

CONSTRUCTION

MODERNE

ANNUEL OUVRAGES D'ART 2013



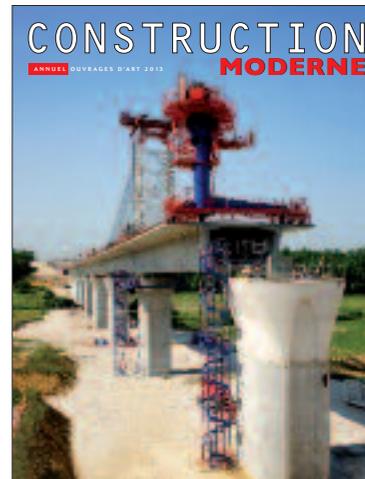
ÉDITO

Comment attirer les jeunes en recherche d'orientation professionnelle vers les métiers de Travaux Publics ? Depuis plusieurs années, la FNTP développe une politique de communication en direction des collégiens et lycéens. L'Association pour la Connaissance des Travaux Publics (ASCO-TP) y contribue grâce à ses relations avec les enseignants de l'Éducation Nationale et la mise en ligne de son site internet Planète-TP qui comprend un espace dédié aux collèves. Le DVD produit en 2009 autour du thème « Architecture et Cadre de vie » a eu un énorme succès dans les établissements scolaires. C'est pourquoi l'École Française du Béton (EFB) vient d'entreprendre sa réactualisation. Il en est de même du livret réalisé par la FNTP sur la découverte des métiers et qui est destiné au programme du même nom.

Mais quoi de plus démonstratif que les belles réalisations d'ouvrages d'art et les chantiers d'infrastructures pour mieux faire connaître les métiers qui sont nécessaires à leur accomplissement ?

Aujourd'hui, le chantier de la ligne LGV Tours-Bordeaux mené par l'entreprise COSEA a été retenu par le Ministère de l'Éducation Nationale pour servir d'exemple dans la mise en œuvre de ses programmes d'enseignement. La FNTP, la Fondation BTP Plus, l'EFB et la Fédération Nationale des SCOP se sont associées pour financer ce projet en complément de l'État. Sa gestion a été confiée à ASCO-TP. Il rassemble de nombreux enseignants et inspecteurs de l'Éducation Nationale, et comprendra la réalisation d'un jeu interactif destiné à faire découvrir la conduite des projets complexes et leurs contraintes en termes d'ordonnancement et de gestion des ressources.

Christian Binet
Président d'ASCO-TP



← Couverture • LGV
Sud Europe Atlantique.
Photo : Michel Barberon.



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 • **Rédactrice en chef adjointe :** 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 2013



01
LGV Sud Europe Atlantique –
Indre-et-Loire (37) et Gironde (33)



06
Dalle d'essais de l'IFSTTAR –
Marne-la-Vallée (77)



10
Barrage – Chatou (78)



23
Stade Jean-Bouin – Paris (75)



28
Hangar à dirigeables –
Écausseville (50)



32
Hommage
à Jacques Mathivat



36
Patrimoine – Halle
de Fontainebleau (77)



International – Grands chantiers
autour du monde



15
L'approche performantielle



Le Sud-Ouest s'ouvre à la **grande vitesse**

Relier par TGV Paris à Bordeaux en 2 h 05, ce sera réalisable à partir de l'été 2017 grâce à un nouveau tronçon de 302 km de ligne à grande vitesse entre Tours et Bordeaux, qui constitue le plus grand chantier linéaire européen actuel. Ponts-rails, ponts-routes, sauts-de-moutons, longues estacades constituées de poutres PRAD, grands viaducs dont sept réalisés en voussoirs préfabriqués en béton précontraint, tranchées couvertes, écrans acoustiques... Le panel des ouvrages est vaste. Ce projet fait très largement appel au béton et met en valeur ses nombreux atouts.

Texte : Michel Barberon



→ 1 et 2 • Estacade de La Folie au nord de Poitiers. Mise en place des poutres en béton précontraint.

La LGV SEA, pour Ligne à Grande Vitesse Sud Europe Atlantique, s'inscrit dans un schéma global d'aménagement du territoire issu des décisions du Grenelle de l'Environnement. Elle va contribuer au renforcement de l'axe transeuropéen qui relie, par la façade Atlantique, les régions nord et est de l'Europe au sud-ouest de la France et à l'Espagne. Représentant un investissement de 7,8 milliards d'euros qui couvre l'ensemble des travaux de génie civil et de superstructure ferroviaire, la ligne est réalisée dans le cadre d'un contrat de Partenariat Public Privé sous forme d'une concession d'une durée de 50 ans.

Calendrier

2010-2012 : études et concertations, acquisitions foncières, fouilles archéologiques, déviations de réseaux

2012 – mi-2015 : travaux d'infrastructure et de Génie Civil

Mi-2014 – 2016 : pose des équipements ferroviaires

Mi-2016 : premiers essais, homologation et marches à blanc

Mi-2017 : mise en service de la ligne

Jusqu'en 2061 les entreprises ferroviaires qui rouleront sur la LGV verseront une redevance à LISEA, société concessionnaire de la future ligne, responsable des financements privés afférents. Cette redevance lui permettra d'assurer la maintenance, le renouvellement des voies et de rembourser les emprunts contractés pour financer les travaux.

Les 302 km nouveaux, auxquels s'ajoutent 38 km pour les dix raccordements de la LGV aux lignes classiques, représentent en fait le prolongement naturel de la branche sud-ouest de la ligne Atlantique mise en service en septembre 1990. Le futur tracé touche 113 communes situées sur six départements, trois régions et quatorze sites Natura 2000. Entrepris simultanément en février 2012 les travaux, qui constituent le plus gros chantier linéaire européen actuel, vont nécessiter six années d'intense activité. Leur ampleur a imposé un « découpage » de la ligne en 16 lots répartis en sept sections géographiques.

« Dans le contexte environnemental très sensible, la ligne à grande vitesse a été étudiée pour « coller » le plus possible au terrain naturel.

De ce fait, il n'y a pas de remblais démesurés, peu d'ouvrages d'art de grande hauteur hormis ceux de franchissement de vallées, ce qui minimise les contraintes visuelles et environnementales », explique François Batifoulier, de Vinci Construction, directeur du génie civil sur la ligne SEA. Sur les quelque 440 ouvrages d'art comptabilisés, il pilote l'exploitation des 20 ouvrages non-courants qui ne sont pas intégrés dans les sections des lots TOARC. Ces ouvrages se classent en quatre familles.

UNE SUCCESSION D'ESTACADES ET DE VIADUCS

La première concerne la tranchée couverte de Veigné, au sud de Tours. Les rames TGV circuleront dans un ouvrage butonné long de 1 755 m, profond de 15 m, qui passe sous quatre grands axes routiers et autoroutiers dont la RD 910 et l'autoroute A85. Un choix d'ouvrage justifié par l'aspect péri-urbain de ce secteur où une zone d'activité commerciale est en cours de développement, cette solution permettant de réduire l'emprise et les nuisances sonores. Deuxième famille, les estacades au

nombre de trois. Celle de La Folie au nord de Poitiers, qui passe au-dessus de la RN 147 et de la RD 910, permettra à la LGV de se raccorder à la ligne classique menant à la gare. Cet ouvrage de 1 800 m comporte 71 piles reposant sur des fondations constituées de pieux de 1,5 à 2 m de diamètre, de 12 à 20 m de hauteur, supportant des massifs intermé-

Chiffres clés

Longueur de la LGV : 302 km
Longueur des 10 raccordements : 38 km
Déblais : 68 millions de m³ , dont une part réutilisée en remblais
Remblais : 12,8 millions de m³
Ouvrages d'art : 440
Viaducs : 15 ; sauts-de-mouton : 15 ; tranchées couvertes : 5
Ouvrages hydrauliques : 240
Écrans acoustiques en béton : 37 km Corniches béton sur OA : 27 km
Volume total de béton : 850 000 m³
Investissement : 7,8 milliards d'€
Collaborateurs sur le terrain au plus fort des travaux : 6 000



→ 3 • Une aire de préfabrication pour les 1 340 voussoirs a été créée à Coulombiers (Vienne). 4 • Le voussoir de 350 t sur la pile P8 du viaduc sur la Dordogne.

diaires (semelles) de 80 à 900 m³ de béton armé. La deuxième estacade, située au sud d'Angoulême, est d'une longueur de 720 m et compte 38 appuis. La troisième, à l'arrivée nord de Bordeaux, est longue de 338 m et comporte 16 appuis. Leurs tabliers font appel à la technique des poutres en béton (classe de résistance C60/75) précontraint par torons adhérents (PRAD). Avec six poutres pour les tabliers simple voie et 11 pour ceux en double voie, il en faudra au total plus de 1 000. Celles de 20 m de long, pesant 30 t, sont fabriquées par un groupement d'entreprises SEA/Bonna-Sabla à La Crèche, près de Niort. Celles de 30 m (55 t), mises en œuvre sur l'estacade de La Folie, proviennent de l'usine espagnole Terra Armada à Madrid. Autre famille importante : les viaducs. Cinq auront un tablier mixte, sept seront constitués de voussoirs préfabriqués en béton précontraint. La pose des voussoirs s'effectue grâce à un système de haubanage provisoire qui permet de les assembler « à l'avancement ». « Une technique Vinci utilisée pour la première fois en ferroviaire », précise François Batifoulier, mais récemment mise en

œuvre par Dodin Campenon Bernard pour le viaduc routier de Compiègne et auparavant pour les viaducs du Barrails sur l'A89 et de Nantua-Neyrolles sur l'A40.

Enfin, le viaduc franchissant la Dordogne constitue à lui seul une famille. Avec ses 1 319 m qui en font le plus long de la ligne (hors estacades), ses 20 appuis (2 culées, 18 piles dont 6 en rivière), il se décompose en plusieurs ouvrages. Un pont principal de 800 m au-dessus de la rivière en béton précontraint coulé en place par encorbellements successifs aux piles ayant la forme de fûts creux elliptiques, deux ouvrages mixtes d'accès (6 et 3 travées) et deux travées inertes à ossature mixte. Compte tenu de la géologie, les fondations ont nécessité la réalisation de 3 280 ml de pieux de 1,5 à 2 m de diamètre et de 20 à 32 m de long (10 000 m³ de béton).

TRANSPARENCE HYDRAULIQUE ASSURÉE

Relativement sobres, ces grands ouvrages, qui ont été dessinés par le cabinet Lavigne & Chéron Architectes, comporteront une corniche en béton jaune-blanc rappelant la pierre cal-





→ 5 • En juillet, le gros œuvre du viaduc de la Boème, long de 450 m, était déjà très avancé. 6 • Le tablier est constitué de voussoirs préfabriqués en béton précontraint.

caire régionale « animée d'une vague symbolisant l'Atlantique ». Pour réduire les nuisances sonores, la ligne comportera aussi un important linéaire d'écrans acoustiques en béton (11 000 éléments de 2,50 m sur les ouvrages et 10 000 de 5 m posés sur les futurs remblais) soit près de 65 km. Ces éléments sont préfabriqués par le groupement SEA/Bonna Sabla dans une usine située à Cinq-Mars-la-Pile, près de Tours. La LGV franchissant 600 écoulements naturels, dont 89 cours d'eau, du simple ruisseau à la rivière importante, la transparence hydrau-

lique est bien sûr indispensable. Tous les ouvrages ont donc été dimensionnés pour assurer le libre écoulement des eaux, même en cas de crue. D'autres permettent la continuité des territoires pour la faune, qu'elle soit petite avec de simples buses en béton ou grande grâce à des tranchées couvertes réalisées à partir d'éléments préfabriqués en béton.

Les études complexes selon les normes Eurocodes des principaux ouvrages d'art ont pris en compte de fortes contraintes liées aux efforts dynamiques dus à la vitesse de

conception de 350 km/h, même si en exploitation les TGV ne rouleront à l'ouverture de la ligne qu'à 320 km/h. Sont également intégrés dans les calculs des efforts liés au freinage – démarrage de deux rames se croisant sur un viaduc et des effets du déraillement de la rame. Le groupement COSEA a conçu des ouvrages d'art non courants qui répondent d'une part aux critères techniques et, d'autre part, aux délais très serrés imposés. « Le Génie Civil a réellement commencé au printemps 2012 et doit s'achever au printemps 2015. Construire plus de 400 ouvrages sur un linéaire de 300 km en trois ans seulement exige des moyens énormes. C'est près de 6 000 collaborateurs et une mobilisation de toutes les forces vives de Vinci, de NGE et de Razel-BEC. Du jamais vu. C'est surtout ce challenge qui fait la spécificité de SEA », conclut François Batifoulier.

1 340 VOUSOIRS EN BÉTON

Les tabliers de sept viaducs (du nord au sud : l'Indre 480 m ; l'Auxances Ouest 443 m ; l'Auxances est 446 m ; la Charente Nord 480 m ; la Charente Médiane 522 m ; la Boème 450 m ;

du Claix 450 m), seront constitués de 1 340 voussoirs en béton précontraint : 1 097 courants et 243 spéciaux pour ceux situés sur piles ou sur culées. Tous sont conçus dans une aire de préfabrication de 30 000 m² créée de toutes pièces à Coulombiers (Vienne), à proximité immédiate du futur tracé. Pourquoi un tel choix ? « Ce principe de préfabrication sur une aire dédiée permet de maîtriser les aléas climatiques, de réduire les délais de construction, de rationaliser la fabrication en maîtrisant au mieux les différents paramètres, géométrie, armatures, béton, et en limitant les opérations de bétonnage dans des sites sensibles d'un point de vue environnemental comme les cours d'eau, ou à la topographie difficile à l'exemple de vallées encaissées », explique Peyo Cordova, directeur de projet viaducs à voussoirs préfabriqués.

Menées en parallèle du chantier proprement dit, les opérations de préfabrication permettent de réduire le délai global de construction. D'une largeur de 12,90 m, équivalente à celle de la plate forme ferroviaire, hauts de 4,25 m, les voussoirs courants sont longs de 2,24 m à 2,80 m

LISEA, COSEA, MESEA, les acteurs clés de la ligne

LISEA, concessionnaire de la ligne pour une durée de 50 ans, assure l'interface entre le concédant RFF (Réseau Ferré de France), le concepteur-constructeur COSEA (Constructeur Sud Europe Atlantique), le futur mainteneur – exploitateur de la ligne MESEA (70 % Vinci Construction, 30 % Systra-Inexia), les investisseurs, les prêteurs et les garants. Piloté par Vinci Construction, COSEA est un groupement d'entreprises composé de Dodin Campenon Bernard, d'Eurovia et du pôle Énergies de Vinci, associé à BEC-FAYAT, NGE, TSO, Ineo, Systra-Inexia, Arcadis, Egis Rail. Présent pendant la phase chantier, soit 73 mois de la date de mise en vigueur du contrat de concession le 30 juin 2011 jusqu'à l'ouverture commerciale mi-2017, COSEA s'appuie sur cinq sous-groupements d'entreprises.



→ 7 et 8 • La pose des voussoirs préfabriqués, pesant entre 52 et 65 t, s'effectue à l'avancement par un système de haubannage provisoire.

et les spéciaux de 1,20 m à 1,50 m. D'un poids unitaire de 52 à 65 t, ils nécessiteront au total 33 400 m³ de béton (classe de résistance C 50/60) provenant d'une centrale BPE située à une quinzaine de kilomètres du site. L'aire de préfabrication sur laquelle travaillent 5 personnes en encadrement, 25 pour les opérations de coffrage et de bétonnage, et 25 en sous-traitance pour les armatures (7 000 t) des voussoirs, est active cinq jours par semaine.

L'installation comporte une ligne de bétonnage complète avec une trémie agitatrice, une pompe, deux colonnes et un mât de bétonnage. La zone de stockage, d'une capacité de 330 voussoirs sur deux niveaux, est desservie par un portique d'une capacité de 70 t se déplaçant sur 370 m.

La fabrication des voussoirs courants a démarré en juillet 2012, celle des voussoirs spéciaux en octobre. La production hebdomadaire atteint 15 éléments pour les premiers, 2 à 3 pour les seconds. Un voussoir reste entre un et six mois sur l'aire de stockage. Effectuées par convois routiers exceptionnels, les livraisons de voussoirs sur les sites des ouvrages ont démarré en janvier 2013 par celui de la Boème. Elles s'achèveront par celui de l'Indre au cours de l'automne 2014. « Cette méthode est adaptée aux ouvrages de grande longueur et une telle installation ne se justifie que si le linéaire de tablier à réaliser est important et au moins supérieur à 2 km, poursuit Peyo Cordova. Les ouvrages en béton précontraint ne sont pas démodés, nous

avons ici l'exemple que cette technique a de l'avenir. »

Pour fournir le béton des ouvrages, soit un volume total estimé à 850 000 m³, le constructeur COSEA s'est appuyé sur les réseaux locaux des centrales BPE existantes pour minimiser les conséquences sur l'environnement et a formé des groupements entre les différents fournisseurs. Réparties géographiquement du nord au sud par rapport à la ligne, ces centrales sont au nombre de 23. Traversant des sous-sols aussi variés que critiques, le projet impose la mise en œuvre de bétons spécifiques capables de résister à diverses agressions, notamment chimiques, nécessitant donc d'être formulés avec des ciments offrant des propriétés adaptées. « Nous utilisons beaucoup de bétons composés de ciments à faible chaleur d'hydratation, ceci pour éviter une montée trop importante en température générée par l'hydratation des ciments et donc répondre aux critères de prévention vis-à-vis du risque de réaction sulfatique interne (RSI) », précise François Batifoulier. La réalisation des grosses semelles d'ouvrages, conçues pour reprendre les efforts énormes im-

sés par les contraintes ferroviaires, ayant tendance à s'échauffer, nécessite des contrôles permanents.

