

CONSTRUCTION

ANNUEL OUVRAGES D'ART 2010

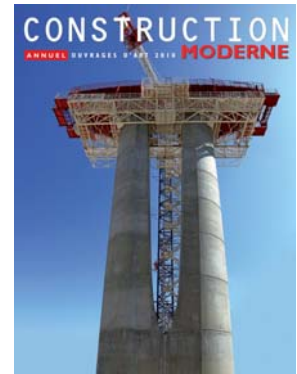
MODERNE



éditorial

On voyait jadis, dans les ponts et les chaussées, autant de façons de relier les hommes entre eux et d'en favoriser les échanges. Tracer un chemin augmentait la prospérité des villages qu'il traversait. On venait de plus loin au marché, à l'école ou à l'église. Hier encore, la route carrossable permettait un accès plus rapide à l'hôpital, donc à la santé, et aux loisirs : la découverte des congés payés, en 1936, se fit en vélo, au fil des routes. Or il s'est produit, avec le Grenelle, un curieux basculement du regard porté sur les territoires. Les infrastructures de transport sont désormais perçues comme une fragmentation de l'espace, réductrice de la biodiversité ordinaire. Ce n'est pas faux : les voies ferrées, les voies navigables, les rivières même, tout comme les routes, sont autant d'obstacles au cheminement terrestre de nombreux animaux de nos campagnes. Faut-il choisir entre eux et nous ? Heureusement pas. Je ne doute pas que l'ingéniosité de nos ouvrages d'art apportera des réponses acceptables par les uns et les autres. Mais au prix d'un surcoût, qui sera en l'occurrence la valeur qu'on accorde, en pratique, à cette biodiversité ordinaire que l'année 2010 a mis en exergue.

DOMINIQUE HOESTLANDT
Ancien président de l'UNICEM



>> Couverture
Viaduc de la Côtière, Rhône-Alpes.
Photo: Hubert Canet, Balloïde-Photo.

CIM *béton*
CENTRE D'INFORMATION SUR
LE CIMENT ET SES APPLICATIONS

7, place de La Défense • 92974 Paris-La-Défense Cedex
Tél. : 01 55 23 01 00 • Fax : 01 55 23 01 10
• E-mail : centrinfo@cimbeton.net •
• Internet : www.infociments.fr

DIRECTEUR DE LA PUBLICATION: Anne Bernard-Gély • DIRECTEUR DE LA RÉDACTION: François L'Huillier • RÉDACTEUR EN CHEF: Norbert Laurent • CONSEILLER TECHNIQUE: Patrick Guiraud •
SECRÉTAIRE DE RÉDACTION: Clothilde Laute • CONCEPTION, RÉDACTION ET RÉALISATION: EDITIONS PC 35, Quai André Citroën – 75015 Paris, Philippe Chauveau, Sophie Chauvin • Pour tout
renseignement concernant la rédaction, tél. : 01 55 23 01 00 • La revue *Construction moderne* est consultable sur www.infociments.fr • Nous vous remercions d'adresser vos demandes d'abonnement
par fax au 01 55 23 01 10 ou par courriel à centrinfo@cimbeton.net •

Sommaire • Numéro annuel Ouvrages d'art • édition 2010



>> PAGE 01 > Manche
EPR de Flamanville



>> PAGE 06 > Aquitaine
Pau-Langon - A 65



>> PAGE 11 > Corse
Barrage du Rizzanese



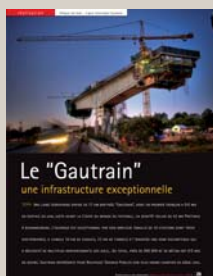
>> PAGE 15 > Guide pour le
choix des classes d'exposition
des ouvrages d'art en béton



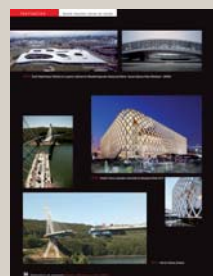
>> PAGE 23 > Alsace
A 352



>> PAGE 26 > Rhône-Alpes
Viaduc de la Côtière



>> PAGE 29 > Afrique du Sud
Ligne ferroviaire Gautrain



>> PAGE 34 > Réalisations
Chantiers autour du monde



>> PAGE 36 > Bloc-notes



Sûreté et compacité pour le dernier réacteur nucléaire

>>> 20 ANS APRÈS LA CONSTRUCTION DE DEUX PREMIÈRES TRANCHES, LA CENTRALE NUCLÉAIRE

DE FLAMANVILLE (MANCHE) VOIT ÉMERGER UNE TROISIÈME GÉNÉRATION DE RÉACTEURS, L'EPR

(EUROPEAN PRESSURIZED REACTOR), QUI BÉNÉFICIE D'UN RETOUR D'EXPÉRIENCE ET D'AMÉLIORATIONS

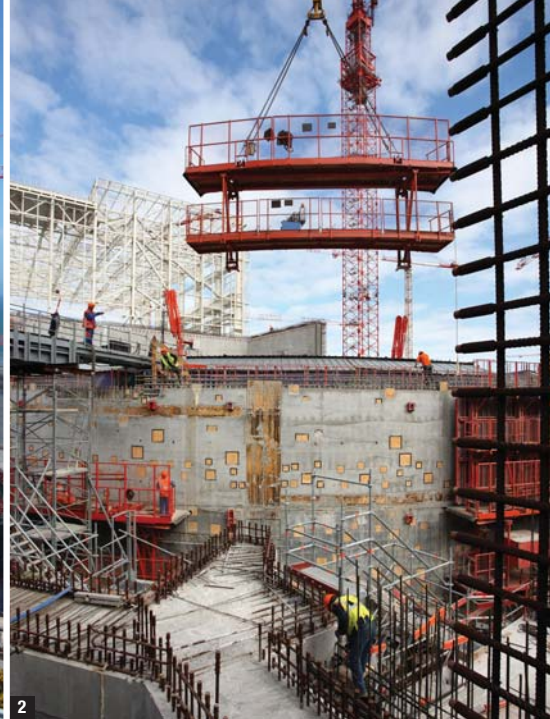
SUBSTANTIELLES EN TERMES DE SÛRETÉ. SA MISE EN SERVICE EST PRÉVUE POUR 2012,

AVEC UNE PERSPECTIVE DE PRODUCTION EN 2013. TOUT EN AFFIRMANT SES LIGNES CONTEMPORAINES,

LE NOUVEL OUVRAGE S'INTÈGRE DANS LA CONTINUITÉ DE L'ENSEMBLE EXISTANT.



1



2

Plus puissant, plus compact et plus complexe que ses grandes sœurs, l'EPR (1 650 MW) résulte d'une collaboration franco-allemande qui tient compte du retour d'expérience, soit 1 300 années d'exploitation cumulées, en France et en Allemagne", explique Philippe Leigné, directeur de l'Aménagement de Flamanville 3. Prévu pour remplacer, le moment venu, les centrales existantes, et conçu pour 60 ans d'exploitation, l'EPR est une tête de série qui demande des adaptations. Obéissant à des objectifs de sûreté renforcés, il présente plusieurs améliorations pour réduire la probabilité d'occurrence d'un accident grave et en limiter les conséquences ainsi que pour renforcer la protection contre les agressions internes et externes.

Tout d'abord, quatre systèmes de sauvegarde de l'installation (au lieu de deux) sont présents autour du bâtiment réacteur.

chiffres clés

- Terrassement total : 700 000 m³
- Béton : 450 000 m³
- Armatures passives : 72 000 t
- Armatures de précontrainte : 2 100 t

Une protection renforcée de type "coque d'avion" a été installée autour du bâtiment réacteur, du bâtiment combustible, de la salle de commandes et de deux des quatre bâtiments de sauvegarde. Cette double enceinte autour du bâtiment réacteur est réalisée en Béton à Hautes Performances. Elle se compose d'un voile externe et d'un voile interne en béton précontraint, tapissé d'un liner métallique. Ces deux parois sont séparées par un vide de 1,80 m. Le tout assure l'étanchéité et résiste aux agressions externes. Enfin, confiné sous le réacteur, un bassin en "béton sacrificiel" (formule brevetée) récupère le combustible fondu appelé corium (1 200°C). En cas d'accident, il réduit la quantité de radioactivité et accélère le confinement du cœur.

Les architectes de l'atome

S'il est hors de propos de raconter par le menu l'histoire architecturale du nucléaire français, il convient néanmoins de rappeler que la construction des douze tranches nucléaires après le choc pétrolier de 1973 fit l'objet d'un Plan Architecture lancé par EDF. Pour développer une image rassurante du nucléaire, Michel Hug, alors directeur de l'Équipement,

fit appel en 1974 à l'architecte Claude Parent. Jusqu'à alors, les architectes intervenaient surtout pour déposer les permis de construire. Pourtant, la diversité des volumes et des formes, les dimensions gigantesques et la crainte suscitée par le nucléaire appelaient une réflexion architecturale. Pendant un an, Claude Parent, volontiers iconoclaste, travailla très librement, transformant ces "masses informes" en dessins poétiques, aussi délirants qu'utopiques. Ayant convaincu Michel Hug que le nucléaire pouvait avoir un "visage", il prit la tête d'un Collège

d'architectes. Ce dernier, composé de Pierre Dufau, Paul Andreu, Roger Taillibert, Jean Willerval..., œuvra à l'expression plastique et à l'insertion paysagère, en se confrontant aux exigences du Service des Études des Projets Thermiques et Nucléaires, aux objectifs de standardisation d'EDF, aux réalités d'exploitation, à l'évolution des typologies, et à la sûreté. Les études engagées donnèrent lieu, selon les années et les modèles, à différentes mises en forme, Paluel étant reconnu comme l'un des paliers (P4) les plus aboutis. Au final, l'apport incon-

>>> Plan masse.





3



4

>>> **1** Les grues les plus proches de la tranche 2 en activité ont été "gainées" de sarcophages en béton armé, les empêchant de basculer en cas de tempête.
2 La construction de l'enceinte externe avance plus rapidement que l'enceinte interne. On a ici un aperçu des platines sur la voile béton. **3** Les coffrages spécifiques, souvent à usage unique car le réacteur compte beaucoup d'angles et de réservations, sont réalisés sur mesure dans un atelier installé sur le chantier. **4** L'exiguïté du site étant l'une des contraintes majeures du chantier, le béton est acheminé via des tuyaux sous pression jusqu'au lieu de coulage. Ici, le coulage du gousset du bâtiment réacteur.

testé des "architectes de l'atome" fut d'améliorer la lisibilité fonctionnelle et l'insertion de l'ouvrage dans le paysage. Depuis l'origine, ce site est prévu pour l'implantation de quatre unités de production, les deux premières ayant été conçues entre 1979 et 1980 par l'architecte Jean Willerval. Adossées à la falaise de granit, les installations nucléaires sont, depuis la terre, en grande partie masquées par le relief.

Le chantier de l'îlot nucléaire

Le génie civil, mené par le groupement Bouygues TP/Quille va se poursuivre jusqu'en 2012. "Le chantier a démarré en août 2006 par une phase préliminaire de terrassement (700 000 m³), des tirs de mines à côté des tranches en fonctionnement, la construction de 2,5 km de galeries techniques et des bâtiments auxiliaires de sauvegarde de la station de pompage", rappelle Philippe Leigné.

"Nous avons signé 150 contrats avec 80 entreprises européennes, cela représente 2 800 personnes inscrites sur le site, avec un pic qui pourra atteindre 3 500 personnes".

Le coulage des premiers bétons, constituant le radier du réacteur, a commencé fin 2007, avec une cadence de 1 000 m³/jour. Au total, plus de 430 000 m³ de béton seront mis en œuvre, dont Bouygues a souhaité garder l'entière maîtrise, en ne sous-traitant pas la fabrication. "Le choix des constituants des bétons et des formulations intègre les principes de prévention vis-à-vis des risques de réaction sulfatique interne et d'alcali-réaction", précise Christian Furon, directeur de production chez Quille. "Cela nous a conduit à des simulations thermiques avec instrumentations des plots béton. Les formulations ont dû être multipliées pour prendre en compte la plage de variation des températures extérieures (de 0°C à plus de 20°C). Les bétons sont

instrumentés pour vérifier la température à cœur et mesurer l'augmentation de chaleur du béton frais induite par l'hydratation du ciment."

Autre spécificité notable, le liner qui borde l'enceinte interne, plaque métallique de 6 mm d'épaisseur, sert de coffrage lors du coulage. Comme cela n'est pas sa vocation, et bien qu'il soit maintenu par

des raidisseurs soudés, le liner impose un bétonnage très lent (12 à 14 m³/h), pour limiter la pression. La construction de l'enceinte externe, en raison de l'absence de liner, est plus simple à réaliser (40 m³/h) et en avance de cinq levées.

"Pour les coffrages, nous avons cherché un optimum entre achat et location", précise François Quandalle, responsable

technique

Composition simplifiée d'une centrale nucléaire

- l'îlot nucléaire regroupe le réacteur, les quatre auxiliaires de sauvegarde, les Bâtiments Auxiliaires Nucléaires (BAN) et le bâtiment du combustible, le tout est hermétique ;
- la salle des machines, semblable à une installation industrielle, est posée sur un socle en béton avec une superstructure légère habillée de bardage. Le plancher de service accueille les groupes turbo-alternateurs, tandis que les plafonds permettent la circulation des ponts roulants ;
- le bâtiment d'exploitation, avec la salle des commandes, est le centre névralgique, où les hommes se relaient pour assurer une surveillance permanente ;
- les stations de pompage et de rejet (aéroréfrigérants au bord des fleuves) actionnent l'eau du circuit secondaire ;
- les bâtiments tertiaires accueillent le personnel pendant les différentes phases d'activités : bureaux, magasins, garages, infirmerie, restaurants, accueil...



Entretien

AVEC BRUNO WILLERVAL, *architecte*

« EDF souhaitait une architecture contemporaine »

Votre père, Jean Willerval, a travaillé au Collège d'architectes et construit les deux premières tranches. Est-ce pour cette raison qu'EDF vous a confié Flamanville 3 ?

Bruno Willerval : Nous avons répondu, en 2005, à la demande d'EDF ; mais c'est un fait que s'appeler Willerval a permis de faire des propositions.

Sur quoi s'est basée votre réflexion ?

B. W. : EDF souhaitait une architecture contemporaine, que nous véhiculons par le dynamisme des pans coupés de la salle des machines, la qualité des matériaux et les jeux d'ouvertures dans la façade du Pôle Opérationnel d'Exploitation (POE). La question de l'intégration dans le paysage avait déjà été étudiée et la tranche 3 vient compléter la composition architecturale amorcée par les tranches 1 et 2 : un alignement régulier des bâtiments, dont la volumétrie reste sensiblement la même. Dans la mesure où une vision lointaine favorise la confusion entre la centrale et le site naturel, nous avons cherché une coloration en harmonie avec les tonalités environnantes : l'ocre brun de la lande, parsemée de blocs rocheux et mariée au

granit gris des falaises, donne la couleur brune des bardages. Cette tonalité se marie très bien avec le granit des falaises, le gris des ouvrages bétonnés et donne du caractère à l'architecture. Un travail d'uniformisation a d'ailleurs été entrepris sur les façades des salles des machines des tranches 1 et 2, auparavant peintes en bleu marine.

Quelle latitude a l'architecte dans la construction d'une centrale nucléaire ? Quelle a été exactement votre mission ?

B. W. : Nous avons déposé un permis de construire pour la globalité de la tranche 3. Les missions étaient différentes selon les bâtiments. Concernant l'îlot nucléaire, éminemment stratégique, l'ingénierie et la sécurité dominant, et l'architecture a peu voix au chapitre si ce n'est pour le code couleur. En revanche, nous avons eu une mission avancée sur la salle des machines, qui se distingue de ses voisins par une toiture aux pentes contrariées, générant une faille de lumière, ainsi que par une façade inclinée vers la mer. Cette géométrie crée une dynamique que l'on retrouve dans la volumétrie du POE contigu.

