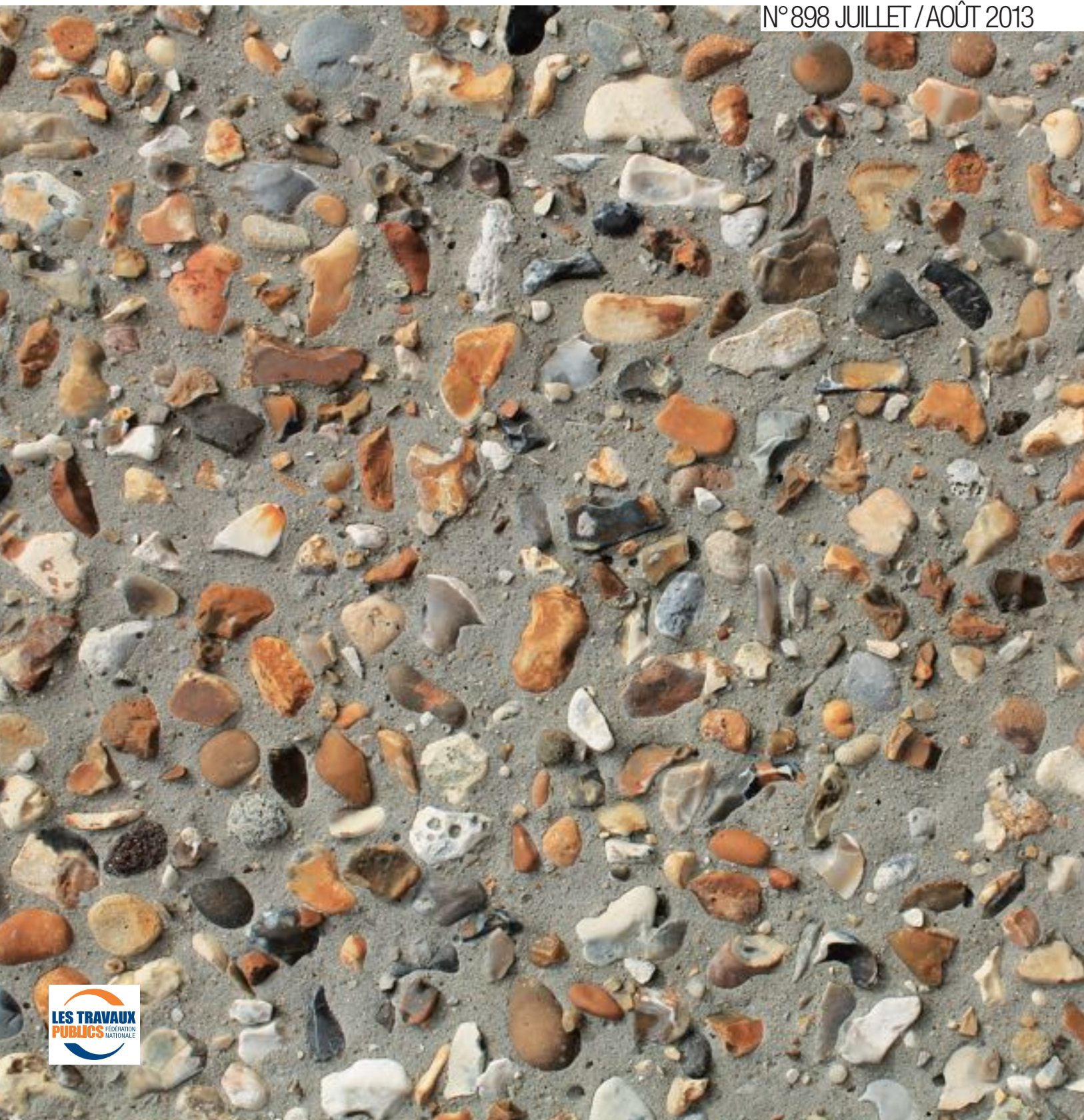


TRAVAUX

REVUE TECHNIQUE DES ENTREPRISES DE TRAVAUX PUBLICS

SPÉCIAL BÉTONS. DES ORIGINES A NOS JOURS. DOMAINES D'UTILISATION. FABRICATION, MISE EN ŒUVRE ET ASSURANCE QUALITE. DURABILITE ET CYCLE DE VIE. REGLEMENTATION ET NORMALISATION. NOUVEAUX BETONS ET RECHERCHE. PONTS. BARRAGES. OUVRAGES MARITIMES ET FLUVIAUX. CENTRALES NUCLEAIRES. OUVRAGES SOUTERRAINS. GRANDS BATIMENTS ET STRUCTURES EXCEPTIONNELLES. FONDATIONS. REVETEMENTS. APPLICATIONS SPECIALES. BETON ET PATRIMOINE

N° 898 JUILLET / AOÛT 2013



Le lerm, votre partenaire depuis 25 ans dans la durabilité des ouvrages

1988 - 2013 Anniversaire du lerm
25
ans



"LERM INFOS spéciale 25 ans"

Consultez notre dernière publication technique et scientifique sur www.lerm.fr



Contrôle et caractérisation
des matériaux



Diagnostic des constructions



Expertise durabilité



Innovation matériaux



Formation

► A chaque étape de votre projet, découvrez le cycle de nos prestations sur www.lerm.fr

Siège social et Laboratoires
23, rue de la Madeleine CS 60136
13 631 Arles Cedex
T: +33 (0)4 86 52 65 00
F: +33 (0)4 90 96 25 27
contact@lerm.setec.fr

Agence Ile-de-France
42-52 quai de la Rapée
CS 71230 - 75563 Paris
Cedex 12
T: +33 (0)1 82 51 41 00
F: +33 (0)1 82 51 41 19

Agence Rhône-Alpes
Les Portes de Croffes
Rond point du Raffour
38920 Croffes
T: +33 (0)4 76 78 83 42
F: +33 (0)4 76 78 80 41

Antenne Grand Ouest
Lerm c/o Hydratec
4, avenue Charles Tillon
35000 RENNES
T: +33 (0)1 82 51 41 99
F: +33 (0)4 90 96 25 27

lerm
Les preuves du temps
une société du groupe 

Directeur de la publication
Patrick Bernasconi

Directeur délégué
Rédacteur en chef
Michel Morgenthaler
3, rue de Berri - 75008 Paris
Tél. : +33 (0)1 44 13 31 03
Email : morgenthalerm@fntp.fr

Comité de rédaction
Hélène Abel (Ingérop), Jean-Bernard
Datry (Setec), Michel Duviard (Egis),
Laurent Guilbaud (Saipem), Ziad
Hajar (Eiffage TP), Florent Imberty
(Razel-Bec), Louis Marracci
(Bouygues TP), Stéphane Monleau
(Soletanche Bachy), Jacques
Robert (Arcadis), Claude Servant
(Eiffage TP), Philippe Vion (Systra),
Michel Morgenthaler (FNTP)

A collaboré à ce numéro
Collecte des articles
Gertrud Gross (Eiffage)

Service Abonnement et Vente
Com et Com
Service Abonnement TRAVAUX
Bât. Copemic - 20 av. Édouard Herriot
92350 Le Plessis-Robinson
Tél. : +33 (0)1 40 94 22 22
Fax : +33 (0)1 40 94 22 32
Email : revue-travaux@cometcom.fr

France (10 numéros) : 190 € TTC
International (10 numéros) : 240 €
Enseignants (10 numéros) : 75 €
Étudiants (10 numéros) : 50 €
Prix du numéro : 25 € (+ frais de port)
Multi-abonnement : prix dégressifs
(nous consulter)

Publicité
Emmanuelle Hammaoui
9, rue de Berri
75008 Paris
Tél. : +33 (0)1 44 13 31 41
Email : ehannaoui@fnftp.fr

Site internet : www.revue-travaux.com

Réalisation et impression
Com'1 évidence
Immeuble Louis Vuitton
101, avenue des Champs-Élysées
75008 PARIS
Tél. : +33 (0)1 82 50 95 50
Email : contact@com1evidence.com

La revue Travaux s'attache, pour l'information
de ses lecteurs, à permettre l'expression de
toutes les opinions scientifiques et techniques.
Mais les articles sont publiés sous la
responsabilité de leurs auteurs. L'éditeur se
réserve le droit de refuser toute insertion, jugée
contraire aux intérêts de la publication.

Tous droits de reproduction, adaptation, totale
ou partielle, France et étranger, sous quelque
forme que ce soit, sont expressément réservés
(copyright by Travaux). Ouvrage protégé ;
photocopie interdite, même partielle
(loi du 11 mars 1957, qui constituerait
contrefaçon (code pénal, article 425).

Editions Science et Industrie SAS
9, rue de Berri - 75008 Paris
Commission paritaire n°0116 T 80259
ISSN 0041-1906

RÉTROSPECTIVES ET PERSPECTIVES



© DRS

La revue Travaux, qui illustre si bien les performances des constructeurs français en ouvrages de génie civil, a choisi de consacrer ce numéro au béton, matériau connu pour sa durabilité et sa difficulté à démolir.

Je ne peux que me féliciter de cette initiative de la revue qui met parfaitement en valeur le savoir-faire technique et innovant de nos différentes entreprises œuvrant dans le domaine du génie civil.

Un "dossier en béton" est symbole de solidité.

Ancien, mais régulièrement rajeuni par de nouvelles innovations dans sa composition et dans sa mise en œuvre, le béton occupe une position particulière dans la construction.

Albert Caquot, Eugène Freyssinet, Jean Muller et les groupes français de construction leaders mondiaux dans leur domaine, comme Vinci, Bouygues, Eiffage et bien d'autres font rayonner la technique française hors de nos frontières.

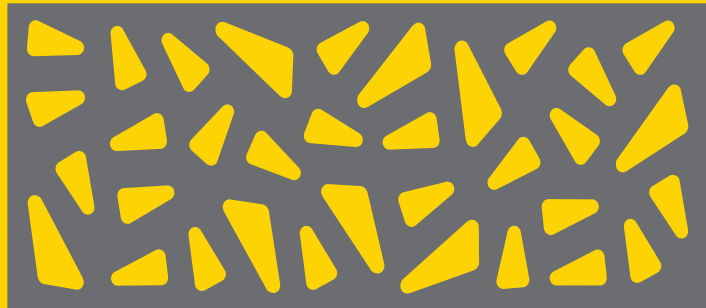
La prise en compte du développement durable via la Responsabilité Sociale et Environnementale des entreprises françaises, qui vise à conjuguer harmonieusement les performances économiques et sociales avec la protection de l'environnement et les économies d'énergie, oblige à de nouvelles innovations et à un renforcement dans la qualité de mise en œuvre des bétons.

Les cimentiers l'ont bien compris et quatre d'entre eux à savoir les sociétés Calcia, Holcim, Lafarge et Vicat financent depuis sept ans une fondation d'entreprise qui associe à ces membres fondateurs des membres partenaires, organismes professionnels représentant les différentes composantes du BTP, au sein de l'École Française du Béton.

