs couches et constituent un revêtement dont l'épaisseur est inférieure à 3 mm.

La protection du béton peut être assurée par différentes familles de produits et systèmes de produits.

On distingue 5 familles :

- inhibiteurs de corrosion ;
- produits d'imprégnation : produits hydrofuges (qui constituent une barrière en surface vis-à-vis de la pénétration de l'eau) ou minéralisateurs à base de silicates, de siloxanes ou de résines acryliques.
- lasures ;
- peintures ;
- produits et systèmes de revêtement : revêtements plastiques épais, revêtements d'imperméabilisation à bases de résine acrylique.

PRÉPARATION DU SUPPORT

Le système de protection doit être appliqué sur un support possédant des caractéristiques mécaniques suffisantes et des propriétés adaptées : porosité, taux d'humidité, alcalinité, propreté, texture superficielle.

La caractérisation du support peut être réalisée par des mesures non destructives ou des analyses d'échantillons en laboratoire.

Les produits de réparation doivent être compatibles avec le support en particulier en terme de retrait, d'adhérence et de résistances mécaniques. La préparation du support revêt une importance primordiale.

Le support doit être propre, sain et avoir subi une préparation de surface permettant en particulier de restituer sa planéité, d'éliminer tous défauts géométriques, d'enlever tout élément susceptible de nuire à l'adhérence (poussières, huiles, produits de cure, microorganismes...) : brossage, ponçage, projection d'abrasif, projection d'eau sous pression. Il doit présenter une cohésion d'au moins 1 MPa en traction directe.

FONCTIONS DE LA PROTECTION

Les diverses familles de système de protection assurent une ou plusieurs des fonctions de protection suivantes :

- contre la pénétration de l'eau ;
- contre la pénétration des chlorures ;
- contre la pénétration du gaz carbonique ;
- contre les réactions de gonflement interne ;
- contre l'écaillage dû au gel.

Le choix de la méthode de protection du support impose impérativement :

- une caractérisation précise de l'état et des défauts de surface ;

- une définition claire de la fonction de protection recherchée.

Lors de l'application des produits il convient de tenir compte de l'humidité du support, des conditions climatiques et des caractéristiques d'application (temps de séchage, délais entre couches...).

La tenue de la protection dépend en dehors des caractéristiques intrinsèques du système de protection appliqué, de l'état du support, des contraintes lors de la mise en œuvre, du soin apporté à l'exécution des travaux et des contraintes liées à l'utilisation de l'ouvrage. ■

Les différents essais de diagnostic

Essais physiques non destructifs

- contrôle visuel : recherche des fissures, taches de rouille...
- essais au marteau et sondages sonores ;
- essais au phacomètre : emplacement de l'enrobage de l'armature et détermination de sa valeur ;
- cartographie du potentiel : prévision relative à l'état de l'armature ;
- mesure du courant de corrosion ;
- jauges de fissures : mesure de l'état et de la stabilité des fissures.

Essais chimiques

- analyse de la profondeur de carbonatation ;
- mesure du taux d'ions chlorures ;
- analyse au microscope : détermination de l'activité de la réaction alcali-agrégats.

Essais destructifs

- carottage permettant d'identifier la résistance du béton.

Les objectifs du diagnostic

- identification de l'origine des désordres ;
- évaluation de leur étendue dans l'espace ;
- prédiction de leur évolution probable, dans l'espace et dans le temps en cas de non intervention ;
- estimation des conséquences des désordres sur la portance et la sécurité de l'ouvrage et des personnes ;
- détection de produits nocifs éventuellement présents dans l'ouvrage : amiante, plomb...
- définition des suites à donner et des solutions de réparation ou de renforcement envisageables.

Béton projeté

Le béton projeté est un béton mis en œuvre à l'aide d'une lance, par projection sur une paroi sous l'impulsion d'un jet d'air comprimé.

La technique consiste à :

- malaxer et homogénéiser les constituants (ciment, granulats, adjuvants, fibres...) à l'état sec ou en incorporant l'eau de gâchage ;
- transporter le mélange par des canalisations avec l'aide d'une pompe ;
- projeter le matériau sur le support à revêtir grâce à un jet d'air comprimé.

Il existe deux techniques de projection : par voie sèche ou par voie mouillée. La différence entre les deux techniques est liée à la manière dont l'eau de gâchage du béton est introduite (soit lors du malaxage du béton, soit lors de l'application du béton).

PROJECTION PAR VOIE SÈCHE

Le mélange sec (granulats, ciment et éventuellement accélérateur de prise et adjuvants) est fabriqué dans un malaxeur puis propulsé par de

l'air comprimé vers la lance de projection. Cette lance est associée à une lance de projection d'eau (et éventuellement d'accélérateur de prise sous forme liquide). (Voir fig. 1).

PROJECTION PAR VOIE MOUILLÉE

Le mélange comprenant l'eau est stocké après malaxage dans une trémie. Il est ensuite pompé jusqu'à la lance de projection et projeté grâce à l'air comprimé. (Voir fig. 2).

Intérêt de la technique

La technique du béton projeté permet de réaliser des couches de béton de faible épaisseur qui épousent le support et y adhèrent parfaitement. Elle est utilisée en travaux neufs ou en réparation d'ouvrages anciens (réparations locales, confortements d'ouvrages, renforcements de structures...).

Le choix de la technique de projection est fonction :

- de l'importance du chantier. La technique par voie sèche qui offre

une grande souplesse d'utilisation est privilégiée pour des chantiers de faible importance ou nécessitant des arrêts fréquents ;

- de la nature des travaux à effectuer ;
- des cadences de réalisation souhaitées : la technique par voie humide permet des capacités de production élevées ;
- des performances mécaniques à obtenir : la technique par voie sèche permet d'obtenir des résistances élevées.

L'adjonction de fibres (dosage 35 à 50 kg/m³) offre au béton projeté des propriétés complémentaires, fonc-

tion du type de fibres : limitation des effets du retrait, amélioration des résistances mécaniques, meilleure cohésion du béton à l'état frais.

Réalisation

Les opérations de bétonnage comprennent la succession des étapes suivantes :

- préparation du support ;
- mise en place des armatures : treillis soudés, barres ;
- projection du béton par passes successives ;
- mise en œuvre d'une couche de finition éventuelle et protection par cure. ■

Info pratique

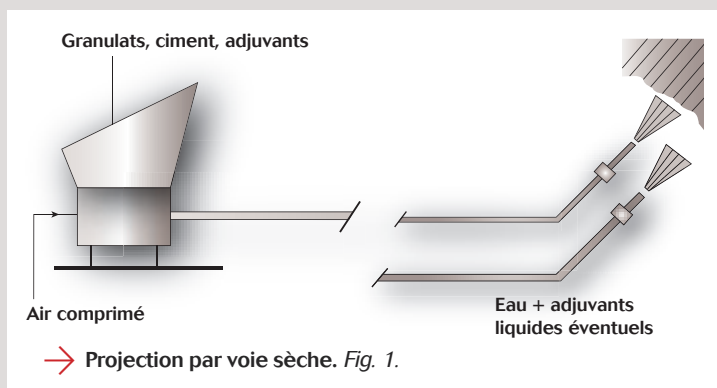
→ Fascicules de l'ASsociation pour la QUALité de la PROjection des mortiers et des bétons (ASQUAPRO) www.asquapro.com

Les fascicules ASQUAPRO sont des compléments aux normes pour tout ce qui concerne la formulation, le dimensionnement, la pratique de la projection du béton et les opérations à réaliser sur les chantiers pour le contrôle de sa qualité.

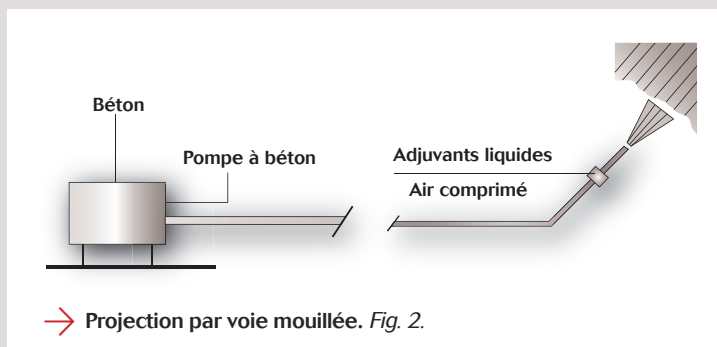
6 fascicules téléchargeables :

- Présentation
- Formulation
- Contrôle partie A
- Contrôle partie B
- État des connaissances sur le dimensionnement
- Mise en œuvre.

→ Guide technique du STRRES :
■ FABEM 5 Béton projeté.



→ Projection par voie sèche. Fig. 1.



→ Projection par voie mouillée. Fig. 2.

Principales normes

SÉRIE DE NORMES NF EN 1504

Produits et systèmes pour la protection et la réparation de structures en béton-Définitions, prescriptions, maîtrise de la qualité et évaluation de la conformité.