Pour ce dernier, dédié à la maintenance et à l'exploitation des tranches 3 et 4 (non construites), nous avons eu la même mission avancée, ainsi que le suivi architectural pendant la phase de construction, ce qui nous a permis de défendre nos principes et nos plans. Le POE se compose d'une partie technique au rez-de-chaussée et d'un bâtiment de bureaux en superstructure, découpé en trois volumes couronnés par une toiture

courbe en aluminium partiellement ajourée pour cacher les édicules techniques. La ligne tendue de la toiture rappelle celle de la salle des machines et contribue à générer une image contemporaine, symbole de la nouvelle technologie EPR. Les façades alternent des bardages aluminium thermo-laqués, de même couleur que la salle des machines, et un revêtement en béton architectural de couleur blanc cassé. ■





>>> **5** Le Pôle Opérationnel d'Exploitation a une architecture qui fait écho à la salle des machines. **6** Adossé au réacteur nucléaire, le bâtiment combustible est également doté d'une double enceinte de sûreté. **7** et **8** Accolés à la station de pompage (**8**) où se trouvent les systèmes de filtration et de pompage des circuits de refroidissement, l'ouvrage de pré-rejet et de rejet est partiellement revêtu de béton architectural.

du bâtiment réacteur chez Bouygues TP. "Les structures internes du réacteur, ainsi que quelques points singuliers des enceintes, demandent des coffrages spécifiques (angles particuliers, réservations, formes complexes, ...) auto-grimpants, souvent à usage unique. Ils sont construits sur mesure dans un atelier installé sur le chantier. En raison de l'extrême densité de ferrailage dans

certaines levées et de la présence de nombreux inserts (fourreaux, platines, cadres...), nous avons innové en les revêtant de plexiglass, ce qui nous a assuré un bon remplissage contre le liner".

Densité des armatures

72 000 t d'armatures ont été prévues pour la construction des îlots nucléaire et conventionnel. "Ce chiffre, sans doute unique, a entraîné la création d'un GIE dédié, Flamanville Armatures, constitué des sociétés Welbond, Bouygues et Quille", explique André-Pierre Desjardins, directeur de projet chez Quille. "Les armatures sont classiques, mais c'est le ratio qui est exceptionnel, avec une moyenne de 220 kg/m², et des pointes supérieures à 400 kg/m²" ajoute Dominique Regallet, directeur des Études de Bouygues. "EDF a d'ailleurs dû alléger certaines zones de ferrailage car la densité était telle qu'on dépassait la limite du constructible".

"Ce projet nous a amené à mettre en place une organisation particulière des études",

poursuit Dominique Regallet. "Les calculs, les plans de coffrage et des plans guides des armatures sont réalisés par des bureaux d'études qualifiés d'amont pour le compte d'EDF. Sur cette base, Bouygues avait pour mission l'établissement des plans d'exécution du ferrailage (environ 7 000) réalisés par un GIE études, associant Setec-TPI, Bouygues TP et Quille, avec un effectif allant jusqu'à 200 personnes et un budget d'études proche de 35 M€".

Les difficultés de mise en œuvre, dues à la géométrie des plots et au ferrailage très dense, ont nécessité le développement de formules en micro béton (D max 10) pour les bétons de classe de résistance C 40/50, C 45/55 et C 60/75. En raison des contraintes thermiques, les formules ont été optimisées en limitant les quantités de ciments à 310 kg/m³. Par ailleurs, de très nombreux plots d'essais à l'échelle 1 ont été réalisés sur chaque formule pour valider les phases de bétonnage, en conformité avec les exigences.

Enfin, la préfabrication du dôme (250 t) a commencé début 2010, à proximité de l'îlot nucléaire. Il a également été bétonné

en plusieurs phases, la première couche formant une dalle collaborante pour la couche supérieure. ■

TEXTE : DELPHINE DÉSVEAUX

PHOTOS : OUVERTURE, PLAN MASSE : AGENCE BRIDOT

WILLERVAL 1, 5 : DELPHINE DÉSVEAUX

2, 3, 4, 6, 7, 8 : EDF



technique

Des bétons spécifiques

Classe de résistance : C 30/37, C 40/50, C 45/55 (enceinte externe), C 60/75 (enceinte interne)

Classe d'exposition : XS3

Ciments :

- CEM V/A 32,5 N CE LH PM ES CP1 NF de Ranville (Calcia) à faible chaleur d'hydratation pour les bétons C 45/55
- CEM I 52,5 N CE PM ES CP2 NF du Havre (Lafarge) pour les C 60/75

Maîtrise d'ouvrage :
EDF-CNEN

Maîtrise d'œuvre études :
Sofinel, EDF Cnepe Tours,
EDF Cnen-IGC

Maîtrise d'œuvre travaux :
EDF-CNEN
Aménagement Flamanville 3

Assistance technique :
EDF Septen (bétons)

Maîtrise d'œuvre architecturale :
Agence Bridot Willerval

Génie civil :
Groupement Bouygues TP
(mandataire) – Quille



Transparence

écologique et hydraulique

>>> ENTRE PAU ET LANGON, L'A 65, DITE AUTOROUTE DE GASCOGNE, ENTRERA EN SERVICE AU COURS DU PREMIER SEMESTRE 2011. LE GIÉ CONSTRUCTEUR ET LE CONCESSIONNAIRE A'LIÉNOR, QUI VA L'EXPLOITER PENDANT 55 ANS, ONT TOUT MIS EN ŒUVRE LORS DE SA CONCEPTION ET DE SA RÉALISATION POUR RESPECTER LA TRANSPARENCE HYDRAULIQUE ET ÉCOLOGIQUE DU PROJET. LES NOMBREUSES CONTRAINTES ENVIRONNEMENTALES, ADAPTÉES AU GRENELLE DE L'ENVIRONNEMENT, ONT, EN QUELQUE SORTE, DIMENSIONNÉ LE PROJET, QUI CONSTITUE UNE RÉFÉRENCE POUR LE FUTUR EN MATIÈRE ENVIRONNEMENTALE.

Une nouvelle autoroute va relier, à partir du printemps 2011, Pau à Langon, au sud-est de Bordeaux. Orientée selon un axe nord-sud quasi rectiligne, les 150 km à deux fois deux voies de l'A 65, baptisée "autoroute de Gascogne", traversent 52 communes de trois départements, la Gironde, les Landes et les Pyrénées-Atlantiques. Elle devrait améliorer les communications et favoriser le développement économique de la région Aquitaine. Selon une étude récente de la Chambre de Commerce et d'Industrie Pau – Béarn, l'ouverture de ce tronçon aura un impact économique de l'ordre de 120 millions d'euros par an. Cette autoroute va aussi renforcer la cohésion régionale et désenclaver les territoires de l'est des Landes en offrant une meilleure accessibilité vers Mont-de-Marsan et les départements proches du Gers et des Hautes-Pyrénées. L'A 65 reliera Bordeaux à Pau, deuxième métropole régionale, en une heure et demi environ. Enfin, elle aura un effet favo-

nable sur la sécurité routière. L'actuelle route Pau – Langon est, en effet, malheureusement connue pour sa dangerosité.

Concession "clés en main"

Le contrat de concession a été attribué par le ministre des Transports et de l'Équipement à la société A'Liénor. Constituée de l'entreprise Eiffage (65 %) et de Sanef (35 %), celle-ci finance, conçoit et réalise cette infrastructure qu'elle va exploiter pour une durée de 55 ans. Le concessionnaire a signé un contrat "clés en main" de conception – construction avec le groupement GIE A 65 Pau – Langon, piloté par Eiffage-TP et associant l'ensemble des branches travaux du groupe. A charge pour ce groupement de concevoir le projet, de le piloter, de le coordonner, de réaliser les acquisitions foncières et de construire l'ouvrage pour le compte du concessionnaire.

Cet investissement, d'un montant de 1,2 milliard d'euros, est assuré grâce aux fonds

propres des actionnaires d'A'Liénor (230 millions d'euros) et par une dette de type "financement de projet" levée auprès des banques. L'autoroute A 65 est donc intégralement financée par le concessionnaire, sans aucun recours à des fonds publics.

Insertion environnementale

La part de l'investissement, consacrée aux multiples mesures environnementales prises pour insérer l'infrastructure dans le paysage, est estimée à 15 % du montant des travaux.

Cette politique d'intégration dans le site est l'un des principaux challenges de cette réalisation, qui se veut un nouveau standard d'infrastructure linéaire, avec un objectif prioritaire : atteindre une véritable transparence hydraulique et faunistique. Les services de l'Etat ont mené des études d'impact préalables, permettant d'établir un dossier des engagements qui a été intégré dans



>>> **1** Le Viaduc de Gabas est le plus long ouvrage d'art de l'autoroute A 65 (444 mètres). Comme pour tous les ouvrages, la largeur du tablier est de 21,5 m.

2 Viaduc du Riumayou. Le hourdis en béton est coulé en place à l'aide d'un équipage mobile, suivant un phasage de bétonnage longitudinal de type pianotage.



3



4

➤➤➤ **3** Ni le plus grand ni le plus petit des 15 viaducs construits par Eiffage pour l'A 65, celui de la Douze (220 m) présente un intérêt certain sur le plan environnemental, la Douze faisant partie des cours d'eau à enjeu. **4** Ouvrage enjambant le ruisseau du Balaing. **5** Les ouvrages de rétablissement de communication, passages supérieurs et passages inférieurs, se succèdent au rythme d'un ouvrage par kilomètre.

6 L'ouvrage de la Brioulette est un ouvrage de rétablissement hydraulique de type cadre en béton armé, prolongé par des murs de soutènement.

le contrat de concession. Énonçant les engagements de l'Etat pris dans le cadre de la procédure de déclaration d'utilité publique, ce document regroupe de nombreuses fiches thématiques de mesures d'insertion : respect du cadre et de la qualité de vie de la population, atténuation des impacts sur l'agriculture

et la sylviculture, intégration dans le paysage. Le GIE A 65 s'est appuyé sur l'expertise de cabinets spécialisés, qui ont privilégié deux axes de travail. Il s'agit, d'une part, d'insérer l'ouvrage dans son environnement, en diminuant son impact visuel et sonore auprès des riverains et, d'autre part, d'éviter la monotonie et créer un axe sécuritaire, en aménageant des ouvertures sur le paysage et des points de vision vers l'extérieur pour les automobilistes. D'autres mesures ont été requises, telles que la préservation du patrimoine et des milieux naturels, la minimisation du bruit, la qualité de l'air, l'identification des risques et la réduction des impacts chantier avec, par exemple, la réalisation de bassins tampons provisoires pour limiter au maximum les rejets d'eau de chantier dans les milieux naturels. La prise en compte du concept de développement durable se traduit également dans la gestion des matériaux, des dépôts et des emprunts. La préservation des eaux souterraines et

de surface a ainsi été particulièrement étudiée. Dans le cadre de la loi sur l'eau, elle a impliqué des études hydrogéologiques détaillées, permettant d'évaluer les impacts du projet, l'objectif étant de garantir la protection des écosystèmes aquatiques, des zones humides et d'assurer cette fameuse transparence.

Transparence faunistique

500 ouvrages, dédiés à l'écoulement des eaux et au passage de la faune, ont été réalisés. Lorsque le tracé ne pouvait éviter les milieux sensibles, des mesures d'atténuation ont consisté, par exemple, à privilégier la construction de viaducs, voire à allonger ceux prévus à l'origine. Ainsi, pour intégrer la notion de transparence faunistique, l'ouverture minimale des ouvrages, imposée par les engagements de l'Etat, a nécessité d'aller bien au-delà des seules exigences en matière d'ouvertures hydrauliques. Sur 13 viaducs nécessitant un total de 300 m d'ouvertures, le cumul est passé, après études de conception, à 1 705 m avec deux ouvrages supplémentaires. "Cette composante environnementale représente une donnée importante pour l'A 65, du fait de la richesse du patrimoine naturel

➤➤➤ A 65 Pau-Langon.



chiffres clés

- Longueur : **150 km**
- Terrassements : **18 millions de m³**
- Ouvrages d'art : **160, dont 15 viaducs**
- Ouvrages hydrauliques : **50**
- Ouvrages de rétablissement de voiries : **95**
- Échangeurs : **2 avec l'A 64 et l'A 62**
- Diffuseurs : **10**
- Aires de service : **2**
aires de repos : **4**



de la région. Il s'agit d'intégrer l'environnement comme un paramètre technique de conception nécessitant un fort niveau de compétences, comme c'est le cas pour la géotechnique, la topographie, l'hydraulique ou la performance des matériaux. C'est dans cet esprit que nous avons abordé l'A 65," explique Olivier Rossa, directeur technique chez Eiffage. "L'autre contrainte était le délai de construction très court. Nous avons beaucoup 'standardisé' les ouvrages, en particulier pour les rétablissements routiers, afin d'optimiser les cadences de fabrication et de réalisation, en utilisant des procédés simples à mettre en œuvre et répétitifs, comme le système des Poutres Précontraintes par Adhérence (PRAD)".

Quatre typologies d'ouvrages

Eiffage a réalisé quatre types d'ouvrages. Le type 1 regroupe les 15 viaducs principaux. Les piles des viaducs ont été implantées sur site par un expert des milieux naturels, pour optimiser l'intégration de l'ouvrage. Le type 2 représente les ouvrages qui franchissent les cours d'eau sensibles, sans impacter les berges. Ces portiques ouverts intègrent un haut

niveau de transparence environnementale dès la conception. "Cela conduit à des ouvrages relativement importants, qui préservent le cours d'eau et la continuité faunistique. En intégrant la géométrie de berges sinueuses, cela impose très vite un ouvrage de 18 m de portée, pour un cours d'eau qui nécessite une ouverture hydraulique de 5 ou 6 m" précise Olivier Rossa. Le type 3 (cadres) correspond à des cours d'eau pour lesquels une déviation provisoire ou définitive est acceptable par le milieu naturel. Mais ces ouvrages restent importants en termes d'ouverture puisque, au-delà de la partie hydraulique proprement dite, une continuité de passages "au sec" de la faune est assurée par des banquettes successives. Enfin, le type 4 correspond à la buse béton, purement hydraulique, de diamètre inférieur à 2 m. Elle est le plus souvent doublée à proximité par une autre buse hors d'eau utilisée pour le passage de la petite faune. A noter que les ouvrages voûte en béton ont été préfabriqués en usine, ce qui a permis de réduire les travaux sur site et de diminuer l'impact du chantier sur le milieu environnant.

La recherche de transparence, en termes d'impact dans le paysage, s'accompagne

technique

Des bétons adaptés aux exigences du chantier

Le volume important de béton utilisé sur l'A 65 (162 000 m³), l'importance du linéaire et le délai de réalisation serré ont nécessité la mise à disposition de sept centrales de Béton Prêt à l'Emploi. Six existaient déjà : une à Langon, deux à Mont-de-Marsan, une à Aire-sur-Adour, deux à Serres-Castet près de Pau. Seule une spécifique a été installée à Captieux pour couvrir la zone des Landes et sera démontée à l'issue du chantier.

"L'A 65 est un projet relativement standard. Par contre, le béton a représenté une solution intéressante puisqu'il nous a permis de faire une conception industrielle de nos ouvrages et de pouvoir réaliser un projet de grande ampleur avec des délais courts", explique Frédéric Cuffel, chargé des ouvrages d'art sur le projet, pour Eiffage-TP.

La grande campagne d'identification des sols, menée en amont sur l'ensemble du tracé, a révélé des configurations très différentes entre le nord, zone sableuse dans les Landes, et le sud plus argileux. Elle a permis de définir l'ensemble des classes d'agressivité chimique des sols et d'adapter les formulations des bétons en conséquence.

En général, ces derniers sont classiques, hormis pour les viaducs exigeant des bétons de classe de résistance C 35/45. La principale spécificité se situe dans les Landes, où l'acidité des sols a nécessité la mise en œuvre d'environ 5 000 m³ de béton de fondation, correspondant à une classe d'exposition XA2, avec un fort surdosage en ciment pour atteindre un niveau suffisant de résistance aux acides.