L'École Française du Béton vise à développer l'information auprès des enseignants et du monde universitaire avec ses laboratoires et ses centres de recherche pour assurer la mise à jour permanente de leurs connaissances, ainsi que la rigueur des praticiens dans l'utilisation du béton et du calcul à la construction elle-même. Elle se réjouit de voir Travaux ajouter une nouvelle contribution à la connaissance de l'histoire de ce matériau et des réalisations rendues possibles par ses exceptionnelles qualités.

Cette amélioration permanente de la qualité et de la durabilité des bétons n'est rendue possible que grâce aux capacités d'innover du réseau scientifique et technique et au savoir-faire de nos entreprises qui permettent à la France de conserver son poste de leader à l'international.

DANIEL TARDY
PRÉSIDENT D'HONNEUR DE LA FNTP
PRÉSIDENT DE L'ÉCOLE FRANÇAISE DU BÉTON



SPÉCIAL BÉTONS

GARE DE BORDEAUX - RÉSILLE BRUP © IJSTAR / JM TORRENTI



004 BÉTONS ET COURBES



006 PARTIE 1 :
HISTORIQUE ET ÉVOLUTION DU MATÉRIAU



008 LE BÉTON DES ORIGINES À NOS JOURS



016 LES DOMAINES D'UTILISATION DU BÉTON



023 LA FABRICATION, LA MISE EN ŒUVRE
ET L'ASSURANCE QUALITÉ



028 LA DURABILITÉ ET LE CYCLE DE VIE
DES BÉTONS



036 RÉGLEMENTATION ET NORMALISATION,
LES INSTANCES CONCERNÉES



044 LES NOUVEAUX BÉTONS
ET LA RECHERCHE



050 PARTIE 2 :
LES RÉALISATIONS



052 LES PONTS



061 BÉTONS DE BARRAGE



066 LES OUVRAGES MARITIMES ET
FLUVIAUX, LES STRUCTURES OFFSHORE

072 LES SPÉCIFICITÉS DU BÉTON
DANS LES INSTALLATIONS CLASSÉES.
LES CENTRALES NUCLÉAIRES
DE PRODUCTION D'ÉLECTRICITÉ

077 LE BÉTON DANS LES OUVRAGES
SOUTERRAINS

084 LES GRANDS BÂTIMENTS
ET LES STRUCTURES EXCEPTIONNELLES

090 BÉTONS DE FONDATION

095 POURQUOI DES REVÊTEMENTS
EN BÉTON ?

102 LES APPLICATIONS SPÉCIALES

108 BÉTON ET PATRIMOINE



BÉTONS ET COURBES



© DR

Le béton, cet agrégat de sable, de gravier, de ciment qui s'unit à l'acier, ce matériau dont on dit qu'il serait le deuxième produit le plus consommé au monde après l'eau, est sans doute celui qui a donné naissance à la plus grande variété de styles architecturaux. C'est lui qui a permis aux architectes et ingénieurs de concevoir et de construire les œuvres les plus marquantes de ces cents dernières années dans un renouvellement permanent de formes et de volumes.

Né en Europe, c'est lui qui exprime le mieux la part latine de l'Architecture moderne et contemporaine.

Certes, les grands courants du style international, du fonctionnalisme, du brutalisme, de l'organique, du post-modern ne se sont pas manifestés qu'aux travers d'œuvres en béton mais parmi toutes celles qui imprègnent l'imaginaire collectif ce sont celles là qui dominent, en Europe du moins, en Amérique latine aussi. Citer ces œuvres majeures serait trop long et travail d'historien.

J'évoquerais ici simplement deux grands moments de ruptures stylistiques, lorsque la rigueur de la ligne et de l'angle droit cèdent la place à la courbe, à des espaces, des formes et des volumes expressions d'une fluidité nouvelle qui émergent à des périodes particulières de l'histoire de l'architecture et de la construction. C'est en ces moments que l'on voit comment le béton par sa nature même devient tour à tour le serviteur et l'initiateur d'un renouveau architectural.

La période la plus proche de nous qui remonte à moins de 15 ans est celle où apparaît ce style que certains appellent la nouvelle « Architecture baroque », d'autres « l'Architecture molle » ou

encore « l'Architecture numérique ». Instants de remise en cause soudaine d'une rationalité structurelle où domine l'orthogonalité qui caractérise la plupart des réalisations de l'architecture moderne et contemporaine. Bien qu'il me faille limiter mon propos au béton, je dois noter que c'est aussi en cette période que s'exprime une nouvelle utilisation du métal qui vise à réduire pour des raisons économiques mais aussi esthétiques et conceptuelles son poids et son volume dans des structures audacieuses. Période où apparaît dans la conception et la réalisation des bâtiments les nouveaux bétons aux performances exceptionnelles dues à de véritables sauts technologiques. Ce sont ces mêmes expérimentations qui permettent de réduire de 50% le poids d'un tablier de pont qui conduisent aux nouvelles architectures de résilles, de voiles arachnéens, de courbes. C'est ainsi que naissent des œuvres architecturales qui explorent les mêmes expressions formelles comme si ces deux matériaux différents par leur constitution et leur mise en œuvre cherchaient à se concurrencer, engagés dans une course de fond pour ouvrir de nouvelles voies.

Je veux citer pour le métal les musées

de Frank GERHY, pour le béton, l'opéra de Valencia de Santiago CALATRAVA, le Rolex learning center de l'Agence SANAA ou la récente résille de béton fibré que Rudy RICCIOTTI érige au stade Jean Bouin.

« Architecture numérique » dit-on aussi à propos de ces réalisations, car au-delà de l'imagination des architectes et des inventions des ingénieurs, il y a cette culture numérique qui imprègne des pans entiers de notre société, née d'un usage nouveau de l'ordinateur, d'une autre manière d'explorer l'espace, d'une volonté de s'inspirer des volumes et des structures virtuelles apparus sur les écrans qui influencent aujourd'hui une part de la production architecturale.

Notons au passage que cette production architecturale concerne surtout des équipements publics majeurs conçus et construits avant qu'éclate la crise actuelle. Espérons que ces acquis techniques ne se perdront pas et que revenus à des temps meilleurs ces avancées technologiques et leurs usages plus répandus, grâce à une production industrielle, seront mis au service d'une architecture plus domestique.

Si j'évoque cette architecture numérique c'est qu'aux temps héroïques de

la CAO, à cette époque déjà lointaine où l'ordinateur servait surtout à produire rapidement et rationnellement les plans, documents et calculs nécessaires à la réalisation des ouvrages, les architectes et les ingénieurs n'utilisaient pas ou peu l'ordinateur comme un outil d'exploration d'espaces virtuels pour en tirer de nouvelles formes d'architecturales.

Ce n'est que quelques années plus tard, qu'apparaît un usage plus « ludique » du clavier de l'ordinateur. Des architectes séduits par la virtuosité graphique des images produites par des logiciels puissants veulent donner corps, au travers d'esquisses d'abord, de projets ensuite et de réalisations enfin à ces espaces immatériels nés des calculs informatiques.

Or, au même moment où les architectes explorent ces espaces et imaginent ces nouvelles architectures, les ingénieurs développent des recherches sur la résistance et la plasticité de bétons à très hautes performances, ils développent dans une logique de production industrielle le béton fibré utilisé aussi bien en génie civil qu'en architecture. Ils peuvent aussi grâce à des logiciels spécialisés, maîtriser la complexité des efforts nés dans les nouvelles structures qui seules peuvent répondre à la complexité des nouvelles formes architecturales.

Ce sont ces découvertes techniques et ces calculs qui permettent de faire naître dans la réalité des chantiers ces formes exprimées dans un premier temps par des images de logiciels puis par des esquisses d'exploration avant de se traduire par des dessins d'exécution.

Pourtant une rupture de type analogue s'est produite dans les années 1950, analogue mais d'une nature mathématique différente.

Je veux parler de ces années où une première avancée technologique permet d'imaginer et de construire de nouveaux espaces architecturaux. C'est la période où les voiles minces que l'ingénieur Bernard LAFAILLE avait mis au point à l'origine pour réaliser les vastes hangars circulaires pour locomotives font leur apparition dans les projets d'églises, d'aéroports, de salles de congrès, de salles de concert.

À cette époque, même si la résistance mécanique du béton, sa tenue à la corrosion n'ont pas encore atteint le niveau de performance du béton fibré actuel, le matériau « béton » permet déjà ces architectures « libres » qui rompent aussi avec l'orthogonalité des structures traditionnelles car elles trou-



© DR

vent leur source dans la géométrie des formes réglées, celles des paraboloides hyperboliques et autres paraboloides de révolution et dans l'auto stabilité qui en découle et que le béton sert déjà admirablement.

Ce sont ces géométries qui donnent naissance parmi tant de réalisations à l'église « de la Médallia Milagrosa » de Rosatio CANDELA à Mexico, à l'aérogare de la TWA de Eéro SAARINEN au JF Kennedy Airport de New York, à l'Opéra de Sydney de John UTZON, au pavillon Philips que LE CORBUSIER réalise avec Iannis XENAKIS à Bruxelles, œuvres emblématiques, œuvres de béton.

Il faut évoquer aussi parmi ces œuvres de la modernité, mais dans un registre formel encore plus libre et surtout dans une logique structurelle différente, l'architecture organique de la Chapelle Notre dame du Haut à Ronchamp de LE CORBUSIER.

Ce sont toutes ces architectures qui montrent, même à une époque où le béton, ne possède pas encore les qualités et est loin d'atteindre les performances actuelles et où les méthodes de calculs n'ont pas encore atteint le degré de sophistication d'aujourd'hui, combien ce matériau est à l'origine de créations architecturales remarquables, toutes en rupture avec une rationalité constructive traditionnelle.

Enfin, puisque je suis remonté dans le temps, je ne résiste pas à imaginer ce qu'Erich MENDELSON aurait fait s'il avait disposé des bétons actuels lorsqu'il réalisa en 1920 à Postdam, la Tour Einstein qu'il dû construire à son époque dans un savant assemblage de briques recouvertes de ciment.

J'ai dit comment ces produits d'une haute technologie ont permis de réaliser des œuvres architecturales remarquables.

Le défi qui reste maintenant à relever c'est de parvenir à utiliser ces nouveaux bétons, pour l'instant encore trop coûteux, pour répondre au besoin insatisfait et croissant de « logements pour le plus grand nombre ».