- Partie 1 : définition.
- Partie 2 : système de protection de surface pour le béton.
- Partie 3 : réparations structurales et non structurales.
- Partie 4 : collage structural.
- Partie 5 : produits et systèmes d'injection du béton.
- Partie 6 : ancrages de barres d'acier et d'armatures.
- Partie 7 : protection contre la corrosion des armatures.
- Partie 8 : maîtrise de la qualité et évaluation de la conformité.
- Partie 9 : principes généraux d'utilisation des produits et systèmes.
- Partie 10 : application sur site des produits et systèmes et contrôle de la qualité des travaux.

Réparation des ouvrages en béton armé dégradés par corrosion des armatures



Document de référence
AFGC : documents scientifiques et techniques
Rehabilitation du béton armé dégradé par la corrosion.
 Novembre 2003

Le béton est généralement associé à des armatures (en acier au carbone), ce qui permet d'augmenter sa résistance en traction et en flexion, d'où le terme de béton armé. Dans un béton sain offrant un environnement basique les armatures sont naturellement passivées.

Les armatures proches de la surface protégées par le béton d'enrobage peuvent être soumises, au cours de la vie de l'ouvrage, à un phénomène de corrosion :

- dès que le front de carbonatation les atteint ;
- ou dès que la quantité de chlorure dans le béton d'enrobage dépasse un seuil critique.

Lorsque les armatures s'oxydent, les produits de corrosion qui se forment occupent un volume plus important ce qui déclenche une fissuration du béton, voire un éclatement et à terme une mise à nu puis une perte de section des armatures.

De nombreuses solutions de réparation du béton armé dégradé par corrosion des armatures sont dispo-

nibles. Elles permettent de réparer durablement le parement en béton et évitent de nouveaux désordres. Pour chaque ouvrage, le choix de la solution adoptée sera fonction en particulier du processus de dégradation (carbonatation, chlorure...), du niveau de propagation de la corrosion, des caractéristiques du béton et des agressions du milieu environnant. La pérennité de la réparation suppose une réalisation soignée et des contrôles réguliers tout au long de la vie de l'ouvrage.

Il existe 3 familles de techniques :

- la réparation traditionnelle : remplacement du béton carbonaté ou pollué par les chlorures et des armatures corrodées ;
- les traitements électrochimiques : protection cathodique, protection galvanique, réalcalinisation, déchloration ;
- la mise en œuvre d'inhibiteurs de corrosion depuis la surface du béton.

RÉPARATION TRADITIONNELLE

Cette réparation est la plus classique. Elle consiste à :

- enlever dans la zone dégradée, le béton d'enrobage non adhérent et dégager les armatures corrodées à traiter, par un moyen mécanique ou chimique. Le dégarnissage doit être effectué jusqu'à ce que l'acier sain soit mis à nu sur une longueur d'au moins 50 mm. Les armatures doivent être dégagées sur la totalité de leur circonférence.

De nombreuses techniques permettent l'enlèvement du béton dégradé : burinage, repiquage, bouchardage, décapage à l'eau à haute pression, sablage à sec ou humide, ponçage, décapage thermique, décapage chimique.

L'importance de cette préparation est fonction de la profondeur de car-

Les méthodes de réparation des bétons armés dégradés par la corrosion des armatures

RÉPARATION TRADITIONNELLE	Remplacement du béton Remplacement des armatures Protection des armatures
TRAITEMENTS ELECTROCHIMIQUES	Protection cathodique Déchloration, réalcalinisation Protection galvanique
INHIBITEURS DE CORROSION	—

Nota : Lors d'un traitement électrochimique (protection cathodique, déchloration et réalcalinisation) des ions hydroxyde (OH⁻) sont générés par l'hydrolyse de l'eau autour des armatures. Le champ électrique créé provoque la migration des cations de l'anode vers l'armature et des anions dans le sens inverse.

bonatation du béton ou des profils de concentration des chlorures.

- éliminer l'intégralité des parties corrodées sur toute la surface des armatures par brossage métallique, repiquage, sablage ou grenailage et toutes poussières résiduelles ou souillures, soit par lavage à l'eau, soit par brossage, aspiration ou soufflage à l'air.

- remplacer les armatures corrodées ou mettre en place des armatures complémentaires par recouvrement, scellement ou soudure pour restituer la section d'armature initiale en tenant compte des longueurs d'ancrage et de recouvrement nécessaires afin de redonner à l'ouvrage sa capacité structurelle. Les armatures peuvent recevoir une protection contre la corrosion par application sur toute leur surface d'un revêtement adapté (inhibiteur anodique, résine synthétique ...). Lorsque la partie d'ouvrage est exposée à un environnement particulièrement agressif ou si l'épaisseur d'enrobage nécessaire ne peut pas être respectée, il peut être mis en place des armatures inox de nuance adaptée.

- reconstituer le béton d'enrobage afin de retrouver la géométrie de la structure : ragréage manuel ou mécanique, béton coulé, béton projeté... Les armatures sont ainsi protégées par passivation grâce à l'alcalinité du nouveau béton d'enrobage.

La zone reconstituée qui bénéficie d'un pH élevé après mise en œuvre du nouveau béton d'enrobage devient une cathode forte au regard des bétons anciens environnants qui deviennent des zones anodiques où il y a risque de corrosion. C'est le phénomène dit d'anode induite.

TRAITEMENTS ELECTROCHIMIQUES PROTECTION CATHODIQUE

La protection cathodique à courant imposé consiste à diminuer à l'aide d'un courant électrique (2 à 20 mA/m²) le potentiel électrique de corrosion de l'armature jusqu'à une valeur seuil (potentiel de protection) pour laquelle la vitesse de corrosion de l'acier est négligeable. Cette technique permet de restaurer la passivité des armatures, elle est installée de manière définitive et donc protège la structure en permanence.

Les dimensions des anodes et la capacité du générateur de courant sont définies en fonction des dimensions des armatures (diamètres, longueurs) et des surfaces à traiter.

Il convient de rétablir préalablement au traitement la continuité électrique des armatures et parfois de protéger la surface du béton après traitement pour éviter de nouveaux désordres. Un générateur électrique impose un courant qui circule de l'anode (pôle positif : treillis en titane ou en carbone disposé sur toute la surface de la zone à traiter et enrobé par un matériau à base de liants hydrauliques) vers l'armature (pôle négatif : cathode).

PROTECTION GALVANIQUE

Une anode active dite sacrificielle est placée sur le parement de la surface à traiter (film de zinc...) ou dans l'enrobage (pastille de zinc). Elle est connectée aux armatures. Il se crée ainsi un courant galvanique sans alimentation électrique.

L'électrolyte (eau contenue dans la capillarité du béton et dans les hydrates des pâtes de ciment) assure la bonne conductivité électrique entre l'anode et la cathode.

RÉALCALINISATION

Ce traitement électrochimique du béton consiste à introduire sous l'effet d'un courant électrique des alcalins (Na^+ ou K^+) dans la zone d'enrobage des armatures. Il va permettre de redonner une alcalinité élevée au béton qui a été carbonaté et donc stopper la corrosion des armatures. Le traitement est réalisé avec une densité de courant imposé de 0,5 à 1 A/m² et dure une à deux semaines.

Il induit une électrolyse autour des armatures qui contribue à la création d' OH^- et à la remontée du pH à des valeurs supérieures à 10.

Les étapes du traitement :

- projection d'une première couche de pâte associée à une solution électrolytique adaptée ;

- mise en place d'un treillis anodique métallique (acier ou titane) sur des baguettes isolantes fixées au parement ;
- connexion du treillis à l'anode ;
- projection d'une deuxième couche de pâte ;
- raccordements électriques au générateur de courant continu ;
- humidification régulière de la pâte par l'électrolyte ou par l'eau ;
- suivi des tensions et courants ;
- dépose de l'ensemble de l'installation.

DÉCHLORURATION

La déchloration est une technique de traitement électrochimique qui consiste à extraire les chlorures et produire des ions hydroxydes (OH^-) situés dans la zone d'enrobage qui protège les armatures, afin de freiner la propagation de la corrosion. La totalité des chlorures ne peut pas être extraite, il convient de s'assurer que la teneur résiduelle en chlorure au droit des armatures est inférieure aux valeurs limites admissibles (0,4 % du poids du ciment).

Ces traitements peuvent être réalisés :

- à l'aide d'un générateur électrique qui impose un courant continu (tension 40 V) circulant de l'anode vers l'armature. Si nécessaire la déchloration et la réalcalinisation sont effectuées l'une après l'autre ou simultanément ;
- à l'aide d'une anode active (grille d'acier ou en titane) directement reliée à l'armature. Il y a création d'un courant galvanique. Dans ce cas la réalcalinisation et la déchloration peuvent être effectués en même temps. Pour les deux procédés, une couche de pâte imbibée d'une solution électrolyte adaptée est appliquée à la surface de la zone de béton à traiter. Elle doit être humidifiée régulièrement pour permettre la circulation du courant. Ces traitements sont temporaires, leur durée d'application est de quelques semaines.