7



8

➤➤➤ **7** Pour les passages inférieurs supportant une forte charge de remblai, des ouvrages voûtés en éléments préfabriqués ont été mis en place. **8** Le projet a été conçu dans un souci de préservation de la biodiversité, avec ici un exemple de passage à faune.

d'une autre démarche, qui concerne le maintien de l'état de conservation, espèce par espèce affectée, grâce à un système de compensation environnementale des impacts résiduels. Évalués par le Conseil national de protection de la nature (CNPN), 1372 ha de biotope, à comparer aux 1603 ha de surface totale des emprises nécessaires à la construction de l'A 65, ont ainsi été acquis ou ont fait l'objet de conventionnement, pour garantir le maintien des équilibres écologiques à l'échelle de la région. Ainsi, par exemple, les chiroptères (chauve-souris) ont récupéré 525 ha. Un programme complet de compensation environnementale sur une trentaine de sites a été élaboré par CDC Biodiversité, qui, auprès du maître d'ouvrage et du groupement concepteur – constructeur, a participé à la création des infrastructures écologiques de l'autoroute. Elle doit en assurer la maîtrise foncière et la gestion écologique jusqu'en 2061. Tous les efforts du concessionnaire A'Liénor et du maître d'ouvrage Eiffage, dont le président Jean-François Roverato a formalisé l'engagement en signant une charte

en faveur de la biodiversité, sont aujourd'hui reconnus. L'État considère que ce projet constitue une référence pour le futur. Le chantier a en outre été agréé par l'Union Internationale pour la Conservation de la Nature (IUCN). L'autoroute de Gascogne est retenue comme projet emblématique pour 2010, déclarée "Année internationale de la biodiversité" par l'ONU.

A'Liénor a donc intégré un haut niveau d'exigence environnementale dans l'élaboration du projet. Plus d'un an et demi a été nécessaire pour réaliser les études indispensables à l'instruction et à l'obtention des autorisations concernant les dossiers de la loi sur l'eau, de la faune et de la flore... Pour leur part, les procédures de réévaluation du projet ont nécessité plusieurs mois et reculé d'autant la délivrance des autorisations administratives indispensables au lancement des travaux. Ceux-ci ont débuté en juillet 2008, soit six mois plus tard que prévu, repoussant le démarrage des terrassements à l'automne. Une période peu favorable pour eux, mais les sols gorgés d'eau et très réactifs ont pu être

Principaux viaducs

Viaduc de Gabas : 113 m
Pont du Riumayou : 246 m
Viaduc de la Douze : 220 m
Viaduc du Luy de France : 80 m
Viaduc de Luy de Béarn : 80 m

valorisés, en traitant les couches de forme avec 170 000 t de ciment.

Un chantier "découpé" en trois sections

Afin d'assurer une meilleure organisation en moyens humains et matériels, les 150 km de linéaire, ponctués de 160 ouvrages d'art, ont été scindés en trois sections de travaux autonomes, gérées par une direction de projet globale. Les 61 km de la section nord se situent entre Langon et Roquefort. La section centre de 39 km part de Roquefort et s'étend jusqu'à Aire-sur-Adour nord. Celle du sud, longue de 45 km, couvre le secteur Aire-sur-Adour sud – Pau. Fin août 2009, au plus fort des travaux, l'A 65 a employé plus de 2 000 personnes, dont 900 issues du tissu économique local. ■

TEXTE : MICHEL BARBERON

PHOTOS : PASCAL LE DOARÉ



Concessionnaire (maître d'ouvrage) :
A'Liénor
(Eiffage 65 %, Sanef 35 %)

Assistance à maîtrise d'ouvrage :
APRR (groupe Eiffage)

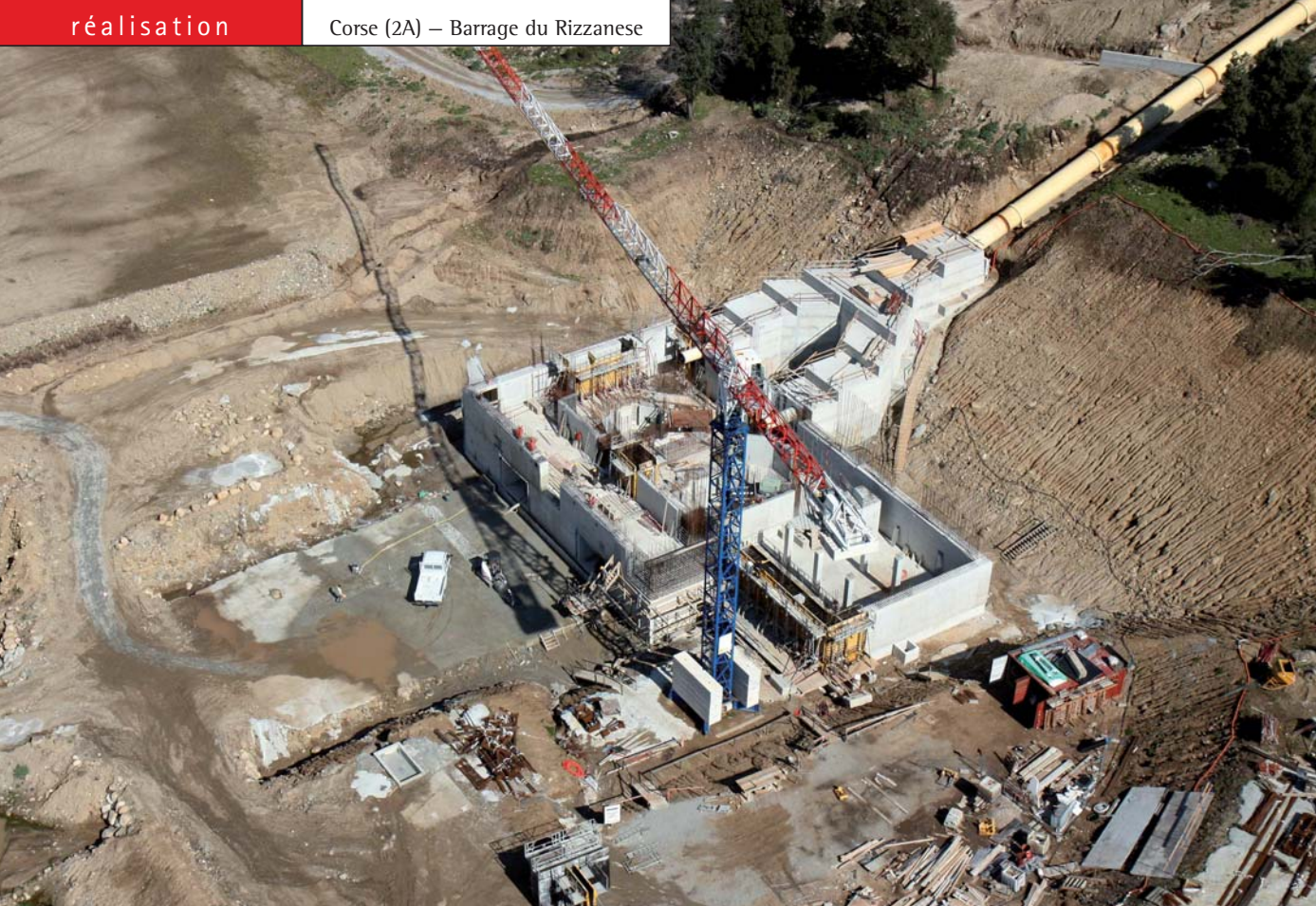
Conception/construction :
"GIE A65" Pau – Langon piloté par Eiffage TP pour 70 % des travaux et 30 % sous-traités à des entreprises extérieures aux groupes Eiffage ou Sanef

Ingénierie de conception :
Ingerop, Arcadis, Coteba, Egis, Sanef

Opérateurs fonciers :
SCET, Inexia

Exploitation :
Sanef Aquitaine

Coût :
1,2 MM€ HT



L'aménagement hydroélectrique du Rizzanese

>>> L'ÉNERGIE ÉLECTRIQUE UTILISÉE EN CORSE PROVIENT DES CENTRALES THERMIQUES, DES INTERCONNEXIONS AU RÉSEAU ITALIEN ET DE TROIS AMÉNAGEMENTS INSTALLÉS SUR LES RIVIÈRES PRUNELLI, GOLO ET FIUM'ORBO. L'IDÉE D'UN BARRAGE SUR LE FLEUVE RIZZANESE NE DATE PAS D'HIER. APRÈS UNE LARGE CONCERTATION, LE PREMIER MINISTRE A DÉCLARÉ LE PROJET D'UTILITÉ PUBLIQUE PAR DÉCRET DU 8 OCTOBRE 2004. AVEC UN TEL OUVRAGE DONT LA MISE EN EXPLOITATION EST PRÉVUE EN 2012, L'ÎLE DE BEAUTÉ CONFORTERA SON INDÉPENDANCE ÉNERGÉTIQUE.



1



2

La région de l'Alta Rocca est un massif montagneux et boisé, jalonné par les Aiguilles de Bavella et la ville de Sartène. Au milieu coule le fleuve Rizzanese, qui dévale en cascades jusqu'à la mer, pour former la plage de Propriano. C'est dans ce paysage naturel, près du village de Sainte-Lucie-de-Tallano, qu'EDF construit le nouvel aménagement hydraulique.

"Ce site a été choisi en raison de ses nombreux avantages, explique Bruno Gondouin, chef d'aménagement à la Direction Production et Ingénierie Hydraulique (DPIH) d'EDF. Situé au confluent de deux rivières, il assure un apport important d'eau propice au remplissage rapide et continu de la retenue. Par ailleurs, il répond au meilleur compromis entre la chute d'eau (410 m) et la distance

qu'elle doit parcourir jusqu'à l'usine hydroélectrique. De plus, le resserrement des gorges minimise l'importance de l'ouvrage et, de ce fait, ses impacts environnementaux. Enfin, la qualité des roches, granite et diorite, permet une production sur place des granulats nécessaires à la fabrication des bétons."

Les trois pôles techniques de l'aménagement

En amont, le lac va s'étendre sur 11 ha. Les eaux sont retenues par un barrage d'une hauteur de 40,5 mètres sur fondation pour une longueur de crête de 140 mètres. La géologie permet la construction d'un barrage de type poids-béton, réalisé grâce à la technique du Béton Compacté au Rouleau (BCR, voir entretien p.13). L'étanchéité de la face amont est assurée par une géomembrane en PVC, tandis que le parement aval présente un aspect "cyclopéen" qui rappelle les constructions en granite. Les conduites d'eau constituent le deuxième pôle. La galerie d'amenée souterraine (5,8 km de longueur) est creusée dans le granit, avec un tunnelier (3,50 m de diamètre), et renforcée par blindage métallique (440 m en amont immédiat

»»» **1** En amont de l'aménagement, l'ouvrage de dérivation détourne le cours d'eau pendant la construction du barrage. **2** A l'aval, la centrale hydroélectrique est construite par des entreprises locales. Elle sera constituée de deux turbines Pelton d'une puissance nominale de 27,5 MW. **3** L'ouvrage de dérivation est en béton conventionnel fabriqué à Propriano dans une centrale BPE.

de la vanne de tête. Elle se prolonge par une conduite forcée (1,245 km), fixée sur un radier en béton et enterrée sur près de 560 mètres au voisinage d'une chapelle. Au niveau de la vanne de tête, une cheminée d'équilibre limite la surpression, dite "coup de Béliet", lors de l'ouverture de la vanne de pied.

A l'aval, dans la centrale hydroélectrique, la conduite forcée se divise en deux rameaux qui alimentent deux turbines (d'une puissance nominale de 27,5 MW). Construits par des entreprises locales, ces ouvrages constituent le troisième pôle d'infrastructures.

Le circuit se termine par un bassin de démodulation (15 000 m³), qui restitue progressivement les débits turbinés dans le lit du fleuve. Enfin, le poste de transformation est constitué de deux transformateurs 5,65 kV/90 kV de 34 MVA chacun.

Les bétons spécifiques

A l'exception du corps du barrage en BCR et d'un béton autoplaçant (BAP) mis

en place dans l'espace annulaire entre la conduite métallique et le massif rocheux, les ouvrages sont en béton conventionnel, fabriqué soit à Propriano dans une centrale BPE, soit dans une centrale classique installée sur le site. La formulation du BAP a été mise au point par Robert Valon, ingénieur chargé d'affaire au Centre d'Ingénierie Hydraulique (CIH), et le laboratoire ATCM travaillant pour le compte du Groupement Vinci/Bec/Razel, titulaire du marché de construction du barrage. "Elaborée avec des constituants spécifiques, entre 500 et 550 kg d'éléments fins, ciment (CEM III B constitué de 66 % de laitier) et fines, associés à un adjuvant (Optima 175), cette formule permet une mise en œuvre sans vibrations, explique Robert Valon. Son intérêt est de remplir parfaitement le vide entre la roche et le blindage. Outre une exothermie modérée, elle offre une résistance aux eaux pures qui garantit une pérennité centennale à l'ouvrage." Après validation de la robustesse de la formulation, essais de convenue et confirmation des valeurs de résistance mécanique, deux niveaux de contrôle, l'un au niveau de la centrale,

chiffres clés

- Longueur en crête : 140 m
- Hauteur sur sa fondation : 40,5 m
- Hauteur de chute : 418 m
- Retenue d'eau
 - Capacité totale : 1 300 000 m³
 - Capacité utile : 1 000 000 m³
- Béton BCR : 80 000 m³



l'autre à l'arrivée sur le site, assurent la régularité de la production.

Conscience environnementale

“Les effets du barrage seront très favorables à la micro-région, en termes de

retombées économiques, assure Camille Laguardia, chef de projets à EDF Système Énergétique Insulaire, maître d'ouvrage de l'aménagement. 30 % des travaux sont réalisés par des entreprises locales. Mais en 2010, les grandes infrastructures font débat car les populations sont

attentives aux projets qui pourraient modifier leur cadre de vie. Leur acceptation et leur appropriation sont une des conditions de réussite, et celle-ci passe par l'insertion paysagère et la préservation de la biodiversité.” Pour diminuer les impacts de l'aménagement sur ce

territoire naturel, EDF a installé plusieurs équipements : un déversoir à seuil libre, qui favorisera le régime torrentiel dans les 12 km de rivière à l'aval du barrage, ainsi qu'un bassin de démodulation qui restituera progressivement les eaux turbinées dans le Rizzanese. Le tracé

Entretien

AVEC ROBERT VALON, ingénieur chargé d'affaires au Centre d'Ingénierie Hydraulique (CIH)

« Le Béton Compacté au Rouleau (BCR) offre une bonne souplesse d'utilisation »

Quels sont les intérêts de cette technique ?

Robert Valon : Elle existe depuis plus de 25 ans et est de plus en plus utilisée pour les barrages. Son grand avantage réside dans sa vitesse d'exécution : si le mélange des constituants relève du métier du fabricant de béton, sa mise en œuvre est comparable à des terrassements. On peut ainsi réaliser des ouvrages en grande masse, assurer le transport par camions, puis régaler et compacter le BCR en couches de 35 cm. Le BCR, qui associe les performances mécaniques d'un béton classique à une mise en œuvre par terrassements, simplifie ainsi la conception, en réduisant la construction d'ouvrages provisoires, donc des délais et des volumes

de matériaux. D'autant qu'il permet de recourir aux granulats locaux.

Quelles sont les propriétés de ce BCR ?

R. V. : Pour ce barrage, le BCR doit assurer les fonctions de poids et de stabilité, l'étanchéité amont étant assurée par une géomembrane. Les principales exigences pour le fournisseur de BCR sont :

- un temps de prise et un délai de maniabilité adaptés aux moyens de terrassements ;
- une faible variation des performances vis-à-vis des conditions de mise en œuvre et des aléas de chantier. La confection, le transport, le répandage et le compactage imposent l'utilisation d'un béton

“rustique”, offrant une bonne souplesse d'utilisation ;

- une traficabilité immédiate après compactage, qui autorise la circulation des engins, afin de permettre l'élévation rapide de l'ouvrage ;
- un délai de recouvrement suffisamment long pour assurer le collage des couches entre elles.

Comment avez-vous conçu la formulation ?