C'est sans doute dans de nouvelles réflexions sur l'usage de ces matériaux de pointe et une nouvelle conception de l'industrialisation du bâtiment, évitant les erreurs et les errements du passé, qu'une réponse sera trouvée. □

AMERIC ZUBLENA
ARCHITECTE, MEMBRE DE L'ACADÉMIE
DES BEAUX-ARTS DE L'INSTITUT DE FRANCE



PONT DU GARD © DR

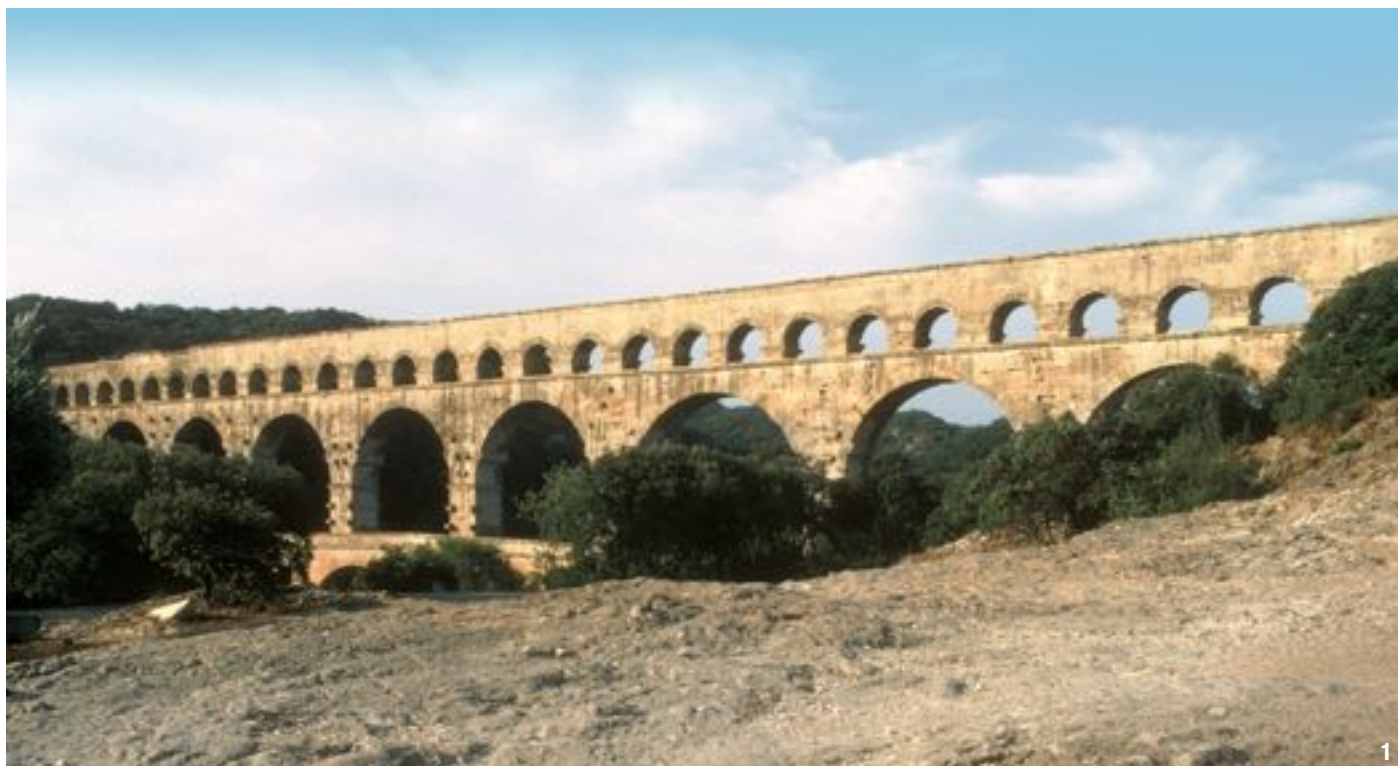


LE BÉTON HISTORIQUE ET ÉVOLUTION DU MATÉRIAU

LE BÉTON DES ORIGINES À NOS JOURS

AUTEURS : CHRISTIAN TRIDON, PRÉSIDENT DU STRES - MICHEL MOUSSARD, CONSULTANT GÉNIE CIVIL ET OUVRAGES D'ART, ARCADIS

LA GRAMMAIRE POPULAIRE FRANÇAISE EN A FAIT UN ADJECTIF QUALIFIANT LA DURETÉ ET LA LONGÉVITÉ ! LES ADEPTES DE L'ÉCOLOGIE DES ANNÉES 60-70 L'ONT CONSPUÉ ! IL EST DEvenu LE QUALIFICATIF D'UN LOGEMENT SOCIAL DÉFAVORISÉ ! TRAÎNÉ DANS LA BOUE, IL RENAÎTRA, MAGNIFIÉ PAR L'IMAGINATION D'ARTISTES TELS QU'EN PARTICULIER AUGUSTE PERRET, LE CORBUSIER, OSCAR NIEMEYER. POURRIONS-NOUS, AUJOURD'HUI NOUS PASSER DE SES SERVICES ? QUEL EST-IL ? CONNAISSONS-NOUS VRAIMENT CE MATÉRIAU ? D'OÙ VIENT-IL ? COMMENT VIEILLIT-IL ? QUE DEVIENDRA-T-IL DEMAIN ? DE L'ÉPOQUE ROMAINE À NOS JOURS : LA CURIEUSE HISTOIRE DU MATÉRIAU BÉTON !



1 © ALEX BEREAULT

LES ORIGINES

LA CHAUX, LE CIMENT ET LE BÉTON DANS L'ANTIQUITÉ

Du latin *bitumen* et du vieux français *betun*, *becton*, *beter*, le mot béton désigne un mélange de matériaux, généralement d'origine minérale, dont la qualité première est de se solidifier en constituant ainsi une roche artificielle. Le ciment ou *caementum* (pierre non taillée) semble avoir été utilisé comme liant pour fabriquer un béton hydraulique, par les Égyptiens, puis

par les Grecs en Italie et enfin par les Romains, qui obtenaient ce ciment en mélangeant à la chaux vive des cendres volcaniques de la région de Pouzzoles et de la terre cuite constituée de tuiles broyées.

Le mélange des matériaux était réalisé dans un mortier, sorte de récipient servant de creuset au broyage et au malaxage. Par extension, on désignera par *mortier* un mélange de sable et de liant (chaux aérienne ou ciment), par opposition à celui de *béton* qui, lui,

1- Pont du Gard.

1- Pont du Gard bridge.

comporte des agrégats allant du sable au granulat.

En raison de son importance stratégique, la recette du ciment semble avoir été un secret militaire gardé confidentiellement par les Cimmériens, les

Phéniciens et les Égyptiens. Permettant la construction de ports artificiels, de forteresses, de temples et de monuments commémoratifs, il s'est répandu dans les colonies grecques, grâce aux conquêtes d'Alexandre le Grand, puis dans l'empire romain, avant de tomber en désuétude à la chute de celui-ci. On retrouve aujourd'hui de nombreuses traces de l'utilisation de ce matériau sous forme de mortier d'assemblage de pierre ou de brique, d'enduits de protection et d'étanchéité, que l'on trouve

notamment au Pont du Gard (figure 1), mais aussi de béton de structure. On peut citer l'exemple des dômes du Panthéon d'Hadrien à Rome, de 42 m de diamètre et celui plus modeste de la Domus Aurea de Néron, de 13 m de diamètre (figure 2). L'état de conservation de ces deux ouvrages est remarquable.

Autant l'utilisation du ciment dans l'antiquité est restée « confidentielle » et stratégique, autant le « cycle de la chaux » était connu et l'usage de chaux éteinte, ou chaux grasse ou encore chaux aérienne, était répandu.

Ce matériau sera utilisé très couramment dans l'antiquité et jusqu'à nos jours, contrairement au ciment pour lequel il faudra attendre le début du XIX^e siècle pour retrouver un liant stable, pouvant faire prise instantanément, sous l'action de l'eau.

« L'ÉCLIPSE » DU V^eS AU XIX^eS

Pour des raisons mal connues, comme nous l'avons vu, le savoir-faire acquis par les Romains pour la fabrication de mortiers et de béton hydrauliques s'est perdu à la chute de l'Empire Romain, pour n'être redécouvert qu'au XIX^e siècle en Europe (Angleterre et France). Pendant toute cette période, les grands ouvrages (églises et cathédrales, châteaux et fortifications, ponts, ouvrages hydrauliques et portuaires) seront réalisés en maçonnerie, en employant des techniques de plus en plus évoluées. Les grandes étapes seront l'Art Roman, l'Art Gothique, la Renaissance et le Siècle des Lumières avec les progrès remarquables dans la construction des ponts, sous l'impulsion de Jean-Rodolphe Perronet. La maçonnerie atteindra son apogée au XIX^e Siècle, avec en particulier les ouvrages de Paul Séjourné, avant de céder peu à peu la place à l'acier et au béton.

La grande question est de savoir pourquoi le liant hydraulique, utilisé jusqu'à l'époque romaine, ne l'a plus été jusqu'au XIX^e Siècle. Une réponse pourrait être que le constructeur n'en éprouvait peut-être pas le besoin.

Il ne demandait pas au mortier un rôle mécanique important. En effet, la résistance des ouvrages était assurée par l'épaulement successif des pierres (ou des briques) n'entraînant que des forces de compression transmises de l'une sur l'autre. Il se peut aussi que cette technique ait été insuffisamment décrite. Il y aura pourtant çà et là quelques tentatives pour construire en utilisant un béton de chaux, mais sans véritable succès. On peut citer comme



2 © FRANÇOIS CUSSIGH



2- Domus Auréa.
3- Louis Vicat.

2- Domus Aurea.
3- Louis Vicat.

exemple la voûte de la Duomo de Florence, de 42 m de diamètre, restée inachevée au début du XV^e Siècle jusqu'à ce que Brunelleschi arrive à concevoir l'ouvrage en maçonnerie avec un mode constructif permettant d'éviter un échafaudage complet.

LE 19^e SIÈCLE : NAISSANCE DES CIMENTS MODERNES ET DU BÉTON ARMÉ

L'histoire moderne du béton débute par la redécouverte des ciments hydrauliques, c'est-à-dire durcissant au contact de l'eau et en l'absence d'air.

LES DÉCOUVERTES DE LOUIS VICAT (1786 - 1861)

Le domaine de la construction, comme d'autres en ce XIX^e siècle, est rythmé par une trilogie composée d'un besoin, d'un matériau et d'un homme. C'est vrai pour le fer, avec le besoin généré par la voie ferrée, un matériau, le fer puddlé, très vite dépassé par

l'acier, puis un homme, Gustave Eiffel. Ce sera également vrai pour un matériau nouveau qui permettra la fabrication du béton. Le besoin est tout d'abord insoupçonné, mais deviendra très rapidement important au fur et à mesure de la révolution industrielle. L'homme, Louis Vicat, va permettre par ses travaux de recherche sur l'hydraulicité des chaux l'élaboration de ce qui deviendra le matériau de construction du vingtième siècle.

Louis Vicat est né à Nevers en 1786. Polytechnicien et Ingénieur des Ponts et Chaussées, il s'intéresse au phénomène de durcissement des chaux naturelles (figure 3). Il découvrira que la chaux « maigre » durcit en présence de l'eau lorsque l'on rajoute au calcaire de base (environ 75%) une certaine proportion d'argile (environ 25%). Il identifiera ce phénomène de l'hydraulicité des chaux en 1817. C'est cet ajout, composé principalement d'alumine et de silice, qui, par sa transformation en aluminates et silicates de calcium sous l'action de l'eau, permettra le durcissement du liant. Ses recherches se poursuivent sur les procédés de fabrication pour obtenir un mélange argilo-calcaire parfait, d'abord par voie humide.

La cuisson au four à 1 450°C permettra de fondre les aluminates et par réaction avec la silice et la chaux d'obtenir les silicates. C'est la *clinkerisation*.