Carl Redon

→ Pont Camille de Hogues à Châtellerault (86). L'un des premiers ponts en béton armé réalisé en France 1899–1900. Ingénieur François Hennebique. Ouvrage classé parmi les Monuments Historiques. Protection par réalcalinisation, vue de l'intrados de l'arche du pont revêtu du treillis anodique.

Il convient préalablement d'assurer une continuité électrique entre les armatures.

INHIBITEURS DE CORROSION

Les inhibiteurs de corrosion sont appliqués à la surface des bétons à traiter. Ils vont migrer dans la zone d'enrobage vers les armatures assurant ainsi leur protection contre la corrosion en abaissant la vitesse de corrosion de l'acier.

L'inhibiteur est appliqué directement sur la surface du béton après préparation du support (enlèvement de la laitance, des salissures, des revêtements éventuels...) par pulvérisation sous forme liquide en plusieurs passes ou par application directe sous forme gélifiée sur la surface. Il pénètre dans le béton par capillarité. Cette technique permet de protéger les armatures de la corrosion sans avoir à purger le béton carbonaté et donc en conservant l'aspect initial du parement de l'ouvrage.

La pénétration des inhibiteurs au sein du béton dépend de nombreux paramètres dont la porosité du béton, le degré d'humidité, le niveau de carbonatation, la teneur en chlorures... La technique fonctionne sous réserve d'une teneur limitée en chlorures

dans le béton et fonctionne d'autant mieux pour les armatures faiblement enrobées.

Souvent le traitement doit être complété par la mise en œuvre d'un revêtement de protection.

Nota : les inhibiteurs de corrosion peuvent aussi être incorporés dans le béton frais lors de la construction d'ouvrage neuf.

Ils sont plus efficaces en présence d'un phénomène de carbonatation qu'en présence de chlorures. ■



Document de référence
Cahier pratique du Moniteur
Réparation du béton.
25 mars 2011

Réparation et renforcement des structures en béton au moyen de matériaux composites



Document de référence
AFGC : documents scientifiques et techniques
Réparation et renforcement des structures en béton au moyen de matériaux composites
Recommandations provisoires.
 Février 2011

Les techniques de renforcement des structures au moyen de matériaux composites utilisent le collage de plats ou de plaques composites (textiles de renforcement unidirectionnels ou bidirectionnels, lamelles, fibres de carbone...) ou la stratification directe *in situ* de composites (tissus textiles en verre ou carbone) associés à des matrices polymères thermodurcissables (résines époxydes, polyester...).

Cette technique de renfort passif est une alternative innovante à la solution traditionnelle utilisant des plats métalliques extérieurs collés.

Elle permet :

- d'augmenter la résistance de structures dégradées, endommagées ou faisant l'objet de défauts de conception ou d'exécution afin de prolonger leur durée d'utilisation ;
- d'adapter la structure à des modifications de ses conditions d'exploitation ou d'accroître sa capacité portante.

Ces techniques permettent :

- l'accroissement de la résistance à l'effort tranchant ou vis-à-vis de la flexion de poutres ;
- le renforcement de structures en cas de modification des charges d'exploitation, de changement de système statique, d'insuffisance d'armatures ou de capacité portante ou de défaut d'exécution ;
- le renforcement parasismique de structures pour les adapter aux évolutions normatives ;
- l'augmentation de la résistance et de la rigidité de structures en béton ;
- le confinement de poteaux, de colonnes ou de piles ;
- le renforcement de structures lors de la création d'ouvertures ou de trémies.

La mise en œuvre de la technique nécessite une méthodologie rigoureuse, le respect de conditions climatiques adaptées (travaux à l'abri de la pluie, pas d'ensoleillement direct, température extérieure comprise entre 10 et 25° C, humidité relative limitée...), des conditions d'emploi des différents matériaux (durée d'utilisation des résines...), des critères de sécurité et de grandes précautions lors de la préparation des supports.

Des règles de dimensionnement en phase avec les normes Eurocode ont été développées et validées par des essais expérimentaux, des modélisations numériques et des retours d'expérience sur des ouvrages réparés et instrumentés.

Le guide technique AFGC précise les recommandations pour le calcul des ouvrages en béton armé, réparé ou renforcé par des matériaux composites et les conditions de mise en œuvre et de contrôle pour assurer la qualité de la réparation.

La surface du béton doit présenter une cohésion superficielle suffisante

(supérieure à 1,5 MPa) et une planéité adaptée car les caractéristiques de l'interface composite béton sont particulièrement importantes vis-à-vis de l'efficacité et de la pérennité de la réparation.

Le support béton doit faire l'objet d'une préparation précise afin de :

- créer une rugosité de surface satisfaisante ;
- rendre la surface chimiquement et physiquement propre et sèche ;
- enlever toute la laitance superficielle et toute trace de poussière, de graisse, d'huile...
- éliminer tous revêtements éventuels ;
- ne pas présenter de défauts (fissures, trous...).

Les principales techniques utilisables sont : le sablage humide ou à sec ; le lavage à l'eau sous très haute pression ; le ponçage au disque diamanté. Le choix du produit et de la solution technique à utiliser est fonction :

- des exigences de dimensionnement : contrainte de rupture, résistance en cisaillement, module d'élasticité du composite, comportement

en fatigue, vis-à-vis du fluage, sous l'effet des vibrations, des chocs, des incendies ou des séismes...

■ des exigences relatives à la mise en œuvre : conditions thermiques lors de l'encollage, durée pratique d'utilisation, géométrie de la pièce...

■ des exigences de durabilité liées aux conditions d'environnement (températures, hygrométrie, ultraviolet...), de surveillance, d'entretien et d'utilisation de la structure.

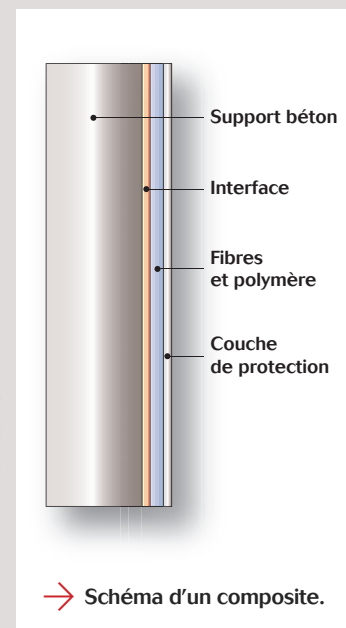
Les composites sont soit imprégnés de résine au moment de la pose, soit pré imprégnés en usine ou sur le chantier avant la pose.

Les tissus ou les lamelles sont collés au support (par simple ou double encollage) à l'aide d'un rouleau par l'intermédiaire d'une résine d'imprégnation. La réparation s'achève par l'opération de marouflage qui permet d'éliminer les bulles d'air éventuellement formées entre le support et le composite et expulser les excédents de colle. Une couche de fermeture est appliquée sur le tissu ou la lamelle une fois posée. ■



Patrick Guiraud

→ Mise en sécurité par des matériaux composites collés des pylônes en béton armé de l'ancien pont suspendu de Terenez atteint d'alcali réaction.



→ Schéma d'un composite.



Un chef-d'œuvre **en sursis**

Situé dans le nouveau quartier Paris-Rive-Gauche en cours d'aménagement, le bâtiment des « Messageries » de la gare d'Austerlitz, construit entre 1927 et 1929 par Eugène Freyssinet (1879-1962), est aujourd'hui menacé. La démolition partielle, envisagée dans le cadre du projet d'aménagement urbain en cours, porterait une atteinte définitive à l'architecture et à la qualité exceptionnelle du volume intérieur de cet édifice. Projet charnière dans l'œuvre de Freyssinet, cet ouvrage technique majeur présente une dimension historique et patrimoniale de première importance. Depuis le printemps 2009, le groupe Jaulin, une société événementielle, y organise avec succès des manifestations artistiques et des défilés de mode. Preuve que la halle Freyssinet a un réel potentiel d'avenir.

Texte : Nicolas Nogue



→ 1 et 2 • Les auvents extérieurs forment un unique voile ondulé directement inspiré des ondes plissées des hangars d'Orly.