Ne pas tenir compte de cet échauffement du béton au jeune âge provoquerait en effet des risques de fissuration. ■

Photos : Michel Barberon



→ Au nord de Poitiers, une tranchée couverte composée d'éléments préfabriqués.



Maître d'ouvrage et société concessionnaire : LISEA

Conception et construction :
COSEA piloté par Vinci Construction, composé de Dodin Campenon Bernard, d'Eurovia et du pôle Énergies de Vinci, BEC-FAYAT, NGE, TSO, Ineo, Systra-Inexia, Arcadis, Egis Rail

Maintenance et exploitation :
MESEA ; Vinci Construction ; Systra-Inexia

Durée de la concession :
50 ans, soit jusqu'en 2061

Coût : 7,8 Md € HT



Nouvelle vague

Pour relever le défi de la ville durable, le ministère de l'Écologie a créé au sein de la Cité Descartes à Marne-la-Vallée, émanation de l'université Paris-Est en synergie avec Advancity, le pôle de compétitivité de la ville durable et des écotecnologies urbaines. Dans le cadre de ce rapprochement stratégique, le bâtiment Bienvenue accueille des unités de l'Institut Français des Sciences et Technologies des Transports, de l'Aménagement et des Réseaux (IFSTTAR), de l'École des Ponts et Chaussées, du CSTB et du PRES (Pôle de Recherche et d'Enseignement Supérieur). Au carrefour du Génie Civil et de la recherche fondamentale, l'architecture fédère ce cluster de l'innovation pour « faire campus » et intègre notamment une plateforme d'expérimentations d'une très haute technicité.

Texte : Delphine Désveaux



1

→ 1 • Couverte par cette dalle ondoyante dont les courbes évoquent une femme allongée, cette structure longiligne abrite l'accueil, la plateforme d'essais et des laboratoires.

Bien desservie par les infrastructures de transport, la Cité Descartes s'étend sur la commune de Champs-sur-Marne, une ville nouvelle qui n'exprime pas véritablement de sentiment urbain. Cet important cluster tourné vers la ville durable et les éco-technologies accueille néanmoins plusieurs grandes écoles – dont l'École des Ponts et Chaussées et l'école d'architecture de Marne-la-Vallée, des laboratoires de recherche et des entreprises innovantes. Dans

ce contexte, l'arrivée de l'IFSTTAR¹ prend tout son sens.

Pour Jean-Philippe Pargade, architecte du projet, l'enjeu consistait à fédérer les écoles entre elles et à créer des lieux de rencontres à l'instar des campus à l'américaine. Pour ce faire, le bâtiment Bienvenue se décompose en deux entités. Au nord, les espaces tertiaires : logés dans trois bâtiments, ils se distinguent par un porte-à-faux de 12 m. Au sud, plus poétiques, des « collines » de béton chapeautées d'un jardin. Ces structures longilignes et ondoyantes abritent, d'un côté le « cœur de pôle » où se répartissent les services collectifs – restaurant, bibliothèque, amphithéâtres, équipements sportifs ; de l'autre, semi-enterrés, une halle « Atelier » et des laboratoires où se déroulent les expérimentations ; au centre, dans l'axe qui traverse le jardin depuis l'École des Ponts et Chaussées, s'ouvre un vaste hall qui favorise la mise en commun des moyens et la synergie entre les différentes activités.

1 – L'IFSTTAR résulte de la fusion en 2011 entre le Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC) et l'Institut National de Recherche sur les Transports et leur Sécurité (INRETS).

Le plateau technique regroupe les ateliers, les laboratoires ainsi que la plateforme d'essais des structures. Générée par ces multiples fonctions, la couverture en béton prend la forme de vagues ondoyantes au creux desquelles viennent se glisser des parois vitrées. Cette manière poétique de revisiter les sheds a demandé un gros travail de mise en œuvre : ayant répondu à l'appel d'offres avec des coffrages traditionnels, l'entreprise Léon Grosse s'est ensuite employée à « coller » aux exigences architecturales de formes et de coloris.

LA DALLE VAGUE

Structurellement, la toiture vague est conçue comme un pont : longue de 220 m, elle est portée par 80 poteaux circulaires (0,80 à 1 m) pourvus d'appuis glissants en raison de l'absence de joints. « *La sous-face de la voûte, qui reste apparente, a fait l'objet de toutes les attentions avec des banches en bois dont les poutrelles, soigneusement calepinées, ont été positionnées longitudinalement pour obtenir un rayon de courbure parfait* », explique Sébastien Letort, conducteur de travaux chez Léon Grosse en charge de la plateforme d'essai.

Plateforme d'essais

Parties en béton de classe de résistance C 60/75 :

- Radier bas : **40 cm d'épaisseur, 280 m³**
- Raidisseurs : **60 cm d'épaisseur ; 4,50 m de hauteur, 1 050 m³**

Parties en béton de classe de résistance C 80/95 :

- Volume : **800 m³**
- Hourdis supérieur : **60,5 m de long ; 10,5 m de large ; 0,9 à 1,25 m d'épaisseur**
- Murs d'essais : **5 m de haut ; 5 m de large ; 1,10 m d'épaisseur**

Caractéristiques du béton C 80/95 :

- Classe de consistance : **S5**
- Classe d'exposition : **XC1 à XC3**

E/C : **0,45**

Constituants : **CEM I 52,5 PM ES NF**

CE Vicat Saint-Egrève
+ sable calcaire concassé **0/4** (carrière du Boulonnais)
+ sable alluvionnaire **0/4 (A2C)** et calcaire concassé **4/12** (carrière du Boulonnais)
+ fumée de silice **(95 DM Condensil)**
+ fillers siliceux **C 480 Sibelco**
+ fillers calcaires Carmeuse de la carrière des Aucrais

Adjuvant : **superplastifiant Glenium Sky 537 BASF CC**

Dalle vague

Dimensions : **10 000 m² ; 55 cm d'épaisseur**

Volume de béton armé : **6 000 m³**

Classe de résistance : **C 40/50**

Classe de consistance : **S4**

Classes d'exposition : **XF1/XC4**

E/C : **0,45**

Constituants : **CEM II/A 42,5 N à R Vicat Xeullet** + sable alluvionnaire **0/4** + sable calcaire concassé **0/4** et calcaire concassé **4/20 (A2C)** + fillers calcaires Carmeuse de la carrière des Aucrais

Adjuvant : **superplastifiant Glenium Sky 537 BASF CC**



2

→ 2 • Intégrant une dimension urbaine, cette « dalle vague » sera plantée pour mettre en scène un vaste espace paysager entre le bâtiment Bienvenue et l'ENPC.

Entretien

JEAN-PHILIPPE PARGADE, *architecte urbaniste mandataire du projet*

Un projet qui associe un bâtiment universitaire et des ouvrages de Génie Civil

Quelle est l'idée maîtresse du projet architectural ?

L'enjeu était de créer une structure urbaine qui fasse campus. Nous avons saisi l'opportunité d'un grand espace libre entre l'IFSTTAR, l'École des Ponts et Chaussées et l'École d'architecture pour créer un jardin public qui fédère les différents établissements, comme dans l'université de Charlottesville en Virginie.

En limite nord, les espaces tertiaires forment un front continu le long du boulevard Newton mais dessinent des interstices côté jardin pour créer des respirations.

Au sud, sous la toiture « colline » que certains appellent les « vagues », se glisse le reste du programme. Outre ses intérêts urbains et fonctionnels, ce dispositif a des incidences thermiques notables pour l'obtention du label BBC.

En quoi la « colline » est-elle un ouvrage d'art ?

Ce bâtiment abrite différentes fonctions de hauteurs variées. D'où l'idée d'une couverture qui ondoie d'un seul tenant sur toute sa longueur, sans joints de dilatation, portée par des poteaux pourvus d'appuis glissants en téflon. Dessinées dans une perspective d'aménagement paysagé, ces ondulations longilignes qui décollent du sol prolongent ainsi le motif en lanières du jardin central.

Quelle était votre marge de manœuvre sur la plateforme d'essais ?

Sur ce point, l'architecture n'avait pas son mot à dire. Mais le fait d'avoir réalisé le toit avant la dalle d'essais a néanmoins facilité les conditions de sa mise œuvre. Tout a dû être optimisé. Pour un perfectionniste comme moi, c'est un enjeu fascinant. ■

Le coulage s'est déroulé sur 8 mois, par phase de 500 m², pour garantir l'homogénéité de teinte. La dalle est ensuite recouverte d'un pare-vapeur, d'une isolation en laine minérale, d'une membrane d'étanchéité, d'une couche drainante et de 30 cm de terre avant végétalisation.

LA PLATEFORME D'ESSAIS DES STRUCTURES

À la fois espace public majeur et bâtiment paysage, Bienvenue recèle une plateforme d'expérimentations de très haute technicité. Destinée à mesurer la résistance et le comportement de modèles, composants et éléments d'ouvrages de Génie Civil, cette structure hors norme se compose d'une dalle (60 m x 10 m) sans

joints de dilatation et de deux murs de réaction. 822 puits d'ancrage, implantés au dixième de millimètre près, traversent de part en part la dalle et les murs d'essais de manière à pouvoir encastrement les équipements d'essais pour les tests.

Au final, la dalle doit être capable de rester presque indéformable sous des cas de charges thermiques caractéristiques et des efforts de service pouvant aller jusqu'à 500 t. Les murs de réaction doivent pouvoir résister à une poussée de 100 t à l'endroit le plus critique sans subir de déplacement en tête supérieur à 1 mm !

Disposant de fondations indépendantes du bâtiment, la plateforme d'essais s'ancre au moyen de bar-



→ Perspective générale du projet.

Illustration : Studio Cyrille Thomas.



3



4

→ 3 et 4. Afin d'éviter les déformations, la plateforme d'expérimentations se décompose en trois strates : une dalle inférieure, un quadrillage de voiles raidisseurs et d'une dalle supérieure.

Entretien

FRANÇOIS TOUTLEMONDE, *Délégué scientifique du département Matériaux et Structures de l'IFSTTAR*

L'exigence d'indéformabilité

En quoi le projet Bienvenüe est-il exceptionnel ?

Le projet est complexe car il associe un bâtiment tertiaire, avec toutefois des contraintes contradictoires d'établissement recevant du public et de protection d'études confidentielles, à des ouvrages de Génie Civil comme les dalles vagues et la plateforme d'essais, sans parler des besoins spécifiques de climatisation et de fluides pour les laboratoires. L'enjeu était pour nous, futurs utilisateurs, d'imaginer un laboratoire de Génie Civil de référence pour les 50 années à venir. Cela signifie l'intégration de plain-pied des ateliers techniques et scientifiques, la nécessité de les relier avec les espaces de bureaux et d'accueil des étudiants et chercheurs, car la synergie est cruciale.

Vos exigences pour la dalle d'essais sont drastiques. Y a-t-il un équivalent dans le monde ?

Une dalle d'essais est en soi un ouvrage exceptionnel, car elle doit être au moins 20 fois plus rigide que les éléments de structure (poutre de pont, voussoir de tunnel, hourdis d'ouvrage...) qu'on y teste. Cette exigence d'indéformabilité (1 mm sur 10 m de portée d'un essai) gouverne sa conception. Rare en Europe, cette association dalle/murs doit nous permettre de répondre à une demande accrue dans l'étude de la fatigue des ouvrages en exploitation, des risques naturels et des séismes, et dans la simulation physique de chargements multiaxiaux complexes.

La taille de la plateforme nous permettra de réaliser en parallèle plusieurs essais dynamiques ou de longue durée, des chargements statiques et dynamiques, mais également d'anticiper sur les matériaux de construction du futur. ■

rettes à 25 m de profondeur. Pour conforter sa rigidité, elle se compose de trois éléments formant une poutre caisson : sur le radier inférieur vient s'encaster un quadrillage de voiles raidisseurs surmonté du hourdis supérieur particulièrement dense. « Nous avons consacré une année aux formulations des bétons et à la mise au point des systèmes constructifs, rappelle Serge Favre, référent béton de l'entreprise Léon Grosse. Deux types de béton ont été formulés pour obtenir un module élevé, limiter les effets du retrait au jeune âge du béton et prévenir toute fissuration prématurée : un béton de classe de résistance C 60/75 sans fumée de silice pour le radier et les raidisseurs, et un béton d'une classe de résistance C 80/95 avec fumée de silice pour le hourdis supérieur et les murs. »

Le bétonnage s'est déroulé de nuit en cinq plots (120 à 150 m³ de béton chacun) pour limiter l'élévation de température du béton et réduire le retrait endogène, proche de zéro dans ce cas. ■

Photos : Photothèque Léon Grosse ;
4 – François Toutlemonde –
Photothèque IFSTTAR



Maître d'ouvrage : Secrétariat général du ministère de l'Écologie, du Développement Durable et de l'Énergie (MEDDE) et du ministère de l'Égalité des Territoires (METL)

Maîtrise d'ouvrage déléguée : Délégation à l'action foncière et immobilière

Maîtrise d'œuvre : Jean-Philippe Pargade, architecte mandataire

BET TCE : SNC Lavalin

Assistance de pilotage de l'opération : Algoé

Conducteur d'opération : DDT 77

Entreprise gros œuvre : Léon Grosse

Étanchéité, toitures végétalisées : Soprema

Surface : 37 200 m² SHON

Coût : 83,5 M€ HT



Intégration architecturale et **environnementale**

Afin de fiabiliser le réseau fluvial, une chaîne de barrages régule un ensemble de plans d'eau successifs sur la Seine. L'un d'eux, le barrage de Chatou, est en cours de remplacement. Une réalisation exemplaire tant sur le plan architectural que technique, exécutée sans interrompre la navigation sur le fleuve ni influencer sur ses crues. Ce barrage a pour mission première de maintenir le niveau d'eau jusqu'à Suresnes pour permettre la navigation fluviale. Il garantit la navigation sur l'un des axes de transport de marchandises les plus importants de France, entre les ports du Havre, de Rouen et la région Île-de-France.

Texte : Marc Montagnon



1



2

→ 1 et 2 • Le nouveau barrage est situé à l'amont immédiat de l'ouvrage actuel.

Le barrage existant a été mis en service en 1933. Il s'agit d'un barrage mobile à vannes levantes doubles régulant, avec l'ouvrage de Bougival, la retenue de la Seine jusqu'au barrage de Suresnes. Initialement, il comportait une quatrième travée côté rive gauche qui a été démolie en 1964 pour permettre la construction de l'écluse.

À l'issue du diagnostic de l'ouvrage, le maître d'ouvrage Voies navigables de France, a fait le choix de procéder à sa reconstruction complète en tenant compte du rapport entre l'investissement effectué, d'un montant de 55 millions d'euros, la facilité de réalisation, la maintenance de l'ouvrage et la longévité accrue.

Le choix technique retenu est celui

d'un barrage à vannes clapets, constitué de trois passes dont deux seront navigables en période de crues. Il comprend également une passe à poissons, un bâtiment de commande sur l'îlot de Chatou, une passerelle technique entre le bâtiment « salle de commande » et la pile de rive droite du barrage. Dans la salle de commande sont installés la centrale hydraulique pour les vérins, les équipements électriques de contrôle-commande du barrage et les équipements de fonctionnement de l'écluse. Le nouvel ouvrage est construit à environ 40 m en amont du barrage existant ce qui permet de conserver ce dernier en service pendant toute la durée des travaux.

Depuis la rive droite jusqu'à la rive gauche, le nouveau barrage a une longueur de 107,50 m, répartie en trois passes de 30,50 m, avec deux culées en rive et deux piles de 4 m en rivière auxquelles s'ajoute la passe à poissons accolée à l'ouvrage en rive gauche (côté îlot de Chatou). Il offre une hauteur de chute de 3,25 m.

Son principe de fonctionnement repose sur le fait que, dans chacune des passes, le volet métallique – la vanne-clapet – pivote sur un radier

en béton armé. Les vannes-clapets, de 32,50 m de longueur, 9 m de hauteur et d'un poids de 170 t, sont actionnées par des vérins. Leur relèvement et leur abaissement permettent de maintenir la cote d'eau à un niveau constant en amont du barrage. Commandés de manière automatique, ils assurent une régulation du plan d'eau efficace et sûre.

UNE INTÉGRATION ARCHITECTURALE ET PAYSAGÈRE

La reconstruction du barrage de Chatou par Bouygues TP, au-delà de sa finalité fonctionnelle de gestion de la Seine, fournit l'opportunité d'une requalification générale du site dans un environnement sensible, à proximité de l'île et du chemin des Impressionnistes. À l'approche technique répond le souci d'une intégration architecturale et paysagère ainsi que d'une synthèse dans l'espace des composantes d'un ensemble complexe, définies ainsi par Luc Weizmann : « Il s'agissait de concilier les préoccupations fonctionnelles et la recherche d'une exploitation sécurisée avec la volonté d'une valorisation qualitative et publique de tout un site ».

La démolition du barrage actuel offre la possibilité de lui substituer un ouvrage beaucoup plus discret, d'expression contemporaine, qui libère la perception visuelle de la courbure de la Seine.

L'intégration d'une passerelle permettant le franchissement du bras de Seine au-dessus du barrage est indispensable au vu des besoins

Réalisation

Le phasage type de réalisation d'une passe

Battage des rideaux de palplanches, mise en place du butonnage supérieur

Pompage de l'eau et mise en place du butonnage inférieur

Terrassement jusqu'au fond de fouille et pompage

Réalisation des micropieux et bétonnage du radier

Démontage du butonnage inférieur

Construction de la pile

Mise en place du clapet et de tous les équipements électromécaniques

Chiffres clés

Palplanches : 7 000 m²

Dragage : 5 600 m³

Déblai : 25 000 m³

Coffrages : 8 000 m²

Armatures : 1 600 t

Béton : 22 600 m³



3

→ 3 • Le nouveau barrage est constitué de trois passes dont deux navigables.

d'exploitation, la priorité absolue restant pour Voies Navigables de France (VNF) la maîtrise des conditions d'accès, de gestion et de contrôle de l'ouvrage. Une prolongation de cette circulation au-dessus de l'écluse existante, pour l'exploitant mais aussi éventuellement pour le public, avec la connexion des accès en rives gauche et droite, reste compatible à terme.