Le produit ainsi obtenu porte le nom de *Clinker*. Par broyage, et par ajout de gypse (3 à 5%) pour favoriser la régulation lors de la prise, on obtiendra le ciment artificiel, dit « *ciment Portland* ». Nous sommes en 1840, c'est le début de la fabrication des ciments artificiels. Louis Vicat continuera ses recherches sur la composition des mortiers, ciments et gangues à pouzzolanes, ainsi que de leur emploi dans toutes sortes de travaux. Il mettra également au point « l'aiguille de Vicat » qui permet de mesurer le temps de prise d'un liant hydraulique. Il faut citer parmi les premières applications en génie-civil de ce nouveau matériau les piles du Pont de Souillac (Lot) sur la Dordogne, en 1824, et celles du pont d'Argentat (Corrèze) en 1828. Louis Vicat ne déposa aucun brevet sur le résultat de ses recherches, et refusa le fauteuil que lui offrit l'Académie des Sciences de Paris. Ce désintéressement lui vaudra une reconnaissance mondiale, et Balzac lui-même le citera en 1839, dans *Le curé de village* : « *Quelle sera la récompense de Vicat, celui d'entre nous qui a fait faire l'unique progrès réel à la science pratique des constructions ?* » ▷

Il eut un fils, Joseph, qui fut son assistant pendant 20 ans et fonda, en 1853, la société des « Ciments Vicat ». Il meurt à Grenoble en 1861.

LES AUTRES PRÉCURSEURS, EN FRANCE ET EN ANGLETERRE

Afin d'être tout à fait honnête, il ne faut pas oublier d'associer à ces travaux de recherche sur les ciments (fin XVIII^e et début XIX^e) les Anglais Smeaton, Parker et Frost, l'Écossais Joseph Aspdin ainsi que les français De Morreau et Pavin de Lafarge.

John Smeaton a longtemps travaillé sur le même sujet. Parce que le mélange calcaire-argile sur lequel il travaillait avait la même couleur que les falaises autour de sa petite ville de naissance il lui avait donné le nom de *Portland*. Joseph Aspdin dit le « briquetier de Leeds » dans le nord-ouest de l'Angleterre est un inventeur. Il dit avoir breveté, en 1824, un ciment prompt naturel, « chaux éminemment hydraulique », qu'il nommera, comme John Smeaton, et pour les mêmes raisons, « *ciment Portland* ». C'est son fils, Williams, qui utilisera ce matériau pour la première fois dans le cadre d'un ouvrage de génie-civil, pour colmater les fuites d'un tunnel piétonnier sous la Tamise construit entre 1825 et 1843.

Cette contribution anglaise n'a pas toujours été reconnue, mais nous avons adopté les termes *ciment Portland*, *portlandite* et *clinker*.

Ce nouveau matériau va révolutionner l'art de la construction. Nous allons, dans les chapitres suivants, ouvrir la galerie de portraits des hommes qui en seront les principaux acteurs.

LE CIMENT ARTIFICIEL ET SES APPLICATIONS - FRANÇOIS COIGNET (1814-1888) : LE BÉTON-PISÉ ET LA PIERRE FACTICE

Avec ses frères Louis, né en 1819, et Stéphane, né en 1820, François Coignet reprend en 1846 l'usine familiale de produits chimiques à Lyon. En 1851 il décide de s'installer près de Paris, à Saint-Denis. En 1854, il dépose un brevet de ciment de clinker et ouvre une deuxième usine à Saint-Denis.

Pour promouvoir ses produits, il construit en 1853 avec l'architecte Théodore Lachez une maison faite de moellons artificiels en ciment près de son usine, au 72 rue Charles Michels à St-Denis. Cette maison sera visitée en novembre 1855 par une commission comprenant 14 architectes, présidée par Henri Labrousse. Dans le rapport



4

il est écrit que « tous les travaux ont été exécutés en béton pisé, moulé et massivé. François Coignet a fait usage de mélanges de différentes matières de peu de valeur, avec la chaux soit grasse, soit hydraulique ». Par ailleurs il note deux sources d'économie : l'usage de matériaux de peu de valeur et l'emploi de manœuvriers à la place d'ouvriers qualifiés. Cette maison a été inscrite à l'Inventaire supplémentaire des monuments historiques en juin 1998.

Entre 1855 et 1859 François Coignet dépose une série de brevets sur l'emploi du béton :

- **Le 29 mars 1855** : brevet sur l'emploi du béton ;
- **Le 15 juin 1855** : brevet sur les silos en béton ;
- **Le 6 septembre 1855** : brevet sur l'emploi du béton hydraulique ;
- **Le 22 janvier 1857** : brevet sur l'emploi de pierres factices ;
- **Le 29 octobre 1859** : brevet sur les travaux à la mer ;
- **Le 19 novembre 1859** : brevet sur l'emploi du béton plastique.

Vers 1860, ce nouveau procédé va être utilisé en Angleterre par l'entrepreneur Joseph Tall.

En 1865 François Coignet dépose un brevet permettant de standardiser les murs et les planchers par l'emploi de coffrages démontables. Il fit avec ce procédé plusieurs maisons qui subsistent encore.

Il obtint l'adjudication de l'aqueduc de la Vanne, long de 140 km et d'une hauteur maximum de 40 m, qu'il construisit entre 1867 et 1874. Il construisit de 1857 à 1893 la digue à la mer de Saint-Jean-de-Luz. Il approvisionna de 1862 à 1865 en éléments de béton

4- La barque de Lambot.

5- La Maison Hennebique.

4- Lambot's boat.

5- "Maison Hennebique" house.

préfabriqués le chantier de l'église Sainte-Marguerite du Vésinet, dont l'architecte était Louis-Auguste Boileau. Son fils Édmond Coignet (1856-1915) participa au développement de la construction en béton armé et à l'établissement de des règles de calcul précises, qui seront en partie reprises dans le premier règlement français de 1906.



5

L'ASSOCIATION AVEC LE FER PUIS L'ACIER : NAISSANCE DU BÉTON ARMÉ

Ce matériau est largement utilisé dans le domaine de la construction, comme mortier d'assemblage ou de protection, et comme roche artificielle, grâce à sa formidable résistance en compression. Par contre, il n'a que très peu de capacité pour reprendre des efforts de flexion et de traction.

De nombreux constructeurs vont s'ingénier à résoudre ce problème en renforçant le béton avec des armatures, et créer ainsi le béton armé.

Joseph Louis Lambot (1814-1887) et sa fameuse barque :

Joseph Louis Lambot est un ingénieur. Il est né à Montfort-sur-Argens dans le Var en 1814. Il fût l'un des premiers à associer des éléments métalliques (fils, barres, chaînes de fer) au béton de ciment. Peut-être est-ce la proximité de la Méditerranée et son esprit « marin » qui lui donna l'idée, en 1848, de construire une barque avec ce matériau. La « *barque de Lambot* » navigua sur le lac de Besse-sur-Issole en 1883 (figure 4). Il en présentera un exemplaire à l'exposition Universelle de Paris en 1855. L'une d'elles est aujourd'hui visible dans le musée de Brignoles.

La construction de cette barque était aussi pour lui un moyen de montrer l'intérêt de ce nouveau matériau, très résistant à l'humidité, dans la construction des navires.

Dans le brevet qu'il dépose le 30 janvier 1855, il parle d'un nouveau matériau, le « Ferciment ».

Depuis cette époque, beaucoup d'embarcations ont été construites en béton armé, et de nombreux concours nationaux et mêmes internationaux de construction de canoës en béton sont organisés, depuis les années 1970, entre les universités et les écoles d'ingénieurs. Honneur soit rendu à Joseph Louis Lambot.

Joseph Monier (1823-1906), le « jardinier de Versailles » :

Joseph Monier est né en 1823 à St-Quentin-la-Poterie dans le Gard, dans une famille modeste. Ne fréquentant pas l'école, il suivit des cours du soir pour apprendre à lire et à écrire. Il est à la fois jardinier, entrepreneur, inventeur. Il sera considéré comme l'inventeur du béton armé, après avoir déposé, entre 1840 et 1870, plusieurs brevets portant sur la fabrication d'ouvrages en ciment-armé.

Comme Lambot, il fera plusieurs essais en enfermant dans le béton des élé-



© CHRISTIAN TRIDON

6- Pont
Lafayette
à Paris.

7- Pont
de la Caille.

6- Lafayette
Bridge in
Paris.

7- Pont
de la Caille
bridge.

ments métalliques de diverses origines. L'entreprise Joseph Monier travaille pour le Parc du château de Versailles, où ses premières applications serviront le domaine de l'horticulture. Dans les années 1850, il va donner ses lettres de noblesse à l'art du « *rocaillage* » qui consiste à projeter un mortier de ciment sur une structure faite d'un grillage métallique. Il réalisera ainsi de faux rochers, de faux arbres, des caisses à fleurs, etc.

Puis ce seront les premiers grands ouvrages en ciment armé tels que des réservoirs, bassins, abreuvoirs. Son entreprise profitera de la prospérité du Second Empire pour améliorer le confort d'une nouvelle bourgeoisie.

Il dépose son premier brevet le 16 juillet 1867 pour un « système de construc-

tion de caisses, bassins mobiles, en fer et ciment ». Il construira un pont pour franchir les Douves du château de Chazelet, près de St-Benoît-du-Sault dans l'Indre. D'une longueur de près de 14 m sur 4,25 m de large, c'est sans doute le premier pont en béton armé au monde.

Au cours des années 1870, il est le seul à construire de façon continue des ouvrages en ciment armé dont il vante les avantages.

Contrairement à Louis Vicat, Joseph Monier est devenu un homme d'affaire. Il déposera de très nombreux brevets, il en revendra certains et concèdera des droits d'exploitation pour d'autres dans divers pays européens. Il aura ainsi permis à ses partenaires de faire fortune, et terminera pourtant sa vie dans la misère, après la faillite et la mise en liquidation judiciaire en 1889 de l'entreprise « J. Monier Constructeur ».

En juillet 1902, il remercia un groupe d'entrepreneurs européens pour avoir demandé au Président Émile Loubet, dans la revue « Le Ciment », d'intervenir en sa faveur ; il leur écrit : « *je suis profondément touché de votre bon souvenir envers moi, je vous remercie de vous être souvenus de votre ancien maître, Joseph Monier, l'inventeur du ciment armé. Je me console de ma peine de n'avoir pas été oublié* ».

Il termina sa lettre en écrivant qu'il était « *trop heureux d'avoir pu réaliser une invention profitable à tous les peuples civilisés* ».

Il meurt à Paris le 13 mars 1906.

Il existe toujours aujourd'hui une société allemande Monierbau, fondée en 1887.

20^e SIÈCLE : L'ESSOR DU BÉTON ARMÉ ET DU BÉTON PRÉCONTRAINT

Sur la base des découvertes de Vicat et des inventions de Monier et de Lambot, le béton armé et le béton précontraint deviendront en moins d'un siècle les matériaux de construction les plus employés sur la planète. Alors que pour les constructeurs le XIX^e aura été le siècle du fer et de l'acier, le XX^e sera le siècle du béton.