Subiront-elles le sort des Halles de Baltard ? Les « Messageries » de la gare d'Austerlitz, construites entre 1927 et 1929 par Eugène Freyssinet (1879-1962), connaissent aujourd'hui un avenir incertain. Situées en plein Paris dans le nouveau quartier Paris Rive-Gauche en cours d'aménagement (13^e arrondissement), leur emplacement au bord des voies de chemins de fer embarrasse considérablement le maître d'ouvrage, la SEMAPA, qui avait tout d'abord prévu sa destruction complète afin de couvrir l'emprise ferroviaire par une dalle, face à la nouvelle Bibliothèque Nationale de France. Heureusement, la crise de l'immobilier des années 90 a reporté l'achèvement de la dalle, protégeant ainsi le bâtiment ferroviaire de la ruine. Mais il se trouve aujourd'hui à nouveau menacé –

plus de destruction complète cependant, mais partielle – avec la reprise de l'opération urbaine. Or sa dépose, même partielle, porterait atteinte à sa valeur patrimoniale et, en conséquence, au patrimoine industriel français de l'entre-deux-guerres, dans la mesure où la halle présente une grande qualité esthétique et une indéniable importance historique qu'il est urgent de faire valoir, même si l'historiographie ne l'a pas repérée comme un ouvrage iconique majeur de Freyssinet, à l'instar des hangars aéronautiques d'Orly (1921-1923) ou du pont « Albert Louppe » (1924-1930) à Plougastel (Bretagne).

L'ESTHÉTIQUE DU RENDEMENT INDUSTRIEL

Réalisé pour le compte de la compagnie du Paris-Orléans (le « P-O »), le bâtiment témoigne du niveau ultime de développement des sociétés privées de chemin de fer avant leur nationalisation en 1937. Long de 310 m, il reprend l'échelle qu'atteignent alors les trains de colis et marchandises qui viennent alimenter la capitale. Sa configuration, avec la partie centrale de la nef nord surélevée, rend compte également

de la nouvelle organisation du travail, désormais « rationalisée » voire « scientifique », que ces compagnies innovantes promeuvent dans l'entre-deux-guerres.

UN PARAPLUIE DE BÉTON

Dictée par des considérations de rendement économique, la configuration de l'ouvrage témoigne ainsi directement de l'organisation du travail du moment et de ses répercussions architecturales. Freyssinet saura en donner une esthétique parfaitement adaptée. En raison de la nature même du programme (un simple abri), jamais jusqu'alors l'ingénieur n'avait conçu un édifice à poteaux porteurs et couvertures en coque aussi léger. Il en résulte un volume intérieur aux qualités esthétiques saisissantes. Elles reposent sur l'extrême légèreté structurelle induite par l'intelligence de la conception et la maîtrise technique hors pair du constructeur : fins piliers pyramidaux, épaisseur réduite des coques (5 cm), façades ajourées au maximum, emploi de voiles minces plissés pour les pignons. Pour la mise en œuvre du béton, Freyssinet utilise en outre son procédé de vibration des

coffrages, d'où l'excellent état actuel de l'ouvrage qui n'a jamais nécessité de lourds travaux d'entretien. Si la halle peut être considérée comme un catalogue des inventions de Freyssinet antérieures à 1928, elle témoigne aussi de sa capacité à innover en fonction du défi posé par le programme.

INNOVATIONS TECHNIQUES

Afin d'accroître les surfaces vitrées en façade tout en utilisant le minimum de matière, l'ingénieur met au point une configuration et une solution technique inédites pour les auvents extérieurs. D'une part, ils épousent la forme de fins voiles cylindriques directement encastrés en façade.

D'autre part, ils sont stabilisés par des tirants métalliques, prétendus par un « système d'écrous », puis noyés dans le béton. Cette solution, brevetée en juin 1928, relève des réflexions contemporaines de Freyssinet sur la précontrainte du béton, dont il dépose d'ailleurs le brevet fondateur au même moment (octobre 1928). À ce titre, la halle marque un jalon important dans la genèse de la précontrainte. L'édifice constitue déjà

Chiffres clés

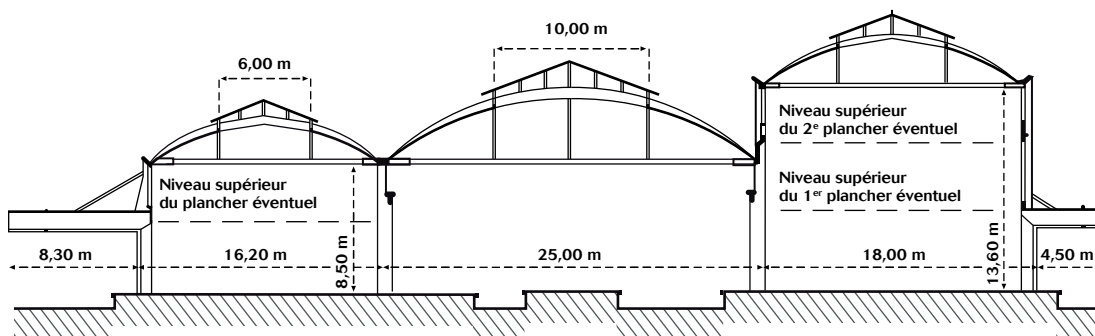
Dates de réalisation : 1927-1929

Longueur : 310 m

Largeur totale : 59,20 m
comprenant trois nefs mesurant respectivement 16,20 m, 25 m et 18 m de largeur



→ 3 et 4 • Finesse de la structure et des coques en béton. 5 • Les façades sont vitrées au maximum.



→ Coupe transversale

une brillante illustration de l'application maîtrisée du concept.

La mise en œuvre des auvents représente l'innovation technique majeure du bâtiment. Leur mise au point découle directement du parti structurel choisi par Freyssinet : ensemble, ils font système. Ce parti, réglé par la volonté d'économie et d'allègement maximal, utilise les travées basses des façades et le bâtiment des bureaux comme principaux éléments de contreventement : ils sont réalisés d'un seul bloc, monolithe, sur toute la longueur du bâtiment, soit 300 m. On comprend dès lors la nécessité de rigidifier les auvents extérieurs : encastres dans les portiques de contreventement monolithes, ils ne doivent pas se déformer

après décentrement d'où l'emploi de tirants prétendus. Leur configuration même conforte aussi leur stabilité : le long des façades, ils forment un unique voile ondulé directement inspiré des ondes plissées des hangars d'Orly.

UNE RECONNAISSANCE INTERNATIONALE

Les nouvelles messageries d'Austerlitz ont connu une réception nationale et internationale immédiate et très positive. Dès la phase du projet, le Génie militaire de Lorient s'informe auprès du maître d'ouvrage de la conception novatrice des auvents. Au même moment, la municipalité de Nantes prend contact avec Limousin pour la réalisation de son nouveau

marché couvert, abritant aussi une salle des fêtes, qui sera réalisée par l'entreprise quelques années plus tard (1936), selon une configuration identique à la halle, les auvents en moins.

La presse technique nationale fait un large écho à la réalisation. Le P-O lui-même va se charger de la médiatisation du projet, et ce au niveau international dans le *Bulletin de l'association internationale du Congrès des chemins de fer* (1929). La halle d'Austerlitz a également été présentée dans l'un des principaux cours de béton armé de l'entre-deux-guerres, celui d'Espitallier et Régimbal à l'École des Travaux Publics (ETP). Dans l'édition de 1943, les auteurs présentent le projet de Freyssinet et

Limousin avec celui des Établissements Boussiron, réalisé à la même époque, selon un programme similaire, pour la Compagnie du PLM à la gare de Lyon. La comparaison entre les deux ouvrages est édifiante ; elle prouve à quel point la conception de l'édifice du P-O s'avère exceptionnelle tant sur le plan technique qu'esthétique : les auvents de la halle du PLM, de configuration traditionnelle, suivent un parti d'une lourdeur qui contraste de façon saisissante avec la légèreté et l'élégance des fins voiles ondoyants de Freyssinet.

DIMENSION PATRIMONIALE ET HISTORIQUE

Témoin majeur des derniers feux des compagnies privées de chemin de fer, ouvrage technologique révolutionnaire, projet charnière dans l'œuvre de Freyssinet, les messageries d'Austerlitz présentent une dimension historique et patrimoniale de première importance. De surcroît, l'exceptionnelle conservation du béton, demeuré quasiment intact malgré le manque d'entretien et les conditions environnementales et d'exploitation particulièrement agressives, témoigne du savoir-faire hors



6



7

→ 6 • Une nef de béton et de lumière. 7 • Un défilé de haute-couture.

pair de l'ingénieur dont le projet doit garder son entière intégrité. D'ailleurs, aujourd'hui, l'immense vaisseau vit une renaissance édifiante. Voilà non seulement une preuve de sa capacité d'adaptation aux usages, programmes et exigences réglementaires contemporains mais également une manifestation éclatante du potentiel que la halle Freyssinet détient à créer une animation dans le 13^e arrondissement et à revitaliser le secteur ainsi que la nouvelle ZAC Paris-Rive Gauche.

RENAISSANCE

Depuis le printemps 2009, suite au départ du Sernam, une partie du bâtiment est louée par la SNCF à une société événementielle, le groupe Jaulin. « *Des aménagements renforçant l'étanchéité et la sécurité ont été effectués dans un esprit particulièrement respectueux de la valeur patrimoniale du bâtiment. Ils ont été conduits en collaboration avec la Direction de l'Architecture de la Ville de Paris qui a délivré en conséquence un permis de construire* », précise Erick Sez, directeur de la halle Freyssinet pour le groupe Jaulin. En effet, les verrières et la toiture

ont été enduites d'un film en polyéthylène qui peut être supprimé sans endommager le bâti existant. Des défenses incendies ont été mises en place à l'intérieur comme à l'extérieur, selon les normes imposées pour les Edifices Recevant du Public (ERP). La partie des voies ferrées qui demeurait intacte après le départ du Sernam a été recouverte d'une chape de béton posée sur solives démontables.