L'organisation des différentes fonctionnalités se fait de façon claire : à l'amont de la passerelle sont implantés les espaces et les locaux techniques (salle de commande, locaux d'exploitation) ; à l'aval, se situent les espaces accueillant les circulations (escaliers, en rive droite, ponton entre les berges et accès à la passerelle) ; un espace en surplomb formant le belvédère.

UNE LOGIQUE DE COMPACTITÉ

Le dessin des composantes du barrage a fait l'objet d'une étude précise permettant d'harmoniser les contraintes propres à l'installation et au fonctionnement des différents équipements – vannes-clapets et vérins – avec le dimensionnement du

Génie Civil. Il prend en compte aussi les contraintes d'accès et de circulation des personnels et des matériels pour l'exploitation, le contrôle, la sécurisation et la maintenance des ouvrages.

Les deux piles courantes et les culées du barrage ont été dessinées dans une logique de compacité maximum. Les escaliers, les cheminements des réseaux et les locaux techniques/relais des organes de commande rapprochés des différents équipements y sont ménagés en creux. Leur expression formelle fait référence à un certain imaginaire fluvial.

Les vérins, leurs articulations et leurs dispositifs d'ancrage forment des éléments très présents : leur dimension et leur inclinaison sont évocatrices de l'importance des énergies en jeu et ont donc à ce titre, sur le

plan architectural, un rôle essentiel ; ils sont autant d'éléments qui confèrent à l'ensemble une valeur expressive forte.

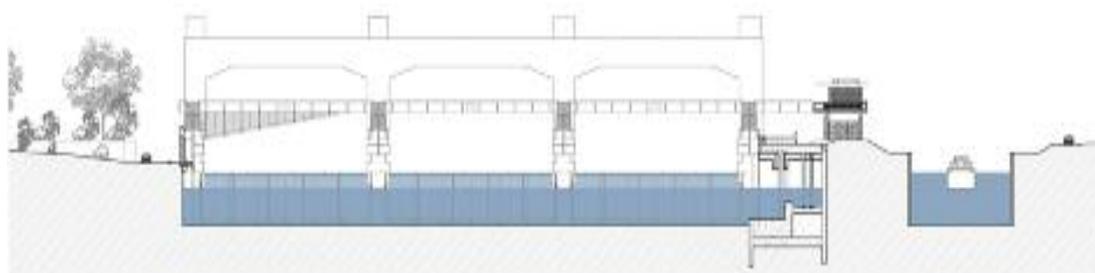
Une passe à poissons trouve place entre la culée en rive gauche du nouveau barrage, la pile arasée de l'ancien et la rive de l'île. Cette implantation discrète est motivée par le souci de ne pas toucher à la berge de l'île à l'aval et de n'en reprendre qu'un linéaire minimal à l'amont. Cette passe à poissons est constituée de seize bassins successifs, disposés en marches de 20 cm avec, à l'amont, un ouvrage de prise d'eau muni de périodes de crues et, à l'aval, un bassin permettant le transit du débit de la passe et du débit d'attrait qui, par définition, « attire » les poissons.

La nouvelle salle de commande se

présente comme un bâtiment linéaire composé parallèlement à l'axe de la Seine, sur l'île de l'Écluse. Elle est organisée selon deux niveaux fonctionnels : l'étage supérieur, ouvert en un ensemble vitré, protégé du soleil par un auvent périphérique ; le niveau inférieur, qui abrite les locaux techniques dans un soubassement en béton brut. Elle forme, dans le prolongement du talus paysager aménagé sur l'île, l'assise visuelle de l'ensemble de la passerelle.

En complément du traitement des ouvrages et bâtiments eux-mêmes, le projet prévoit la requalification paysagère des abords proches du barrage.

Certains équipements qui actionnent les vannes de l'ancien barrage seront mis en valeur sur la culée rive gauche arasée, en rive de l'île de l'Écluse. Cet



→ Élévation en aval de l'ensemble du barrage et de ses berges.



4



5

→ 4 • Les piles ont été dessinées dans une logique de compacité maximale. 5 • Escaliers et réseaux sont aménagés en creux dans les piles.

aménagement profite des fondations de l'ancien barrage ; il révèle, dans la configuration réelle, les mécanismes historiques nécessités pour la gestion des eaux.

DISPOSITIONS MAJEURES POUR LES TRAVAUX

Au niveau de l'exécution des travaux, dont le chantier est dirigé par Nicolas Duramé de Bouygues TP, le projet est géré par quatre dispositions majeures :

- 80 % des travaux se font à l'aide d'une estacade dont le tablier est escamotable en période de crue ;
- tous les équipements (vantellerie, mécaniques, hydrauliques, électriques, automatismes) ont été mis en œuvre pour chaque passe avant le 30 novembre de chaque année ;
- les travaux sont réalisés dans un site urbain sensible – industriel et résiden-

tiel – d'où la nécessité d'amoindrir les nuisances, notamment sonores ;

- les travaux dans le lit mineur de la Seine sont réalisés obligatoirement entre le 1^{er} avril et le 30 novembre de chaque année.

LES PRINCIPES GÉNÉRAUX DE CONSTRUCTION

L'ensemble des éléments constitutifs de l'ouvrage et des phases de réalisation a fait l'objet d'une modélisation 3D par le bureau d'études de Bouygues TP afin d'optimiser et de définir avec la plus grande précision le déroulement des travaux.

Le délai total de réalisation est de 56 mois, d'avril 2009 à septembre 2013.

Pour effectuer les travaux dans le lit de la Seine, des batardeaux de palplanches ont été mis en place afin de construire le radier et les piles et ins-

taller les équipements de manœuvre. Il a également été prévu de construire l'estacade provisoire et démontable, évoquée précédemment, qui dessert le chantier depuis la berge rive droite. Cette estacade est utile, aussi bien pour la réalisation des fondations, des piles, du butonnage que pour le montage des éléments de vantellerie (clapets et équipements connexes).

Les piles et radiers ont été exécutés depuis l'estacade dans des batar-

deaux de palplanches ancrés dans 7 m de craie sous le lit de la Seine.

Le radier est un massif d'environ 22 m de largeur et d'épaisseur variable de 2,10 m à 4,80 m, fondé dans la craie de bonnes caractéristiques mécaniques et ancré avec un réseau de micropieux d'une longueur de 10,30 m suivant une maille de 3,25 m x 3,25 m. Ces micropieux sont destinés essentiellement à reprendre la sous-pression en phase de chantier et à éviter les problèmes éventuels

Rétablissement du corridor écologique

La réalisation d'une passe à poissons, inexistante dans le précédent barrage constitue l'un des éléments les plus originaux du projet. Elle permet aux poissons de remonter la Seine sans se trouver bloqués par l'ouvrage.

Elle est constituée d'une succession d'ouvrages dans le prolongement les uns des autres :

- prise d'eau en amont munie d'une vanne d'isolement pour les périodes de crues ;
- 16 bassins successifs ;
- conduite métallique de débit d'attrait ;
- bassin aval par lequel transitent à la fois le débit de la passe et le débit d'attrait ;
- pertuis de restitution vers la Seine, contrôlé par une vanne permettant de garantir une chute constante entre le niveau dans le premier bassin et le niveau aval de la Seine.

Illustration : Philippe Drancourt



→ Vue perspective du projet depuis la rive droite de Chatou.



6



7

→ 6 • Les piles ont une forme conoïde en aval et ellipsoïdale en amont. 7 • Vue de la passe à poissons qui leur permet de remonter la Seine.

de tassements différentiels en phase de service. Il est coulé en deux couches sur l'épaisseur : une première couche de 2,10 m puis une seconde couche d'épaisseur variable. Le béton est, en grande partie, mis en œuvre par pompage.

Les tolérances de mise en œuvre et la qualité du parement des piles et des culées constituaient des enjeux importants du projet. Elles sont construites en béton clair, avec des lignes ornementales, traitées avec

une résine époxy, afin de protéger les parties en frottement avec les clapets. Les piles ont une forme conoïde en aval et une forme ellipsoïdale en amont. Une matrice de coffrage a été appliquée pour donner à leur parement un aspect rainuré.

UN BÉTON SPÉCIFIQUE

Les piles et les culées sont réalisées en béton de classe de résistance C 40/50. Une simulation thermomécanique a été effectuée afin de

prévenir toute fissuration thermique. Pour la formulation des bétons, confiée à Cemex, les spécifications particulières liées à la teinte du parement ainsi qu'à la dimension des ouvrages ont été prises en compte. Les réflexions sur le dégagement thermique du matériau au moment de la prise ont poussé l'entreprise à réaliser un béton à base de ciment de type CEM III/A 52,5 N PM ES, associé à des cendres volantes, à faible chaleur d'hydratation et haute durabilité chimique. De cette façon, l'exigence de teinte demandée par l'architecte a été respectée, ainsi que la nécessité de dégagement thermique le plus faible possible en regard des ouvrages massifs que constituent les piles et le radier.

Pour les coffrages, l'entreprise a fait le choix du bois, solution la mieux adaptée au nombre important de réemplois tout en assurant la qualité de parement nécessaire.

Un soin particulier a été donné à la forme des piles, tant à l'aval qu'à l'amont ainsi qu'aux joints creux.

Ce soin s'est également traduit dans la mise en œuvre d'une matrice de coffrage pour obtenir des voiles en béton rainuré, ainsi que dans l'utilisa-

tion ponctuelle de béton préfabriqué, par exemple pour la dalle et l'escalier. La construction des trois passes a ainsi été réalisée au rythme d'une passe par an, à l'abri d'une enceinte étanche pour une mise en service à l'été 2013, date à partir de laquelle l'ancien barrage sera déconstruit. ■

Photos : ouverture –

Matthieu Bouriquet/LWA ;

1 – VNF - Philéas Fotos /D.Osso ;

2, 3, 4, 5 et 6 – Marc Montagnon ;

7 – VNF/DTBS/TVE Luc Jean-Marie

Entretien

LUC WEIZMANN, *architecte*

Requalifier le site

Dans quel esprit avez-vous conçu ce nouvel ouvrage ?

L'actuel barrage de Chatou se situe dans un environnement sensible, à proximité de l'île et du chemin des Impressionnistes : il s'agissait donc, pour sa reconstruction, au-delà de la finalité fonctionnelle qui préside à son remplacement, de saisir l'opportunité d'une requalification du site. Le nouveau barrage est beaucoup plus discret et relève d'une expression contemporaine qui contribue à une perception visuelle retrouvée de la courbure de la Seine à hauteur de Chatou.

Comment l'univers des impressionnistes est-il rappelé ?

Il est prévu une mise en lumière colorée de la chute d'eau dont les reflets vont conférer à l'ouvrage un effet pictural particulier et mouvant. Au fil des jours et des saisons, le changement et la combinaison des couleurs valoriseront ainsi sobrement, de nuit, le site et son environnement. ■



Maître d'ouvrage :
Voies Navigables de France

Maître d'œuvre : Coyne et Bellier (mandataire) ;
Luc Weizmann Architecte ;
Spretec

Entreprises : groupement
Bougues TP (mandataire) ;
Bougues-TP
Régions France/EMCC

Solutions béton

D'une obligation de moyens vers
une obligation de résultats P. 16

Point de vue de la maîtrise d'ouvrage
et de la maîtrise d'œuvre P. 18

Le guide du LCPC : Application
de l'approche performantielle P. 19

Les évolutions au niveau
européen
Les outils de l'approche
performantielle Rabat 1

Incidence sur le CCTP Rabat 2

Exemple d'application de
l'approche performantielle
sur le viaduc de Volesvres P. 20



L'approche performantielle

L'approche performantielle est une démarche innovante, globale et prédictive de la durabilité des structures en béton, fondée sur la notion d'indicateurs de durabilité. Elle permet de formuler des bétons pour une durée de vie attendue dans un environnement donné lors de la phase de conception d'une structure et donc d'en maîtriser la durabilité, mais aussi de déterminer la durée de vie résiduelle d'un ouvrage existant. Elle constitue un outil de contractualisation des objectifs de durabilité des ouvrages en béton et représente une évolution majeure dans la prescription des bétons qui s'inscrit dans la continuité d'une logique de progrès depuis plusieurs décennies. Elle a été traduite sous forme d'un guide technique pour maîtriser la durée de vie des ouvrages d'art, mis au point par les experts de l'IFSTTAR, afin de faciliter sa mise en œuvre en cohérence avec le cadre normatif européen. Les recommandations de ce guide ont été mises en œuvre sur le viaduc de Volesvres. Texte : Christophe Aubagnac, Didier Brazillier, Patrick Dantec, Bruno Godart, Patrick Guiraud, Jean-Marc Potier

D'une obligation de moyens vers une obligation de résultats

NOTION DE DURABILITÉ

Les acteurs de la construction doivent aujourd'hui répondre, lors de la construction d'ouvrages, puis de leur gestion, à des exigences de durabilité fortes, qui s'inscrivent dans une démarche globale de Développement Durable.

Les ouvrages en béton subissant au cours de leur vie des agressions et attaques multiples qui peuvent altérer progressivement leur niveau de service, la maîtrise de leur durée d'utilisation est devenue un enjeu majeur pour les gestionnaires d'ouvrages qui leur impose de se préoccuper dès la conception et la construction des exigences de durabilité qu'il convient de pouvoir rendre contractuelles.

La durabilité d'un ouvrage caractérise sa capacité à conserver les fonctions d'usage pour lequel il a été conçu (fonctionnement structurel, sécurité, confort des usagers) et à maintenir son niveau de fiabilité et son aspect esthétique dans son environnement (gel, eaux agressives...), avec des frais de maintenance et d'entretien aussi réduits que possible.

La durabilité d'un ouvrage est assortie d'une durée, temps minimal pour lequel l'ouvrage est conçu, qui est appelée : la durée d'utilisation de l'ouvrage.

Elle dépend de nombreux paramètres dont la qualité de la conception (maîtrise de la fissuration, enrobage), des matériaux et des produits utilisés, des dispositions constructives, de la réalisation de l'ouvrage, de la mise en œuvre des produits, et des contrôles. Elle suppose l'utilisation de l'ouvrage conforme aux hypothèses du projet et sa maintenance courante et régulière.

Il est possible désormais de définir

des objectifs de durabilité et de spécifier avec précision les caractéristiques du béton dès la conception de l'ouvrage en fonction des agressions potentielles qu'il aura à subir pendant toute sa durée d'utilisation.

LA DÉMARCHÉ PRESCRIPTIVE ACTUELLE

La durabilité des bétons d'un ouvrage est gouvernée actuellement par un ensemble cohérent et homogène de normes qui traduisent une démarche prescriptive basée sur un concept d'obligation de moyens, associé pour certains types de dégradations (alcali-réaction, gel/dégel...) à des essais de performance.

Les normes de conception des structures (Eurocodes) applicables depuis le 1^{er} avril 2010 en France explicitent l'exigence de durabilité des ouvrages et la nécessité de prendre en compte la durée d'utilisation de l'ouvrage dès sa conception.

La norme *NF EN 206-1/CN* définit des valeurs limites applicables à la composition des bétons en fonction de l'environnement auquel sera soumis chaque béton de l'ouvrage pendant sa durée d'utilisation (en particulier : teneur minimale en liant équivalent, résistance minimale en compression, rapport maximal E/liant équivalent).

La définition et les spécifications des bétons sont fixées par le prescripteur. Elles doivent en particulier prendre en compte :

- les agressions liées à la carbonatation et à la pénétration des chlorures ;
- la prévention des désordres dus aux gonflements internes du béton (alcali-réaction et réaction sulfatique interne) ;
- la tenue des bétons durcis soumis au gel et aux sels de déverglaçage ;

- les agressions chimiques.

Cette approche facile à utiliser est fondée sur un important retour d'expérience de plusieurs décennies.

Elle est parfaitement adaptée pour les ouvrages traditionnels pour lesquels la durée de vie conventionnelle de 50 ans est requise. Dans le cas d'ouvrages exceptionnels ou soumis à des sollicitations particulières ou lorsqu'une durée de vie significativement plus importante (100, 120, voire 150 ans) est souhaitée par le maître d'ouvrage, l'approche prescriptive n'est pas toujours suffisante pour maîtriser la durabilité des bétons de l'ouvrage.

LES POSSIBILITÉS INTRODUITES PAR

LA NORME *NF EN 206-1/CN*

La norme *NF EN 206-1/CN* introduit la notion « d'approche performantielle » dans deux articles et la précise dans deux annexes en prévoyant que les spécifications relatives aux classes d'exposition puissent être définies en utilisant des méthodes de conception performantielles.

■ Article 5.2.5.3 concept de performance équivalente

« Le concept de performance équivalente du béton permet de modifier les prescriptions de composition des bétons énoncées dans les cas où une addition spécifique est utilisée avec un ciment spécifique dont l'origine et les caractéristiques de chacun sont clairement définies et consignées. »

« Il doit être prouvé à l'aide d'essais performantiels que le béton a une équivalence de performance avec celle d'un béton de référence, en particulier pour ce qui concerne son comportement vis-à-vis des agressions de l'environnement et sa

durabilité, conformément aux exigences pour la classe d'exposition concernée. »

L'annexe E donne les principes d'évaluation du concept de performance équivalente.

■ Article 5.3.3 méthodes de conception performantielles

« Les exigences relatives aux classes d'exposition peuvent être établies en utilisant les méthodes de conception performantielles pour la durabilité et elles peuvent être établies en termes de paramètres performantiels, par exemple une mesure d'écaillage dans un essai de gel/dégel. »

L'annexe J donne des conseils relatifs à l'utilisation de cette méthode de formulation.