De grands précurseurs, entrepreneurs, ingénieurs et architectes, développeront progressivement les potentialités de cette association entre le béton et l'acier, en tirant le meilleur parti des progrès constants de ces matériaux. Nous avons retenu ici de grands concepteurs, constructeurs et architectes : François Hennebique, Édmond Coignet, Napoléon de Tedesco, Charles Rabut, Albert Caquot, Eugène Freyssinet, Auguste Perret et Le Corbusier. Nous avons dû limiter notre propos ; cette liste est loin d'être exhaustive, et occulte en particulier le rôle des scientifiques qui ont contribué aux progrès de la formulation des bétons : Bolomey, Faury, Feret, Dreux, Gorisse, L'Hermite notamment.

FRANÇOIS HENNEBIQUE (1841-1921) : AVEC LES PREMIÈRES STRUCTURES MODERNES, LE BÉTON ARMÉ FAIT JEU ÉGAL AVEC LA CHARPENTE MÉTALLIQUE

Entrepreneur et autodidacte, François Hennebique, qui dépose ses premiers brevets pour des systèmes constructifs en béton armé en 1880, est le premier à employer l'expression « béton armé » et non pas « ciment armé ».

C'est en 1879 qu'il coule sa première dalle de béton armé. En 1892, il construit son premier immeuble en béton armé au n°1, rue Danton à Paris, et y installe son entreprise avec comme slogan : « Plus d'incendies désastreux ».

La contribution majeure de François Hennebique est la mise au point de procédés qui permettent de réaliser des structures monolithiques continues, comparables aux charpentes métalliques. ▶

En 1899, il conçoit et construit le premier pont civil en béton armé de France, le pont Camille-de-Hogues sur la Vienne à Châtelleraut, ouvrage d'une grande élégance, toujours en service aujourd'hui.

Afin de démontrer les possibilités exceptionnelles de son matériau, il l'emploie pour bâtir, de 1901 à 1904, une demeure à l'architecture originale, que l'on peut voir en face du lycée Lakanal, près de la gare RER de Bourg-la-Reine. Inscrite en 1972 à l'inventaire général du patrimoine culturel, la « maison Hennebique » (figure 5) possède une architecture unique, véritable vitrine des possibilités novatrices du béton armé : terrasse en encorbellement, tour-minaret de 40 mètres de hauteur faisant office de château d'eau destiné à l'arrosage des serres et des jardins suspendus de la villa, portées importantes sans piliers, porte-à-faux, différences de niveaux et saillies illustrent à merveille la souplesse du matériau. Les constructions s'enchaînent ensuite : les docks de Manchester, le tunnel de Newcastle, le stade de Lyon...

**ÉDMOND COIGNET ET
NAPOLÉON DE TEDESCO :
LA PREMIÈRE FORMULATION
THÉORIQUE DU BÉTON ARMÉ**

Fils de François Coignet, Édmond Coignet (1856-1915), ingénieur (ECP) et entrepreneur, a joué un rôle déterminant dans la théorie du béton armé. Il énonça en 1889 les principes du dimensionnement des poutres en ciment armé. Il embaucha comme directeur du bureau d'études Napoléon de Tédesco. Ensemble ils ont développé la première formulation théorique du calcul du béton armé, qu'il appliqua en 1892 à la construction de l'aqueduc d'Achères avec ses galeries elliptiques. Avec Napoléon de Tédesco, il présenta la formulation théorique du calcul du béton armé en 1894 devant l'Académie des sciences et la Société des Ingénieurs Civils. Il orienta de façon définitive les activités de l'entreprise familiale de produits chimiques vers la construction. Avec son procédé de poutres à armatures symétriques, il obtint entre autres l'adjudication du dôme de la Gare d'Anvers, le Casino de Biarritz, le tablier d'un pont de la ville de Luxembourg. Il fut le premier à utiliser des pieux en béton armé et construisit avec l'architecte Jacques Hermant les premiers immeubles parisiens dans ce matériau : Le Magasin des Classes Laborieuses, rue Saint-Martin (1899), la salle Gaveau, rue Saint-Honoré.

**ARMAND-GABRIEL CONSIDÈRE
(1841-1914)**

Ingénieur des Ponts et Chaussées, il fût lui aussi un pionnier de ce nouveau matériau. Visionnaire, il fût en désaccord avec la circulaire de 1906 qui ne considérait pas que le module de déformation pouvait varier selon les contraintes et leur durée d'application. Il participe à la conception du pont de Saint-Jean-de-la-Rivière, arc de 45 m d'ouverture dont la voûte en béton fretté n'avait que 45 cm d'épaisseur à la clé. On lui attribue également la conception d'un pont sur le Tam, à Montauban en 1882, constitué de deux arches de 53 et 56 m, surbaissées dans un rapport de 1/6^e, construit par l'entreprise Bous-siron.

**CHARLES RABUT (1852-1925) :
LE PREMIER COURS DE BÉTON
ARMÉ, À L'ÉCOLE DES PONTS
ET CHAUSSÉES**

À sa sortie de l'École des Ponts et Chaussées, il est nommé Ingénieur des Ponts et Chaussées en 1876 et est affecté en Normandie. Il construit le pont tournant de l'écluse de l'Orne, premier ouvrage réalisé en acier Bessemer en France.

En 1884, il est mis en congé illimité et devient ingénieur à la Compagnie des chemins de fer de l'Ouest pour laquelle il étudie les viaducs de la Souleuvre et de Boulaire. C'est sur la ligne Charleval-Serqueux qu'il emploie le béton armé pour la construction des ouvrages d'art. Il met au point un appareil de mesure de la déformation des pièces de pont, en traction et en compression, et un appareil enregistreur du mouvement

des pièces en translation ou rotation. Il devient en 1896 professeur adjoint en mécanique appliquée à l'École des Ponts et Chaussées. Cela lui permet d'y créer le premier cours de béton armé donné dans le Monde. Il aura comme élève Eugène Freyssinet.

En 1897, il conçoit des constructions en béton armé en porte-à-faux sur la petite ceinture de Paris. Il est nommé en 1900 membre de la Commission du ciment armé, qui va rédiger en 1906, sous la direction de Maurice Lévy, avec Armand-Gabriel Considère comme rapporteur, la circulaire du 20 octobre 1906 sur l'emploi et le calcul du béton armé. Ce texte constitue la reconnaissance officielle du béton armé, admis à figurer parmi les matériaux de construction classiques.

En 1902 il définit les lois de déformation du béton armé, ses règles de calcul et d'emploi. En 1906 est publié son cours de béton armé sous la forme d'un recueil de notes prises par ses élèves.

En 1910, il réalise en béton armé les consoles de la rue de Rome à Paris, avec 7,50 m de porte-à-faux, pour permettre l'élargissement de la tranchée des Batignolles, et augmenter le nombre de voies ferrées en sortie de la gare Saint-Lazare.

**8- Pont Albert
Louppe.**

**8- Albert Louppe
Bridge.**

**ALBERT CAQUOT (1881-1976),
SCIENTIFIQUE ET CONSTRUCTEUR**

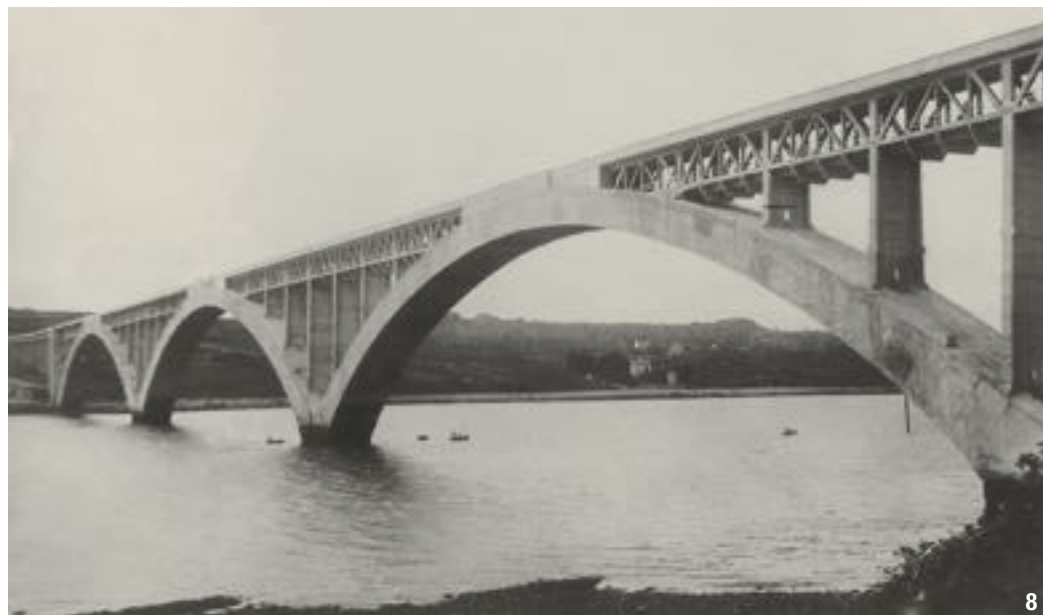
Polytechnicien et Ingénieur des Ponts et Chaussées, de la même promotion qu'Eugène Freyssinet, il se fit remarquer dès sa première affectation dans l'Aube, à Troyes, par les mesures d'assainissement importantes qu'il développa. Celles-ci sauvèrent de nombreuses vies humaines et protégèrent la ville de la grande crue de la Seine de 1910.

Il marque son époque dans le domaine de l'aéronautique par la création, en 1915, des ballons captifs dits « saucisses ».

Il est nommé Directeur Technique de l'Aviation en 1918 et contribue à la supériorité de la chasse française, prélude à la victoire finale de la Première Guerre Mondiale.

Dans le domaine scientifique, il est à l'origine d'importantes avancées comme l'adaptation plastique, la courbe intrinsèque et la connaissance des phénomènes de fatigue. Il sera également à l'origine des bases de la nouvelle discipline qu'est la mécanique des sols. En 1912, il rejoint comme associé le bureau d'études de béton armé d'Armand-Gabriel Considère (1840-1914) où il donnera libre cours à son talent de concepteur d'ouvrages d'art.

Il mène parallèlement à ses nombreuses réalisations de brillantes recherches ; on lui doit en particulier le critère auquel il a donné son nom et la courbe intrinsèque parabolique. Ses publications en 1933 sur la stabilité des massifs pulvérulents ou cohérents font l'objet d'un rapport admiratif de l'Académie des sciences, où il est élu



© ENT. LIMOUSIN



9

© PHOTOTHÈQUE ASSOCIATION EUGÈNE FREYSSINET ET FAMILLE GUYON

membre de la section de mécanique le 12 novembre 1934.

En 1948, avec Jean Kerisel (1908-2005), son gendre et disciple, il présente un nouveau mode de calcul des équilibres de poussée-butée dans les ouvrages de soutènement avec une surface de rupture logarithmique, universellement appliqué depuis. En employant pour la première fois le béton armé pour la réalisation d'un pont à haubans à Donzère-Mondragon en 1952, il en renouvelle la technique. En 1967, il propose pour traverser la Manche un projet de pont avec des portées de 810 m, de 25 m de large sur deux niveaux, pour 8 chaussées, 2 voies de chemin de fer et 2 voies d'aérotrain.