Tous les aménagements constituent des solutions démontables et temporaires qui permettent à l'édifice d'accueillir des salons commerciaux, des événements d'entreprises et autres meetings politiques. Mais, surtout, la halle est devenue un haut lieu de la mode qui accueille les défilés des plus prestigieuses maisons de haute-couture : Lanvin, Valentino, Dior, Hermès... Ce n'est pas un hasard : outre leur fluidité, les espaces intérieurs sont d'une beauté saisissante. Cela n'a pas échappé aux plus grands professionnels de la mode. Et les idées de reconversion de la halle Freyssinet après la fin du contrat de location en 2015 entre la SNCF et Jaulin ne manquent pas, telle la création d'un « Espace Génie Civil »,

vitrine du savoir-faire et de l'excellence française dans le domaine du BTP. Porté par Cimbéton, l'Association Française de Génie Civil (AFGC), l'Association Eugène Freyssinet et en collaboration avec de nombreux autres, le projet a notamment pour but de valoriser les métiers du génie civil auprès des jeunes.

CONSERVATION TOTALE

Ainsi, toute destruction des anciennes messageries de la gare d'Austerlitz – même partielle – porterait atteinte à la qualité exceptionnelle de son volume intérieur et de son parti architectural qui, faut-il le rappeler, est symétrique. La dépose d'une nef longitudinale ruinerait sa stabilité.

La destruction de quelques travées de son aile orientale briserait la symétrie de sa composition et le souffle de son espace intérieur. Elle ferait disparaître un élément constructif remarquable de l'ouvrage : son pignon d'about que Freyssinet a réalisé sous forme d'un fin voile mince plissé, solution alliant élégance formelle, économie et rigidité structurelle. Démolir le bâtiment des bureaux endommagerait également la stabilité du bâtiment et lui ôterait

son indispensable façade latérale qui le relie au tissu urbain du quartier du Chevaleret. Enfin, comme le prouvent actuellement les activités de la société événementielle, la conservation totale des messageries ne semble pas poser de problème pour peu qu'on y installe des usages et programmes appropriés. Ce serait d'autant plus insensé de ne pas saisir une telle opportunité que la halle Freyssinet a la chance inespérée de se situer en plein Paris. ■

Photos : ouverture, et 7 – Source Entreprise Jaulin ; Nello Giambi

Maître d'ouvrage : Compagnie des chemins de fer du Paris-Orléans

Maître d'œuvre : Eugène Freyssinet (1879-1962), directeur technique des Établissements Limousin

Constructeur : Établissements Limousin



Une dentelle minérale pour un ouvrage royal

Superbes, exceptionnels, uniques... Si les éloges ne tarissent pas, chacun s'accorde à souligner la complexité des six ouvrages réalisés sur la vallée du Bouregreg au Maroc afin de faciliter les échanges entre Rabat et Salé. Car à projet royal, ouvrage royal ! Au cœur de ce dispositif s'impose le pont Hassan II. Convoquant une multitude d'images oniriques, cette dentelle en béton de ciment blanc vient remplacer le pont Moulay el Hassan pour autoriser le passage du tramway et accroître les voies de circulation routière.

Texte : Delphine Désveaux



→ 1, 2 et 3 • Sur l'oued Bouregreg, le pont Hassan II se compose d'arcs évolutifs qui, partant de chacune des rives, convergent vers l'arc central.

Longtemps Rabat et Salé, deux cités impériales séparées par l'oued Bouregreg, se sont observées en sœurs ennemies – les taxis ne franchissaient pas l'actuel pont Moulay el Hassan construit en 1957. Longtemps, les crues du fleuve ont été dévastatrices, contenues par un barrage mis en service en 1974 et situé à 17 km en amont. Mais il semble bien qu'aujourd'hui, sous l'impulsion de Sa Majesté le roi Mohamed VI, le royaume chérifien joue la course contre la montre. Les villes poussent comme des champignons et on entend partout la même antienne : tenir les délais.

Tout doit aller vite, l'autoroute, le train, le développement économique, la construction de Tanger Med II, l'aménagement de la vallée du Bouregreg (60 km²) en six phases, dont deux sont en cours, les quatre suivantes étant à l'étude.

La première séquence se situe en aval, entre Rabat et Salé, et a été baptisée Bab el Bahr (Porte de la Mer). Sa réalisation suit les directives des urbanistes français Reichen et Robert et s'apprête à accueillir un nouveau quartier dédié aux loisirs (marina, promenades urbaines...) qui, par son

rayonnement, confortera l'unification et profitera à l'ensemble de l'agglomération. Cette première phase est complétée par la construction de nouvelles infrastructures pour autoriser le passage du tramway et accroître les voies de circulation douce et routière entre les deux villes.

UN HORIZON CONSTRUIT

Le paysage est marqué par une large vallée à fortes composantes horizontales que soulignent des constructions prestigieuses : côté Rabat, la nécropole mérinide de Chellah, la médina de Rabat préservée dans son authenticité, la ville moderne qui a transformé Rabat en capitale administrative du royaume, la Kasbah des Oudayas du ^{XII}^e siècle, la mer que l'on devine au loin et, sur l'autre rive, la citadelle de Salé. « *On est frappé de voir combien le bâti se fonde dans le paysage, avec les coloris des médinas qui adoptent les teintes de la terre et s'inscrivent dans la minéralité du site* » précise Jacques Durst, ingénieur responsable du calcul des phases de projet chez Marc Mimram. Cet « horizon construit » nourrit la pensée du projet et le façonne : le geste architectural recherche « le

dialogue avec cette minéralité ciselée d'où seule émerge verticalement la tour Hassan » et trouve sa réponse dans la conception d'une structure délicate, une « dentelle minérale » asymétrique.

Lancée en 2005, la consultation initiale ne portait que sur la réalisation du pont Hassan II, soit un quart en mètres linéaires des ouvrages aujourd'hui réalisés. « *Les accès, qui sont les ancrages territoriaux des ponts, sont souvent plus importants que le franchissement lui-même*, confie Marc Mimram. *Le véritable projet, c'est la route qui longe la falaise que nous avons reprise pour amorcer la descente, l'ouverture sur la vallée grâce au pont de la Base Nautique, la culée creuse, le pont lui-même, la rampe du tramway et le viaduc côté Salé, que j'ai traité comme un espace public. Il me paraissait donc important de constituer différentes séquences et de faire en sorte que le pont Hassan II ait un début et une fin pour qu'il ne se perde pas dans les transformations de ses ancrages* ». Marc Mimram souhaitait que cette succession d'ouvrages s'inscrive dans une continuité urbaine et développe un vocabulaire unifié, bien que porteur

Chiffres clés

Longueur : 330 m

11 appuis, 10 travées (21/2626/31/36/76/36/31/26/26/21 m)

Fondations

217 pieux, 33 semelles

– Béton : 11 400 m³

– Armatures passives : 1 340 t

Structure

31 piles :

– Hauteur variable entre 2,80 m à 7,35 m

– Béton : 1 130 m³

– Armatures passives : 120 t

27 palmes, 24 béquilles

– Béton : 2 500 m³

– Armatures passives : 300 t

– Précontrainte : câbles 19T15 et 31T15

Tablier

210 demi-voussoirs préfabriqués

– Hauteur des caissons : 1,75 m

– Béton : 3 050 m³

– Armatures passives : 7 600 t

– Précontrainte transversale : câbles 4T15

– Précontrainte longitudinale intérieure et extérieure : câbles 7T15, 13T15, 19T15, 31T15

MARC MIMRAM, architecte ingénieur

« Donner du sens »

Quel parti architectural fonde cet ouvrage ?

Pour moi, la condition première est celle du paysage, la relation qu'installe l'ouvrage avec la géographie, le sol et le ciel, la matière et la lumière. La vallée du Bouregreg, c'est un horizon de faible hauteur, fragile, précieux, ciselé par une géographie et une stratification historique très savante qui remonte au XIV^e siècle. J'ai voulu être attentif à cette histoire. C'est donc un ouvrage de sol, et non de ciel, qui construit un lien visuel entre les deux rives avec une succession de demi-arcs qui s'accroissent progressivement et qui finissent par constituer un arc central. Ce système, avec le motif récurrent des palmes, sort du modèle international et déterritorialisé. Il est totalement unique... et à vrai dire assez fortement complexe.

Représente-t-il une prouesse technique ?