Nota : Le futur fascicule 65 (*Exécution des ouvrages de Génie Civil en béton*) prend en compte l'application possible de l'approche performantielle.

DÉFINITION DE L'APPROCHE PERFORMANTIELLE

Les recherches consacrées à la durabilité des ouvrages en béton lors des dernières décennies ont abouti à une meilleure compréhension des mécanismes de dégradation des bétons et une mise au point d'outils de caractérisation et de suivi de leurs évolutions. Des modèles prédictifs ont été développés et validés expérimentalement.

L'expertise acquise a permis de développer une nouvelle démarche visant à maîtriser plus rationnellement la durabilité des bétons appelée « approche performantielle ».

Cette nouvelle approche fixe des exigences en termes de résultats (par exemple résistance aux chlorures) et non plus en termes de moyens (par exemple dosage minimal en

ciment) et donne des outils pour contrôler si les objectifs de durabilité sont atteints. Elle ne dispense pas, bien sûr, d'appliquer avec la même rigueur les règles de l'art et recommandations habituelles pour la mise en œuvre du béton, l'exécution des ouvrages et la réalisation des contrôles.

Elle complète et renforce la norme *NF EN 206-1/CN* en tirant profit de l'évolution des connaissances scientifiques sur les transferts hydriques, sur les mécanismes physico-chimiques mis en jeu dans les processus de dégradation et les propriétés de transport des agents agressifs. Elle apporte une réponse quand l'approche prescriptive conduit à des exigences de moyens difficiles à concilier.

UNE DÉMARCHE FONDÉE SUR DES INDICATEURS DE DURABILITÉ

L'approche performantielle est une méthodologie multiniveau, globale, scientifiquement fondée et innovante pour la spécification, l'évaluation et la prédiction de la durabilité des structures en béton armé ou précontraint.

Elle est fondée sur la notion d'indicateurs de durabilité associés à des critères performantiels et des valeurs seuils à respecter ainsi que des méthodes de caractérisation physico-chimiques et des modèles calibrés des différentes dégradations. Lors de la conception d'un ouvrage, la méthode consiste, en fonction de son environnement (actions environnementales auxquelles est soumise chaque partie d'ouvrage) et de la durée d'utilisation de l'ouvrage escomptée, à identifier les risques de dégradations potentielles des bétons, à choisir des indicateurs de

durabilité adaptés et pertinents traduisant les risques de dégradation puis à sélectionner les spécifications de performances optimales à adopter et les seuils et critères d'acceptation des indicateurs de durabilité à respecter.

DOMAINES D'UTILISATION DE L'APPROCHE PERFORMANTIELLE

Elle s'applique aussi bien aux ouvrages neufs en phase de conception qu'aux ouvrages existants du patrimoine.

Démarche prédictive de la durabilité des ouvrages en béton, elle permet :

- de valider la durabilité d'une formulation de béton conforme à la norme *NF EN 206-1/CN* ;
- de définir, prescrire et qualifier des formulations de béton pour une durée d'utilisation et un ouvrage donnés ;
- de prédire la durabilité des ouvrages neufs ;
- d'optimiser la formulation du béton en intégrant la durée de vie de l'ouvrage et les conditions environnementales auxquelles il est soumis ;
- de spécifier des bétons sur la base d'indicateurs de durabilité spécifiques ;
- d'évaluer les performances des bétons vis-à-vis de la durabilité adaptée à leur environnement et une meilleure prise en compte du contexte local de l'ouvrage (utilisation de matériaux locaux par exemple) ;
- d'utiliser de nouveaux matériaux et de privilégier les ressources locales tout en s'assurant que les exigences de durabilité sont respectées ;
- de déterminer la durabilité des bétons ou de prévoir l'évolution de l'ouvrage vis-à-vis d'un processus de dégradation considéré ;
- de tirer profit des avantages tech-

niques et environnementaux des nouveaux concepts de formulation des bétons et des propriétés et des performances des bétons innovants ;

■ d'optimiser la formulation des bétons pour répondre à un cahier des charges spécifique d'un ouvrage ;

■ de contrôler et suivre les évolutions des bétons et des structures au cours du temps.

Elle est destinée aussi à :

■ estimer la durée de vie résiduelle d'un ouvrage existant, ce qui permet d'optimiser le suivi de l'ouvrage et d'établir un diagnostic précis de l'état de la structure afin de définir une stratégie optimale de gestion, d'entretien, de maintenance ou de réparation d'un patrimoine d'ouvrages ;

■ déterminer et prédire la durée de vie potentielle d'un ouvrage dans son environnement au moment de sa conception, mais aussi la durée de vie résiduelle d'un ouvrage existant.

DES ACQUIS SCIENTIFIQUES

Elle s'appuie sur des acquis scientifiques et les résultats de nombreuses recherches et enrichit le référentiel technique actuel en offrant des marges de manœuvre pour la formulation et la qualification des bétons destinés à la construction d'ouvrages.

Ce type d'approche a déjà été appliqué et validé sur de grands projets tels que le viaduc de Millau et le pont Vasco de Gama sur le Tage.

Les connaissances scientifiques sur l'approche performantielle ont été analysées dans le cadre d'un groupe de travail de l'Association Française de Génie Civil (AFGC) animé par Véronique Baroghel-Bouny. Elles font l'objet d'un guide AFGC : « *Conception des bétons pour une durée de*

vie donnée des ouvrages : maîtrise de la durabilité vis-à-vis de la corrosion des armatures et de l'alcali-réaction, État de l'art et Guide pour la mise en œuvre d'une approche performantielle et prédictive sur la base d'indicateurs de durabilité ».

ATOUTS DE L'APPROCHE PERFORMANTIELLE

L'approche performantielle autorise une plus grande liberté pour la formulation des bétons et favorise l'innovation en offrant aux prescripteurs plus de souplesse sur le choix du béton et de ses constituants.

Choix de maîtrise d'ouvrage, elle répond à l'enjeu croissant de durabilité dans un cadre rationnel et contractuel et offre aux concepteurs d'ouvrages une plus grande diversité de solutions.

La démarche performantielle permet de prendre en compte la globalité des aspects technico-économiques spécifiques à un ouvrage au sein de son environnement et d'appréhender et de maîtriser la durabilité des bétons en intégrant les défis et les préoccupations liés à la prise en compte du concept de Développement Durable (ouvrages pérennes, valorisation des matériaux, optimisation de l'utilisation des ressources naturelles...).

UNE ANTICIPATION INDISPENSABLE

L'application de l'approche performantielle nécessite des changements importants dans les relations entre les acteurs (maître d'ouvrage, maître d'œuvre, entreprise, producteur de béton), un renforcement des responsabilités de chacun et une anticipation de la problématique matériaux lors de la mise au point du projet. ■

Point de vue de la maîtrise d'ouvrage et de la maîtrise d'œuvre

Point de vue de l'expert

DIDIER BRAZILLIER, directeur de l'Ingénierie DIR Centre-Est

Quel maître d'ouvrage n'a pas rêvé de pouvoir commander puis réceptionner un ouvrage avec un niveau de service garanti, évitant ainsi sur une période de durée de vie spécifiée de faire face à de coûteuses réparations bien souvent problématiques vis-à-vis des contraintes d'exploitation et mal acceptées par les usagers ?

Ce rêve peut devenir réalité avec l'approche performantielle, aboutissement des évolutions récentes dans la maîtrise des formulations des bétons modernes, dans la modélisation et la caractérisation des processus de dégradation du béton armé dans un environnement donné... mais cela demande une posture affirmée et quelques efforts de rigueur dans la définition de leurs attentes de la part du maître d'ouvrage et de son maître d'œuvre.

Ne pas oublier les fondamentaux.

■ Il convient de rappeler avec force que l'application de cette méthode ne permettra aucunement de s'affranchir d'un suivi régulier et d'un entretien courant normal au cours de la vie de l'ouvrage, pas plus que la mise de côté des normes habituelles sur les matériaux constitutifs du béton.

Afficher ses attentes et savoir s'entourer.

■ Il convient d'exposer résolument et clairement, le plus en amont possible, le recours souhaité à ce type d'approche, ses exigences et la description de l'environnement précis dans lequel sera construit l'ouvrage. Pour être précis, explicite et conforme au cadre des normes Eurocodes (voir guide SETRA – « Application des Eurocodes par le maître d'ouvrage, le programme d'un OA aux Eurocodes » – février 2010 – Réf. 1002) et du guide « Application de l'approche performantielle du LCPC » (voir ci-contre), le maître d'ouvrage doit s'entourer d'un AMO ou d'un maître d'œuvre expérimenté dans ce domaine.

Cela est indispensable compte tenu de la technicité de la définition des données d'entrée qui doivent être pertinentes, adaptées à l'ouvrage et cohérentes entre elles pour éviter l'accumulation de prescriptions parfois contradictoires ou la multiplication des formules exigées pour chaque partie d'ouvrage sans plus-value.

Offrir les conditions de réussite et encourager l'innovation.

■ La définition des indicateurs de durabilité pertinents et des seuils d'acceptation est particulièrement importante, car condi-

tionnant l'économie générale des études. Le maître d'ouvrage veillera à donner du temps pour permettre les études formulation et la validation des épreuves de convenance, mais aussi pour que l'entreprise et son BPE puissent s'emparer de la souplesse offerte par l'approche performantielle pour optimiser les formules tant du point de vue économique qu'environnemental.

On aura d'ailleurs tout intérêt dans les pièces contractuelles à rechercher à valoriser cette optimisation (prime à des bétons à moindre impact environnemental ou prise en charge de plusieurs études de formulation par exemple) pour encourager à explorer cette voie, qui est fondamentale dans une logique de Développement Durable.

Donner du temps, cela peut passer par une information anticipée des acteurs (avant le lancement de l'appel d'offres) via l'affichage d'une politique générale du maître d'ouvrage, résolument tournée vers une analyse en coût global ou via un contact préalable avec les organismes professionnels...

Ou encore par le financement d'études sur des matériaux locaux pour simplifier le recueil de données, voire par le recours à des formulations locales

types préalablement testées et validées... Il est important de souligner que cette approche ne se résume pas uniquement à un pari de la part du maître d'ouvrage basé sur un contrat moral lors de la conclusion du marché. Il pourra avec quelques essais réguliers sur les bétons de la structure s'assurer que le vieillissement constaté est conforme aux prédictions initiales du modèle et donc disposer de véritables témoins de durée de vie.

Un appui pour les gestionnaires...

■ C'est aussi grâce à ces modèles de simulation des dégradations et de vieillissement, comme exposé par ailleurs, que l'approche performantielle est également un outil puissant pour l'évaluation de la durée de vie résiduelle probable d'une structure existante ou la prédiction de l'évolution des dégradations du béton structurel, ce qui est extrêmement précieux et potentiellement source d'économie.

Avec la généralisation de la méthode et quelques retours d'expérience attendus, on s'oriente bien vers une petite révolution dans la gestion d'un patrimoine d'ouvrages d'art. ■



Le guide du LCPC : Application de l'approche performantielle

BRUNO GODART, *Directeur adjoint du Département Matériaux et Structures de l'IFSTTAR*



L'objectif du guide est de faciliter la mise en œuvre de l'approche performantielle de la durabilité pour les ouvrages d'art neufs en béton dont la durée d'utilisation est fixée par l'Eurocode à 100 ans. S'appuyant sur une démarche scientifique et tirant profit des résultats de la recherche, ce guide propose une méthodologie adaptée pour l'application pratique de la démarche performantielle aux ouvrages courants. C'est-à-dire des ouvrages de dimensions relativement modestes, dont la conception et la réalisation sont simples et qui ne présentent pas un caractère stratégique majeur au sein du réseau d'infrastructures. Prenant en compte les préoccupations liées à la construction de structures durables, adaptées à leur environnement et respectueuses des contraintes économiques, cette méthodologie répond de manière pratique aux exigences du Développement Durable.

APPROCHE GLOBALE ET CONTEXTE LOCAL

Ce guide est destiné aux maîtres d'ouvrage, aux gestionnaires d'ouvrages, aux maîtres d'œuvre et prescripteurs, aux entreprises de construction, aux industriels réalisant des produits préfabriqués en béton, aux fournisseurs de BPE et aux laboratoires impliqués dans la construction.

Il intègre trois risques principaux de dégradation du béton :

- la corrosion des armatures (due à la carbonatation et à la pénétration des chlorures) ;
- les effets du gel (écaillage et gel interne) ;
- les réactions de gonflement interne (alcali-réaction et réaction sulfatique interne).

Il définit en particulier :

- les exigences à introduire dans le programme du maître d'ouvrage et les spécifications correspondantes du CCTP ;
- les modalités requises pour la qualification et la comparaison des formules de béton ;
- les modalités relatives aux contrôles et suivi de l'ouvrage.

De manière plus précise, ce guide permet au maître d'ouvrage de prendre en compte, dans une approche globale, le contexte local de son ouvrage et ses exigences propres en termes d'enjeux et de stratégie :

- la durée de vie de l'ouvrage ;
- les fonctions de l'ouvrage (utilisations, enjeux...) ;
- l'environnement, avec la prise en compte des spécificités locales (mer, gel, emploi de sels de déverglaçage) ;
- les ressources locales.

Pour les entreprises et les producteurs de béton, la méthode décrite dans le guide vise à simplifier les modalités de mise au point et de validation des formules de béton, permettant ainsi des gains de temps dans la phase de préparation des chantiers. Elle met à leur disposition des outils pratiques d'évaluation de la performance des bétons vis-à-vis de la durabilité. Elle offre aussi tous les outils nécessaires pour mieux évaluer et justifier des innovations en matière de formulation des bétons.

Elle introduit la notion de formules locales « préqualifiées » répondant à des exigences de durabilité et permettant de faciliter l'application de cette approche. Ces formules doivent avoir fait l'objet d'études et disposer de références probantes vis-à-vis des exigences de durabilité.

UNE DÉMARCHÉ EN 6 ÉTAPES

Le recours à l'approche performantielle est normalement de l'initiative du maître d'œuvre, en accord avec le maître d'ouvrage. L'initiative peut en revenir à l'entreprise, dans la mesure où le maître d'œuvre a ouvert cette possibilité dans son marché.

Dans sa mise en œuvre, la démarche performantielle se décline en six grandes étapes successives :

- 1 – Le choix de la durée d'utilisation du projet.
- 2 – La prise en compte des conditions environnementales et l'analyse des risques principaux de dégradation.
- 3 – La sélection des indicateurs de durabilité et des spécifications relatives à ces indicateurs.
- 4 – La formulation du béton avec les épreuves d'étude.
- 5 – La réalisation des épreuves de convenance et de contrôle.
- 6 – Le « Point zéro durabilité » sur l'ouvrage et son suivi.

QUELQUES LIMITES D'UTILISATION

Le guide comporte en outre différentes annexes dont une aide au choix des classes d'exposition pour les ouvrages d'art, des exemples de spécifications à introduire dans les cahiers des charges, et une description des modes opératoires des essais à utiliser.

Pour conclure, il convient de mentionner que cette démarche innovante au plan mondial possède des limites. Les seuils fixés sur les indicateurs de durabilité en matière de corrosion sont donnés pour des enrobages standards de 30 ou 50 mm, et ils doivent être ajustés si des enrobages différents sont mis en œuvre. De même, les seuils ont été fixés sur la base d'une utilisation de ciments de type CEM I, et ils doivent être adaptés si l'on emploie des ciments contenant de fortes quantités de laitiers de haut fourneau ou de cendres volantes.

Les seuils à respecter s'appliquent à des valeurs moyennes mesurées sur un béton de 90 jours, pour des ouvrages dont la durée d'utilisation de projet est de 100 ans ; pour des durées supérieures ou pour une prise en compte de la variabilité des valeurs, il faut se reporter à la littérature scientifique et technique dont notamment le guide AFGC. ■



Conception des bétons pour une durée de vie donnée des ouvrages
Maîtrise de la durabilité vis-à-vis de la corrosion des armatures et de l'alcali-réaction
■ **État de l'art**
■ **Guide pour la mise en œuvre d'une approche performantielle et prédictive sur la base d'indicateurs de durabilité.**

AFGC juillet 2004.

Les évolutions au niveau européen

Point de vue de l'expert

JEAN-MARC POTIER, chargé de mission technique au SNBPE

La nouvelle version de la norme béton, EN 206, actuellement au stade du vote formel, précise dans l'article :

5.3.3 : Méthodes performantielles :

a) – Les exigences liées aux classes d'exposition peuvent être établies en utilisant des méthodes performantielles pour la durabilité et peuvent être spécifiées en termes de paramètres performantiels, par exemple une mesure d'écaillage du béton au cours d'un essai de gel/dégel. L'utilisation d'une méthode performantielle est soumise aux dispositions en vigueur sur le lieu d'utilisation du béton.

Les conditions cadres pour le mode opératoire de détermination de la durabilité équiva-

lente ont été publiées en tant que CEN/TR 16563.

« *Principles of the equivalent durability procedure* ».

Le principe d'équivalence de durabilité est une méthode basée sur l'approche traditionnelle de valeurs limites établies en termes de rapport E/C, de teneur minimale en ciment, etc. Le principe repose sur la comparaison entre un béton de référence et le béton candidat, sur la base d'essais représentatifs des conditions environnementales auxquelles sera soumis le béton candidat.

La procédure d'équivalence de durabilité (EDP) permet d'établir la conformité de compositions de béton s'écartant des valeurs prescriptives. Cette procédure est en théorie applica-

ble pour toutes les classes d'exposition, mais, dans la pratique, est limitée aux classes d'exposition pour lesquelles des normes d'essais normalisées au niveau européen existent.