R. V. : J'avais participé à sa mise au point en 1992, quand j'étais au laboratoire EDF-CEMÉTÉ à Aix-en-Provence. Nous l'avons améliorée dans un objectif d'optimum économique, afin de diminuer le coût des

matériaux et de leur mise en œuvre, tout en respectant l'épure de la conception : nous avons sélectionné des matériaux locaux, réduit le nombre de classes granulaires (2 classes 0/12,5 et 12,5/63 mm), ajusté au plus près le dosage en ciment (80 kg/m³ de CEM III B de Lafarge Ciments), pour obtenir une résistance en compression simple supérieure à 4 MPa à 28 jours, ce qui est très faible et qui explique d'ailleurs la base assez large du barrage. Mais au final, même avec un dosage relativement faible en liant, du fait de sa compacité, le BCR, tout en assurant une traficabilité immédiate, atteint à long terme des résistances en compression et en traction proches de celles d'un béton traditionnel. ■



4 Le bassin de démodulation (15 000 m³) à l'aval de la centrale hydro-électrique permet de restituer progressivement les débits turbinés dans le lit du fleuve.

de la conduite forcée a été choisi pour réduire son impact global. La couleur de la conduite d'aménée, quand elle n'est pas enterrée, s'approche du "vert marron" (couleur des chênes liège), pour se fondre au mieux avec le territoire qu'elle traverse. Toutes les zones terras-

sées pour la réalisation des ouvrages seront revégétalisées. En contrebas, les formes cubiques de l'usine, à moitié enterrée, revêtues d'un parement de bois, augurent une certaine discrétion. Au-delà de la production d'électricité, une convention, signée entre EDF et

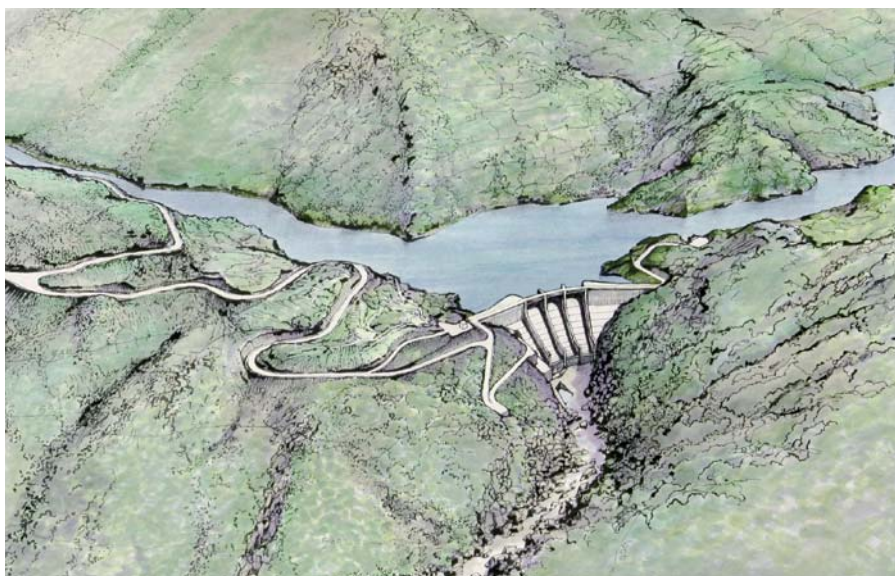
l'Office d'Équipement Hydraulique de Corse, met à disposition 1,6 M m³ d'eau par an, de mai à octobre, pour l'irrigation de terrains agricoles. ■

TEXTE : DELPHINE DESVEAUX

PHOTOS : OUVERTURE, 1, 2, 4 : DELPHINE DESVEAUX

3 ET CROQUIS : EDF

>>> Au confluent du Saint-Antoine et du Codi, la retenue d'eau s'étendra sur 11 hectares.



Maîtrise d'ouvrage :

EDF, Système Énergétique Insulaire (SEI)

Maîtrise d'œuvre :

EDF, Direction Production et Ingénierie Hydraulique (DPIH)

Conception architecturale et paysagère :

Architectes : Pierre-Henri Lorenzi & Christian Pachiaudi
Paysagiste : Marie-Hélène Stefanaggi

Entreprises :

Barrage : Vinci/Razel/Bec
Travaux souterrains : Razel/Bec
Fournisseur BPE : Société des Industries Sartenaises
Usine hydro-électrique : Groupement Vendasi / SCT
Génie civil conduite forcée et usine : Corse Européenne Entreprise

Durée des travaux :

4 ans (2008 – 2012)

Coût :

200 M€ HT

solutions

Guide pour le choix des classes d'exposition des ouvrages d'art en béton

>>> LES NOUVEAUX TEXTES NORMATIFS RELATIFS AUX OUVRAGES EN BÉTON

PRENNENT EN COMPTE LA DURABILITÉ, EN S'APPUYANT SUR LA NOTION

DE CLASSE D'EXPOSITION. CES CLASSES TRADUISENT LES ACTIONS DUES

À L'ENVIRONNEMENT AUXQUELLES LE BÉTON ET LES ARMATURES DE L'OUVRAGE

OU DE CHAQUE PARTIE D'OUVRAGE VONT ÊTRE EXPOSÉS PENDANT LA DURÉE

DE SERVICE DE LA STRUCTURE. LES CLASSES D'EXPOSITION PERMETTENT

AINSI D'OPTIMISER LA FORMULATION DES BÉTONS ET LA CONCEPTION

DES OUVRAGES EN VUE DE LEUR DURABILITÉ.



→ **En mer**

ou à moins de 100 m de la côte

p.17



→ **Littoral**

à moins de 1 km de la côte

p.18



→ **Gel faible**

ou modéré

p.19



→ **Gel sévère**

p.20

→ Des classes d'exposition conformes à l'Eurocode Béton et à la norme Béton NF EN 206-1

Depuis le 1^{er} avril 2010, les Eurocodes s'imposent comme normes pour les calculs des structures, et en particulier pour les structures en béton(*) : Ces normes de conception, associées à l'Eurocode 0 (bases de conception) et aux normes définissant les actions (Eurocode 1), sont constituées du texte de la norme européenne et de l'Annexe Nationale correspondante, pour son application en France. Elles sont cohérentes avec l'application de la norme NF EN 206-1. Pour assurer une durabilité satisfaisante des constructions, c'est aux maîtres d'ouvrage et à leurs maîtres d'œuvre de définir, dès le stade de conception, outre la durée d'utilisation de projet, en cohérence avec les dispositions de la norme NF EN 1990, les classes d'exposition traduisant les attaques et risques de corrosion que subiront chaque partie d'ouvrage au cours de la durée d'utilisation de l'ouvrage. Un groupe de travail a été créé au sein de l'École Française du Béton, afin de réaliser un guide pour aider les rédacteurs de cahiers des charges à choisir les classes d'exposition pour différentes catégories d'ouvrages ou de constructions. Ce fascicule synthétise, en quatre tableaux, les informations nécessaires pour les ouvrages d'art en béton. Chaque tableau distingue les principales parties d'ouvrages pertinentes au regard des différentes classes d'exposition XCi, XSi, XD_i, XF_i et XAi à considérer.

- Tableau 1 : ouvrages situés à moins de 100 m (ou à moins de 500 m, selon la topographie) de la côte (risque d'exposition aux embruns)
- Tableau 2 : ouvrages situés à moins de 1 km (ou à moins de 5 km selon la topographie) de la côte (risque d'exposition à l'air véhiculant du sel marin)
- Tableau 3 : ouvrages situés à l'intérieur des terres en zones de gel faible ou modéré
- Tableau 4 : ouvrages situés à l'intérieur des terres en zones de gel sévère.

HENRY THOMIER, EGF-BTP

Mode d'emploi des tableaux

L'aide au choix des classes d'exposition est déclinée, pour les classes d'exposition liées aux risques de carbonata-

tion, agression par les chlorures, gel-dégel et attaques chimiques, en quatre tableaux (1 à 4 ci-après) portant en lignes les parties d'ouvrages, et en colonnes les risques considérés, avec, pour certains risques, différents niveaux de sévérité, correspondant à des sous-colonnes⁽¹⁾.

Ces tableaux correspondent à quatre zones d'environnement (liées notamment à la localisation géographique de l'ouvrage) exclusives pour la France métropolitaine et la plupart des DOM-TOM. La définition de ces zones fait référence, en particulier, à la clause 4.2 (2) de l'Annexe Nationale de la norme NF EN 1992-1-1, en termes de distance à la côte et de sévérité du gel. Pour les quelques territoires soumis à la fois à un environnement maritime et au gel sévère, il convient d'utiliser les indications des tableaux 1 ou 2, liés à l'environnement maritime pour les classes d'exposition XC et XS, et celles du tableau 4 lié à l'environnement en zone de gel sévère pour les autres classes, notamment XD et XF.

Dans l'aide au choix des classes d'exposition vis-à-vis du gel (XF), il est tenu compte des interprétations actualisées de la norme NF EN 206-1, en cours d'harmonisation avec les autres textes.

Précisions sur le salage

En application de la clause 4.2 (2) de l'Annexe Nationale de la norme NF EN 1992-1-1 (notes 4 et 6), le choix de la classe XD1, XD2 ou XD3 se réfère non seulement à l'effet aggravant des cycles d'humidification / séchage, selon les indications du tableau 4.1 de la norme NF EN 1992-1-1, mais également à la fréquence de salage des chaussées.

Dans les tableaux 1 à 4, l'appréciation du salage se réfère à la voie franchie par l'ouvrage, sauf :

- pour les dalles de transition, solins de joints de dilatation, barrières de sécurité en béton, longrines d'ancrage, massifs d'ancrage d'équipements et garde-corps en béton où on l'apprécie par rapport à la voie portée,
- pour les corniches et corniches caniveaux où on l'apprécie à la fois par rapport à la voie portée et à la voie franchie.

Le salage est considéré comme "peu fréquent" lorsque la moyenne annuelle du nombre de jours de salage estimée sur les 10 dernières années est inférieure à 10, "très fréquent" lorsqu'elle est supérieure ou égale à 30, et "fréquent" entre ces deux cas. En application de l'Annexe Nationale de la norme NF EN 1992-2, les parties extérieures d'ouvrages situées à moins de 6 m (horizontalement ou verticalement) d'une chaussée salée sont réputées exposées ou très exposées aux projections de sels de déverglaçage, selon la fréquence du salage. Quelle que soit la fréquence de salage des routes et la zone géographique, certaines parties d'ouvrages peuvent ne pas être exposées aux effets du salage (appuis d'un ouvrage franchissant un vallon sans voie de communication, partie supérieure du tablier d'un ouvrage ferroviaire, par exemple), on considèrera alors pour ces parties d'ouvrages la colonne "salage peu fréquent".

Précision importante

Dans tous les tableaux qui suivent, les classes indiquées ne tiennent pas compte des défauts d'entretien de l'ouvrage et de ses équipements, quelquefois constatés. Il est rappelé notamment que l'évacuation des eaux doit être bien conçue et entretenue durant toute la durée d'utilisation de l'ouvrage, et que le défaut d'entretien ne doit pas être pris en compte à la conception, par exemple en surclassant le niveau d'agressivité de l'environnement. Ceci concerne notamment les chevêtres sur appuis. ■

FRANÇOIS TOUTLEMONDE, LCPC ; PARTICK DANTEG, LRPC-CLERMONT

⁽¹⁾ NF EN 1992-1-1 – Calcul des structures en béton –

Partie 1-1 : règles générales et règles pour le bâtiment

NF EN 1992-1-2 – Calcul des structures en béton –

Partie 1-2 : règles générales - Calcul du comportement au feu

NF EN 1992-2 – Calcul des structures en béton –

Partie 2 : ponts en béton - Calcul et dispositions constructives

NF EN 1992-3 – Calcul des structures en béton –

Partie 3 : silos et réservoirs

^(*) Dans ces tableaux le tiret "-" indique que l'agression en question n'est pas à prendre en compte pour la partie d'ouvrage considérée.

Tableau 1 - Ouvrages d'art situés en mer, ou à moins de 100 m de la côte

(ou jusqu'à 500 m de la côte, suivant la topographie particulière, lorsque les parties aériennes sont soumises à un risque d'exposition aux embruns)

PARTIES D'OUVRAGE	XC	XS	XD		XF		XA
			salage peu fréquent	salage fréquent*	salage peu fréquent	salage fréquent	
FONDATIONS (PIEUX, BARRETTES, PUIS MAROCAINS, BÉTONS DE BLOCAGE, SEMELLES, RADERS...)							
Fondations de tous types entièrement immergées	XC1	XS2	-	-	-	-	selon analyse sol et eau
Fondations de tous types en zone de marée	XC4	XS3	-	-	XF1	XF1	selon analyse sol et eau
Fondations profondes enterrées hors eau de mer	XC2	XS1**	-	pas d'exposition XD ou XD2 selon salage et distance de la voie franchie	-	-	selon analyse sol et eau
Fondations superficielles non immergées (partie aérienne)	XC4	XS3	-	XD1 ou XD3 selon salage et distance de la voie franchie	XF1	XF1, XF2 si très exposé aux sels	-
Fondations superficielles non immergées (partie enterrée)	XC2	XS1**	-	pas d'exposition XD ou XD2 selon salage et distance de la voie franchie	-	-	selon analyse sol et eau
APPUIS (CHEVÊTRES SUR PILES, CHEVÊTRES SUR PILES, PIÉDROITS, CULÉES Y COMPRIS MURS EN RETOUR...), PARTIES D'OUVRAGES EN CONTACT AVEC LE TERRAIN, NOÛTES							
Parties immergées	XC1	XS2	-	-	-	-	selon analyse sol et eau
Parties en zone de marée	XC4	XS3	-	-	XF1	XF1	selon analyse sol et eau
Parties enterrées	XC2	XS1**	-	pas d'exposition XD ou XD2 selon salage et distance de la voie franchie	-	-	selon analyse sol et eau
Parties à l'air libre	XC4	XS3	-	XD1 ou XD3 selon salage et distance de la voie franchie	XF1	XF1, XF2 si très exposé aux sels	-
Facès intérieures des piles ou culées creuses	XC3	XS1	-	-	XF1	XF1	-
Dalles de transition	XC2	XS1**	-	XD2	XF1	XF2	-
TABLIER (POUTRES, HOURDIS, DALLES, CAISSONS, TRAVERSES DE PONTS CADRES, ENTRETOISES)							
Face supérieure du hourdis protégée par l'éanchéité	XC3	-	-	-	XF1	XF1	-
Facès extérieures	XC4	XS3	-	XD1 ou XD3 selon salage et distance de la voie franchie	XF1	XF1 ou XF2 selon salage et distance de la voie franchie	-
Facès intérieures des caissons	XC3	XS1	-	-	XF1	XF1	-
ÉQUIPEMENTS ET SUPERSTRUCTURES							
Corniches	XC4	XS3	-	XD1 ou XD3 selon salage	XF1	XF2	-
Solins de joints de dilatation	XC4	XS3	-	XD3	XF1	XF2	-
Contre-corniches et longrines d'ancrage de barrière de sécurité (non revêtues)	XC4	XS3	-	XD3	XF1	XF2	-
Barrières de sécurité en béton, garde-corps, écrans acoustiques	XC4	XS3	-	XD3	XF1	XF2	-
Massifs d'ancrage (non revêtus) des candélabres, PPHM et panneaux de signalisation	XC4	XS3	-	XD3	XF1	XF2	-
Corniches-canaiveaux	XC4	XS3	-	XD3	XF1	XF2	-

* L'appréciation du salage se réfère le cas échéant à la voie franchie, sauf :

- pour les dalles de transition, solins de joints de dilatation, barrières de sécurité, longrines d'ancrage, massifs d'ancrage et garde-corps en béton où on l'apprécie par rapport à la voie portée ;
- pour les corniches et corniches-canaiveaux où on l'apprécie à la fois par rapport à la voie portée et à la voie franchie.

Le salage est considéré comme "peu fréquent" lorsque la moyenne annuelle du nombre de jours de salage estimée sur les 10 dernières années est inférieure à 10, "très fréquent" lorsqu'elle est supérieure ou égale à 30, et "fréquent" entre ces deux cas. En application de la norme NF EN 1992-2 et de son annexe nationale, les parties extérieures d'ouvrages situées à moins de 6 m (horizontalement ou verticalement) d'une chaussée salée sont réputées (très) exposées aux projections de sels de déneigement. Quelle que soit la fréquence de salage des routes et la zone géographique, certaines parties peuvent ne pas être exposées, on considérera alors la colonne "salage peu fréquent".