Au cours de sa carrière, habile dessinateur et infatigable calculateur, il réalisa de toutes sortes dont plusieurs furent des records du monde, notamment :

1927-1928 : le pont de la Madeleine (ou pont du Général Audibert), à Nantes, un cantilever franchissant la Loire ;

1927-1928 : le pont La Fayette franchissant les voies de la Gare de Paris-Est à Paris (1927-1928), pont à poutre treillis en béton armé où l'on utilisa pour la première fois des vibreurs à air comprimé (figure 6) ;

1927-1928 : le pont de la Caille sur le Ravin des Ussets au nord d'Annecy, arc de 140 m de portée en béton fretté sans armatures longitudinales (figure 7) ;

9- Halle Freyssinet à Paris.

9- Halle Freyssinet in Paris.

1931 : Le môle-escale du Verdon sur Mer, à l'embouchure de la Gironde ;

1935 : la grande forme de radoub Jean Bart à Saint-Nazaire, qui révolutionna les procédés de construction navale ;

1945-1949 : le barrage de la Girotte en haute montagne, en béton non armé ;

1948 : le pont de la Jonelière sur l'Erdre entre Nantes et La Chapelle-sur-Erdre ;

1950 : l'écluse fluviale de Bollène du barrage de Donzère-Mondragon sur le Rhône (1950), record mondial de dénivellée entre biefs ;

1953-1955 : le tunnel sarrois de Bildstock (1953-1955), en zone d'affaissements miniers ;

1961-1966 : la plus grande usine marémotrice du monde sur la Rance en Bretagne.

Deux prestigieuses réalisations contribuent à sa renommée internationale : la structure interne en béton armé de la grande statue du Christ rédempteur sur le Mont Corcovado à Rio de Janeiro, œuvre du grand sculpteur Paul Landowski (1931) et le pont George V à Glasgow sur la Clyde pour lequel

les ingénieurs écossais demandèrent son aide.

EUGÈNE FREYSSINET (1879-1962) : CONCEPTEUR, CONSTRUCTEUR ET INVENTEUR DU BÉTON PRÉCONTRAIT

Polytechnicien et Ingénieur des Ponts et Chaussées, il assiste aux premiers cours de Charles Rabut sur le béton armé, qui seront à l'origine de sa carrière. Nommé à Moulins en 1905, il commence par construire des ponts d'intérêt local. À l'occasion d'un appel d'offres sur des projets de passages à niveau il fait la rencontre de l'entrepreneur François Mercier. Ce dernier, ayant vu en 1907 un avant-projet en béton armé du pont de Boutiron dans le bureau de Freyssinet au moment où il allait soumissionner le nouveau pont du Veurdre, lui fit la proposition de construire trois ponts sur le même principe - pont du Veudre, pont de Boutiron et pont de Châtel-de-Neuvre - au prix de l'estimation du seul pont du Veurdre. Le conseil général de l'Allier accepta cette proposition, et Freyssinet assura la conception et le contrôle de la construction.

Dans ce contexte il construisit en 1908 une arche d'essai pour le pont du Veurdre, et réalisa à cette occasion un tirant précontraint pour reprendre les poussées de cette arche d'essai : « depuis bien des années déjà, en

fait depuis les leçons de Rabut, j'étais hanté par l'idée de précontrainte ; je l'utilisais pour relier les deux culées par un tirant en béton de 1,50 m² de section environ, pré-comprimé entre les deux culées, sollicitées à se rapprocher l'une de l'autre par une force permanente de 2500 t fournie par plusieurs centaines de fils en acier de 8 mm tréfilés de haute limite élastique et tendus par paires au voisinage de celle-ci ; puis ancrés par des clavetages insérés entre les deux fils de chaque paire... » C'est à l'occasion de la construction des trois ponts sur l'Allier qu'il va découvrir les déformations différées du béton en compression. Conformément au règlement du béton armé de 1906, Eugène Freyssinet n'avait pas tenu compte d'une déformation différée du béton sous l'effet de la compression du béton. Mais quelques mois après la mise en service, une flèche importante était apparue en clé et ne cessait de croître. Devant ce phénomène imprévu, Freyssinet réutilise le vérinage en clé qu'il venait de mettre au point pour le décentrement du pont de Pairéal-sur-Besbre, et rétablit la géométrie des arches. Ceci le conduisit à effectuer des recherches sur le fluage et à faire des essais sur modèles réduits sur la déformée différée du béton. Il se renseigna auprès du Laboratoire des Ponts et Chaussées pour savoir pourquoi les mesures qui y ont été faites n'ont pas montré ce phénomène. ▷

Il apprend ainsi que les laborantins démontaient chaque soir les appareils de mesure, et les remettaient à zéro le lendemain matin, empêchant ainsi de mesurer ce phénomène !

Il entreprend en 1914 la construction du pont de Villeneuve-sur-Lot, qui, interrompue par la guerre, sera terminée en 1919 ; d'où le nom de Pont de la Libération donné à cet ouvrage qui associe élégamment deux arcs latéraux en béton non armé de 96 mètres de portée à des arches secondaires en brique. Il est toujours en service.

Les trois ponts sur l'Allier et le Pont de Villeneuve sur Lot préfigurent, par la hardiesse de leur conception et de leur construction, l'ensemble de l'œuvre d'Eugène Freyssinet, qui est à l'origine du formidable développement du béton précontraint.

Il dépose un brevet le 2 octobre 1928, qui décrit un procédé de mise en précontrainte par prétension et fils adhérents. Il se lance alors dans la fabrication de poteaux pour lignes électriques, mais rencontre de grandes difficultés pour faire accepter ses procédés.

En 1933, la reprise en sous-œuvre de la gare maritime du Havre, menacée d'effondrement suite à des tassements importants des fondations, lui donne l'occasion de démontrer le potentiel de ses procédés à l'entrepreneur Edmé Campenon, avec lequel une fructueuse collaboration s'engage.

Le pas décisif est l'invention de la précontrainte par post-tension.

Le brevet déposé le 26 août 1939 intitulé : « Système d'ancrage de câbles sous tension destinés à la réalisation de constructions en béton précontraint » décrit un système comprenant des câbles à fils parallèles mis en tension par des vérins puis bloqués par des cônes d'ancrage.

La société STUP (Société Pour l'Utilisation de la Précontrainte) est créée en 1943 afin de mettre en œuvre les brevets d'Eugène Freyssinet.

L'œuvre d'Eugène Freyssinet est immense : outre la précontrainte, on lui doit notamment la vibration du béton et les appuis néoprènes, et la construction en voussoirs préfabriqués, mise au point pour la construction du Pont de Luzancy sur la Marne entre 1941 et 1946, suivie de 1947 à 1950 d'une série de 5 ponts identiques sur la Marne, 74 mètres de portée, à Esbly, Ussy-sur-Marne, Changis-sur-Marne, Trilbardou et Annet-sur-Marne (Seine-et-Marne).

Ces ouvrages sont constitués de poutres, elles-mêmes réalisées au



10

© FARIM5

moyen de voussoirs préfabriqués, assemblés par précontrainte longitudinale et transversale, après bétonnage en place des joints entre voussoirs. En 1966, pour la construction du Pont de Choisy-le-Roi sur la Seine, Jean Muller, disciple de Freyssinet, améliorera ce procédé en inventant les joints conjugués collés. Cette technique de construction a eu ensuite l'immense développement que l'on connaît, en France tout d'abord, puis dans le Monde entier.

Outre les ouvrages cités, on retiendra également, de l'œuvre de Freyssinet :

1922-1930 : Pont Albert-Loupe sur l'Elorn entre Plougastel-Daoulas et Brest (figure 8) ;

1922 : Pont de Tonneins sur la Garonne ;

1923 : Hangars de l'Aéroport d'Orly ;

1927-1929 : la Halle Freyssinet ou Halle des Messageries de la gare d'Austerlitz à Paris (figure 9) ;

1936 : Conduites d'eau de l'Oued Fodda, en Algérie ;

1937-1941 : Barrages des Portes de Fer et de Béni Badhel, en Algérie ;

1938 : pont sur l'Autobahn 2 à Oelde dans l'Arrondissement de Warendorf en Allemagne, premier pont en béton précontraint dans ce pays ;

10- Église Saint Joseph - le Havre.

10- Saint Joseph Church - Le Havre.

1946-1951 : Réservoir d'Orléans ;

1947 et 1953 : Pistes d'aviation d'Orly ;

1951-1953 : Trois viaducs en arc sur l'autoroute Caracas - La Guaira, Venezuela ;

1954 : Sauvetage et consolidation de la toiture de l'émetteur d'Europe 1 à Felsberg, Sarre ;

1955-1958 : basilique Saint-Pie X à Lourdes avec les architectes Pierre Vago et André Le Donné ;

1955-1961 : Barrage à voûtes multiples d'Erraguene sur l'oued Djen-Djen, Algérie ;

1957 : Pont n°10 sur la Nationale 7, à Orly ;

1957 : Pont Saint-Michel à Toulouse ;

1961-1964 : Réservoir des Lilas, à Paris ;

1961-1964 : Pont en arc de Gladsville, Australie.

LES FRÈRES PERRET ET LE CORBUSIER : LE RÔLE ESSENTIEL DU BÉTON ARMÉ DANS LE DÉVELOPPEMENT DE L'ARCHITECTURE CONTEMPORAINE

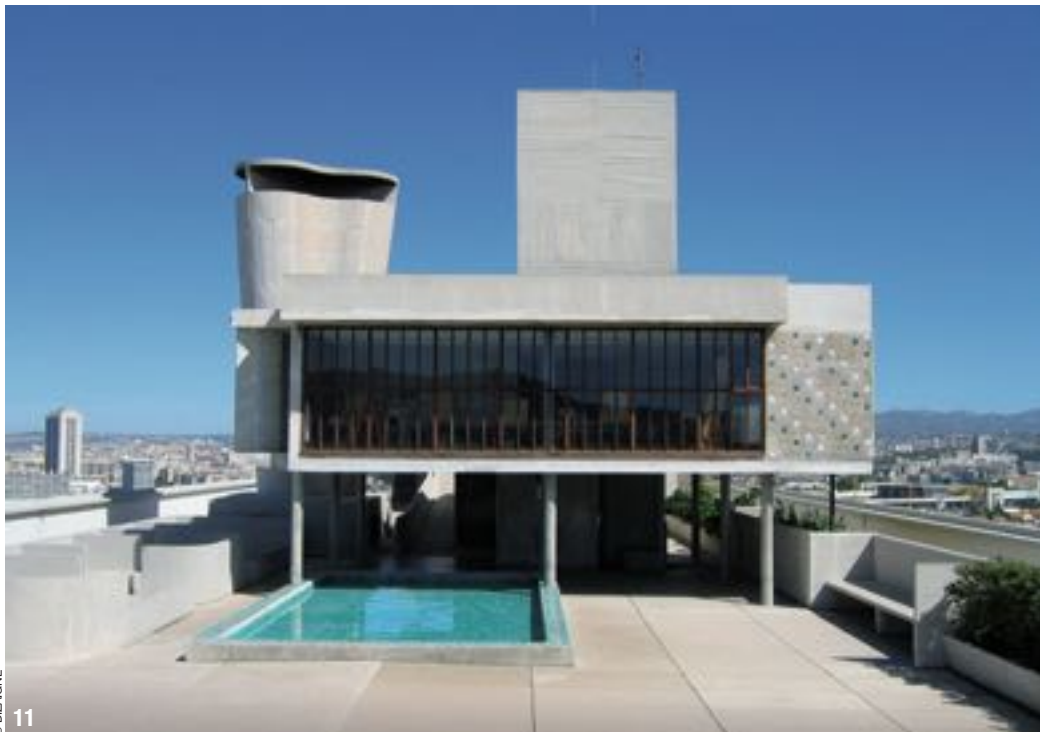
Auguste Perret (1874-1954)

Auguste Perret s'inscrit dans la lignée d'un grand-père carrier et d'un père tailleur de pierre : il a toujours gardé un goût du matériau simple traité noblement et un sens tout aussi modeste que pragmatique de la construction. Né dans les environs de Bruxelles, où son père avait trouvé refuge après son implication dans la Commune de Paris, il s'initie aux procédés de construction modernes au sein de l'entreprise familiale, avant d'orienter définitivement sa carrière en tant qu'« architecte spécialisé dans le béton armé ». Dans le même temps, il effectue ses études à l'École Nationale Supérieure des Beaux-Arts de Paris, où il reçoit l'enseignement de Julien Guadet, l'un des théoriciens de l'architecture contemporaine qui lui transmet la démarche rationaliste et classique des Beaux-Arts.