La procédure comprend au minimum trois parties :

■ la fixation de valeurs de réf-

rence (approche absolue) ou d'un béton de référence (approche comparative) ;

■ des essais initiaux du béton candidat pour vérifier le respect des valeurs limites ;

■ un contrôle continu de la production pour l'évaluation de la conformité. ■

Méthodes d'essais de performance normalisées (ou en cours) au niveau européen

CEN/TS 12390-9 – Testing hardened concrete –

Part 9: Freeze-thaw resistance – Scaling (essai d'écaillage).

CEN/TS 12390-10 – Testing hardened concrete –

Part 10: Determination of the relative carbonation resistance of concrete (résistance relative à la carbonatation).

CEN/TS 12390-11 – Testing hardened concrete –

Part 11: Determination of the chloride resistance of concrete, unidirectional diffusion (résistance à la pénétration des chlorures).

CEN/TR 15177 – Testing the freeze-thaw resistance of concrete - Internal structural damage (gel interne).

Les outils de l'approche performantielle

La démarche « approche performantielle » s'appuie sur des indicateurs de durabilité.

On distingue trois types d'indicateurs.

Indicateurs de durabilité généraux : valables pour différents types de dégradations :

■ porosité accessible à l'eau par absorption sous vide : $P_{\text{eau}} \%$;

■ coefficient de diffusion apparent des chlorures par migration :

$D_{\text{app}} 10^{-12} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$;

■ perméabilité apparente au gaz :

$K_{\text{gaz}} 10^{-18} \text{ m}^2$;

■ teneur en portlandite $\text{Ca}(\text{OH})_2$.

Indicateurs de durabilité spécifiques : valables pour un processus de dégradation donné (alcali-réaction, dégradations dues au gel) ;

■ variations dimensionnelles/gonflement ;

■ gel : caractéristiques du réseau de bulles d'air ;

■ alcali-réaction : concentration en alcalins équivalents.

Indicateurs de substitution :

■ porosité accessible au mercure ;

■ résistivité électrique ;

■ coefficient d'absorption capillaire ;

■ coefficient de diffusion du CO_2 .

Chaque indicateur est associé à des spécifications et des valeurs seuils, fonction de la durée de vie exigée, ainsi qu'à des essais en laboratoire ou sur éprouvettes prélevées sur ouvrage.

Les **témoins de durée de vie** (tels que la profondeur de carbonatation ou le profil de concentration en chlorures dans le béton d'enrobage) analysés par des essais *in situ* ou sur des prélèvements permettent d'évaluer le niveau d'avancement du processus de dégradation et donc de prédire la durée de vie résiduelle des ouvrages en béton armé.

Les **essais de performance** permettent d'évaluer le comportement d'un béton soumis à des sollicitations physico-chimiques, de façon amplifiée et accélérée, de même nature que celles auxquelles l'ouvrage sera exposé.

Des **modèles prédictifs** ont été développés, calés et validés (essais accélérés en laboratoire, analyse de prélèvement sur ouvrage) pour chaque processus de dégradation. Ils évaluent l'avancement du processus de dégradation. ■

Incidence sur le CCTP

Point de vue de l'expert

PATRICK DANTEC, *consultant*

Le fascicule 65 de 2008 ouvre la porte à l'utilisation de l'approche performantielle dans son chapitre 8 article 81.2.2 pour les bétons ne relevant pas des classes XF3, XF4 et XA1 à XA3.

Le CCTP du marché doit préciser les dispositions applicables à la prescription des bétons de l'ouvrage considéré. Le guide du LCPC de mars 2010 « Maîtrise de la durabilité des ouvrages d'art en béton » définit les éléments particuliers à prendre en compte, propose la démarche à suivre et fournit des exemples de clauses de rédaction adaptées à inclure dans le CCTP.

En premier lieu, le CCTP doit rappeler les exigences particulières du projet fixées par le maître d'ouvrage en ce qui concerne sa durée d'utilisation, généralement 100 ans pour les ouvrages d'art, le contexte climatique et environnemental en référence à la norme *NF EN 206-1* pour le choix des classes d'exposition, à la norme *NF EN 1992-1-1* pour la définition de l'enrobage et aux recommandations pour la prévention des risques de réaction de gonflement interne, de réaction sulfatique et de gel.

Le CCTP précise les classes

d'exposition des différents bétons et la justification des enrobages attendus C_{min} , dur selon les Eurocodes et leur Annexe nationale française. Il convient de souligner que l'application de la démarche performantielle permet une modulation de la classe structurale qui autorise un gain de 10 mm sur l'enrobage.

Le CCTP définit les spécifications performantielles des bétons par partie d'ouvrage dans le « tableau des bétons ». Pour chaque partie d'ouvrage concernée par l'utilisation de l'approche performantielle, la teneur minimale en liant équivalent et le rapport eau efficace sur liant équivalent maximal de l'approche prescriptive sont remplacés par des valeurs de seuil à obtenir sur les indicateurs de durabilité vis-à-vis de la corrosion des armatures. Ces indicateurs sont choisis de façon pertinente en fonction des classes d'exposition de chaque partie d'ouvrage considérée.

Les autres chapitres du CCTP impactés par cette démarche performantielle concernent les épreuves d'étude, de convenue et de contrôle. Il convient de vérifier qu'à ces différentes étapes le béton possède les critères de perfor-

mance retenus sur les indicateurs de durabilité spécifiés. La difficulté principale résulte de la durée des essais de durabilité fixée à 90 jours. De ce fait, le guide LCPC propose des modalités pratiques de réalisation de ces épreuves compatibles avec les exigences de chantier en s'appuyant sur des mesures de certains paramètres à 28 jours. Le recours à cette démarche est facilité par l'utilisation de formules locales de béton « préqualifiées » disposant de références d'utilisation récentes.

Le maître d'ouvrage prononce la réception en s'assurant de la conformité par partie d'ouvrage des résultats obtenus sur les indicateurs, sur les valeurs d'enrobage voire d'autres mesures ou essais *in situ*. Cela constitue le point zéro durabilité et permet d'initialiser le suivi dans le temps de l'ouvrage basé sur la mesure périodique *in situ* des témoins de durée de vie sur chaque partie d'ouvrage (par exemple évolution de la carbonatation ou de la profondeur de pénétration des chlorures).

Le projet du futur fascicule 65 du CCTG (parution prévue en 2014), qui prend en compte les exigences de la norme

NF EN 13670 sur l'exécution des ouvrages en béton, développe la possibilité de recours à la méthode de conception performantielle en y consacrant un article complet mais en bridant toutefois son utilisation par des possibilités de dérogations limitées des exigences de composition prescriptives relatives aux classes d'exposition (augmentation maximale du rapport eau efficace sur liant équivalent de 0,1 ; diminution de la teneur en liant équivalent de 20 % ; limitation de la teneur en addition). Ces nouvelles dispositions actualisent les seuils des indicateurs de durabilité du guide LCPC de mars 2010 et permettent de mieux gérer les modulations de classe structurale en fonction des niveaux de performance atteints sur les indicateurs.

Ce fascicule actualise les dispositions pratiques du guide LCPC de mars 2010 relatives à la réalisation des épreuves d'étude, de convenue et de contrôle des bétons. La vérification des seuils des indicateurs spécifiés est renforcée au niveau des épreuves d'étude et de convenue et assouplie au niveau des épreuves de contrôle comme pour les valeurs de résistance. ■

Un grand merci aux experts qui ont rédigé ce document technique : Bruno Godart, *Directeur adjoint du Département Matériaux et Structures de l'IFSTTAR (Institut Français des Sciences et Technologies des Transports, de l'Aménagement et des Réseaux)*, Didier Brazillier, *Directeur de l'Ingénierie à la Direction Interdépartementale des Routes Centre-Est*, Christophe Aubagnac, *Chef du groupe OAGR du Département Laboratoire d'Autun de CETE de Lyon*, Patrick Dantec, *consultant*, Jean-Marc Potier, *chargé de mission technique au SNBPE*.

Exemple d'application de l'approche performantielle sur le viaduc de Volessvres

CHRISTOPHE AUBAGNAC, Chef du groupe OAGR du Département Laboratoire d'Autun du CETE de Lyon

Photo : CETE de Lyon – DL Lyon – DOA



→ Ouvrage en cours de construction.

Photo : CETE de Lyon – DL Autun



→ Ouvrage achevé.

Le viaduc de Volessvres est situé sur la commune de Volessvres dans le département de Saône-et-Loire et permet à la RN 79 – RCEA le franchissement de la rivière « Bourbinçe », de la route départementale 974 et du canal du Centre.

PRÉSENTATION DE L'OUVRAGE

Dans le cadre de la mise à deux fois deux voies de la RN 79, l'ouvrage initial a été doublé par un pont de type « caisson mixte » de hauteur constante, à 5 travées continues de 32, 40, 50, 52, et 32 m de portées en allant de Digoin vers Mâcon.

Le profil en travers de l'ouvrage comprend deux voies de circulation et une BAU, pour une largeur utile de 9,75 m.

Les culées C0 et C5 sont constituées d'un sommier de 1,20 m d'épaisseur, fondé profondément sur deux files de pieux verticaux en béton armé, coulés en place et de 1,20 m de diamètre.

Les piles, constituées d'un fût hexagonal de 2,60 m d'épaisseur surmonté d'un chevêtre architecturé de 2,50 m de hauteur, ont le même mode de fondation que les culées.

Les fondations profondes de cer-

taines piles ont été exécutées à l'intérieur de batardeaux, compte tenu de la nature des terrains en surface et de la présence de la nappe phréatique.

La charpente métallique du tablier est constituée d'un caisson ouvert de 1,69 m de hauteur, dont les âmes sont inclinées (entraxe variant de 3,45 m à 4,65 m), pour un encombrement total en largeur de 5,45 m.

Le hourdis supérieur est constitué par une dalle en béton armé d'environ 30 cm d'épaisseur moyenne.

La charpente métallique a été mise en place à la grue, au moyen de palées provisoires.

Le hourdis béton a été coulé en place par plots d'environ 40 m³, avec un phasage ayant consisté à couler en dernier les zones sur piles (pianotage).

Une durée d'utilisation du projet de 100 ans a été considérée.

Pour ce qui est des bétons, ont été pris en compte :

- le niveau C de prévention vis-à-vis de la réaction Alkali-Silice ;
- le niveau de prévention Ds vis-à-vis de la réaction Sulfatique Interne pour les pieux et semelles de fondation et le niveau de prévention Cs pour les autres parties de l'ouvrage ;

- la classe de gel modéré et un salage très fréquent pour la voie portée.

Le marché a été attribué au groupement d'entreprises CBR-TP (mandataire), SNCTP et IOA Construction pour un montant d'opération de 4 M€ HT et un délai de réalisation de 24 mois.

Les bétons ont été fournis par la société Béton Contrôlé Montceau Le Creusot (BCMC), centrales de Gueugnon et de Blanzay.

PRÉSENTATION DE LA DÉMARCHE APPLIQUÉE

La Direction Interdépartementale des Routes Centre-Est souhaite faire évoluer la prescription des bétons d'ouvrages d'art de l'approche prescriptive actuelle à l'approche performantielle, en raison de ses missions d'exploitant d'un réseau routier avec une logique de recherche de la plus grande durée d'utilisation des ouvrages avec le moins d'interventions de maintenance possible.

Elle a souhaité appliquer la démarche « approche performantielle » de façon non contractuelle, en complément d'une approche prescriptive classique, à l'occasion de la construction de l'ouvrage de doublement du viaduc de Volessvres.

LES PROPOSITIONS DU LABORATOIRE D'AUTUN

Le Département Laboratoire d'Autun (DL Autun) du CETE de Lyon a proposé à l'IFSTTAR, dans le cadre du groupe « Innovations OA » du Réseau Scientifique et Technique du MEDDE, de tester sur ce chantier l'application des Recommandations provisoires du LCPC de mars 2010 « Maîtrise de la durabilité des ouvrages d'art en béton – Application de l'approche performantielle » sur les quatre principales formulations de béton :

- fondations profondes : C 30/37 XC2/XA1 ;
 - semelles, murs de front des culées, fûts des piles : C 30/37 XC4/XF1 ;
 - hourdis : C 40/50 XC4/XF1 ;
 - longrine d'ancrage des BN4, bordures, solins d'ancrage des joints de chaussée : C 35/45 XC4/XF4/XD3.
- Il s'agissait de permettre un retour d'expérience sur le caractère applicable des Recommandations provisoires du LCPC, sur la dispersion des résultats d'essais, sur la possibilité de respecter les seuils préconisés..., pour des formulations de béton « classiques » en ouvrage d'art.

En outre, l'IFSTTAR a souhaité que soit mise en œuvre une instrumentation par capteurs de corrosion dans certaines parties en béton armé de l'ouvrage.

Le DL Autun s'est ainsi rapproché du *Laboratório Nacional de Engenharia Civil* (LNEC) de Lisbonne, partenaire de l'IFSTTAR, et lui a demandé de l'aider à définir un système de surveillance de la corrosion à installer pendant la construction de l'ouvrage. Compte tenu du caractère non contractuel de l'approche performantielle des bétons sur ce chantier, le DL Autun a cherché à impliquer

avant le démarrage des études de formulation des bétons les principaux acteurs du chantier et a également associé la profession (SNBPE, Cimbéton et ATILH).

Face au retour unanimement favorable pour cette démarche innovante, le DL Autun a proposé un plan de contrôle pour les différentes formulations de béton, se conformant aux préconisations des Recommandations provisoires du LCPC et basé sur le planning général prévisionnel des travaux hors intempéries de l'entreprise.

Ce plan de contrôle faisait intervenir majoritairement les DL Autun et DL Clermont-Ferrand du CETE de Lyon et associait les laboratoires Lafarge LCR et CTG Calcia pour des essais complémentaires ou contradictoires :

- porosité accessible à l'eau (P_{eau}), essais réalisés par les 4 laboratoires ;

- perméabilité au gaz (K_{gaz}), essais réalisés par le DL Clermont-Ferrand (azote) et les deux laboratoires cimentiers ;

- résistivité électrique (ρ), essais réalisés par les DL Autun, DL Clermont-Ferrand et Lafarge LCR ;

- coefficient apparent de diffusion des ions chlorures (D_{app}) : essais réalisés par le DL Clermont-Ferrand. En outre, Lafarge LCR a réalisé des essais de carbonatation accélérée en laboratoire et des essais de carbonatation naturelle en conditions abritées ou non sur le site de l'ouvrage et sur un autre site.

Il s'agissait pour les 4 laboratoires de consolider ou d'initier leur pratique des essais de l'approche performantielle des bétons en se basant sur les modes opératoires d'essais définis à l'annexe 1 des Recommandations du LCPC : « Modes opératoires sim-

plifiés : Résistivité électrique et migration des ions chlorure sous champ électrique. Porosité à l'eau. Perméabilité au gaz Cembureau ». Pour s'assurer de pratiques les plus homogènes possible entre les 4 laboratoires, le CETE de Lyon a établi un document complémentaire « modes opératoires communs ».

Les 4 formulations de béton ont donc fait l'objet d'une caractérisation par les essais de l'approche performantielle, initiée lors des épreuves de convenance et poursuivie pendant toute la durée de mise en œuvre des bétons sur le chantier.

INTERPRÉTATION DES PRINCIPAUX RÉSULTATS

Du point de vue de l'approche prescriptive contractuelle, les 3 premières formules de béton (pieux,

appuis et hourdis) sont conformes. Vis-à-vis de l'approche performantielle :

- les valeurs de porosité accessible à l'eau dépassent les seuils des Recommandations provisoires du LCPC (jusqu'à + 1,3 % en valeur absolue pour les bétons « CEM I » et jusqu'à + 3,5 % en valeur absolue pour le béton « CEM III ») ; cela s'explique vraisemblablement par le mode opératoire pratiqué pour ces mesures, avec une étape de saturation sous vide du béton de durée de 72 heures au lieu de 48 heures.

Nota : les seuils de porosité accessible à l'eau préconisés par les Recommandations provisoires du LCPC sont vraisemblablement cohérents avec le mode opératoire antérieurement pratiqué (durée de la phase de saturation sous vide au moins 2 fois plus courte).

En complément pour les mesures de porosité accessible à l'eau :

- les porosités à 90 jours mesurées sur les 4 bétons sont « du même ordre de grandeur », avec cependant des valeurs plus importantes (environ + 1 %) mesurées sur le béton « CEM III » :

- CEM I : porosités mesurées de 13,6 % à 15,7 % ;

- CEM III : porosités mesurées de 14,5 % à 16,5 % ;

- la dispersion des résultats au sein d'un même prélèvement est faible (inférieure à 3 % en valeur relative dans la quasi-totalité des cas) ;

- les écarts-types des mesures réalisées par le DL Autun sont faibles (0,6 % en valeur absolue maxi) ;

- les écarts entre laboratoires sur essais contradictoires sont la plupart du temps inférieurs à 1 % en valeur absolue (et dans tous les cas inférieurs à 10 % en valeur relative) ;

Formulation des bétons

Type de béton	Pieux	Appuis	Hourdis	Longrines
Constituants	XC2/XA1 C 30/37 S4 D max. 20 Cl 0,40	XC4/XF1 C 30/37 S3 D max. 20 Cl 0,65 RSI	XC4/XF1 C 40/50 S3 D max. 20 Cl 0,40 RSI	XC4/XF4/XD3 C 35/45 S3 D max. 20 Cl 0,40
Sable 0/2 RL Cognard site de Chazey Gueugnon (ou 0/2 R – C2B – Port sud Épervans pour la centrale de Blanzey)	345	365	340	/
Sable 0/2 RL Cognard site de Chazey Gueugnon (ou 0/4 R – C2B – Port sud Épervans pour la centrale de Blanzey)	345	375	340	620
Gravillon 4/12,5 LSC Cognard site de Chazey Gueugnon	380	300	320	400
Gravillon 10/20 LSC Cognard site de Chazey Gueugnon	680	760	775	645
CEM III/A 52,5 L CE PM-ES-CP1 NF Calcia Rombas	/	330	/	/
CEM I 52,5 N CE CP2 PM-ES-CP2 NF Lafarge Val d'Azergues	385	/	/	420
CEM I 52,5 N CE CP2 NF Calcia Beffes	/	/	350	/
Filler Bétocarb P2 OMYA/MEAC Gy	/	50	55	/
Plastiment 22S Sika	2,65	2,30	2,30	/
Sika Viscocrete Tempo 12 Sika	2,12	2,12	4,24	/
Plastiretard Sika	0,94	0,235	0,35	/
SPHRE – BASF – Glenium SKY 537	/	/	/	3,36
AEA – BASF – Micro Air 104 dilué	/	/	/	0,25
Eau efficace	185	155	146	143
Eau efficace/liant équivalent	0,48	0,47	0,42	0,34

■ les valeurs de perméabilité au gaz satisfont aux seuils des Recommandations provisoires du LCPC ;

■ les critères de conformité à 28 jours (épreuve de convenance, épreuve de contrôle) sont toujours vérifiés.