** XS1 correspond ici à un risque de ruissellement et d'infiltration de chlorures marins pour les parties enterrées. Ceci constitue une interprétation de la norme cohérente avec les errements actuels pour les parties de bâtiment.



Y compris Antilles et DOM-TOM.



Y compris Antilles
et DOM-TOM.

Tableau 2 - Ouvrages d'art situés à moins de 1 km de la côte

(ou jusqu'à 5 km de la côte, suivant la topographie particulière) lorsque les parties aériennes de ces ouvrages sont exposées à un air véhiculant du sel marin, mais pas directement aux embruns

PARTIES D'OUVRAGE	XC	XS	XD		XF		XA
			salage peu fréquent*	salage fréquent*	salage peu fréquent	salage fréquent	
FONDATIONS (PIEUX, BARRETTES, PUITS MAROCAINS, BÉTONS DE BLOCCAGE, SEMELLES, RADIERs...)							
Fondations de tous types entièrement immergées (rivière ou eau saumâtre ou marée)	X01	XS2	-	-	-	-	selon analyse sol et eau
Fondations de tous types en zone de marnage (rivière ou eau saumâtre ou marée)	X04	XS3	-	-	XF1	XF1	selon analyse sol et eau
Fondations profondes enterrées hors eau	X02	-	-	pas d'exposition XD ou XD2 selon salage et distance de la voie franchie	-	-	selon analyse sol et eau
Fondations superficielles non immergées (partie aérienne)	X04	XS1	-	XD1 ou XD3 selon salage et distance de la voie franchie	XF1	XF1, XF2 si très exposé aux sels	-
Fondations superficielles non immergées (partie enterrée)	X02	-	-	pas d'exposition XD ou XD2 selon salage et distance de la voie franchie	-	-	selon analyse sol et eau
APPUIS (CHEVÈTRES SUR PIEUX, PILES, CHEVÈTRES SUR PILES, PIÉDROITS, CULÉES Y COMPRIS MURS EN RETOUR...), PARTIES D'OUVRAGES EN CONTACT AVEC LE TERRAIN, VOÛTES							
Parties immergées (rivière ou eau saumâtre ou marée)	X01	XS2	-	-	-	-	selon analyse sol et eau
Parties en zone de marnage (rivière ou eau saumâtre ou marée)	X04	XS3	-	-	XF1	XF1	selon analyse sol et eau
Parties enterrées	X02	-	-	pas d'exposition XD ou XD2 selon salage et distance de la voie franchie	-	-	selon analyse sol et eau
Parties à l'air libre	X04	XS1	-	XD1 ou XD3 selon salage et distance de la voie franchie	XF1	XF1, XF2 si très exposé aux sels	-
Faces intérieures des piles ou culées creuses	X03	-	-	-	XF1	XF1	-
Dalles de transition	X02	-	-	XD2	XF1	XF2	-
TABLIER (POUTRES, HOURDIS, DALLES, CAISSONS, TRAVERSES DE PONTS CADRES, ENTRETENUES)							
Face supérieure du hourdis protégée par l'épanchéité	X03	-	-	-	XF1	XF1	-
Faces extérieures	X04	XS1	-	XD1 ou XD3 selon salage et distance de la voie franchie	XF1	XF1 ou XF2 selon salage et distance de la voie franchie	-
Faces intérieures des caissons	X03	-	-	-	XF1	XF1	-
ÉQUIPEMENTS ET SUPERSTRUCTURES							
Corniches	X04	XS1	-	XD1 ou XD3 selon salage	XF1	XF2	-
Solins de joints de dilatation	X04	XS1	-	XD3	XF1	XF2	-
Contre-corniches et longrines d'ancrage de barrière de sécurité (non revêtues)	X04	XS1	-	XD3	XF1	XF2	-
Barrières de sécurité en béton, garde-corps, écrans acoustiques	X04	XS1	-	XD3	XF1	XF2	-
Massifs d'ancrage (non revêtus) des candélabres, PPHM et panneaux de signalisation	X04	XS1	-	XD3	XF1	XF2	-
Corniches-cantiveaux	X04	XS1	-	XD3	XF1	XF2	-

* L'appréciation du salage se réfère, le cas échéant à la voie franchie, sauf :

- pour les dalles de transition, solins de dilatation, barrières de sécurité, longrines d'ancrage, massifs d'ancrage d'équipements et garde-corps en béton où on l'apprécie par rapport à la voie portée ;
 - pour les corniches et corniches-cantiveaux où on l'apprécie à la fois par rapport à la voie portée et à la voie franchie.
- Le salage est considéré comme "peu fréquent" lorsque la moyenne annuelle du nombre de jours de salage estimée sur les 10 dernières années est inférieure à 10, "très fréquent" lorsqu'elle est supérieure ou égale à 30, et "fréquent" entre ces deux cas. En application de la norme NF EN 1992-2 et de son annexe nationale, les parties extérieures d'ouvrages situées à moins de 6 m (horizontalement ou verticalement) d'une chaussée salée sont réputées (très) exposées aux projections de sels de déverglacage. Quelle que soit la fréquence de salage des routes et la zone géographique, certaines parties peuvent ne pas être exposées, on considèrera alors la colonne "salage peu fréquent".

Tableau 3 - Ouvrages d'art à l'intérieur des terres en zone de gel faible ou modéré



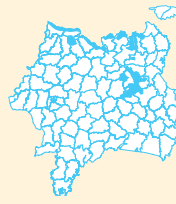
Y compris Aquilles
et DOM-TOM.

PARTIES D'OUVRAGE	XC		XS		XD			XF			XA	
	salage peu fréquent*	salage fréquent*	salage peu fréquent*	salage fréquent*	salage très fréquent*	salage peu fréquent*	salage très fréquent*	salage très fréquent*	salage très fréquent*			
FONDATIONS (PIEDS, BARRETTES, PUIS MAROCAINS, BÉTONS DE BLOCAE, SEMELLES, RADIERs...)												
Fondations de tous types entièrement immergées (eau douce**)	XC1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	selon analyse sol et eau
Fondations de tous types en zone de marnage (eau douce**)	XC4	-	-	-	-	-	-	XF1	XF1	XF1	XF1	selon analyse sol et eau
Fondations profondes enterrées hors eau de mer	XC2	-	-	-	pas d'exposition XD ou XD2 selon salage et distance de la voie franchie	XD2	-	-	-	-	-	selon analyse sol et eau
Fondations superficielles non immergées (partie aérienne)	XC4	-	-	-	XD1 ou XD3 selon salage et distance de la voie franchie	XD3	XF1	XF1, XF2 si très exposé aux sels	XF2, XF4 si très exposé aux sels	-	-	-
Fondations superficielles non immergées (partie enterrée)	XC2	-	-	-	pas d'exposition XD ou XD2 selon salage et distance de la voie franchie	XD2	-	-	-	-	-	selon analyse sol et eau
APPUIS (CHEVÈTRES SUR PILES, PILES, CHEVÈTRES SUR PILES, PIÉDROITS, CULÉES Y COMPRIS MURS EN RETOUR...), PARTIES D'OUVRAGES EN CONTACT AVEC LE TERRAIN, VOÛTES												
Parties immergées (eau douce**)	XC1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	selon analyse sol et eau
Parties en zone de marnage (eau douce**)	XC4	-	-	-	-	-	XF1	XF1	XF1	XF1	XF1	selon analyse sol et eau
Parties enterrées	XC2	-	-	-	pas d'exposition XD ou XD2 selon salage et distance de la voie franchie	XD2	-	-	-	-	-	selon analyse sol et eau
Parties à l'air libre	XC4	-	-	-	XD1 ou XD3 selon salage et distance de la voie franchie	XD3	XF1	XF1, XF2 si très exposé aux sels	XF2, XF4 si très exposé aux sels	-	-	-
Faces intérieures des piles ou culées creuses	XC3	-	-	-	-	-	XF1	XF1	XF1	-	-	-
Dalles de transition	XC2	-	-	-	XD2	XD2	XF1	XF2	XF2	-	-	-
TABLIER (POUTRES, HOURDIS, DALLES, CAISSONS, TRAVERSES DE PONTS CADRES, ENTRETOISES)												
Face supérieure du hourdis protégée par l'étanchéité	XC3	-	-	-	-	-	XF1	XF1	XF1	XF1	XF1	-
Faces extérieures	XC4	-	-	-	XD1 ou XD3 selon salage et distance de la voie franchie	XD1 ou XD3 selon salage et distance de la voie franchie	XF1	XF2	XF2, XF4 si très exposé aux sels	-	-	-
Faces intérieures des caissons	XC3	-	-	-	-	-	XF1	XF1	XF1	XF1	XF1	-
ÉQUIPEMENTS ET SUPERSTRUCTURES												
Corniches	XC4	-	-	-	XD3	XD3	XF1	XF2	XF4	-	-	-
Solins de joints de dilatation	XC4	-	-	-	XD3	XD3	XF1	XF2	XF4	-	-	-
Contre-corniches et longrines d'ancrage de barrière de sécurité (non revêtues)	XC4	-	-	-	XD3	XD3	XF1	XF2	XF4	-	-	-
Barrières de sécurité en béton, garde-corps, écrans acoustiques	XC4	-	-	-	XD3	XD3	XF1	XF2	XF4	-	-	-
Massifs d'ancrage (non revêtus) des candélabres, PPHM et panneaux de signalisation	XC4	-	-	-	XD3	XD3	XF1	XF2	XF4	-	-	-
Corniches-caniveaux	XC4	-	-	-	XD3	XD3	XF1	XF2	XF4	-	-	-

* L'appréciation du salage se réfère le cas échéant à la voie franchie, sauf :

- pour les dalles de transition, solins de joints de dilatation, barrières de sécurité, longrines d'ancrage, massifs d'ancrage d'équipements et garde-corps en béton où on l'apprécie par rapport à la voie portée ;
 - pour les corniches et corniches-caniveaux où on l'apprécie à la fois par rapport à la voie portée et à la voie franchie.
- Le salage est considéré comme "peu fréquent" lorsque la moyenne annuelle du nombre de jours de salage estimée sur les 10 dernières années est inférieure à 10, "très fréquent" lorsqu'elle est supérieure ou égale à 30, et "fréquent" entre ces deux cas. En application de la norme NF EN 1992-2 et de son annexe nationale, les parties extérieures d'ouvrages situées à moins de 6 m (horizontalement ou verticalement) d'une chaussée salée sont réputées (très) exposées aux projections de sels de déneigement. Quelle que soit la fréquence de salage des routes et la zone géographique, certaines parties peuvent ne pas être exposées, on considérera alors la colonne "salage peu fréquent".

** En cas d'eau salée ou saumâtre cf. tableau 1 pour la classe XS



Y compris Terres Australes et Antarctiques Françaises (TAAF) et Saint-Pierre-et-Miquelon.

Tableau 4 - Ouvrages d'art à l'intérieur des terres en zone de gel sévère

PARTIES D'OUVRAGE	XC	XS	XD		XF		XA
			salage peu fréquent*	salage très fréquent*	salage peu fréquent*	salage très fréquent*	
FONDATIONS (PIEDS, BARRETTES, PUIS MAROCAINS, BÉTONS DE BLOCAGE, SEMELLES, RAOIERS...)							
Fondations de tous types entièrement immergées (eau douce**)	XC1	-	-	-	XF3	XF3	-
Fondations de tous types en zone de marnage (eau douce**)	XC4	-	-	-	XF3	XF3	selon analyse sol et eau
Fondations profondes enterrées hors eau de mer	XC2	-	-	pas d'exposition XD ou XD2 selon salage et distance de la voie franchie	XD2	XF3	selon analyse sol et eau
Fondations superficielles non immergées (partie aérienne)	XC4	-	-	XD1 ou XD3 selon salage et distance de la voie franchie	XD3	XF3, XF4 si très exposé aux sels	-
Fondations superficielles non immergées (partie enterrée)	XC2	-	-	pas d'exposition XD ou XD2 selon salage et distance de la voie franchie	XD2	XF3	selon analyse sol et eau
APPUIS (CHEVÈTRES SUR PIEDS, PILES, CHEVÈTRES SUR PILES, PIÉDROITS, CULÈES Y COMPRIS MURS EN RETOUR...), PARTIES D'OUVRAGES EN CONTACT AVEC LE TERRAIN, VOÛTES							
Parties immergées (eau douce**)	XC1	-	-	-	XF3	XF3	selon analyse sol et eau
Parties en zone de marnage (eau douce**)	XC4	-	-	-	XF3	XF3	selon analyse sol et eau
Parties enterrées	XC2	-	-	pas d'exposition XD ou XD2 selon salage et distance de la voie franchie	XD2	XF3	selon analyse sol et eau
Parties à l'air libre	XC4	-	-	XD1 ou XD3 selon salage et distance de la voie franchie	XD3	XF3, XF4 si très exposé aux sels	-
Facès intérieurs des piles ou culées creuses	XC3	-	-	-	XF3	XF3	-
Dalles de transition	XC2	-	-	XD2	XD2	XF3	XF4
TABLIER (POUTRES, HOURDIS, DALLES, CAISSONS, TRAVERSES DE PONTS CADRES, ENTRETOISES)							
Face supérieure du hourdis protégée par l'étanchéité	XC3	-	-	-	XF3	XF3	-
Facès extérieurs	XC4	-	-	XD1 ou XD3 selon salage et distance de la voie franchie	XD1 ou XD3 selon salage et distance de la voie franchie	XF3 ou XF4 selon salage et distance de la voie franchie	XF3 ou XF4 selon salage et distance de la voie franchie
Facès intérieurs des caissons	XC3	-	-	-	XF3	XF3	-
ÉQUIPEMENTS ET SUPERSTRUCTURES							
Corniches	XC4	-	-	XD3	XD3	XF3	XF4
Solins de joints de dilatation	XC4	-	-	XD3	XD3	XF3	XF4
Contre-corniches et longrines d'ancrage de barrière de sécurité (non revêtues)	XC4	-	-	XD3	XD3	XF3	XF4
Barrières de sécurité en béton, garde-corps, écrans acoustiques	XC4	-	-	XD3	XD3	XF3	XF4
Massifs d'ancrage (non revêtus) des candélabres, PPHM et panneaux de signalisation	XC4	-	-	XD3	XD3	XF3	XF4
Corniches-cantiveaux	XC4	-	-	XD3	XD3	XF3	XF4

* L'appréciation du salage se réfère le cas échéant à la voie franchie, sauf :
 - pour les dalles de transition, solins de joints de dilatation, barrières de sécurité, longrines d'ancrage, massifs d'ancrage d'équipements et garde-corps en béton où on l'apprécie par rapport à la voie portée ;
 - pour les corniches et corniches-cantiveaux où on l'apprécie à la fois par rapport à la voie portée et à la voie franchie.
 Le salage est considéré comme "peu fréquent" lorsque la moyenne annuelle du nombre de jours de salage estimée sur les 10 dernières années est inférieure à 10, "très fréquent" lorsqu'elle est supérieure ou égale à 30, et "fréquent" entre ces deux cas. En application de la norme NF EN 1992-2 et de son annexe nationale, les parties extérieures d'ouvrages situées à moins de 6 m (horizontalement ou verticalement) d'une chaussée salée sont réputées (très) exposées aux projections de sels de déneigement. Quelle que soit la fréquence de salage des routes et la zone géographique, certaines parties peuvent ne pas être exposées, on considèrera alors la colonne "salage peu fréquent".
 ** En cas d'eau salée ou saumâtre cf. tableau 1 pour la classe XS

→ Bien spécifier les classes d'exposition : quel enjeu ?

Les classes d'exposition constituent, en complément de la durée d'utilisation de projet ("design service life"), la clé d'entrée de la durabilité des ouvrages en béton telle que prise en compte dans les normes actuelles : Eurocode 2, norme béton, norme d'exécution des structures en béton. Leur spécification est de la responsabilité du maître d'ouvrage qui se trouve ainsi engagé dans l'expression des risques et des conditions d'exploitation de la structure qu'il commande. Qu'elle soit traitée de façon prescriptive ou au moins partiellement performantielle, la conception durable de l'ouvrage se trouve gouvernée par cette donnée d'entrée, afin de répondre à l'objectif consistant à s'assurer d'une durée probable de service contractualisée, sans réparation majeure, compte tenu des agressions et risques probables.