En 1905, associé à ses frères Gustave (1876-1952), qui fut lui aussi architecte, et Claude (1880-1960), Auguste Perret devient l'un des premiers entrepreneurs à employer le béton armé dans la construction. Ainsi, dès 1913, il construit sa première grande réalisation : le théâtre des Champs-Élysées à Paris. Grâce à une réflexion ouverte sur les possibilités techniques et formelles de ce nouveau matériau, il est considéré comme le précurseur du plan libre en arrivant rapidement à la conclusion que la construction est fondée sur deux entités fondamentales : la structure porteuse, ou ossature, et les remplissages : cloisons, baies et trumeaux. Il applique au béton des formes et des proportions souvent apparentées au classicisme français, ainsi que des textures et des surfaces travaillées à la manière de la pierre de taille (choix des constituants du béton, bouchardage des surfaces). « Mon béton, disait-il en 1944, est plus beau que la pierre. Je le travaille, je le cisèle [...], j'en fais une matière qui dépasse en beauté les revêtements les plus précieux ». Cette approche fut illustrée en particulier par l'Église St-Joseph du Havre (figure 10)

Le Corbusier (1887-1965)

Influencé par son stage effectué en 1909 chez Auguste Perret, Le Corbusier est connu pour la technique constructive poteau/dalle dont l'archétype est la villa Savoye à Poissy et dont l'élaboration théorique est passée par



© DIZAGNE
11

la « maison Dom-Ino ». Les planchers sont supportés par de fins poteaux disposés sur une trame. Ainsi les façades sont libérées de la fonction structurelle. Elles ne sont plus chargées de porter le bâtiment, comme dans la construction en maçonnerie. Les ouvertures ainsi que les parties pleines sont implantées librement et organisent la façade. Cette nouvelle façon de concevoir la construction des bâtiments est riche de conséquences. Si Le Corbusier n'en est pas l'inventeur, il est cependant celui qui a su la formuler en termes simples - le plan libre - et développer un vocabulaire architectural réellement nouveau. La décennie 1920-1930 le voit concevoir un ensemble remarquable de pro-

jets de villas-manifestes, construites ou non, où l'on voit se formaliser les éléments du langage architectural « corbuséen ». Cette série culmine avec deux réalisations remarquables : La Villa Stein, connue aussi sous le nom de « villa les terrasses », livrée vers 1929 à Garches et la Villa Savoye (1929,

11- Cité Radieuse - Marseille.

11- Cité Radieuse - Marseille.

Poissy), application littérale des « cinq points d'une architecture moderne », la plus remarquable de cette période, qui aura une influence considérable dans l'histoire de l'architecture.

Enfin, on peut compléter cette suite par la réalisation en 1925 du Pavillon de l'Esprit Nouveau, à l'occasion de l'Exposition Internationale des Arts Décoratifs (Expositions universelles de Paris). De 1945 à 1952, Le Corbusier construit la Cité radieuse de Marseille, un immeuble d'habitation sous la forme d'un parallélépipède sur pilotis (en forme de piètements évasés à l'aspect rugueux), qui constitue une innovation importante dans la conception architecturale des résidences d'habitations.

Dans cet immeuble, il a tenté d'appliquer ses principes d'architecture pour une nouvelle forme de cité en créant un village vertical, composé de 360 appartements en duplex distribués par des rues intérieures (figure 11).

L'ÉVOLUTION AU COURS DES DERNIÈRES DÉCENNIES

Comme nous l'avons vu le béton, en remplaçant la maçonnerie, s'est progressivement imposé au cours de la première moitié du 20^e siècle comme le matériau le plus largement utilisé dans la construction, seul ou associé à l'acier. Pour autant il n'a cessé d'évoluer, pour répondre à des exigences toujours plus élevées en termes d'ouvrabilité, de durabilité (dans son acception la plus large), de résistance et de qualité architecturale.

Sur la base de recherches scientifiques de plus en plus poussées, faisant appel aux avancées et aux techniques de la physique et de la chimie contemporaines, de nouveaux bétons ont vu le jour, aux performances, à la durabilité, à l'ouvrabilité, à l'aspect exceptionnels : bétons fibrés, bétons à haute et ultra haute performances (BHP et BFUP), bétons auto-plaçants, bétons résistant au gel et aux sels de déverglaçage, béton colorés dans la masse, etc.

Les recherches les plus récentes font appel aux nanotechnologies, qui comme dans d'autres domaines vont permettre de modifier les propriétés macroscopiques du matériau en agissant au niveau moléculaire, ce qui permet d'envisager une adaptation de plus en plus précise et rationnelle du matériau aux performances requises pour chaque ouvrage : c'est l'approche performantielle, qui vient progressivement remplacer l'approche prescriptive. □

ABSTRACT

CONCRETE FROM THE ORIGINS TO THE PRESENT DAY

CHRISTIAN TRIDON, STRES - MICHEL MOUSSARD, ARCADIS

With an annual global production of about 7 billion tonnes, or 1 tonne per inhabitant, concrete is the material most commonly used on our planet. Known to the Romans, then forgotten, it was rediscovered and developed in the 19th century. In the 20th century, with the rapid development of reinforced concrete and then prestressed concrete, it would become the material most commonly used by builders. Adopted by architects, which it freed from the constraints of masonry, but also a symbol of an often degraded urban environment, it is constantly changing, with ever-increasing properties, to meet the challenges of the 21st century which result from contradictory demands between protection of our environment, population growth and the need for housing and infrastructure. □

EL HORMIGÓN DESDE LOS ORÍGENES HASTA NUESTROS DÍAS

CHRISTIAN TRIDON, STRES - MICHEL MOUSSARD, ARCADIS

Con una producción mundial anual de unos 7.000 millones de toneladas, es decir 1 tonelada por habitante, el hormigón es el material más empleado en nuestro planeta. Conocido por los romanos, olvidado después, recuperado y desarrollado en el siglo XIX, con el auge del hormigón armado y, posteriormente, del hormigón pretensado, en el siglo XX se convirtió en el material más empleado por los constructores. Adoptado por los arquitectos, a quienes liberó de las limitaciones de albañilería, pero también símbolo de un entorno urbano frecuentemente degradado, evolucionó constantemente para hacer frente, gracias a sus prestaciones cada vez mayores, a los retos del siglo XXI derivados de las exigencias contradictorias entre el respeto de nuestro medio ambiente, la demografía y la necesidad de viviendas e infraestructuras. □



© FRANCIS VIGOUROUX/PHOTOTHÈQUE VINCI ET FILIALES

LES DOMAINES D'UTILISATION DU BÉTON

AUTEURS : LIONEL LINGER, EXPERT BÉTONS & LAURENT BOUTILLON, DIRECTEUR SCIENTIFIQUE, VINCI CONSTRUCTION GRANDS PROJETS

LE CHAMP COUVERT POUR CETTE PRÉSENTATION NON-EXHAUSTIVE DES DOMAINES D'UTILISATION DU BÉTON CONCERNE LE DOMAINE DU GÉNIE-CIVIL. LA DÉMARCHE RETENUE EST DE PRÉSENTER LE SUJET EN PARTANT D'UN BESOIN ET EN DÉCRIVANT LA RÉPONSE À APPORTER VIA LA FORMULATION DU BÉTON PLUTÔT QUE DE LA PRÉSENTATION D'UNE SORTE DE « CATALOGUE DE TYPES DE BÉTONS ». CE CHAPITRE DÉMONTRE, S'IL EN ÉTAIT ENCORE BESOIN, LE CARACTÈRE « SUR-MESURE » DU BÉTON QUI NÉCESSITE DE S'ADAPTER AUX RESSOURCES DISPONIBLES LOCALEMENT POUR RÉPONDRE AU MIEUX À UN CAHIER DES CHARGES PRÉCIS.

INTRODUCTION

Le béton est largement utilisé dans de très nombreux domaines de la construction sous des formes très variées. Le domaine de la construction requiert en effet de nombreuses fonctionnalités différentes pour les structures ou parties d'ouvrages qui demandent aux bétons d'adapter, dans la mesure du possible, leurs caractéristiques tant à l'état frais que durci. Ce présent chapitre s'attache

à présenter les domaines d'utilisation du béton dans le domaine du Génie-Civil. Plutôt que de dresser un catalogue le plus exhaustif possible des caractéristiques que peut offrir le matériau béton en fonction de sa formulation, ce sujet très vaste est abordé en partant de l'identification d'un besoin particulier, pour aboutir à la réponse apportée par le choix d'une formulation spécifique. En fait, l'exercice permet de démontrer,

1- Vue d'ensemble du barrage BCR de Wadi Dahqah au Sultanat d'Oman.

1- Overall view of the Wadi Dahqah RCC dam in the Sultanate of Oman.

s'il en était encore besoin, le caractère véritablement « sur-mesure » du béton et l'absolue nécessité de s'adapter au mieux aux ressources naturelles disponibles localement. Les différentes spécifications et fonctionnalités du matériau béton seront introduites en respectant la logique suivante :

→ Quelles sont les contraintes particulières d'exécution sur chantier et les fonctionnalités recherchées ?

→ Comment peut-on traduire ces exigences en termes de propriétés du béton recherchées ?

→ Quels sont alors les principes de formulation applicables ?

Nous aborderons dans les grandes lignes les thèmes suivants :

- Les bétons à ouvrabilité graduée ;
- Les bétons à résistance mécanique graduée ;
- Les bétons à durabilité adaptée ;
- Les bétons de masse ;
- Les bétons lourds ;
- Les bétons légers ;
- Les bétons et leur comportement au feu ;
- Les bétons « de niche ».

LES BÉTONS À OUVRABILITÉ GRADUÉE

Indépendamment de ses caractéristiques à l'état durci, le béton doit avoir à l'état frais une consistance adaptée à la technique de mise en œuvre retenue pour la réalisation d'un élément structurel. Pour cela, le béton peut être fabriqué dans une très large gamme de consistances allant de la « terre humide » à un véritable fluide pouvant s'écouler et se mettre en œuvre sous son propre poids.