En complément pour les mesures de résistivité électrique :

– la résistivité électrique est plus faible pour les bétons CEM I (< 200 voire à 100 ohm.m) que pour le béton « CEM III » (plutôt comprise entre 200 et 400 ohm.m) ;

– la dispersion des résultats au sein d'un même prélèvement est assez importante (généralement inférieure à 20 % en valeur relative) ;

– les écarts-types des mesures réalisées par le DL Autun sont généralement de l'ordre de 10 % en valeur relative ;

– les écarts entre laboratoires sur essais contradictoires sont du même ordre de grandeur.

Du point de vue de l'approche prescriptive contractuelle, la 4^e formule de béton (longrines XF4, XD3 G+S) est conforme (à l'exception du critère « G » : facteur d'espacement des vides d'air supérieur à 200 µm mais proche de 250 µm).

Vis-à-vis de l'approche performantielle, en considérant la classe d'exposition XD3 associée à la classe XF4, les valeurs de porosité accessible à l'eau, de perméabilité au gaz et de coefficient de diffusion apparent des ions Cl⁻ ne satisfont pas aux seuils des Recommandations provisoires du LCPC.

Ce constat doit faire réfléchir aux conséquences des pratiques françaises actuelles de formulation des bétons « G+S » pour les éléments en béton armé exposés aux sels de déverglaçage. En privilégiant la résistance au gel interne et à l'écaillage du matériau béton, on s'expose de façon importante au risque de corrosion des armatures passives internes, bien que les règles de bonne conception conduisent à retenir des valeurs d'enrobage importantes, mais rarement et raisonnablement jamais supérieures à 5 cm.

PERSPECTIVES DE DÉVELOPPEMENT

La mise en œuvre de l'approche performantielle des bétons sur le chantier du viaduc de Volesvres a montré que les principes généraux

des Recommandations provisoires du LCPC étaient adaptés (il est cependant nécessaire d'accumuler de l'expérience) et a permis d'identifier plusieurs pistes pour une future révision du document.

Il est indispensable de fiabiliser les modes opératoires d'essais ; l'annexe des Recommandations provisoires du LCPC est désormais complétée par les normes :

■ NF P18-459 Porosité accessible à l'eau (mars 2010) ;

■ XP P18-463 Essai de perméabilité au gaz (novembre 2011) ;

■ XP P18-462 Coefficient de diffusion apparent des ions chlorures (juin 2012).

Il sera nécessaire de recalculer les incertitudes d'essai, en particulier pour les mesures de résistivité électrique et de perméabilité au gaz.

Il a été identifié comme étant la principale difficulté d'application certaines valeurs trop contraignantes des seuils admissibles de porosité accessible à l'eau en application du mode opératoire des Recommandations provisoires du LCPC.

Ce retour d'expérience est d'ores et déjà pris en compte dans le projet de révision du fascicule 65 du CCTG

relatif à l'exécution des ouvrages en béton.

Il conviendra ainsi d'affiner les seuils proposés par les recommandations en se calant sur davantage de résultats et en visant un optimum économique :

■ influence des modes opératoires d'essais (porosité accessible à l'eau : durée de saturation sous vide) ;

■ influence du type de ciment (CEM I /CEM III)...

Il semble également souhaitable de préciser les conditions de réception (interprétation des épreuves de contrôle) : critères de conformité intégrant une dispersion maximale admissible des résultats au sein d'un même prélèvement, critères applicables aux valeurs individuelles, aux valeurs moyennes.

Pour une bonne adhésion des acteurs, une information préalable sur la mise en œuvre de la démarche d'approche performantielle des bétons s'est révélée indispensable.

L'approche performantielle des bétons doit permettre une « nouvelle donne » pour le couple « entreprise/fournisseur de BPE », dans une logique « gagnant-gagnant ».

Il faudra trouver, collectivement, des pistes pour favoriser l'optimisation technico-économique et environnementale des formules de béton.

Il est indispensable d'anticiper pour assurer la gestion des délais sur chantier (*durée de murissement du béton de 90 jours préalable à la mesure des indicateurs de durabilité*) et la meilleure solution semble être le développement du recours à des formules régionales préqualifiées.

Il est enfin nécessaire de développer le nombre de laboratoires capables de réaliser les essais. ■

Photo : CETE de Lyon – DL Clermont-Ferrand



→ Perméabilité au gaz. Matériel Cembureau.

Photo : CETE de Lyon – DL Autun



→ Porosité à l'eau. Matériel du DL Autun.



Une *ola* en béton

Le 16^e arrondissement de Paris est un quartier résidentiel qui compte trois des plus importants équipements sportifs de la capitale : Roland Garros, le Parc des Princes et le stade Jean-Bouin. Depuis 1925, ce dernier accompagne l'histoire du rugby et plus particulièrement celle du Stade Français. Mais trop vétuste, inadapté, il a été démantelé en 2010 pour laisser place à un équipement plus dense et plus urbain, une architecture expressionniste signée Rudy Ricciotti. Si la vague est à l'honneur à l'IFSTTAR, la forme architecturale adopte ici celle d'une *ola* qui acclamerait un concert de technicité : une structure dissymétrique à double courbure en béton fibré à ultra hautes performances (BFUP) qui constitue à la fois la peau et l'ossature.

Texte : Delphine Désveaux



1



2

→ 1 • Un élégant contraste entre volume bâti et résille délicate. 2 • En couverture, les panneaux triangulés intègrent des occlusions de verre.

Décidément, 2013 aura été l'année Rudy Ricciotti : au premier semestre, une exposition à la Cité de l'Architecture et du Patrimoine, l'inauguration du Mucem, la médaille d'or de l'Académie d'architecture, sans compter les nombreuses invitations sur les ondes. À l'honneur en cette rentrée, le stade Jean Bouin à Paris. Dans le voisinage d'illustres confrères, le puissant Parc des Princes de Roger Taillibert, « *interprétation tonitruante de l'art de construire* » selon Rudy Ricciotti, et un immeuble de Le Corbusier, le nouveau temple du ballon ovale « *cherche davantage la paix*

que l'affrontement » en prenant le contre-pied au moyen d'une architecture « *féminine et maniérée, n'ayant que la peau sur les os* ».

ARCHITECTURE EXPRESSIONNISTE

Il l'a souvent répété. Il le martèle avec un plaisir non dissimulé : Rudy Ricciotti œuvre en faveur d'une architecture expressionniste en rupture avec la modernité et le minimalisme. « *La résille est une alternative à l'opposition caricaturale opaque/transparent, tchador/mini-jupe... l'idée est donc plus le déshabillé architectural, une forme textile qui enveloppe le gabarit réglementaire dont les hauteurs sont toutes différentes sur la périphérie du stade.* »

Moins viril que le Parc des Princes, peut-être, mais plus dense que son prédécesseur, certainement : là où tenaient 12 000 places, dont la moitié étaient à l'air libre, s'étagent aujourd'hui 20 000 places couvertes, des commerces directement accessibles depuis l'espace public, un gymnase, des places de parking dont certaines sont allouées aux riverains, des bureaux... « *Les hauteurs autorisées autour du stade sont*

toutes différentes avec une faible élévation côté ville et une hauteur de 32 m au nord que nous avons mise à profit pour intégrer l'essentiel du programme, rappelle Gérard Le Goff, architecte adjoint du projet. Lorsque l'on relie ces différents gabarits, on obtient cette silhouette mouvante qui affranchit le nouveau stade de la banalité de l'ovale. » Le tout sur la même emprise que l'ancien stade, si contrainte que la typologie organique du projet résulte du règlement d'urbanisme : « *Optimisant les possi-*

bilités du plan d'occupation du sol, l'enveloppe structurelle du stade en est également sa clôture, reprend Christophe Kayser, chef de projet au sein de l'agence Rudy Ricciotti. En intégrant les commerces à l'équipement, nous avons libéré le parvis pour proposer des espaces extérieurs conséquents. »

Rudy Ricciotti évoque régulièrement la « *difficulté d'être* » de l'architecture, question existentielle qu'il transcende en rendant hommage aux « *vertus du travail* » : le béton est pour

Chiffres clés

Enveloppe : 1 300 m³ BFUP

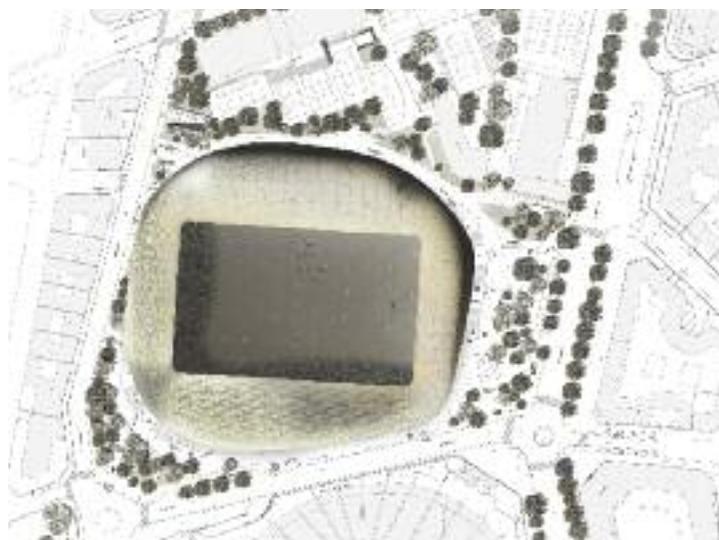
3 348 triangles autoportants :

- longueur maxi : 8,20 m ;
- largeur : 2,40 m ;
- épaisseur : 3,5 cm pour la couverture et 11 cm pour les façades ajourées ;
- poids moyen : 1 t

Panneaux de couverture : 1 596

Panneaux de transition : 333

Résilles de façade : 1 428 dont 73 panneaux avec ouvrant pompier



→ Plan masse.



→ 3 et 4 • Pour les panneaux triangulaires de couverture, la combinaison verre/BFUP a fait l'objet d'un Atex.

lui l'expression concrète d'un dessin conjuguée aux exigences de l'ingénierie structure la plus pointue.

MÉMOIRE DU TRAVAIL

Auteur d'une architecture qu'il qualifie de « *maniériste* », l'architecte du Mucem reconnaît être « *métaphysiquement attiré par la dentelle* », tout comme il aime à se tenir « *près de la bétonnière* ».

« *Je travaille avec le béton, c'est une affaire de croyance, au sens politique et esthétique. Ce qui me touche dans le béton, c'est qu'il s'agit d'un matériau de proximité, non lié à une hégémonie économique. Fait main, produit dans une courte chaîne de fabrication, extrêmement savant, il permet à la fois d'éviter la délocalisation des emplois et de renouveler les savoir-faire locaux. Fabriquer de la mémoire technique in situ est structurant d'un point de vue identitaire. Cela fait sens aujourd'hui. Ce qui m'intéresse, c'est développer et affirmer la mémoire du travail territorialisé par la complexité. La narration architecturale et le dépassement technoscientifique montrent l'intensité de l'effort et fabriquent des métiers. Lorsque l'architecte fait son*

métier, l'intérêt du béton est de permettre la création de projets complexes, pas forcément dans la technologie mais dans l'ouvragerie. Le béton appelle de gros besoins en main d'œuvre et je ne crois pas aux bâtiments construits à partir de produits industriels standardisés. Ce qui m'intéresse, c'est précisément de concevoir des bâtiments qui requièrent de gros besoins en main d'œuvre. Et non l'inverse. Mes projets, qui sont souvent complexes et difficiles à réaliser, sollicitent une gamme complète de compétences, de l'ingénieur à l'ouvrier. Le béton oblige à interroger le sens des choses, l'économie, les méthodes, avec des échanges en profondeur entre concepteurs et entrepreneurs. Les projets utilisant les nouveaux bétons prennent un tour innovant et constituent un défi structurel. Ils interrogent la forme par l'exploration de la matière ; des cas de figure uniques apparaissent et permettent des premières mondiales. Les frontières sont repoussées, liant étroitement ingénierie de haut niveau et vision architecturale. Cette technologie réforme en profondeur et met en crise les certitudes et écritures architecturales. »

Entretien

ROMAIN RICCIOTTI, cofondateur de Lamoureux & Ricciotti Ingénierie, bureau d'études structures

Une prouesse technologique

Quelles difficultés présente cette structure-enveloppe ?

L'enjeu était de réaliser une enveloppe ondulante tridimensionnelle avec des panneaux plans. Cette complexité géométrique, sans aucune régularité mathématique, nous a demandé d'imaginer une solution qui évitait d'avoir à faire plusieurs fois les mêmes gestes constructifs pour l'ossature, la peau architectonique, l'étanchéité et le drainage. D'où la présence des panneaux triangulaires, forme géométrique la mieux adaptée pour épouser les courbes sinusoïdales. L'élaboration de cette résolution mécanique et constructive nous a demandé deux ans et demi de travail.

Qu'apporte la modélisation aux éléments finis en 3D de la structure dissymétrique à double courbure ?

Cela permet d'évaluer les interactions des efforts entre les différentes parties, notamment pour la mise au point des liaisons couverture/charpente et l'amélioration du contreventement de la charpente métallique grâce à l'inclinaison des poutres crémaillères en béton. Nous avons également pu valider certains points d'étude déterminants dans le phasage d'exécution afin de minimiser les efforts exercés sur la couverture du boulevard périphérique, située sous le stade, en phase finale : construction par alternance, création d'appuis élastiques...

Sur quoi portait l'ATEX des panneaux de couverture ?

L'Atex nous a amenés à adopter une approche intéressante car, à partir du moment où l'on innove, il faut penser à sécuriser totalement le projet avant la consultation des entreprises, c'est-à-dire que nous avons proposé des calculs sur une base quasi réglementaire pour pallier le moindre aléa, qu'il relève du financier, du planning ou de la faisabilité. ■



5



6

→ 5 • L'asymétrie et l'ondulation, synonyme de mouvement, résultent des contraintes d'urbanisme. 6 • La capacité d'accueil du stade est passée à 20 000 places.

Entretien

PATRICK MAZZACANE, Directeur d'activité sur le chantier, chez Bonna Sabla, préfabricant des panneaux triangulaires en BFUP

Une réalisation complexe

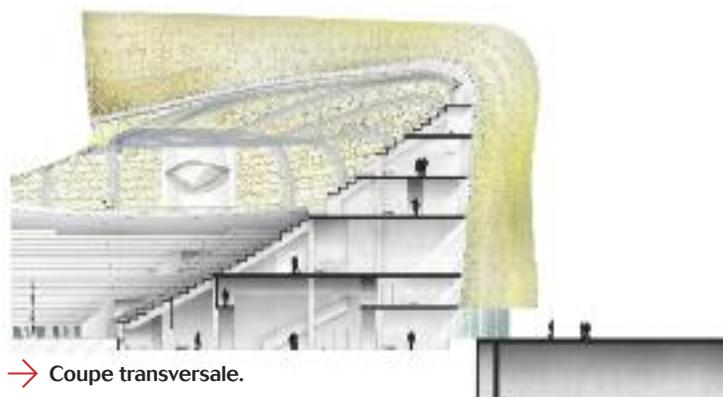
La complexité de la couverture tient au fait qu'il fallait fabriquer près de 1 600 panneaux différents en BFUP en incorporant des pavés de verre. Nous avons d'abord mis au point l'interface verre/BFUP pour protéger les produits verriers lors des différentes phases de réalisation en usine. La phase de traitement thermique était particulièrement délicate avec la mise en étuve des panneaux à une température de 90 °C pendant 48 h. L'autre difficulté consistait à éviter la casse des verres lors des différentes étapes de manutention (transport, pose...) afin d'assurer la pérennité de l'ouvrage in situ. Nous avons donc mis au point un joint spécifique qui répond à ces problèmes. La réalisation des chéneaux latéraux pour récupérer les eaux de pluie au contour de chaque panneau a également requis toute notre attention. Ils ont des formes très fines et particulières, d'où une mise en œuvre complexe. Nous avons fabriqué les panneaux de toiture à l'horizontale dans des moules métalliques autonomes et modulables. Cette technique a été étendue à la fabrication des panneaux de transition. Concernant les 1 428 panneaux résille de la façade, ils sont tous différents, et 73 d'entre eux devaient intégrer un ouvrant pompier ! Compte tenu de leurs formes, le choix du moule s'est porté sur un ensemble « souple » en polyuréthane monté sur support rigide, avec un moulage à l'horizontale. La difficulté majeure a été le réglage dimensionnel unitaire des moules pour suivre le calepinage de l'architecte, notamment pour la fermeture des panneaux lors de l'accroche sur le chantier. Pour l'ensemble de ces fabrications, Bonna Sabla a respecté les recommandations de l'AFGC sur les BFUP avec notamment la mise au point et la vérification par des essais de convenances des différents modes de moulage. ■

« L'ouvrage étant construit pour une durée de vie de 100 ans, nous avons suivi les normes Eurocodes et le Fascicule 65 en termes d'enrobage et nous nous sommes engagés sur des bétons aux propriétés spécifiées (BPS), explique Serge Favre, référent béton de l'entreprise générale Léon Grosse, qui a travaillé sur les formulations des bétons. Pour assurer la même qualité en continu, nous avons choisi de produire l'essentiel des bétons – soit plus de 23 000 m³ – avec deux centrales installées au milieu du stade, permettant à la fois de diminuer les contraintes logistiques en milieu urbain et leurs incidences environnementales. Des centrales extérieures étaient sollicitées lors des grosses opérations de

coulage (planchers et parkings). L'essentiel a été réalisé en béton de classe de résistance C 30/35, avec ponctuellement des parties (vestiaires) en béton de classe de résistance C 25/30. Les poutres crémailières portant les gradins ainsi que certaines structures techniques sont en béton de classe de résistance C 40/50, tandis que toute la partie en porte-à-faux sur le périphérique est une structure composée de béton de classe de résistance C 50/60 ».