Si les classes d'exposition constituent depuis quelques années des concepts connus et mis en pratique parce que participant à la désignation du béton commandé et formulé en application de la norme NF EN 206-1, il est important de noter qu'elles sont aussi à utiliser :

- dès le stade du projet pour la détermination des enrobages (normes : NF EN 1992-1-1, NF EN 1992-2 et leurs annexes nationales, section 4) ;
- dès le stade du projet pour la maîtrise de la fissuration (normes : NF EN 1992-1-1, NF EN 1992-2 et leurs annexes nationales, section 7) ;
- et lors de la construction, pour préciser les spécifications d'exécution dont, par exemple, les classes de cure (norme : NF EN 13670).

Les visées spécifiques des différentes normes qui font référence à ces classes et la multiplicité des praticiens concernés par leur utilisation ont conduit à une nécessaire mise en commun des interprétations, de façon à aider à une spécification homogène et responsable des classes d'exposition, compte tenu des enjeux économiques liés à la durabilité des ouvrages concernés. Tel a été le travail du groupe de l'EFB animé par H. Thonier, s'appuyant pour les différents types d'ouvrages sur le travail des experts concernés. Si ces *Guides d'aide au choix des classes*

d'exposition n'ont pas de statut officiel, ils constituent cependant une indication du consensus technique actuel cohérent avec les niveaux d'exigence prescriptifs et/ou performantiels actuellement associés à ces classes en lien avec les durées d'utilisation de projet de référence actuelles (100 ans pour les ouvrages d'art courants). Ils ont donc en quelque sorte valeur de règles de l'art.

De façon plus fondamentale, ces tableaux traduisent effectivement un état des connaissances et un retour d'expérience qu'un maître d'ouvrage ne peut plus ignorer :

- la prise en compte du risque de corrosion des armatures et parties métalliques des ouvrages par carbonatation du béton, qui concerne pratiquement toutes les structures à des degrés divers, la sévérité du risque étant associée à la fois à l'humidité environnante moyenne (pénétration du gaz carbonique maximale pour une humidité relative comprise entre 40 et 70 %), et à des apports d'eau liquide (intempéries, condensations), le retour d'expérience sur le patrimoine bâti confirmant les analyses et modèles issus de la recherche ;
- la prise en compte du risque de corrosion des armatures et parties métalliques des ouvrages par pénétration des ions chlore, d'origine marine ou non : la pénétration de ces ions est favorisée par les cycles d'humidification-séchage, ce qui explique le niveau maximal de prévention à adopter pour les zones de marnage, soumises aux projections d'embruns ou directement soumises aux projections contenant des sels de déverglaçage ;
- la prise en compte des risques d'attaque chimique du béton et d'attaque physique liée aux cycles de gel-dégel dont le nombre est amplifié par la comitance des sels ;
- le cas échéant, la prise en compte du risque d'abrasion ;
- enfin, le risque accru induit par l'apport éventuel d'eau liquide (immersion, projections ou intempéries), ou d'humidité persistante, dans le cadre de la prévention des désordres dus aux réactions de gonflement du béton et notamment à la Réaction Sulfatique Interne.

Si un effort reste nécessaire pour chacun avant d'atteindre l'aisance parfaite dans l'emploi de ces classes, on peut néanmoins affirmer que la cohérence désormais réelle entre l'ensemble des normes françaises et européennes sur le sujet constitue un atout pour exprimer de façon plus rationnelle l'ambition de durabilité d'un ouvrage et ses contraintes, et pour y répondre en mobilisant le meilleur des pratiques et possibilités en jouant tant sur le matériau béton que sur les dispositions d'enrobage et de ferrailage, la conception d'ensemble et de détail, les dispositifs de protection et la qualité de réalisation.

Dans tous les cas, l'enjeu est de favoriser de façon ouverte l'assurance de la qualité associée aux dispositions classiques liées à la durabilité, et aussi, en particulier dans les environnements sévères, l'émergence de variantes appropriées pour atteindre l'objectif de durabilité. ■

FRANÇOIS TOUTLEMONDE, LCPC

Un groupe de travail a été créé au sein de l'École Française du Béton afin de rédiger des guides destinés à faciliter le choix des classes d'exposition pour différentes catégories d'ouvrages ou de constructions.

Ce Groupe, piloté par Henry Thonier (EGF-BTP), est constitué de membres représentant l'Administration (LCPC, CETMEF, CETU), les bureaux de contrôle (SOCOTEC, APAVE), les fédérations professionnelles (FFB, FNTP, EGF-BTP, UMGO), les entreprises (Eiffage, Bouygues), les organismes techniques professionnels (CERIB, Cimbéton).

La rédaction a été principalement assurée par Laetitia d'Aloia (CETU), Patrick Dantec (LRPC-Clermont), Mokhtar Daoudi (APAVE), Philippe Francisco (CERIB), Patrick Guiraud (Cimbéton), Michel Menguy (LRPC-Saint-Brieuc), Wilfried Pillard (UMGO), Jean-Marc Potier (SNBPE), François Toutlemonde (LCPC).

→ Prévention de la Réaction Sulfatique Interne (RSI)

Le tableau ci-dessous complète l'aide au choix des classes d'exposition. Il est associé à la prévention de la Réaction Sulfatique Interne, en application du guide technique *Recommandations pour la prévention des désordres dus à la Réaction Sulfatique Interne*, publié par le LCPC en août 2007. Ce guide précise en effet : "la norme NF EN 206-1 ne définissant pas de classe d'exposition adaptée à la réaction sulfatique interne, trois classes complémentaires XH1, XH2 et XH3 sont introduites et doivent être spécifiées au CCTP pour chaque

partie d'ouvrage. Les spécifications définies dans ce guide doivent être prises en compte, en complément de celles imposées par la norme NF EN 206-1."

Par analogie avec la démarche de prévention de l'alcali-réaction, le niveau de prévention, et donc les précautions à mettre en œuvre, est associé non seulement à la classe d'exposition XH1, XH2 ou XH3, mais également au choix d'une catégorie d'ouvrage ou d'élément d'ouvrage, I, II ou III, qui relève de la responsabilité du maître d'ouvrage

et dépend "de la nature de l'ouvrage, de sa destination, des conséquences des désordres sur la sécurité souhaitée, et de son entretien ultérieur". La catégorie II comprend "les éléments porteurs de la plupart des bâtiments et les ouvrages de génie civil (dont les ponts courants)" et la catégorie III "les ponts et viaducs exceptionnels", tandis que la catégorie I comprend "les éléments aisément remplaçables". Le tableau 5 ci-dessous intègre cette notion pour aider au choix du niveau de prévention. ■

FRANÇOIS TOUTLEMONDE, LCPC ; PARTICK DANTEG, LRPC-CLERMONT

Tableau 5 - Prévention de la Réaction Sulfatique Interne

Tous ouvrages d'art indépendamment de leur situation géographique

PARTIES D'OUVRAGE	XH (PRÉVENTION RSI)	NIVEAU DE PRÉVENTION RSI	
		Ouvrage courant (de catégorie II)	Ouvrage exceptionnel (de catégorie III)
FONDATIONS (PIEUX, BARRETTES, PUIXS MAROCAINS, BÉTONS DE BLOCAGE, SEMELLES, RADIERS...)			
Fondations de tous types, parties entièrement immergées	XH3	Cs	Ds
Fondations de tous types, parties en zone de marnage	XH3	Cs	Ds
Fondations profondes enterrées hors eau de mer	XH3	Cs	Ds
Fondations superficielles non immergées (partie aérienne)	XH2	Bs	Cs
Fondations superficielles non immergées (partie enterrée)	XH2	Bs	Cs
APPUIS (CHEVÊTRES SUR PIEUX, PILES, CHEVÊTRES SUR PILES, PIÉDROITS, CULÉES Y COMPRIS MURS EN RETOUR...), PARTIES D'OUVRAGES EN CONTACT AVEC LE TERRAIN, VOÛTES			
Parties immergées	XH3	Cs	Ds
Partie en zone de marnage	XH3	Cs	Ds
Parties enterrées	XH2	Bs	Cs
Parties à l'air libre	XH2	Bs	Cs
Faces intérieures des piles ou culées creuses	XH1		As
Dalles de transition	XH2		Bs
TABLIER (POUTRES, HOURDIS, DALLES, CAISSONS, TRAVERSES DE PONTS CADRES, ENTRETOISES)			
Face supérieure du hourdis protégée par l'étanchéité	XH2	Bs	Cs
Faces extérieures	XH2	Bs	Cs
Faces intérieures des caissons	XH2	Bs	Cs
ÉQUIPEMENTS ET SUPERSTRUCTURES			
Corniches	XH2		Bs
Solins de joints de dilatation	XH3		As
Contre-corniches et longrines d'ancrage de barrière de sécurité (non revêtues)	XH3		Cs
Barrières de sécurité en béton, garde-corps, écrans acoustiques	XH2		As
Massifs d'ancrage (non revêtus) des candélabres, PPHM et panneaux de signalisation	XH3		Cs
Corniches-caniveaux	XH3		Cs



Un trait d'union dans la plaine d'Alsace

>>> LE RACCORDEMENT DE L'AUTOROUTE A 352 À LA VOIE RAPIDE DU PIÉMONT DES VOSGES S'ACHÈVE PAR LA RÉALISATION DE DEUX BRETelles ET TROIS OUVRAGES D'ART, DONT L'UN D'ENTRE EUX, DIT OA1, A EXIGÉ DES ÉTUDES ET UNE MISE EN ŒUVRE INHABITUELLES POUR OBTENIR LA BELLE LIGNE EFFILÉE QUI CONTRIBUE À SON INSERTION DISCRÈTE ET HARMONIEUSE DANS LA PLAINE D'ALSACE. LES PILES DE L'OUVRAGE PRÉSENTENT UNE SILHOUETTE EFFILÉE BIEN MISE EN VALEUR PAR LEUR PAREMENT DE BÉTON QUI PRÉSENTE UN ASPECT DE SURFACE D'UNE GRANDE RÉGULARITÉ.



1



2

L'opération consiste à raccorder l'autoroute A 352 Strasbourg – Molsheim à la Voie Rapide du Piémont des Vosges, qui se développe au sud jusqu'à la déviation de Sélestat. Elle concerne la réalisation de sa dernière section entre la déviation d'Innenheim et l'A 352. Le tracé retenu permet à la fois de répondre à court terme aux fonctions et aux usages liés à cet axe et de rester compatible avec les grands projets envisagés à plus long terme comme, notamment, le Grand Contournement Ouest (GCO) de Strasbourg.

Le projet nécessite la construction ou l'allongement de plusieurs ouvrages d'art, selon différentes typologies.

Pour l'ouvrage OA1, il s'agit de construire un pont au-dessus de l'A 352, destiné à supporter la bretelle Strasbourg – Colmar, dont les travées centrales franchissent l'autoroute, tandis que les

travées latérales permettront le passage des engins agricoles. En ce qui concerne les ouvrages OA1 bis et 1ter, l'opération consiste à élargir l'ouvrage agricole existant (PIPO) sur l'A 352 pour permettre le passage latéral des bretelles de liaison. Enfin, l'ouvrage OA2 consiste en un passage inférieur à cadre fermé (PICF), à l'usage des engins agricoles, sous la section courante et la future bretelle Colmar – Strasbourg de l'A 352 du GCO.

Un coulage de nuit

L'ouvrage OA1 est le plus important de l'opération et le plus délicat à réaliser puisque les travaux se déroulent sans interruption du trafic autoroutier.

Il est constitué d'un tablier en béton précontraint à quatre travées, de 80 m de longueur et 12 m de largeur, comportant trois piles et deux culées, fondées sur des semelles superficielles de 10 m x 4,50 m x 1 m.

La pile située sur le terre-plein central de l'autoroute a nécessité, pour sa construction, la réalisation d'une paroi berlinoise, destinée à maintenir le terrain en place pendant les travaux de terrassement de la semelle, compte tenu de la surcharge engendrée par la circulation autoroutière.

Le tablier, d'une épaisseur constante de 0,80 m, est en pente, en partie supérieure, de 7 % longitudinalement et de 4 % transversalement.

Au-dessus de l'autoroute, il a été coulé en place sur des plateaux coffrants s'appuyant sur des tours d'étalement en HEB 600 de 15 m de longueur, en surgarbit de 0,90 m par rapport à la hauteur finale de l'ouvrage, de façon à maintenir le gabarit autoroutier pendant les travaux. Sur les rives, le soutènement était assuré par des étalements classiques, supportant un fond de moule coffrant mixte.

Le béton était mis en œuvre à l'aide d'une pompe principale et d'une pompe secondaire, intervenant alternativement, du point bas vers le point haut, ce qui a permis un bétonnage en continu, de 3 heures du matin jusqu'au milieu de l'après-midi pour les 720 m³. Il était approvisionné à partir de deux centrales situées à Entzheim et Ergersheim.

Une formulation optimisée

"Le béton a nécessité une formulation spéciale en raison de la densité élevée des armatures dans le tablier : 120 kg/m³", précise Marc Tritschler, conducteur de

>>> Liaison A 352-A 35.



chiffres clés

- Béton : 4 000 m³
- Armatures : 350 t
- Durée de réalisation : 14 mois



➤➤➤ **1** Les piles dans leur environnement. **2** Le franchissement de l'autoroute A 352 Strasbourg – Colmar. **3** Les piles ont été dessinées par l'architecte Jean-Marc Zimmermann. **4** L'aspect de surface des piles évoque l'empreinte d'une planche de bois avec une courbure incrustée montant jusqu'au chevêtre.

travaux principal chez Eiffage Construction Strasbourg.

En effet, le projet optimisé par rapport à la proposition initiale, défini par l'entreprise en collaboration avec Davi Przybyla du LRPC de Strasbourg et le service technique de Holcim aboutit à un tablier en béton précontraint de seulement 0,80 m d'épaisseur, nécessitant un ferrailage particulièrement dense auquel s'ajoute la présence de 14 gaines de 95 mm pour les câbles de précontrainte 19T15.

Les intervenants ont choisi une formulation du béton différente de celle couramment mise en œuvre dans la

région pour des ouvrages similaires, de façon à obtenir une consistance de 15 mm au cône d'Abrams.

"Il en résulte un béton de classe d'exposition XF4 relativement fluide, indique Marc Leguil, responsable qualité chez Holcim Bétons région Est, *constitué de granulats roulés de Lingolsheim (225 kg de 4/8, 870 kg de 8/16, 720 kg de 0/4), 150 litres d'eau, 400 kg de ciment CEM I 52,5 N CE PM CP2 NF de la cimenterie de Rochefort, 0,45 % de Glenium Sky 537 et 0,45 % de Chrysoplast CER*".

Cette formule a permis d'atteindre une résistance de l'ordre de 35 MPa néces-

saire à sept jours pour la mise en tension de la précontrainte et le décintrage et de classe de résistance C 55/60 à 28 jours. Le vérinage du tablier à sa hauteur définitive s'est effectué sur une durée totale de trois semaines en respectant une tolérance de tassement différentiel de l'ordre de 1 mm par point d'appui.

Des piles architecturées

La forme des culées et l'élançement des piles ont été définis par l'architecte Jean-Marc Zimmermann. Elles sont en harmonie avec celles de la VRPV Strasbourg – Colmar, dont il avait également assuré la conception.

La silhouette des piles est affinée par leur forme élancée et bien mise en valeur grâce à un aspect de surface du béton, qui donne un parement d'une grande régularité.

L'utilisation d'une huile de parement végétale, associée à une mise en œuvre élaborée dans des coffrages préparés avec soin, ont permis d'obtenir un résultat final très séduisant.

Ainsi, le béton met en évidence un dessin rappelant l'empreinte de planches de bois ainsi qu'une courbure mon-

tante s'effilant jusqu'au chevêtre qui contribue à une insertion discrète de l'ouvrage dans son environnement. ■

TEXTE : MARC MONTAGNON

PHOTOS : OUVERTURE, 2, 3, 4 : MARC MONTAGNON

1 : EIFFAGE CONSTRUCTION ALSACE



Maître d'ouvrage :
MEEDDM et DRE Alsace

Maître d'œuvre :
Direction Interdépartementale
des Routes Est
(SIR de Mulhouse)

Architecte :
Jean-Marc Zimmermann

Entreprises :
Eiffage Construction Alsace
(mandataire),
Eiffage TP

Coût :
3,7 M€ HT

contexte

L'achèvement de l'A 35

La Voie Rapide du Piémont des Vosges (VRPV) est l'un des maillons de l'autoroute A 35, dont la vocation est de constituer entre Lauterbourg et Bâle un axe autoroutier Nord-Sud permettant le développement de l'Alsace en assurant le raccordement de la région aux réseaux autoroutiers suisses et allemands et confortant ainsi Strasbourg dans son rôle de métropole rhénane.