La prouesse est de deux ordres – technique et ontologique – presque contradictoires. Certes, les calculs et la modélisation extrêmement sophistiqués, que nous avons menés jusqu'à l'appel d'offre, la préfa-

brication et le phasage des travaux, auxquels nous avons réfléchi dès la conception, sont des conditions essentielles. Mais à mes yeux la technique n'est une prouesse que dans la mesure où elle accompagne les qualités du paysage et qu'elle donne sens au besoin qui la fonde. La technique est au service de la cohérence et de la raison d'être du projet. Il faut alors de l'invention, de la matière et du sens.

En quoi fait-il sens ?

Partir de l'infrastructure comme condition de développement de la ville est une antienne qui remonte à l'Antiquité. Sauf qu'on s'est aperçu depuis une cinquantaine d'années qu'il ne suffisait pas de construire des routes et de mettre en mobilité les gens pour faire une ville. Ici, la condition essentielle du projet, c'est l'adoption d'un transport collectif dont le gabarit n'était pas supportable par le pont Moulay el Hassan. C'est un symbole du lien entre la ville administrative et la ville populaire. Créer du lien, c'est mon travail. L'infrastructure devient un bien partagé, et non un mal nécessaire. ■

MICHEL DUVIARD, ingénieur chef de projet chez Egis JMI

Des calculs aux limites des états de contraintes

Malgré son apparente simplicité, c'est peu dire que le pont Hassan II est complexe, ce qui ne facilite guère la synthèse des contraintes et des exigences à respecter :

- **La structure très fine** est soumise à de très fortes contraintes qui ont dû être optimisées en jouant avec tous les paramètres possibles pour obtenir un état global de contraintes admissibles, parfois à la limite des règlements dans un certain nombre de sections : modifications de dimensions, dénivellations d'appuis, tensions détensions des tirants provisoires au fil des phases de construction, modulation de la précontrainte, modification du phasage de construction... ;
- **Les détails d'interface** entre le pont Hassan II et les structures voisines ont été reconçus ;
- **La modélisation spatiale** de la structure a été réalisée avec le logiciel Inventor d'Autodesk. Cette vision précise et détaillée en 3D, incluant tous les ancrages et câbles de précontrainte, a été la condition sine qua non pour une conception maîtrisée. Elle a également permis de fiabiliser la production des plans d'exécution.

La complexité géométrique et structurelle de l'ouvrage se traduit en particulier par :

- **La très grande hyperstaticité** de la structure complète faisant interagir les trois tabliers construits en parallèle et reliés entre eux ;
- **Les mises au point importantes** concernant les calculs liés aux entretoises biaisées de liaison des tabliers et les études sismiques. L'ouvrage est dimensionné pour résister à un séisme ayant une période de retour de 975 ans ;
- **Les surfaces gauches des piles** : 8 surfaces non planes par fût ;
- **Les sections et hauteurs variables** des béquilles ;

- **Le fonctionnement successif** de l'arc central comme un arc en phase de construction, et comme bracons du tablier, avec les béquilles correspondantes, en configuration définitive ;
- **Les 4 formes différentes de palmes**, avec une section évolutive dans les trois directions de l'espace, utilisées chacune 6 fois, et une forme de palme centrale, clavage de l'arc, également variable et utilisée 3 fois ;
- **Les difficultés de dimensionnement** des pieds des palmes principales constituant les arcs : étude de diffusion des efforts de précontrainte et des réactions d'appui ;
- **La grande complexité de conception** des nœuds de la structure, pièces massives où convergent palme, béquille, entretoise et tablier ;
- **Les caissons des tabliers**, à trois âmes, de faible hauteur, et de sections variables à l'approche des nœuds de la structure.

On peut également citer dans un autre ordre d'idée :

- **L'existence d'appareils d'appui** soumis à de fortes tractions ;
- **La jonction du tablier** portant le tramway avec la rampe adjacente par l'intermédiaire d'un encastrement élastique ;
- **L'absence dans le marché de la problématique** des courants vagabonds générés par l'alimentation du tramway en courant continu, ce qui a nécessité de mettre en œuvre des dispositions de protection spécifique pour les aciers passifs et les câbles de précontrainte de manière à assurer la liaison électrique entre les armatures et éviter tout risque de corrosion préférentielle ;
- **Les exigences du calendrier** difficiles à tenir eu égard au nombre important de difficultés qui ont dû être surmontées ;
- **Le phasage de construction complexe.**



4



5

→ 4 • Le viaduc de Salé prolonge le pont Hassan II. 5 • La pile P 10 prend la forme d'une harpe celtique pour relier élégamment les deux ouvrages.

Entretien

JEAN-MARC TANIS, *Directeur de Egis JMI*

Un pur sang

Quelle est la contribution de JMI dans la réalisation de cet ouvrage ?

Marc Mimram est un architecte de talent doublé d'un ingénieur. Il a intégré dans son agence des ingénieurs pour ne pas subordonner sa liberté de création et assurer son autonomie. Il nous a mandatés pour contrôler les études techniques du pont Hassan II mais le calendrier était si serré qu'il ne laissait pas le temps nécessaire pour mener les études dans des conditions « normales ». Puis, pour répondre avantageusement aux exigences du calendrier, nous avons convenu avec Marc Mimram et avec l'accord du maître d'ouvrage, de devenir le bureau d'études techniques de l'entreprise SGTM, qui a réalisé un ouvrage d'une qualité irréprochable.

Quel regard portez-vous sur ce pont ?

C'est un pont royal qui mérite bien le nom d'ouvrage d'art et qui s'inscrit dans la continuité des réflexions structurelles que Marc Mimram avait engagées lors de la réalisation des ponts sur la ravine Saint-Sauveur ou de Belfort. Il affine ici son trait dans un ouvrage très difficile à concevoir, très tiré, aux limites des justifications de calcul et que je comparerais volontiers à un pur-sang. Mais compte tenu des délais extrêmement tendus, sa réalisation est devenue un challenge commun pour tous les acteurs qui ont su nouer des relations fortes et franches, dont l'objectif commun était de réussir cet ouvrage prototype. La multiplicité des intervenants était hautement représentative de l'expertise internationale dans le domaine des ouvrages d'art. La bonne synergie entre les bureaux d'études locaux et internationaux a favorisé le transfert des connaissances et des savoir-faire. Les ingénieurs marocains sauront mettre à profit cette capitalisation dans la réalisation de futurs ouvrages. ■

des éléments identitaires propres à chaque rive. Ainsi, le pont de la Base Nautique, côté Rabat, s'inscrit en courbe dans la continuité du dispositif urbain et se compose de deux tabliers qui reprennent le principe des grandes voûtes du pont Hassan II ; la culée creuse est un vaste ouvrage de sol ; point d'orgue au cœur de cette succession d'infrastructures, le pont Hassan II est conçu comme un objet unique et mêle savamment poésie, invention sans pareil, symbolique du rapprochement, usages multiples et esthétique sophistiquée ; et sur un autre registre, le viaduc de Salé, dont les piles sont solidaires du tablier et des appuis au niveau du sol, prolonge le tablier du pont Hassan II jusqu'à la culée de Salé en adoptant un rythme de piles semblable à la dernière travée (21 m) du pont Hassan II. Cet immense « mille pattes » est constitué de deux tabliers auxquels viennent s'adjoindre les deux rampes d'accès (ouest et est) du tramway. Le viaduc développe en outre une réflexion sur l'espace public en le gratifiant d'un toit sous lequel Marc Mimram rêve de voir s'installer un marché. L'unité d'ensemble est assurée par un même

béton à hautes performances de ciment blanc, une continuité de rive et une corniche identique sur une longueur de 1 300 m.

UNE STRUCTURE ÉVOLUTIVE ET ORIENTÉE

Le pont Hassan II est constitué transversalement de trois tabliers juxtaposés, indépendants et reliés par des entretoises. À l'ouest, en aval, le premier tablier accueille le tramway ainsi qu'une large passerelle en encorbellement qui prodigue aux passants – piétons et deux roues – une promenade sur le magnifique paysage de la médina et des Oudayas. Les deux autres tabliers sont dédiés aux véhicules (2 x 3 voies), celui de l'amont s'accompagnant également d'une circulation douce en balcon sur le fleuve. La structure du pont se compose d'arcs évolutifs qui, partant de chacune des rives, convergent vers l'arc central à la manière d'une main tendue. « Cette figure instable du demi-portique qui finit par constituer la voûte centrale est intéressante car elle parle symboliquement du lien et de l'ancrage » explique Marc Mimram. À la symbolique forte s'agrègent la précision du trait et l'esthé-



→ 6 et 7 • L'objectif architectural de la dentelle claire a nécessité un béton de résistance 65 MPa formulé avec un ciment blanc de l'usine du Teil.

tique du motif, une « palme ». Palme, crête de vagues, course de dauphins... les métaphores abondent, prennent de la consistance, et sont toujours en adéquation avec le paysage. L'extrême soin porté aux détails, qui témoigne d'une louable attention à l'égard des passants, démontre chez Marc Mimram une précision d'orfèvre, alors même qu'il se refuse à afficher ostensiblement la complexité d'une structure : « *Cannelure, rainure, saillie, jeu d'ombre et lumière... On me fait souvent remarquer que ces détails sont imperceptibles mais je ne veux rien abandonner, même si cela peut sembler un peu fou* ». Aussi, sculptés dans la matière, les éléments varient-ils continuellement tout au long des membrures adaptées au schéma statique pour former des voûtes magnifiques.