LE DÉFI TECHNIQUE VERRE/BFUP

Mais la vraie complexité aura été la réalisation de la structure-enveloppe en béton fibré à ultra hautes perfor-



→ Coupe transversale.



→ 7 • Afin de laisser passer la lumière, les panneaux sont ajourés à 30 % environ. 8 • La maille de béton est à la fois l'enveloppe et l'ossature.

mances (BFUP) qui répondait aux exigences architecturales des bétons architectoniques de couleur claire. Tous ces ouvrages d'enveloppe ont été développés en phase d'exécution par l'agence Rudy Ricciotti. À la fois ossature et peau, façade et couverture étanche, tridimension-

nelle et asymétrique, l'enveloppe est une résille ajourée à plus de 30 % pour laisser passer la lumière. Cette dentelle est constituée de 3 348 panneaux triangulaires en BFUP préfabriqués dans les ateliers de Bonna Sabla. De grandes dimensions et autoporteurs sur toute leur longueur,

ces éléments sont supportés par 74 gigantesques fléaux métalliques. De géométrie assez proche et assurant les mêmes fonctions structurales et architectoniques, les panneaux se répartissent néanmoins en trois familles : en bas, les écailles suspendues ; à mi-hauteur, les panneaux de transition sans vitrage ; enfin, les triangles de couverture. Ces derniers sont tout à fait innovants : pour assurer l'étanchéité de l'enveloppe-toiture, les perforations sont remplies d'inclusions de verre feuilleté (épaisseur : 2 cm). Le verre et le BFUP étant jusqu'alors deux matériaux incompatibles, leur association est donc une première, un véritable défi technique qui a fait l'objet d'une mise au point spécifique par Bonna Sabla et d'une Appréciation Technique d'Expérimentation (Atex). L'innovation réside dans l'utilisation de panneaux de BFUP à faible épaisseur avec des inclusions de verre, l'ensemble devant assurer tout à la fois l'imperméabilité, esthétique, résistance, durabilité. « La multiplication des Atex nous fait progresser, conclut Jean Martin-Saint-Léon, Directeur général Ductal® chez Lafarge. Notre démarche actuelle consiste à déve-

lopper la normalisation de ces produits pour avoir demain une offre de solutions globales pour le secteur de la construction avec nos BFUP. » ■

Photos : Olivier Amsellem ;

1 et 5 – Entreprise Léon Grosse ;

3 – Agence Ricciotti

Béton Fibré à Ultra Hautes Performances (BFUP)

« Nous savons que le potentiel d'innovations et d'applications du BFUP est très conséquent. La réussite de ce projet vient de la motivation de tous les partenaires qui ont apporté leur expertise : le centre de Recherche et Développement de Lafarge ainsi que les ingénieurs structure ont travaillé avec Bonna Sabla sur les formulations et ont validé le mode de coulage du Ductal® FM pour éviter tout risque de fissuration du verre, notamment en augmentant l'anti-retrait. »

Jean Martin-Saint-Léon, Directeur général Ductal® chez Lafarge

« Fruit d'une industrie de pointe et issu d'un savoir-faire français, le BFUP est aux bétons classiques ce que le moteur à réaction est au moteur à hélice. » Rudy Ricciotti, architecte

« Les panneaux triangulaires nervurés exploitent le langage naturel du BFUP : grâce au travail sur la matrice cimentaire – dimension des agrégats et mode d'empilement qui minimisent les vides – les capacités mécaniques du BFUP sont beaucoup plus performantes que les bétons traditionnels tout en exigeant très peu de matière. D'où son empreinte environnementale très favorable. Toute la beauté du geste est là, dans l'utilisation d'un seul matériau constructif, là où une construction traditionnelle nécessiterait quatre composants et autant d'étapes sur le chantier. » Romain Ricciotti, ingénieur structure



Maître d'ouvrage : Ville de Paris, Direction de la Jeunesse et des Sports

Maître d'œuvre : Agence Rudy Ricciotti (Christophe Kayser, Gérard Le Goff, Attila Varga)

Bureau d'études généraliste : Bérim

Bureau d'études structure et enveloppe : Lamoureux et Ricciotti Ingénierie (Attila Varga)

Entreprise : Léon Grosse

Préfabricant : Bonna Sabla

Coût : 90 M€ HT



Une charpente béton pour un hangar à dirigeables

Le hangar pour ballons dirigeables construit en 1917-1919 à Écausseville dans la Manche, marque un jalon remarquable dans l'histoire des équipements aéronautiques et, plus généralement, dans celle de la construction en France. Mis au point par l'ingénieur Henry Lossier (1878-1962), réalisé par l'entreprise Fourré & Rhodes, il est le premier hangar à dirigeables entièrement construit en béton armé. Sa structure relève d'une conception innovante qui se traduit par l'invention de formes inédites issues du nouveau matériau.

Texte : Nicolas Nogue



→ 1 • Vue latérale de la couverture constituée de tuiles en béton armé. 2 • Vue intérieure. Les tuiles reposent sur une charpente en béton armé.

Si les ballons « plus légers que l'air » s'avèrent totalement inadaptés dans les combats sur le front, face à l'artillerie et à l'aviation notamment, ils se révèlent fort précieux pour la surveillance des côtes maritimes au moment où les Allemands lancent leurs premiers sous-marins à l'assaut des forces Alliées. Le ministère de la Marine équipe ainsi de ballons dirigeables ses nouvelles bases aéronavales et édifie plusieurs hangars pour les abriter. Le Centre de dirigeables ouvert à Écausseville fait partie de ce programme à côté d'infrastructures aménagées, dès 1916, au Havre, à Rochefort, Aubagne puis, en 1917, à Cuers-Pierrefeu (près de Toulon), Brest, Ajaccio ainsi qu'en Algérie (Alger, Oran) et en Tunisie (Bizerte)¹. Avant la réalisation du premier projet en béton de Lossier, les hangars pour dirigeables présentent des charpentes en bois ou en métal. Mais à l'heure de l'appel d'offres organisé pour le nouveau Centre d'Écausseville, la rareté et le coût de l'acier

1 – À l'heure où le hangar est construit, ce n'est pas la commune d'Écausseville qui est mentionnée pour localiser le Centre de dirigeables mais la localité de Montebourg.

ruine la compétitivité des charpentes métalliques. Par ailleurs, les ossatures démontables en bois, couvertes de toile, adaptées à la stratégie de la « guerre de mouvement » ne conviennent plus à l'équipement pérenne des bases maritimes. Dès lors, le faible coût et les performances du béton armé imposent son emploi dans la construction de vastes édifices voûtés.

UNE COUVERTURE EN FINE MAILLE DE BÉTON ARMÉ

Le hangar d'Écausseville abrite un seul ballon. Lors du concours, le cahier des charges établi par le ministère de la Marine impose une longueur de 150 m et, comme gabarit du vide, un rectangle de 16 m de hauteur sur 24 m de largeur, surmonté d'un demi-cercle de 12 m de rayon. Henry Lossier enveloppe ce profil au moyen, d'une part, de deux pylônes rigides écartés de 24,50 m et hauts de 18 m et, d'autre part, d'arcs de voûte à trois articulations, fixés au sommet des pylônes. Les arcs présentent une flèche de 12,20 m ; ils dépassent le dessus du gabarit d'environ 3 m, afin de loger sous la rotule de clef une passerelle de

manœuvre. Les pylônes, devant être particulièrement rigides, ont une forme triangulaire en élévation qui offre un empattement de 8 m au niveau des semelles de fondation. La couverture épouse le profil extérieur ; elle suit la ligne de la voûte et de la membrure inclinée de sorte que l'ouvrage mesure en définitive sur sa section transversale, 31 m de hauteur totale et 40,50 m de largeur au pied.

L'ossature en béton armé du hangar n'imité pas la configuration traditionnelle des charpentes de bois ou de métal. L'adoption d'une couverture en berceau conduit Lossier à modifier profondément le système constructif à la mesure des propriétés du nouveau matériau. L'ingénieur se débarrasse de toutes les pièces secondaires des charpentes courantes pour ne conserver qu'un « simple » maillage orthogonal de pannes et de fermes. Il parvient à ce tour de force grâce à la courbure « en chaînette » de la voûte. Ses arcs épousent le profil, quasiment parabolique, d'une courbe d'équilibre sous les charges prévues. Elle se suffit dès lors à elle-même sans adjonction de treillis triangulé. Seules les pannes relient

les arcs entre eux pour constituer un damier épuré que recouvrent, sur toute la surface externe de l'ouvrage, de grandes tuiles en ciment armé préfabriquées, les fameuses « tuiles Minard », du nom de l'ingénieur des Ponts et Chaussées qui les inventa. Les fermes de l'ossature sont coffrées et coulées en place. Elles sont reliées par les pannes qui sont préfabriquées, les armatures dépassant à nu pour être noyées dans le béton frais de la ferme. Ainsi, la trame constituée par les pannes et les fermes travaille *in fine* comme un ensemble monolithe plissé.

UNE STRUCTURE INNOVANTE

L'invention dont fait preuve Lossier pour les hypothèses de calcul et leur résolution fait écho à l'innovation formelle du projet. L'ingénieur doit en effet se plier aux contraintes des charges et surcharges, notamment celles dues au vent et à la neige qui deviennent très importantes pour un ouvrage de ces dimensions, tout en modélisant une configuration structurelle inédite et particulièrement légère. Les hypothèses que l'ingénieur pose pour concilier l'ensemble



3

→ 3 • Vue du volume intérieur de 150 m de longueur et 40 m de hauteur.

de ces contraintes dans cette solution structurelle entièrement en béton armé ont fait date dans l'histoire de la construction en France, à tel point qu'elles sont publiées par la presse spécialisée, en particulier dans *Le Génie Civil* (1919), et rapidement reprises dans l'un des meilleurs cours de béton armé du moment, celui de Georges Espitallier à l'École Spéciale des Travaux Publics (ESTP).

COQUES VERSUS CHARPENTES

En 1917, à l'heure où Lossier conçoit son projet pour Écausseville, seuls les hangars d'aviation en voiles de béton cylindriques de 50 m de portée, réalisés à partir de 1916 sur la base d'Istres par l'ingénieur Eugène Freyssinet et les Établissements Limousin, proposent une alternative moderne quant à l'emploi innovant du nouveau matériau. Pendant quelques années les deux systèmes constructifs vont se faire concurrence, chaque concepteur défendant dans ses publications les avantages de sa solution structurelle.

Le principal article présentant le hangar d'Écausseville cite ainsi en référence les ouvrages en coque de

Freyssinet construits à Istres pour argumenter en faveur de la conception en charpente mise en œuvre à Écausseville². L'auteur de cet article, qui rapporte les convictions de Lossier, précise que « l'absence de *hourdis intervenant dans la résistance à la compression a permis d'augmenter les dimensions transversales des arcs* ». Par ailleurs, « *les éléments de couverture étant moins lourds qu'un hourdis continu, on peut estimer que les charges sont en définitive moins grandes. Les pannes et les tuiles peuvent être moulées à terre avant mise en place, ce qui dispense d'un cintrage compliqué et coûteux* ». Pour Lossier, il est clair que le nouveau type de charpente en béton armé qu'il met en œuvre est plus économique et performant que la solution concurrente, en voile cintré monolithe, proposée par Freyssinet. En fait, la structure de l'ingénieur offre à la fois les atouts d'une charpente (préfabrication des tuiles et

2 – G. Espitallier, « Les voûtes en béton armé dans la couverture des bâtiments. Le hangar de Montebourg pour ballon dirigeable ». *Le Génie Civil*, septembre 1919, n°10, pp. 213-218.

En raison de la modernité de son système constructif, le hangar d'Écausseville a été classé Monument Historique en 2003. Aujourd'hui, le béton armé employé pour la structure et les tuiles de couverture est dégradé et la réhabilitation de l'ouvrage s'impose. Malheureusement, la municipalité manque de fonds pour assurer la conservation pérenne du précieux édifice.

pannes, simplicité de mise en œuvre) et ceux d'une structure monolithe (résistance aux charges). Dans un premier temps, les arguments de Lossier semblent avoir convaincu la maîtrise d'ouvrage puisque l'ingénieur remporte en 1920 l'appel d'offres pour la construction de cinq hangars d'aviation sur l'aérodrome du Bourget. Bâties en 1920-1922, les ouvrages comportent une couverture en berceau de 50 m de portée, directement inspirée du projet d'Écausseville. Par ailleurs, en 1918, le ministère de la Marine confie à l'ingénieur la réalisation d'un gigantesque hangar pour deux dirigeables, à Luçon en Vendée. L'ouvrage constitue alors le plus grand hangar du monde entièrement en béton armé. Long de 220 m, large de 110 m et haut de 56 m, sa structure reprend également la solution en voûte

d'Écausseville, en l'améliorant et en la simplifiant. L'ingénieur conçoit une charpente à fermes et pannes au profil parabolique, uniquement constituées de voussoirs préfabriqués et reposant à même le sol. Malheureusement, le projet ne sera pas réalisé. De surcroît, après ses réalisations au Bourget en 1922, Lossier n'aura plus l'occasion d'appliquer sa conception novatrice qui va être supplantée par celle en voile monolithe de béton défendue par Freyssinet.

Dans l'article qu'il rédige dans *Le Génie Civil* à l'occasion de la livraison des deux immenses hangars qu'il bâtit à Orly en 1921-1923, Freyssinet explique les raisons qui l'ont conduit à rejeter la configuration en charpente pour opter en faveur de la solution en coque parabolique plissée³. Il détaille ses arguments dans un long chapitre intitulé « Élimination des systèmes fondés sur l'emploi



→ 4 et 5 • Détail des piédroits fixes triangulés sur lesquels reposent les arcs de voûtes à trois articulations.

d'éléments moulés par avance». Freyssinet vise alors directement les projets de Lossier, le hangar d'Écausseville et celui pressenti pour la base de Luçon. Après avoir montré les avantages techniques, fonctionnels et économiques qui fondent, selon lui, la supériorité de son « système monolithe », il conclut : « en résumé, le système par montage d'éléments préparés d'avance, nous a paru a priori inférieur au système monolithe. La suite des événements nous a donné raison. Des constructions par éléments moulés ont en effet été proposées, mais à des prix supérieurs en moyenne à ceux de notre construction monolithe. »

Lossier avait-il participé à l'appel d'offres contre Freyssinet pour la réalisation des hangars d'Orly ? On l'ignore. Toujours est-il que Freyssinet semble avoir durablement persuadé la maîtrise d'ouvrage publique des avantages de la solution en voile mince : elle s'impose après 1923 et dans les années 30. Lossier lui-

même se voit contraint de l'adopter pour le hangar à hydravions qu'il édifie en 1939-1940 sur la base de Biscarrosse pour lequel il met au point deux coques en berceau de 100 m de portée chacune.

DEUX REPRÉSENTATIONS DE LA MODERNITÉ

De nos jours, il apparaît clairement que la solution prônée par Lossier fut écartée alors qu'elle présentait d'indéniables avantages économiques, techniques et fonctionnels. Lossier le souligne dès 1936, dans le numéro spécial de la revue *Architecture d'aujourd'hui*⁴ consacré à l'architecture industrielle. Il conclut par ces mots son article dédié aux « Évolutions et tendances actuelles des couvertures et des ponts en béton armé de grande portée » : « Toutes les innovations actuellement proposées rencontreront-elles un égal succès dans l'avenir ? Je ne le pense pas. La dure épreuve du temps et l'expérience conduiront certainement à opérer

une sélection dont certains résultats peuvent sembler apparaître dès aujourd'hui. Ce serait toutefois commettre une erreur, à tous égards, de porter un jugement prématuré sur une conception, quelle qu'elle soit, sans lui avoir accordé le délai nécessaire à son adaptation et à sa mise au point normales. Dans les limites où la sécurité reste assurée, il convient d'encourager au contraire, par tous les moyens possibles, cette course vers le progrès dans laquelle les constructeurs français tiennent une place incontestablement prépondérante. » L'ingénieur regrette ici implicitement le sort qui fut réservé à son système de couverture expérimenté à Écausseville, d'autant que, avec le recul dont on dispose aujourd'hui, la dimension moderne et historique de la charpente « à la Lossier » se trouve clairement avérée.

Sa solution constructive s'inscrivait, il est vrai, dans une tradition séculaire qu'elle renouvelait à la suite des innovations apportées par Philibert Delorme, Anatole de Baudot puis Henri Deneux qui reconstruit en 1927, avec Bernard Laffaille comme ingénieur-conseil, la charpente de la cathédrale de Reims, à l'aide d'élé-

ments préfabriqués, manportables et assemblés, en béton armé. Freyssinet proposait quant à lui un concept en totale rupture avec l'histoire constructive, celui du voile autoportant travaillant comme une structure tridimensionnelle monolithe. Les acteurs de son temps lui auront donné l'avantage pour des raisons purement idéologiques. Car derrière les deux systèmes concurrents, ce sont bien deux représentations, deux modèles différents de la modernité qui se sont affrontés. ■

Photos : Association des amis du hangar d'Écausseville

3 – E. Freyssinet, « Hangars à dirigeables en ciment armé en construction à l'aéroport de Villeneuve-Orly ». *Le Génie Civil*, septembre 1923, n° 12, pp. 265-273.