Un géant aux appuis élégants

>>> LE VIADUC DE LA CÔTIÈRE FAIT PARTIE DU CHANTIER DE L'AUTOROUTE A 432 LES ECHETS - LA BOISSE, QUI AMÉLIORERA LE QUOTIDIEN DES USAGERS ET RIVERAINS, EN LEUR OFFRANT UN ITINÉRAIRE PLUS FLUIDE POUR RELIER LE NORD ET L'EST DE L'AGGLOMÉRATION LYONNAISE. SELON LES PRÉVISIONS, 15 000 VÉHICULES PAR JOUR Y CIRCULERONT BIENTÔT. CET OUVRAGE, DONT L'ESTHÉTIQUE EST CARACTÉRISÉE PAR SES ÉLÉGANTES PILES EN BÉTON, COMPTE PARI MI LES PREMIÈRES STRUCTURES JUSTIFIÉES AUX EUROCODES.

Le tracé en S du viaduc de la Côtière longe celui du viaduc de la ligne ferroviaire (LGV Rhône-Alpes). Les deux ouvrages obéissent à un parallélisme rigoureux, pour éviter une nouvelle coupure du paysage.

La présence du viaduc LGV a conduit le groupement, lauréat du concours en conception-construction organisé par APRR, maître d'ouvrage et exploitant de l'A 432, à privilégier un ouvrage "classique". Comme le précise la note architecturale et paysagère de l'ouvrage, il n'était pas question "de concurrencer de manière frontale le viaduc ferroviaire par une superstructure marquée de type ouvrage haubané, suspendu ou bow-string. [...] Nonobstant, la ligne architecturale du viaduc doit être originale, tenir compte de son voisin sans le singer". L'appréciation visuelle de l'ouvrage, à partir de la RD 1048, aboutit à un strict alignement des piles des deux viaducs au droit de cette départementale. La topographie du site a nécessité un trai-

tement particulier car la Côtière de la Dombes est une pente boisée orientée est-ouest. Pour limiter l'incidence du viaduc sur cette composante naturelle, la longueur du tablier est ajustée, les dimensions de la culée nord réduites et aucun remblai d'approche dans la pente n'a été réalisé.

Une impression de grande finesse

La structure choisie est de hauteur constante afin de s'harmoniser avec le dessin des arches de l'ouvrage ferroviaire. La ligne architecturale s'articule donc autour de trois éléments. Tout d'abord une série de piles (de 14 à 41 m de hauteur) uniques, évidées et toutes en courbes. Le jeu d'ellipses de l'évidement central, qui s'élancent jusqu'à une encoche "taille de guêpe" dans le chevêtre, donne plus de transparence. Ensuite, une travure proche de celle du viaduc ferroviaire.

À l'échelle de la plaine, le tablier donne une impression de grande finesse. Tel un simple trait coloré en rouge pourpre, il jaillit du versant de la Côtière.

Le viaduc comporte deux tabliers jumeaux, totalisant une largeur de 30 m. La charpente métallique est composée de deux poutres de 3,25 m de hauteur, solidarisées tous les 8 m par des entretoises. Le hourdis en béton armé est liaisonné aux poutres par des connecteurs métalliques.

Les travaux ont duré 26 mois. Les fondations des piles (forage des pieux) et les semelles ont été réalisées d'octobre 2008 à juin 2009. Les piles et culées ont été construites de janvier 2009 à janvier 2010. La charpente métallique a été fabriquée et mise en place d'avril 2009 à mai 2010. La réalisation du tablier, la pose des dalles préfabriquées en béton et des équipements seront achevées en novembre prochain. Finitions et aménagements paysagers se termineront en avril 2011.



>>> **1** Lors du coulage, le coffrage métallique fixé au sommet de la pile devait reprendre les 850 tonnes de béton frais et d'armatures en acier. **2** Une encoche "taille de guêpe" dans le chevêtre donne plus de transparence.



3



4



5

➤➤➤ **3** Le tablier est une structure mixte. **4** Les piles sont évidées et toutes en courbes. **5** Les piles au parement soigné mesurent de 14 à 41 mètres de hauteur.

Un ouvrage dimensionné aux Eurocodes

Comptant parmi les premières structures justifiées aux Eurocodes, l'ouvrage est dimensionné pour résister à une accélération sismique de 1 m/s^2 et au passage d'un convoi militaire de type M120 (110 t). Les pieux en béton prébattu (8 à 12 par pile), qui reprennent 70 % des efforts en frottement et 30 % en effet de pointe,

comportent une densité d'armatures de 60 kg/m^3 . Ils mesurent de 20 à 30 m de longueur pour 1,5 m de diamètre. Ce sont les centrales de Miribel et de Satolas qui ont fourni les 40 000 m³ de béton utilisés pour le coulage des pieux, semelles, piles, chevêtres et tabliers. La particularité de ce chantier a consisté à formuler un béton spécifique selon le cahier des charges du service Bétons de Vinci, qui imposait notamment de limiter l'élévation de la température au cœur du béton pour prévenir tout risque de réaction sulfatique interne dans le béton. Le fournisseur de BPE a donc formulé un béton en limitant l'exothermie, tout en garantissant la résistance mécanique (classe de résistance C 40/50 pour le tablier, C 30/37 pour les pieux, C 35/45 pour les semelles, élévations et chevêtres) et une bonne pompabilité maîtrisée par une adaptation du rapport granulats/sable et du volume de pâte. La cimenterie de Saint-Egrève a fourni 15 000 t de CEM I 52,5 N CE PM ES NF. Un test de performance à l'écaillage selon la norme XP P 18 420, réalisé par le laboratoire Sigma Béton, a permis de valider la tenue du béton aux sels de déverglaçage. Un béton de classe

de résistance C 40/50 a également été nécessaire pour réaliser les 650 dalles préfabriquées du tablier. Les "bétons d'hiver" arrivaient sur le chantier du viaduc à 17-18°C et des adjuvants retardateurs de prise ont été ajoutés aux "bétons d'été".

Une esthétique optimale

La qualité des parements des piles est particulièrement soignée pour une esthétique optimale de l'ouvrage. Les coffrages ont été désaccouplés pour effectuer les levées demi-coque par demi-coque. Les chevêtres en tête de piles sont imposants (27 x 4 x 5 m). Ils supportent les deux tabliers et liaisonnent les deux fûts constitutifs des piles. Leur réalisation est une prouesse. En effet, le coffrage métallique fixé au sommet de la pile doit reprendre lors du coulage les 850 t de béton frais et d'armatures. Les chevêtres ont été coulés à l'aide d'une pompe de 58 mètres. Le décoffrage a été réalisé sous 48 h. Enfin, la précontrainte des grands porte-à-faux des chevêtres est assurée par quatre câbles 27T15. ■

TEXTE : EMMANUELLE SERRANO

PHOTOS : OUVERTURE, 1, 3 : HUBERT CANET,

BALLOÏDE - PHOTO 2, 4, 5 : EMMANUELLE SERRANO



Maître d'ouvrage :

APRR (Autoroutes Paris Rhin Rhône), concessionnaire et exploitant

AMO :

Setec International — SetecTPI

Architectes :

Thomas Lavigne, Christophe Chéron

Bureaux d'études

exécution : Vinci Construction France BET, Campenon Bernard Dodin

Travaux :

Dodin Campenon Bernard (mandataire) — GTMTP Lyon

Fournisseur BPE :

Cemex

Dalles préfabriquées :

Bonna Sabla (groupe Consolis)

Coût :

73 M€ HT

chiffres clés

- Longueur : **1 210 mètres**
- Largeur : **30 mètres**
- 2 tabliers jumeaux supportant 3 voies de circulation dont 1 voie pour véhicules lents, 17 appuis dont 2 culées et 15 piles de 14 à 21 mètres de hauteur, 16 travées de 43 à 88 mètres de portée (du Nord au Sud : 66-4 x 83-88-4 x 80-84-77,50-72-66,5-61-43)
- Surface totale des tabliers : **34 620 m²**
- Charpente métallique : **8 400 t**
- Armatures : **7 000 t**
- Béton : **40 000 m³ (appuis + tablier)**



Le "Gautrain"

une infrastructure exceptionnelle

>>> UNE LIGNE FERROVIAIRE RAPIDE DE 77 KM BAPTISÉE "GAUTRAIN", DONT UN PREMIER TRONÇON A ÉTÉ MIS EN SERVICE EN JUIN, JUSTE AVANT LA COUPE DU MONDE DE FOOTBALL, VA BIENTÔT RELIER EN 42 MN PRETORIA À JOHANNESBURG. L'OUVRAGE EST EXCEPTIONNEL PAR SON AMPLEUR. EMAILLÉ DE 10 STATIONS DONT TROIS SOUTERRAINES, IL CUMULE 10 KM DE VIADUCS, 15 KM DE TUNNELS ET TRAVERSE UNE ZONE DOLOMITIQUE QUI A NÉCESSITÉ DE MULTIPLES RENFORCEMENTS DES SOLS... AU TOTAL, PRÈS DE 900 000 M³ DE BÉTON ONT ÉTÉ MIS EN ŒUVRE. GAUTRAIN REPRÉSENTE POUR BOUYGUES TRAVAUX PUBLICS SON PLUS GRAND CHANTIER DE GÉNIE CIVIL.



1



2

L'Afrique du Sud vient d'organiser cet été un événement sportif international majeur : la Coupe du monde de football 2010, une première sur le continent africain. Pour l'accueillir, le Gouvernement a souhaité au préalable s'équiper de stades, d'hébergements, mais surtout d'infrastructures de transports. Il a donc lancé un vaste programme de promotion et d'aménagement des transports publics, dont le fer de lance est une liaison ferroviaire nouvelle rapide, baptisée Gautrain. Une première phase a été mise en service début juin, le reste doit l'être avec un décalage de neuf mois. D'une longueur totale de 77 km, en forme de Y inversé, cette ligne rapide a été conçue d'emblée avec l'écartement entre rails international de 1,435 m, alors que le réseau local est métrique. Elle est

destinée à relier les centres-villes de Johannesburg et de Pretoria, ainsi que l'aéroport international. Elle est complétée par 9 000 places de parkings disséminées sur les 10 stations et d'un réseau de rabattement de bus desservant une zone rayonnante d'une dizaine de kilomètres autour de chacune d'elles.

Moderniser les transports

Ce vaste projet s'inscrit dans le cadre de la modernisation des transports et du développement de l'axe entre ces deux villes, comparable à une véritable "Silicon Valley de cette Californie Sud-Africaine". Car le déficit en transports s'est beaucoup aggravé au fil du temps dans ce pays. En conséquence, les temps de parcours domicile-travail ont presque triplé en vingt ans. En outre, les réseaux de bus ont vieilli et ne répondent plus à la demande. Pour tenter de combler ce déficit d'offres de transports de masse, des flottes de maxi-taxis d'une capacité de 10-12 personnes sillonnent la province du Gauteng 24 heures sur 24 et contribuent encore un peu plus à l'engorgement du trafic. Quant au réseau ferré, qui couvre 21 245 km de voies dont 50 % pour cette seule province,

1 Usine de préfabrication des voussoirs des ouvrages d'art. 2 Voussoirs courants, en attente de mise en place, sur l'aire de stockage. 3 Puits d'accès des secours des ouvrages souterrains. 4 Viaduc de Jean Avenue : construction par encorbellements successifs par voussoirs coulés en place dans des équipages mobiles.

il est surtout destiné au transport des marchandises. De plus, le fonctionnement des trains de banlieue est affecté par des pannes et des problèmes de sécurité qui s'ajoutent à des dessertes ferroviaires souffrant d'un manque d'adaptation au développement de l'urbanisation.

Face à cette situation, le Premier Ministre de la Province du Gauteng a voulu inverser la tendance. En 2000, il dévoile le projet Gautrain et crée un comité de supervision, qui visite l'année suivante des réalisations similaires à l'étranger. Les ambitions affichées par ce projet, qui table sur 165 000 passagers/jour, sont grandes. En soulageant le trafic automobile sur l'axe Johannesburg – Pretoria, le Gouvernement espère économiser 585 000 km de trafic voiture chaque jour. Le niveau de performances du projet devra être élevé, en particulier la ponctualité et la disponibilité des trains et des bus, l'information du public en temps réel, la sécurité et la maintenance. Il maximisera "le nombre d'emplois directs et indirects, favorisera les transferts de technologies

pour l'Afrique du Sud, réduira la discrimination pour les communautés noires et les populations défavorisées". Sur le plan environnemental, pour lequel la législation est très stricte, il diminuera la pollution de l'air et le bruit. Enfin, à long terme, le Gautrain devra générer 1 % de croissance supplémentaire du PIB pour la Province.

La procédure de Partenariat Public Privé (PPP) a été initiée au début des années 2000. A l'issue de l'appel d'offres lancé en mai 2002, deux pré-qualifiés ont été retenus parmi les dix compétiteurs. Le 2 juillet 2005, Bombela a été déclaré concessionnaire pressenti pour ce contrat, qui comprend la conception, la construction, l'exploitation et la maintenance de la ligne pendant 15 ans. Ce groupement, constitué dès la phase de pré-qualification, rassemble plusieurs grands partenaires. Bouygues Travaux Publics, Murray & Roberts, major de la construction en Afrique du Sud, Strategic Partners Group (SPG) une société Sud-africaine, le canadien Bombardier Transportation pour

chiffres clés

- Longueur de la ligne : 77 km
- Longueur des tunnels : 15 km
- Longueur des viaducs : 10 km
- Volume de béton : 900 000 m³
- Stations : 10



3



4

le matériel roulant et RATP Développement pour assurer l'exploitation et la maintenance des infrastructures. Un contrat est signé entre Bombela et Turnkey Contractor (TKC), l'ensemblier pour la construction et la mise en service du Gautrain, chargé de la gestion des interfaces entre partenaires, des relations avec les autorités, les services de sécurité et l'autorité de régulation ferroviaire d'Afrique du Sud. Les deux groupements de travaux, BC JV pour le génie civil et E&M JV pour le système ferroviaire et le matériel roulant, sont responsables chacun des études et de la construction dans leurs domaines respectifs. Suite aux études, associant les ingénieurs génie civil, système et exploitation, l'infrastructure initiale envisagée est modifiée sur plusieurs secteurs. Ainsi, l'aéroport sera desservi en surface et non en souterrain, la section à trafic plus faible Sandton - Park passe à une seule voie alternée, l'alignement des tunnels est revu pour diminuer l'impact d'une zone de faille. Au nord, un point de rebroussement et une modification du tracé évitent des tunnels à l'approche de la station terminus de Pretoria. Toutes ces modifications engendrent des économies de l'ordre de 30 % qui ne sont pas négligeables

car le seul génie civil représente environ 1,6 milliard d'euros, sur un total estimé au final à 2,5 milliards d'euros (valeur 2005).

La version définitive du projet est présentée au client en janvier 2006. Les représentants de la ville de Johannesburg, des administrations des routes et autoroutes, des trains régionaux, de l'aéroport, des villes d'Ekhuruleni et de Pretoria, des ministères de l'Eau et de l'Environnement, valident alors les solutions techniques. Le contrat de concession est signé le 28 septembre 2006 et les travaux démarrent aussitôt.

Un projet hors norme

Une véritable course contre la montre débute, avec un plan de protection environnementale très strict couvrant la réduction du bruit et des vibrations, la gestion de l'eau et la protection des nappes. "C'était un projet hors norme, le plus gros que Bouygues Travaux Publics ait jamais réalisé. Le volume du béton mis en œuvre a atteint presque 900 000 m³. En plus des terrassements et des ouvrages courants, le projet cumule 10 km de viaduc et 15 km

>>> Le tracé du Gautrain.





de tunnels. Nous avons conçu, sur le site du dépôt, une usine de préfabrication pour les voussoirs, les poutres de ponts, les corniches, les parapets.