UNE RÉALISATION COMPLEXE

La cinématique de réalisation résulte d'un phasage extrêmement tendu dont la complexité répond à la nécessité d'obtenir un état de contrainte satisfaisant. Après mise en place des remblais et des fondations, un pont provisoire a été construit

pour réaliser l'arc central et assurer la liaison des chantiers d'une rive à l'autre. Les piles courantes sont fondées sur six pieux forés entre - 25 et - 47 m de profondeur, sous boue bentonitique. Les piles principales, P4 et P5, situées de part et d'autre de l'arc, sont fondées sur neuf pieux avec des semelles construites à l'intérieur d'énormes batardeaux.

MISE EN ŒUVRE RIGOREUSE

Les coffrages des piles ont été uniformisés par groupe de six en standardisant les fruits et en jouant sur les longueurs d'embase. Cas particulier, les piles P10 prennent la forme d'une « harpe celtique », selon Michel Duviard, pour harmoniser la jonction du viaduc de Salé avec le pont Hassan II. Pour les trois ouvrages construits en simultané, la réalisation de l'arc central (76 m) s'est déroulée en trois temps : pose des deux palmes latérales, pose de la palme centrale, clavage des clés d'arc. Cette valse se poursuit par la mise en tension simultanée dans les trois palmes de deux des six câbles de précontrainte centraux (19T 15) pour réaliser une compression partielle, les poussées de

l'arc en pieds de palme étant reprises par des tirants. Après quoi sont réalisées les travées suivantes avec pose d'une palme ; une réservation est prévue en tête, au niveau du nœud qui constitue l'âme du caisson, ou nervure de la palme, pour encastrer la béquille. Ces dernières sont coulées en place entre le pied d'une palme et la tête de la palme suivante. Sont ensuite coulées les entretoises qui relient les tabliers, l'ensemble constituant le squelette autostable de l'ouvrage. Enfin sont posés les demi-voussoirs, clavés transversalement et longitudinalement selon un pianotage très précis, et mis en tension les câbles de précontrainte.

L'ensemble des travées est ainsi construit en gérant les trois tabliers en parallèle selon un phasage qui « *ne permettait pas la moindre interprétation* » selon Michel Duviard. La construction se termine par le clavage avec les extrémités précédemment coulées en place au contact des interfaces. ■

Photos : ouverture, 1, 2 et 4 – Jacques Durst ; 3 – Serge Bisson ; 5 et 7 – Delphine Désveaux ; 6 – Noël Richet



Programme : 3 ouvrages d'art

Lot 1 – côté Rabat :

pont base nautique ;
culée creuse ; rampes
de tramway ;

pont Hassan II (2 tabliers à
3 voies routières + 1 tablier
tramway + voie piétonne
et deux roues de part et d'autre
de l'ouvrage).

Lot 2 – côté Salé, accès nord :
viaduc (2 tabliers) + 2 rampes
d'accès routier

Maître d'ouvrage : l'Agence
pour l'Aménagement de
la Vallée du Bouregreg

**Contrôle pour la maître
d'ouvrage :** LPEE

Maître d'œuvre : Marc Mimram

Entreprises :

**Lot 1 – SGTM (mandataire) ;
BET JMI : études d'exécution
Freyssinet (précontrainte)**

**Lot 2 – Sogéa (mandataire),
BET Secoa, Freyssinet
(précontrainte)**



Un signal fort à l'entrée de Fès

Le royaume du Maroc étoffe son réseau autoroutier sur l'ensemble de son territoire. Pour l'autoroute Fès-Oujda (328 km), la société nationale des Autoroutes du Maroc souhaitait construire un pont à haubans pour créer un signal architectural fort à l'entrée de Fès, au niveau de l'échangeur de la RN 8. L'ouvrage, réalisé par Freyssinet et conçu par Michel Virlogeux, comporte un pylône central dont les deux jambes inclinées, de section variable, dessinent une forme en V auquel sont suspendues deux dalles nervurées symétriques en béton précontraint.

Texte : Delphine Désveaux



1



2



3



4

→ 1 • Le pylône axial adopte une forme en V. 2 • Vue de la culée 3 • Détail sur les haubans. 4 • Le tablier en béton précontraint vient s'encastrer dans le pylône.

À la suite de l'appel d'offres qui portait sur la conception-construction d'un pont à haubans, deux propositions avaient été retenues : la première avec un pylône excentré, la seconde avec un pylône central. C'est cette dernière solution, économiquement plus intéressante et signée Freyssinet/Michel Virlogeux, qui fut choisie. « Certes, un pylône excentré est plus élégant et beaucoup plus spectaculaire, reconnaît Michel Virlogeux, concepteur de l'ouvrage, mais sa structure demande un rééquilibrage (avec une culée contre-poids par exemple) qui accroît l'enveloppe financière. Or nous désirions limiter les coûts ». L'ouvrage a un pylône axial, implanté dans le terre-plein

central de l'autoroute, auquel sont suspendues deux travées symétriques. L'architecture du pylône adopte une forme en V avec deux jambes inclinées de section variable et une embase volontairement massive qui s'affine progressivement vers la partie supérieure.

UN HAUBANNAGE À DEUX NAPPES LATÉRALES

Pour le tablier, le choix s'est porté sur une dalle en béton précontraint à deux nervures latérales. Le haubannage est constitué de deux nappes latérales à trois haubans issues du pylône. « La principale difficulté réside dans le coefficient de séisme important qui a augmenté entre l'appel d'offre et le projet », rappelle Michel Virlogeux. « À la suite de calculs en plasticité, nous avons optimisé la conception grâce à une double rotule plastique au droit du pylône et un renforcement des aciers passifs dans le tablier ». Le dimensionnement suit les règles de l'Association Française du Génie Parasismique et les Eurocodes. « Pour répondre aux exigences du maître d'ouvrage, ajoute Guy Sevoz, Directeur de Freyssinet Maroc, nous avons dimensionné le tablier de

manière à ce qu'il puisse supporter la rupture éventuelle d'un hauban. Par ailleurs, nous avons mis en place un dispositif pour remplacer les haubans ». Les travaux ont commencé par la construction des culées et des fondations. Pour faciliter l'exécution du pylône, la construction s'est déroulée en sept levées (entre 4 et 6 m) sur échafaudages en utilisant un coffrage bois. Le tablier étant encastré dans le pylône, Freyssinet a recouru à des barres filetées afin de réduire le nombre d'armatures en attente traversant le coffrage. En partie supérieure, l'avant-dernière levée intègre les boîtes d'ancrages métalliques des haubans positionnées avec précision grâce à un système de vis. Le tablier a été exécuté sur un échafaudage complet avec mise en place des coffrages, des aciers passifs, des ancrages et des gaines de précontrainte, et un bétonnage en une seule phase. Une fois les câbles de précontrainte (câbles 12C 15 et 19C 15) mis en tension par des vérins mono-torons, les gaines ont été injectées par un coulis de ciment. Préfabriqués à longueur, les torons des haubans ont été enfilés dans des gaines en PEHD avant d'être hissés à la grue, accrochés à la

chape du pylône et mis en tension. Après le réglage et l'injection à la cire des ancrages, la mise en place des enrobés et des équipements de l'ouvrage, la mise en tension définitive a été réalisée. ■

Photos : ouverture, 1 et 4 – Delphine Désveaux ; 2 – Noël Richet ; 3 – Louis Marracci

Caractéristiques du béton

Classe de résistance : B35 - B45

Ciment : cimenterie d'Holcim Fès

Agrégats : sable de concassage, sable dunaire, G1 et G2

Centrale BPE : Holcim béton Fès

Chiffres clés

Longueur totale : 69,45 m

Largeur totale : 14,70 m

1 pylône central en V : 22 m de haut

Tablier précontraint avec dalle à 2 nervures latérales encastrée dans le pylône

2 nappes de haubans : 4 x 3 = 12 haubans 19HD 2000

Délai (études, travaux) : 11 mois

Maître d'ouvrage : Autoroutes du Maroc

Maître d'œuvre : Freyssinet (mandataire), Michel Virlogeux

Entreprise : Freyssinet

Coût : 2 M€ HT



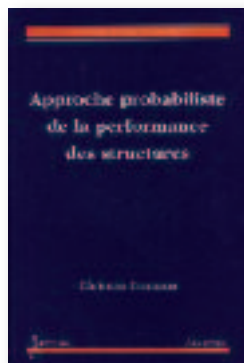
DESIGNING AND BUILDING WITH UHPFRC

François Toutlemonde
et Jacques Resplendino

Le livre *Designing and building with UHPFRC* constitue les actes du colloque international sur les bétons fibrés à ultra hautes performances (BEFUP) organisé, en 2009 à Marseille, par l'Association Française de Génie Civil et la Fédération internationale du béton. Le comité d'organisation du colloque a choisi de publier dans cet ouvrage l'ensemble des interventions en anglais afin de diffuser largement le très riche contenu de cette manifestation. Il livre ainsi à la connaissance du lecteur, une cinquantaine d'interventions qui détaillent des expériences avec les BEFUP dans différents pays. À travers cette grande diversité de témoignages, de nombreux thèmes sont développés

tels que les nouvelles solutions architecturales, les nouveaux équipements et composants structurels, la maîtrise de la durabilité des structures. ■