4 – H. Lossier, « Évolutions et tendances actuelles des couvertures et des ponts en béton armé de grande portée ». *Architecture d'aujourd'hui*, n° 11, novembre 1936, pp. 24-25.



Concepteur : Henri Lossier (1878-1962), ingénieur

Maître d'ouvrage : ministère de la Marine

Entreprise de construction : Fourré & Rhodes



JACQUES MATHIVAT

Hommage à Jacques Mathivat

Patrice Kirschner

Cogérant de SECOA

Éminente personnalité du monde des ouvrages d'art, Monsieur Jacques Mathivat est décédé le 13 novembre 2012, à l'âge de 80 ans. Tout au long de sa brillante carrière d'ingénieur, il a développé des concepts novateurs qui sont aujourd'hui devenus des classiques. Né en 1932, il est diplômé de l'École Spéciale des Travaux Publics et de l'École Nationale Supérieure des Pétroles et Moteurs. En 1962, il intègre l'entreprise Campenon Bernard.

CONSTRUIRE ET INNOVER

Jacques Mathivat étudie alors son premier ouvrage, le pont de Choisy-le-Roi sur la Seine. Modeste par sa taille, cet ouvrage s'avère être un prototype des futurs ponts construits par encorbellement de voussoirs préfabriqués à joints conjugués collés. Cette réalisation lui permet également de prouver l'intérêt des piles à voiles souples pour assurer la stabilité des tabliers pendant leur construction par encorbellement. Il réalise ensuite les études du viaduc d'Oléron qui est le premier ouvrage

construit par encorbellement de voussoirs préfabriqués mis en place à l'aide d'une poutre de lancement. En 1972, Jacques Mathivat est nommé directeur des études de Campenon Bernard et participe à ce titre avec son équipe, comprenant notamment Jacques Combault, Hubert Baur, Michel Levesque et Michel Placidi, à la conception et à la réalisation des nombreux ouvrages exécutés par l'entreprise au cours de cette décennie. Dès cette époque, Jacques Mathivat s'est beaucoup investi dans l'optimisation des structures en y intégrant les méthodes de construction dès la conception. De nombreuses solutions innovantes, sur lesquelles il a travaillé et qu'il a développées, ont par la suite été reprises par d'autres concepteurs. Parmi les principales innovations qu'il a largement contribué à mettre au point, on peut retenir les piles à doubles voiles souples, la conception des joints entre voussoirs, la méthode de construction à l'avancement à l'aide d'un mât de haubanage provisoire, l'allègement des sections

transversales par la nervuration du hourdis supérieur, l'allègement des structures par le remplacement des âmes en béton par des âmes métalliques plissées.

ALLÉGER LES PONTS

En 1978, Jacques Mathivat fonde le bureau d'études SECOA dont il a assuré la gérance jusqu'en 1988. Avec Bertrand Lenoir et Patrice Kirschner, il poursuit ses recherches sur l'optimisation des tabliers en béton précontraint. Ses analyses pragmatiques des inconvénients et des difficultés de réalisation des techniques innovantes de l'époque (âmes en bracons à triangulation spatiale, âmes métalliques plissées...) le conduisent à imaginer une solution d'allègement des sections transversales en les constituant de panneaux triangulaires, pointes en bas, appelée « ponts à âmes béton évidées ».

Fervent partisan de la précontrainte extérieure promue par Michel Virlogeux, Jacques Mathivat en a imaginé l'extension consistant à augmenter l'excentrement des câbles de pré-

contrainte sur appuis jusqu'à les placer au-dessus de la fibre supérieure du tablier. Cette solution est appelée « ponts à précontrainte extradossée ». Jacques Mathivat est l'auteur du livre *Construction par encorbellement des ponts en béton précontraint* qui fait référence. Il a aussi enseigné à l'École Spéciale des Travaux Publics, au Centre des Hautes Études de la Construction et à l'École Nationale des Ponts et Chaussées. Jacques Mathivat s'est également beaucoup investi au service de la profession des Travaux Publics en s'engageant pleinement au sein du SNBATI, de la FNTP et en assurant la présidence de l'AFC puis de l'AFGC entre 1989 et 1997. Élevé au grade de chevalier de la Légion d'honneur en 2001, il a reçu le prix Albert-Caquot en 2002. Jacques Mathivat laisse le souvenir d'un grand ingénieur et d'un homme d'une honnêteté sans faille, ce qui lui a valu le respect et l'estime de tous. Ceux qui l'ont connu de près garderont de lui le souvenir d'un être exceptionnel, d'un grand charisme et d'une extrême gentillesse. ■



1



2



3



4



5

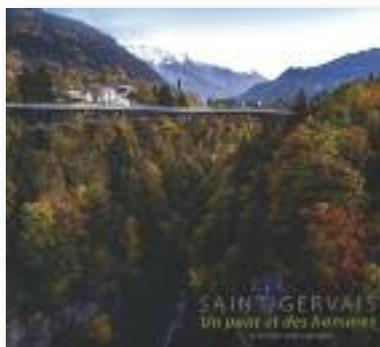
→ 1 • Pont de Choisy-le-Roi – Photo : Jacques Mossot. 2 • Viaduc du Rioulong sur l'autoroute A75 – Photo : Jacques Mossot. 3 • Pont du Morbihan – Photo : Milegue. 4 • Viaduc d'Oléron – Photo : Mitichou. 5 • Pont de la Ravine des Trois Bassins (exemple de pont utilisant la technique de la précontrainte extradossée) – Conception : Arcadis-Cotéba-Berlottier, île de la Réunion – Photo : Philippe Servant.



**LES ÉDIFICES RELIGIEUX
DU XX^e SIÈCLE EN ÎLE-DE-FRANCE**
75 lieux de culte
« patrimoine du xx^e siècle »

Au cours du xx^e siècle, plus de 400 lieux de culte ont été créés en Île-de-France, contribuant à la naissance et au développement de nouveaux quartiers. Le label « patrimoine du xx^e siècle » permet de signaler au public les réalisations les plus remarquables. Soixante quinze édifices religieux, de conception ou d'architecture exceptionnelle, bâtis entre 1905 et 2000, se sont vus attribuer ce label par le ministère de la Culture et de la Communication. Cet ouvrage présente ces lieux de culte et invite à les découvrir. ■

Beaux Arts Éditions



**SAINT-GERVAIS, UN PONT
ET DES HOMMES**

**Delphine Désveaux, Gabriel Grand-
jacques, Franck Lecoutre**

Ce livre retrace la genèse et l'histoire de la réalisation de l'ouvrage de contournement de la commune de Saint-Gervais-les-Bains. Il met en lumière un chantier spectaculaire mais également les décisions politiques, l'aventure humaine et les innovations techniques qui ont été nécessaires à l'aboutissement de ce projet exceptionnel. Grâce à l'élégance et à la finesse de sa structure, le nouveau pont, qui domine l'impressionnante gorge du Bonnant, s'inscrit harmonieusement dans le paysage sans dénaturer le panorama de la chaîne des Aravis et du désert de Platé. ■

Éditions Atelier Esope



L'ÎLE AUX OUVRAGES
La Réunion

**Sous la direction
de Jean-Jacques Gueguen**

Ce recueil consacré aux ouvrages d'art de l'île de la Réunion souligne et met en valeur toute la richesse de ce patrimoine. Il témoigne également du savoir-faire des concepteurs, des bureaux d'études et des entreprises qui ont participé à la construction de ces ouvrages. À travers quelques exemples de réalisations contemporaines sont présentées et décrites les solutions techniques retenues pour répondre à des problématiques complexes de franchissement d'obstacles naturels, nombreux sur l'île de la Réunion. ■

Publications

Les collections « Solutions béton » de Cimbéton



La norme NF EN 13670
Exécution des structures en béton

Cette norme vient compléter le corpus normatif permettant de maîtriser la formulation et la qualité des bétons pour la réalisation d'ouvrages en béton pérennes. Ce document présente les principales nouveautés qui sont introduites, telles que la notion de classes de cure du béton et celle de classes d'exécution. ■

Réf. SB-OA 2012-1.



**Le béton : un allié de choix pour des
ouvrages de Génie Civil plus durables**

Aménager toujours plus le territoire tout en relevant moins de ressources est un enjeu essentiel du Génie Civil. Le béton y prend toute sa part : issu de ressources de proximité, résistant et sans cesse en évolution pour plus de performances et de durabilité, il s'inscrit naturellement dans tous les types d'aménagements. ■

Réf. SB-OA 2012-2.



**Carbonatation des bétons
et Piégeage du CO₂**

La carbonatation est indissociable du matériau béton. Les conséquences sont aujourd'hui parfaitement maîtrisées et on cherche désormais à optimiser les effets de ce phénomène, en particulier piéger le CO₂ et valoriser les granulats recyclés issus de la démolition des bétons. ■

Réf. SB-OA 2012-3.



LE PONT
JACQUES CHABAN-DELMAS
Un pont levant urbain

Delphine Désveaux

Ce nouveau pont sur la Garonne relie les quartiers de Bacalan et de la Bastide à Bordeaux. Il permet une liaison urbaine longue de 575 m qui assure la cohabitation sécurisée entre piétons, cyclistes, transports en commun et véhicules particuliers. La circulation fluviale et maritime est permise par une travée levante portée par quatre pylônes de 77 m de hauteur. Ce livre présente la genèse du pont Jacques Chaban-Delmas en donnant la parole aux différents intervenants. Les aspects techniques de l'ouvrage d'art, l'avancement du chantier et le résultat architectural de cette entreprise sont rendus grâce à une iconographie riche et diversifiée. ■

Editions Archibooks



LA RÉPUBLIQUE
ET EUGÈNE FREYSSINET
Patrimoine et Avenir de la France

Franck Guyon

Comme nous le précise son auteur dans son avant-propos : « *L'objet de ce livre est de croiser la référence à la République et la référence à l'éminent bâtisseur que fut Eugène Freyssinet, pour apprécier la richesse du patrimoine de la France et aussi pour répondre aux questions que nous pose le futur... La morale d'Eugène Freyssinet est éminemment républicaine. Il croyait comme les élites de la Troisième République que le talent impose des devoirs envers la collectivité et que le véritable progrès est celui qui bénéficie à tous les citoyens...* ». ■

Association Eugène Freyssinet

Agenda

EXPOSITION AUGUSTE PERRET
PALAIS D'IÉNA

Novembre 2013 – Février 2014

L'œuvre d'Auguste Perret est l'une des plus importantes pour l'architecture du xx^e siècle et la construction en béton armé. Le CESE (Conseil Économique Social et Environnemental), dans le cadre d'une opération de mécénat de la fondation Prada et en partenariat avec le SNBPE, lui consacre une exposition exceptionnelle. Elle présentera, dans la salle hypostyle du palais d'Iéna, huit édifices majeurs de son œuvre : l'immeuble de la rue Franklin à Paris, le théâtre des Champs-Élysées, l'église du Raincy, la salle Cortot, le Mobilier national, le Palais d'Iéna, l'église Saint-Joseph, l'hôtel de Ville du Havre. Cette exposition sera accompagnée d'un agenda culturel important et accueillera de nombreux événements, en particulier des conférences sur le matériau béton à destination des professionnels et des étudiants. ■

Palais d'Iéna – 9, Place d'Iéna, 75016 Paris
(métro Iéna ou Trocadéro).

Contact : p.guiraud@cimbeton.net

JOURNÉES TECHNIQUES
APPROCHE PERFORMANTIELLE
DES BÉTONS

Lille le 16 octobre 2013

Aix-en-Provence le 28 novembre 2013

L'approche performantielle est basée sur les propriétés fondamentales du matériau, par le biais d'indicateurs de durabilité et sur la spécification de critères performantiels associés à ces indicateurs. L'AFGC, Cimbéton et le SNBPE, en partenariat avec les COTITA et les CETE en région, proposent des journées d'information pour mieux comprendre ces enjeux, afin de concevoir, construire et gérer des structures durables en béton, en cohérence avec le cadre normatif européen. ■

Contact : p.guiraud@cimbeton.net

Site internet

PLANÈTE TP

Le site Planète TP fait découvrir au grand public les Travaux Publics sous différents angles : métiers, personnalités, ouvrages réalisés, techniques et moyens utilisés. Il met l'accent sur l'action pédagogique à destination des collèges afin de montrer les nombreux métiers au travers des grandes réalisations d'ouvrages d'art ou d'infrastructures. ■

www.planete-tp.com



L'espace souterrain, une ressource au service de la ville durable

La densification urbaine et la recherche d'un modèle économe en ressources conduisent à imaginer une ville compacte, prenant racine dans un sous-sol riche de nombreuses possibilités. Espace, ressources, les potentiels des sous-sols apportent des réponses pour une ville durable et responsable vis-à-vis des générations futures. ■

Réf. SB-OA 2013-2.



Collection technique de Cimbéton
Recueil des publications
Béton et Génie Civil – Édition 2013

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 et innovantes, économiquement viables, pérennes et qui répondent aux exigences du Développement Durable et aux défis des concepteurs et des architectes. ■

Une halle à reconquérir

Patrick Guiraud

Directeur Délégué Génie Civil, Cimbéton

La halle du marché de Fontainebleau, chef d'œuvre de Nicolas Esquillan est fortement menacée de destruction. Encore un ouvrage, témoignage de l'excellence de la France en matière de Génie Civil qui pourrait disparaître. Des historiens, des architectes du patrimoine, des universitaires et des ingénieurs sont mobilisés pour la sauver et la protéger au titre des monuments historiques. Votre soutien serait précieux.

Nicolas Esquillan (1902-1989) est né à Fontainebleau. Diplômé de l'École nationale supérieure des arts et métiers, il est engagé au sein de l'entreprise Boussiron en 1923. Il y fera toute sa carrière. Parmi ses réalisations, il a battu 6 records du monde. Nicolas Esquillan est le concepteur du célèbre Centre des Nouvelles Industries et Technologies (CNIT). La voûte en double coque nervurée en béton à courbures parallèles qui assure à la fois le rôle de structure porteuse et de couverture s'inscrit dans un triangle équilatéral de 218 m de côté. Elle détient

toujours le record du monde de la plus grande surface portée par point d'appui (7 500 m²).

La démarche de conception de Nicolas Esquillan, comme celle d'illustres ingénieurs tels qu'Eugène Freyssinet, était basée sur une vision intuitive du comportement global de l'ouvrage et du cheminement des efforts en intégrant dans la réflexion la logique constructive. Le calcul permettant ensuite de vérifier et valider l'intuition.

UNE PROUESSE TECHNIQUE

En février 1941, l'entreprise Boussiron remporte l'appel d'offres pour la construction de la halle du marché au centre de Fontainebleau, avec une structure aménagée par Nicolas Esquillan à partir du projet de l'architecte Henri Bard (1892-1951). L'ouvrage est une audacieuse coque mince nervurée en béton, ajourée de pavés de verre (de Saint-Gobain) et ourlée d'un auvent continu (64 m de longueur et 24 m de largeur) qui repose sur un jeu de 22 piles tronconiques.

En parfait état de conservation, elle est caractéristique par la minceur de

sa voûte et l'élégance de ses formes et par la transparence et l'éclairage naturel offerts par ses pavés de verre.

EN INSTANCE DE CLASSEMENT

Le projet de réaménagement de la place de la République retenue par le conseil municipal prévoit la démolition complète de la halle et la construction d'un parking souterrain. La halle a échappé de justesse à la démolition le 5 mars 2013. Elle fait l'objet depuis d'une instance de classement adoptée par la ministre de la Culture et de la Communication Aurélie Filipetti, qui instaure un délai de réflexion d'un an pour décider de son éventuelle inscription ou classement au titre des monuments historiques. La mesure d'urgence adoptée par Aurélie Filipetti résulte de l'unanimité et de la virulence des appels en faveur du sauvetage de la halle émanant d'associations de commerçants et de riverains, de professionnels (architectes, ingénieurs, professeurs, historiens) et de spécialistes français et étrangers.

Le débat sur la valeur patrimoniale de la halle est ouvert. Une table ronde intitulée «*Quel projet pour la Halle Esquillan ?*» a été organisée le 20 avril à Fontainebleau. Elle a permis, en regroupant plus d'une centaine de participants professionnels, riverains, bellifontains, de débattre en toute connaissance de cause sur le bien-fondé de la valeur patrimoniale de cet ouvrage d'un enfant du pays, de porter le débat sur la place publique et de reconsidérer l'intérêt de la halle et son potentiel de réutilisation.

La destruction de cette halle surnommée désormais Halle Esquillan scandalise les professionnels ingénieurs, historiens et spécialistes du patrimoine.

Audacieuse et utile à ses usagers, elle mérite de devenir, grâce à un projet respectueux de son existence, le point d'ancrage du renouveau de l'aménagement urbain du centre historique de Fontainebleau et le pôle d'attraction d'un vrai cœur de ville rajeuni. ■

Photos : Patrick Guiraud et DR



GRANDS CHANTIERS AUTOUR DU MONDE



1

→ Pont de Zhong Sheng Da Dao, de la ville nouvelle Sino Singapour de Tianjin, Chine. Ingénieur Marc Mimram. Photos : 1 et 2 DR.



2



3



4

→ Le Mucem, Marseille – Bouches-du-Rhône (13). Architecte Rudy Ricciotti. Photos : 3 et 4 Lisa Ricciotti.



5

→ La passerelle Eugène Freyssinet, Objat – Corrèze (19), conçue par l'entreprise Composants précontraints à Brive. Photo : 5 Patrick Guiraud.

En 4^e de couverture : Stade Jean-Bouin, Paris. • Photo : Olivier Amsellem →