L'ensemble du génie civil a mobilisé, en pointe, environ 6 000 personnes, sans compter l'encadrement", énumère Michel Weick, directeur du bureau d'études, pour Bouygues. Cette phase 1 de 45 mois correspond à la liaison ouverte en juin dernier entre l'aéroport international et le nouveau quartier d'affaires de Sandton. "Dans des réalisations de cette ampleur, le facteur d'échelle est difficile à appréhender et à mesurer. Sur un projet de 300 millions d'euros, nous prévoyons un certain nombre de problèmes, mais nous avons nos réflexes et savons comment les traiter. Ici, les effets d'échelle ne sont pas linéaires. Quand, par exemple, une décision est à prendre sur un plan technique, cela ne s'applique pas sur un ouvrage de 500 m de long, mais peut-être sur un de 5 km : la décision n'est pas forcément neutre... Nous avons relevé un beau défi et avons ouvert en temps et en heure".

La ligne du Gautrain sera opérationnelle dans son intégralité entre Pretoria et Johannesburg début 2011.

Le temps de trajet parcouru par les navettes à 160 km/h entre les terminus de Hatfield et Park Station atteindra alors 42 minutes.

La ligne comporte 13 viaducs, totalisant 10,4 km représentatifs d'un large échantillon de techniques de réalisation : voussoirs préfabriqués assemblés travée par travée, voussoirs coulés en place par encorbellements successifs, poutres préfabriquées précontraintes avec hourdis coulés en place.

Deux ouvrages exceptionnels en béton précontraint franchissent, avec un biais très prononcé, des axes autoroutiers majeurs : Jean Avenue et Vorster Avenue. À l'origine, ils devaient être conçus avec tablier mixte pour les lancer sans interrompre le trafic autoroutier. Mais Sanral, l'exploitant de l'autoroute N1, n'a pas souhaité appliquer cette technique inconnue en Afrique du Sud. Des solutions classiques de tabliers en encorbellements successifs, avec équipages mobiles, ont donc été mises en œuvre. Les travées maximales des viaducs atteignent 110 m et 121 m. Leurs tabliers ont une largeur constante de 10,75 m et une hauteur de 3,5 m pour les travées courantes et variable de 3,5 m à 7,5 m pour les grandes travées.

Près de 15 km de tunnels monotubes et bitubes ont été réalisés selon des techniques variées : creusement à l'explosif ou au tunnelier, excavation à la machine à attaque ponctuelle. Jusqu'à dix fronts d'attaque simultanés ont été ouverts depuis le portail, les trois stations et les sept puits intermédiaires. Au-delà de l'excavation proprement dite, l'équipement des tunnels en trottoirs, murs séparateurs et caniveaux, a complété les travaux.

Zone de dolomite au nord

En direction du nord, le tracé traverse une zone dolomitique sur environ 10 km, où existe un risque de fontis pouvant atteindre une trentaine de mètres de diamètre. Trois incidents de ce type ont d'ailleurs émaillé le chantier. "Dans ce secteur, nous avons sous-estimé la difficulté. Un sondage à un endroit révélait une nature de terrain, deux mètres plus loin un autre sondage en révélait une autre ! Des travaux très lourds ont dû être menés et toutes les gammes de confortement de sol possibles en termes d'injections ont été utilisées", explique Michel Weick. Comme il n'existait pas de référence, une démarche

associant géologues, géotechniciens, ingénieurs de bureaux d'études et spécialistes d'analyse des risques, qui s'est poursuivie au-delà de l'ordre de service travaux, a permis de mettre au point un concept avec des critères acceptables par les autorités. Dans cette zone, les fondations des viaducs courants ont été particulièrement étudiées pour satisfaire les spécifications de déformations des piles soumises aux efforts de freinage des rames, mais aussi pour disposer de solutions techniques compatibles avec les matériels disponibles en Afrique du Sud.

Située dans le quartier des banques, la station Sandton, qui dispose de deux quais parallèles et de trois voies, assure l'arrivée de la ligne directe de l'aéroport et les connections vers les centres-villes de Johannesburg et de Pretoria. Sa conception s'est organisée dans une recherche du meilleur compromis entre son architecture intérieure et la circulation verticale des passagers, les intersections de voies pour l'exploitation des trains, la géologie et la zone de faille au nord de la station. Enfin, l'impact du plan masse sur les déviations de routes, avec un très important trafic autour et dans



➤➤➤ **5** Viaduc en encorbellement de Jean Avenue traversée de rive Nord : fléau terminé en attente de clavage avec les fléaux adjacents. **6** Viaduc V5c à Centurion. **7** Station de Centurion construite en élévation en élargissant, dans la zone des quais, le tablier des viaducs.

Johannesburg, a imposé un changement radical de sa conception et de sa construction. L'excavation à ciel ouvert de 660 m de long et 25 m de profondeur prévue à l'origine a en fait été remplacée par la création de deux puits et d'une "caverne" de 170 m de longueur et 15 m de largeur, à 45 m sous le niveau de la surface. Ce choix judicieux a permis de gagner un an et de bâtir un programme compatible avec le démarrage de la Coupe du monde de football.

Zone sud : 35 formulations de béton

Quatre centrales à béton ont alimenté la construction des ouvrages de la zone sud du Gautrain. Deux principales sur le chantier de Marlboro, situé au milieu de la zone, pour édifier viaducs, tunnels et stations. Deux plus petites installées dans le secteur des tunnels. "L'une des grosses difficultés était justement la fabrication du béton. En Afrique du Sud, l'habitude consiste à le malaxer dans les camions toupies, ce qui donne des produits hétérogènes. Nous avons donc

fait venir deux centrales Arcen du Portugal et deux Couvrot de France avec malaxeurs incorporés pilotés par ordinateur, ce qui a nécessité de recruter et former des opérateurs locaux", explique Frédéric Canteau, ingénieur Travaux chez Bouygues, en charge de la formulation et de la fabrication des bétons. Le Pôle Ingénierie Matériaux de Bouygues TP a mené une analyse environnementale à partir de laquelle ont été déduites diverses catégories relatives aux agressivités traduites en classe d'exposition et servant de base aux formulations.

Pour les viaducs, de multiples exigences ont été intégrées : cycles de température, variation d'humidité, propriétés des bétons à l'état frais et à l'état durci, fluidité, résistance au jeune âge permettant un décoffrage rapide et une résistance à long terme.

Pour les autres ouvrages, les formulations étaient liées à l'environnement du projet : attaques chimiques des sols et de l'eau pour les pieux des fondations des viaducs, des parois moulées

des stations et des revêtements des tunnels. Les techniciens ont constaté que la composition chimique des sols variait beaucoup sur le linéaire d'environ 35 km, surtout dans la zone des travaux en souterrain. "Plutôt que de développer une formulation pour chaque classe d'exposition, nous avons retenu les plus contraignantes pour la partie aérienne et pour la partie souterraine. Ce qui n'a pas empêché, étant donné le panel d'ouvrages, d'arriver à 35 formules !" En effet, un ciment CEM I 42.5 N était utilisé pour pouvoir fabriquer les formules des bétons soumis aux agressions extérieures (viaducs, ponts, stations aériennes...), et un ciment CEM V 32.5 N résistant aux sulfates pour la partie souterraine.

Une autre difficulté a concerné les livraisons de béton. "Au plus fort des travaux en 2008, il y a eu jusqu'à une trentaine de sites à livrer chaque jour, avec des volumes de quelques m³ à plusieurs centaines de m³, pour les gros coulages de radier, le tout livré avec une flotte de 25 camions. Il fallait organiser le planning au jour le jour, mais aussi pouvoir pallier les demandes non programmées". ■

TEXTE : MICHEL BARBERON

PHOTOS : BOUYGUES TP/DR



Groupe pour le contrat de constructions Génie Civil :
Bouygues TP
Murray & Roberts
Stratégic Partners Group

Des acteurs internationaux :

- Bouygues TP, Scetauroute, Ingerop International, Systra, Certifer, Terrasol, IPC (France)
- Africon, Asch, Iliso, HHO, Ingerop South Africa, Ninham Shand, SNA, Ages, Dr Wagener, Dr Oosthuizen, March, Geopractica, CA Du Toit, Felehetsa, ITS (Afrique du sud)
- Arup, Atkins, GCG, ProfWaltham, Pascall et Watson (Angleterre)
- Bonnard et Gardel (Suisse)
- Arup, Atkins (Hong Kong)
- Parson's Brickerhoff (USA)

Coût :
2,5 M€ HT



>>> École Polytechnique Fédérale de Lausanne, bâtiment du Rolex Learning Center (Suisse) (architecte : Kazuyo Sejima et Ryue Nishizawa - SANAA)



>>> Pavillon France, Exposition Universelle de Shanghai (Chine) 2010



>>> Pont de Térénez (France)



7

>>> Viaduc Saint-Paul - Route des Tamarins (La Réunion - 1974)

>>> Viaduc de Toulouse-Blagnac (France)



8

>>> Pont Phu My, Hô-Chi-Minh Ville (Vietnam)



10



9

PHOTOS : 1, 2 : HISAO SUZUKI 3, 5 : CG 29 4, 6 : JACQUES FERRIER ARCHITECTURES/PHOTOS LUC BOEGLY

7 : HERVÉ DOURIS 8, 9 : EMMANUEL PIRON 10 : PETER BOESCH

livres



→ La Technique française du béton

Publié par l'AFGC à l'occasion du 3^e congrès international de la fib, qui s'est déroulé du 29 mai au 2 juin 2010 à Washington, ce recueil présente les différents aspects du savoir-faire français en matière d'ouvrages d'art en béton. Innovations et performance du matériau, applications dans les domaines du bâtiment, du génie civil et pour des projets de grande envergure, le champ des possibles ne cesse de s'étendre. L'ouvrage présente également des réponses aux questions de maintenance et de réparation, sujet crucial en termes de durabilité.

AFGC,
72 pages, CD vendu 50 euros



→ Traité du béton armé

Jean Perchat

A destination plus spécifiquement des ingénieurs et techniciens de bureaux d'études, cet ouvrage présente les nouvelles notations, approches de conception et méthodes de calcul de l'Eurocode 2. Il doit permettre de maîtriser les changements importants par rapport aux anciennes règles et de comparer les solutions de dimensionnement. En bref, un outil pour s'approprier ces nouvelles normes à travers l'analyse de calculs concrets.

Editions du Moniteur,
872 pages, 95 euros



→ Eurocode Fascicule 65

Ce document synthétise les incidences des Eurocodes et du Fascicule 65 (Exécution des ouvrages de génie civil en béton armé ou précontraint) sur le matériau béton. Il fait le point sur les modifications fondamentales introduites par les Eurocodes par rapport aux règles concernant les bétons armés aux états limites (BAEL) et les bétons précontraints aux états limites (BPEL). Il porte également l'accent sur les évolutions entre la norme NF EN 206-1 et le nouveau Fascicule 65.

SNBPE,
48 pages



→ Paris, de pont en pont
Le long de la Seine et du canal Saint-Martin

Claudine Hourcadette, Sophie-Marguerite, Serge Montens

À Paris, les œuvres d'art sont partout et sous nos pieds aussi. Tous les 400 mètres environ, la Seine et les canaux enlacent Paris de 69 ponts, viaducs ou passerelles et l'enluminent. Les bords de Seine, inscrits au patrimoine de l'Unesco, et les bords du canal, cinématographiés à l'envi, livrent aux passants curieux, beautés, anecdotes et étrangetés qui parfois leur échappent.

Editions Christine Bonneton,
224 pages, 14,90 euros

publications techniques Cimbéton



Analyse du cycle de vie d'un pont en béton

Ce guide décrit de manière détaillée l'ensemble de la démarche permettant de réaliser une Analyse de Cycle de Vie (ACV) d'un pont routier en béton. Cette approche, innovante dans le domaine du Génie civil, est présentée de façon pédagogique afin d'offrir aux maîtres d'ouvrage, maîtres d'œuvre, ingénieurs et architectes un outil permettant d'évaluer la qualité environnementale d'un patrimoine d'ouvrages ou d'optimiser la conception d'un projet en choisissant les solutions constructives les plus respectueuses du principe de Développement Durable. ■

Référence T 87, 153 pages, gratuit et en téléchargement sur le site www.infociments.fr



→ **Ciments et bétons**
Des innovations au service du développement durable dans le Génie civil

Patrick Guiraud

Ce fascicule présente et synthétise les innovations techniques pour la fabrication des ciments et des bétons dans une optique de réduction de ses impacts environnementaux. Six principes guident cette démarche : préserver les ressources naturelles, minimiser les impacts, faciliter la mise en œuvre et améliorer la sécurité sur les chantiers, limiter la quantité de déchets générés, développer des solutions à long cycle de vie et enfin prendre en compte les besoins futurs. Ces principes s'appliquent aussi à la conception, à la construction et à la réhabilitation des ouvrages.

8 pages, gratuit,
Tiré à part de CBPC, n°900.
SIM/Cimbéton, janvier 2010



→ **Les bétons**
De nouvelles propriétés au service du développement durable

Les trois axes du Développement Durable, économie, environnement et société entraînent de nouvelles exigences pour les matériaux de construction. Ce document présente, en fonction de ces trois critères, les solutions apportées par les nouvelles propriétés des bétons pour répondre à ces nouvelles exigences. Par exemple, à une gestion optimale des ressources naturelles, répond l'optimisation des structures rendues possibles par les BFUP. On peut encore citer le piégeage du CO₂ par carbonatation du béton, et ce tout au long de la vie de l'ouvrage.

8 pages, gratuit,
Tiré à part de L'Ingénieur constructeur n°515, juin 2010

site Internet



→ **Site structurae**
"Galerie et base de données internationales d'ouvrages d'art"

Ce site répertorie informations et divers supports sur les constructions dans le monde et au fil du temps. Il décrit plus particulièrement les ouvrages d'art et les grands projets présentant une structure particulièrement intéressante, dans le domaine de la construction et de l'architecture.

www.structurae.de

hommage

→ **Les ingénieurs**
Serge Lestrade et Nabil Neghache
victimes du tremblement de terre en Haïti

Le tragique tremblement de terre, qui a ravagé Port au Prince et sa région le 12 janvier 2010, a tué plus de 200 000 personnes.

Deux ingénieurs de l'entreprise cantalienne Matière, spécialisée dans les ouvrages d'art, ont péri lors de ce sinistre. Serge Lestrade et Nabil Neghache étaient à Port au Prince pour répondre à un appel d'offre de l'Union Européenne concernant la construction de deux ponts à Gonaïves. L'ingénieur des études et l'ingénieur des travaux ont été victimes de l'effondrement de l'immeuble de trois étages dans lequel ils travaillaient sur ce dossier d'appel d'offres que l'entreprise Matière devait déposer en collaboration avec l'entreprise haïtienne Tecina.

Construction Moderne Ouvrages d'Art souhaitait s'associer au souvenir de ces ingénieurs et exprimer toute sa sympathie à l'entreprise Matière.

agenda

→ **Lyon**
Pollutec 2010
Du 30 novembre au 3 décembre 2010

Ce 24^e salon international accueille les professionnels de l'environnement. Il présente les techniques de prévention et de traitement des pollutions, de préservation de l'environnement et de mise en œuvre du développement durable. Cimbéton, la FIB et le CERIB présenteront l'offre de produits préfabriqués en béton pour l'assainissement sur leur stand, situé dans le Hall 9, allée E, stand 120.
www.pollutec.com

→ **Cachan**
Journées techniques GC'2011
Les 22 et 23 mars - ESTP
"L'innovation dans le Génie Civil au service de la construction durable"

La conception, la construction et la gestion des ouvrages doivent intégrer de plus en plus les critères du développement durable (santé, respect de l'environnement et intégration dans le site, économie des ressources naturelles, limitations des rejets...). Ces journées proposent de faire un point sur les solutions innovantes dans ce domaine, tant au niveau de la conception que de la construction et de la réhabilitation des ouvrages.
www.afgc.asso.fr



Pile de pont – Franchissement de l'A 352 Strasbourg – Colmar.