Éditions Wiley – ISTE

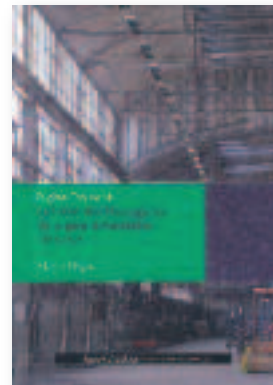


APPROCHE PROBABILISTE DE LA PERFORMANCE DES STRUCTURES

Christian Cremona

Cet ouvrage propose un panorama des méthodes disponibles pour mettre en œuvre une approche probabiliste de la performance des structures. Basés dans la mesure du possible sur des cas concrets, les différents exemples présentés cherchent autant à illustrer les approches théoriques qu'à démontrer leur intérêt et leur mise en œuvre pratique. ■

Éditions Hermes – Lavoisier,
et Éditions Wiley – ISTE pour la version anglaise,
Structural performances



EUGÈNE FREYSSINET La halle des Messageries de la gare d'Austerlitz 1927-1929

Nicolas Nogue

Ce livre met en lumière le caractère historique remarquable et l'indéniable dimension patrimoniale de cet ouvrage dont l'avenir s'avère aujourd'hui bien incertain. Le bâtiment pourrait être voué à une destruction partielle alors que son exceptionnelle qualité, tant technique qu'esthétique, milite en faveur de sa conservation intégrale. Conçue et réalisée en 1927-1929 par Eugène Freyssinet, cette halle constitue à la fois la synthèse de toutes les innovations de Freyssinet dans le domaine du béton armé tout en représentant l'un des premiers édifices où l'ingénieur met en œuvre la technologie révolutionnaire de la précontrainte du béton. ■

Éditions Jean-Michel Place

Publications



Collection technique de Cimbéton Recueil des publications Béton et Génie Civil – Édition 2011

Ce recueil regroupe
l'ensemble des docu-

mentations techniques de Cimbéton consacrées aux Ouvrages d'Art et au Génie Civil. Elles précisent les spécificités de conception des structures, de formulation, de mise en œuvre des bétons et d'optimisation de la durée d'utilisation des ouvrages. Elles présentent des solutions constructives innovantes, économiquement viables, pérennes et qui répondent aux exigences du développement durable et aux défis des concepteurs et des architectes. ■



Les collections « Solutions béton » de Cimbéton

■ Guide pour le choix des classes d'exposition des ouvrages maritimes et fluviaux en béton

Ce deuxième volet du guide a été élaboré par un groupe créé au sein de l'École Française du Béton pour aider les rédacteurs de cahiers des charges à choisir les classes d'exposition. *SB OA 10-2*

■ Guide pour le choix des classes d'exposition des tunnels routiers creusés

Ce troisième volet concerne les tunnels routiers creusés. *SB OA 10-3*

■ Guide pour le choix des classes d'exposition des ouvrages divers de Génie Civil

Les ouvrages de génie civil visés ici comprennent notamment les murs et ouvrages de soutènement, les ouvrages hydrauliques, les ouvrages de production d'énergie, les silos et les réservoirs et les fondations (pieux, micro-pieux, barrettes, puits, parois moulées ou radiers). *SB OA 10-4*. ■



HQE
Les renards du temple

Rudy Ricciotti

Un cri de colère et de révolte. Un essai pamphlétaire brûlant et dérangeant. Une remise à plat, sans faux plis, de l'expertise environnementale et de ses genuflexions serviles. Grand Prix National d'Architecture 2006, Rudy Ricciotti part en guerre contre le pervers et périlleux syndrome HQE. Trois lettres glacées pour signifier aux élus et aux maîtres d'œuvre le label Haute Qualité Environnementale. Sans se préoccuper des appréciations oiseuses des sempiternels petits marquis de la culture, Rudy Ricciotti engage la polémique avec la terrifiante radicalité qui lui est coutumière. Et naturellement, il défend le béton et le rude, face aux maniéristes et aux idéologues abscons de la norme environnementale. En fili-

grane lumineux à son argumentation belle-queuse et rigoureuse, Ricciotti dénonce la prise en otage de la légitimité démocratique par la technocratie. Cet essai est l'édition augmentée et réécrite de la publication éponyme, parue en 2006 aux éditions Transbordeurs. ■
Éditions Al Dante/Clash



BERNARD DAVID

La rédaction de *Construction Moderne* a appris avec une grande tristesse le décès de Bernard David survenu le 12 juin 2011. Ingénieur diplômé de l'ESTP, après une longue carrière au sein de l'Industrie du béton puis chez Lafarge ciments, il a exercé chez Cimbéton les fonctions de Directeur Délégué – Génie Civil de 1998 à 2002 année de son départ à la retraite. Au cours de ces années, il a apporté toute son expertise et ses connaissances aux contenus éditoriaux et techniques des numéros annuels *Ouvrages d'Art de Construction Moderne*. Tous ceux qui l'on connu gardent de lui le souvenir d'un homme chaleureux, de conviction, de contact et adepte de la convivialité et de la joie de vivre, passionné par son métier. Cimbéton et la rédaction de *Construction Moderne* s'associent au souvenir de Bernard David et expriment toute leur sympathie à ses proches. ■

Agenda



AIX-EN-PROVENCE
Du 29 mai
au 1^{er} juin 2012 –
Palais des congrès
**CONFÉRENCE
INTERNATIONALE
SSCS 2012**

L'AFGC, en partenariat avec la Rilem, la fib et l'AUGC, organise la première Conférence internationale sur l'utilisation des modélisations numériques pour concevoir des structures en béton en phase avec le concept de développement durable. ■
www.sscs2012.com



**Matériaux
et applications**
**Les filières ciments
et bétons**

Les trois axes du développement durable : optimisation des procédés de fabrication et utilisation de sources d'énergies alternatives permettant une gestion optimale des ressources naturelles, développement de nouveaux matériaux et la mise au point de solutions constructives innovantes. ■
8 pages, gratuit – Tiré à part de *L'Ingénieur constructeur* n° 517 – décembre 2010.



PARIS
Du 3 au 7 juillet
2012
**4^e CONGRÈS
INTERNATIONAL
D'HISTOIRE DE LA
CONSTRUCTION**

Les Écoles nationales supérieures d'architecture Paris-Malaquais, Paris La Villette et Versailles ainsi que le Conservatoire national des arts et métiers (Centre d'histoire des techniques et de l'environnement), avec le soutien des ministères de la Culture (BRAUIP) et de l'Écologie (PUICA) et de l'ENSA de Strasbourg organisent à Paris le 4^e Congrès international sur l'Histoire de la Construction, qui se tiendra du mardi 3 juillet au samedi 7 juillet 2012. Plus de six cents chercheurs, enseignants et praticiens de la construction et de la restauration, de disciplines les plus variées (historiens, architectes, ingénieurs, entrepreneurs, etc.) sont attendus à ce congrès. ■
www.icch-paris2012.fr

Site internet



SITE INTERNET

La RILEM (Réunion Internationale des Laboratoires et Experts des Matériaux, systèmes de construction et ouvrages) se dote d'un nouveau site internet, plus dynamique et ergonomique. Il relaie les principaux objectifs de l'association, à savoir promouvoir une construction durable et sûre, stimuler de nouvelles directions de recherches et favoriser la coopération internationale par un accès général aux connaissances avancées. ■
www.rilem.net

GRANDS CHANTIERS AUTOUR DU MONDE



→ Hoover Dam Bypass Bridge, Nevada, (États Unis d'Amérique). 1 • Décembre 2008. 2 • Mai 2009. 3 • Août 2009. 4 • Octobre 2010. • Photos : FHWA – Central Federal Lands Division.



→ Qingdao Haiwan Bridge (Chine). • Photos : 1 • Zhang 2008. 2 • PT1/WENN.COM/SIPA.



→ Pont de Térénez, (France). • Photos : Lavigne Chéron Architectes.



→ Unité de post-dénitrification et de traitement des boues Achères/Seine-Aval, (France). • Architecte : Luc Weizmann LWA. • Photos : Alex Beraud

En 4^e de couverture : Pont Hassan II, vallée du Bouregreg, Rabat, Maroc. • Photo : Jacques Durst →