LES BÉTONS DE CONSISTANCE FERME

Les bétons extrudés sont des bétons coulés en continu par coffrage glissant pour réaliser des dispositifs de retenus en béton - séparateurs simples ou doubles en bétons adhérents (glissières GBA ou DBA) - sur autoroute, ainsi que des ouvrages d'assainissement.

Le béton, décoffré alors qu'il est encore frais et que sa prise n'a pas eu lieu, doit supporter son poids propre sans déformations inacceptables ; il est donc nécessaire d'avoir un béton très ferme/raide à l'état frais.

D'autres cas nécessitent l'utilisation d'un béton de consistance ferme, lorsque l'on veut une résistance au très jeune âge (6/7 heures) élevée ou encore pour des applications comme la réalisation des chaussées en béton ou des pistes d'aéroport.

Les bétons de consistance ferme sont qualifiés au moyen d'un essai au cône d'Abrams (S : 10 à 40 mm) voire préférentiellement par un essai Vébé (V : 5 à 30 secondes), tel que décrit dans la norme EN 12350-3, qui consiste à mesurer un temps d'affaissement du béton frais soumis à vibration.

→ **Formules de béton à extruder**

Le béton, qui doit présenter un affaissement de l'ordre de 30 mm, est mis

en œuvre par des machines à coffrage glissant (figure 2) et doit respecter une formulation très précise et rigoureusement constante. C'est un béton dosé à raison de 330 à 350 kg/m³ de ciment et comportant une teneur en fines élevée (15% d'éléments < 0.063 mm) tels les fillers calcaires ou du sable fillérisé. La capacité du béton à présenter une stabilité mécanique immédiate après mise en œuvre est obtenue grâce à un choix de granulats adaptés (forme anguleuse de préférence), une teneur en eau limitée (rendue possible grâce à l'utilisation d'un plastifiant).

Dans le cas de travaux routiers, le béton devra en plus présenter une résistance suffisante aux cycles de gel/dégel et aux sels de déverglaçage, ce qui est obtenu en ajoutant un adjuvant entraîneur d'air permettant de stabiliser un réseau de microbulles d'air.

2- Machine à extruder pour glissière séparatrice d'autoroute en béton.

2- Extrusion machine for concrete motorway safety barrier.



2

© FRANCIS VIGOURLOUX/PHOTOTHÈQUE VINCI ET FILIALES

→ **Formules de béton routiers ou de pistes d'aéroport**

Les bétons routiers ou pour chaussées aéronautiques ne sont pas fondamentalement différents des bétons pour ouvrage d'art, néanmoins le choix des constituants et la définition de leurs proportions dans le mélange doivent être déterminés afin d'obtenir des performances adaptées au mode de mise en place (machine à coffrage glissant) et aux sollicitations particulières que supportent les chaussées (sollicitations de flexion, usure superficielle et tenue aux cycles de gel/dégel et aux sels de déverglaçage). Le choix des granulats sera fait en tenant compte des exigences de la norme XP P 18-545, notamment en ce qui concerne leur dureté, leur sensibilité au gel et leur friabilité. Outre l'adjonction d'un plastifiant permettant la limitation de la quantité d'eau de gâchage, un adjuvant entraîneur d'air sera systématiquement utilisé. Enfin, puisque la résistance à la flexion du béton non armé est un aspect primordial, ce paramètre (par fendage sur éprouvette cylindriques ou par essais de flexion sur prismes) devra être mesuré.

→ **Les bétons de préfabrication**

La production industrielle (figure 3) en très grande quantité d'éléments préfabriqués comme les voussoirs de tunnel requiert de maximiser la réutilisation des moules et donc de minimiser le temps passé par la pièce dans le coffrage.

Dans les cas extrêmes on cherchera à faire 3 cycles par 24 heures et il est donc indispensable que le béton présente des caractéristiques mécaniques suffisantes (12/15 MPa) au bout de 6 à 7 heures pour pouvoir être décoffré (figure 5). Par ailleurs, le nombre de pièces étant très important, les volumes de béton le sont également et il est nécessaire de peaufiner l'optimum technico-économique du produit, ce qui conduit le plus souvent à retenir des bétons fermes ayant une Durée Pratique d'Utilisation (DPU) réduite (de l'ordre de 30 minutes) et une résistance à 28 jours de l'ordre de 40 MPa.

Ces bétons très fermes sont très exigeants, d'une part ils requièrent une maîtrise quasi parfaite de la quantité d'eau de gâchage, d'autre part l'opération de vibration (voire d'hypervibration) nécessaire au parfait remplissage des moules est délicate à mettre au point et les travaux de finition (réglage et talochage) sont pénibles (figure 4).

C'est pourquoi, aujourd'hui, la solution radicalement opposée consistant à mettre en œuvre des bétons auto-plaçants est de plus en plus utilisée pour la préfabrication classique et qu'elle est expérimenté - avec des résultats prometteurs - pour la préfabrication de voussoir de tunnel.

LES BÉTONS DE CONSISTANCE INTERMÉDIAIRE (PLASTIQUE À FLUIDE)

Il s'agit des bétons traditionnels, dont l'affaissement est compris entre [50-90], [90-150] et [160-210] mm, coulés en place dans la plupart des chantiers de bâtiments et/ou de génie-civil. Il convient seulement de mentionner que la tendance depuis quelques années déjà est d'utiliser des bétons de consistance de plus en plus fluide. Cela peut s'expliquer par le fait que les plastifiants et superplastifiants modernes permettent de formuler des bétons à forte ouvrabilité malgré un dosage réduit en eau et qu'il est également plus commode, avec ce type d'adjuvants, de garantir le maintien de consistance dans le temps (DPU) d'un béton frais pour des consistances plus élevées (S : 180 +/- 30 mm) que pour des consistances intermédiaires (S : 150 +/- 30 mm).

LES BÉTONS DE CONSISTANCE TRÈS FLUIDE

Partout où il n'est pas possible de mettre en œuvre l'opération de vibration nécessaire au bon remplissage et au bon compactage (ou serrage) du béton, ▷



3

© FRANCIS VIGOUROUX/PHOTO THÈQUE VINCI ET FILIALES

il est nécessaire de mettre en œuvre des bétons de consistance très fluide afin que ceux-ci puissent se mettre en œuvre de manière satisfaisante. Un certain nombre d'applications requiert ce type de bétons comme par exemple les bétons utilisés pour les fondations profondes ou coulés sous l'eau.

→ Les bétons de fondations profondes non vibrés

Ces bétons doivent être très fluides et relativement peu visqueux, ils ne doivent pas présenter de phénomènes de ségrégation et avoir une susceptibilité au ressuage très faible. Le béton étant injecté par le bas et la colonne de béton remontant le long du pieu ou de la paroi jusqu'à la fin du bétonnage, il est nécessaire que l'ouvrabilité du béton soit maintenue pendant une durée supérieure à celle nécessaire au bétonnage du pieu (typiquement supérieur ou égale à 4 heures) ; ce point est un aspect prépondérant pour la formulation du béton.

Les bétons de fondations profondes sont formulés avec un volume important d'éléments fins (au minimum 385 kg/m³ de particules inférieures à 0.063 mm, incluant le ciment) permettant de limiter ségrégation et le ressuage, et une synergie adéquate d'adjuvants (généralement un superplastifiant et un retardateur de prise) permettant le maintien d'une rhéologie adéquate dans le temps.

→ Les bétons coulés sous l'eau

La spécificité des bétons coulés sous l'eau réside dans les conditions de mise en œuvre en aveugle du béton sans

possibilité de vibration. Les propriétés du béton frais et les paramètres de formulation sont donc voisines de celles des bétons de fondations profondes décrites dans le paragraphe précédent. En sus des caractéristiques de durabilité et de résistance, les points clés suivants doivent être respectés :

→ Choix d'un béton de consistance S3 ou S4 (voire auto-plaçant) pour permettre le pompage, assurer une répartition homogène dans le coffrage ou en fond de fouille et pour ne pas avoir besoin de serrer le béton ;

→ Utilisation d'un tube-plongeur qui évitera la ségrégation et la désagrégation du mélange ;

→ Choix d'une granulométrie riche en éléments fins avec au moins 400 kg/m³ de passant au tamis de 0,063 mm ;

→ Utilisation d'un adjuvant agent de cohésion spécifique pour donner au béton une cohésion qui permettra de limiter le phénomène de délavage sans diminuer la maniabilité.

LES BÉTONS AUTO-PLAÇANTS : BÉTONS COULÉS EN PLACE OU PRÉFABRIQUÉS

Le cas des bétons auto-plaçants (BAP) est largement développé dans l'article de cette revue qui est dédié aux nouveaux bétons et la recherche.

Les BAP se distinguent des bétons ordinaires principalement par leurs propriétés à l'état frais et leur capacité de moulage, d'enrobage et de compaction par le seul effet de la gravité.

On définit ainsi par BAP : un béton très fluide, homogène et stable, mis en œuvre sans vibration (la compaction

3- Vue d'ensemble usine de préfabrication de voussoirs à postes fixes.

3- Overall view of a fixed segment prefabrication plant.

s'effectue par le seul effet gravitaire). De nombreux résultats ont été acquis et publiés dans le cadre du Projet National B@P et on pourra utilement se reporter au guide AFGC Recommandations pour l'emploi des Bétons Auto-Plaçants publié en 2008.

LE CAS PARTICULIER DES BÉTONS PROJÉTÉS

Il est parfois nécessaire de mettre en œuvre une paroi de béton plus ou moins épaisse et orientée dans n'importe quelle position (horizontale, verticale, en plafond) sans utiliser de coffrage. C'est le cas pour la réalisation des confortements de soutènement en souterrain, pour le soutènement de talus, ou la réparation d'ouvrages.

On utilise alors la technique du béton projeté qui doit être capable de se raidir et de rester en place dès son contact avec la paroi lorsqu'il est projeté avec une vitesse adéquate, soit parce qu'il contient une faible quantité d'eau (voie sèche), soit parce qu'un activateur

chimique (accélérateur de prise spécifique sans alcalins) a été introduit en bout de lance (voie mouillée).

Dans les deux cas, la qualification et l'expérience des opérateurs qui mettent en œuvre le béton (dosage en eau ou adjuvant lors de la mise en œuvre, distance par rapport à la paroi, ...) est absolument primordiale, notamment pour limiter les phénomènes de rebond. On pourra utilement se reporter aux guides publiés par l'ASQUAPRO dans ce domaine.

Il est possible de d'obtenir des bétons performants (> 35 MPa), par exemple pour des revêtements définitifs de tunnel, avec la technique du béton projeté. Les bétons projetés sont formulés de manière analogue aux bétons coulés en veillant à minimiser le diamètre du plus gros gravillon (< 12 mm) et augmenter la proportion de sable par rapport au gravillon. Le dosage en liant est généralement voisin de 400 kg/m³. Ils peuvent incorporer une certaine quantité de fibres métalliques (généralement entre 20 et 35 kg/m³) voire de macrofibres synthétiques structurales (entre 6 et 8 kg/m³) pour éviter d'utiliser un treillis d'armatures sur la paroi. On distingue deux méthodes de mise en œuvre du béton projeté :

→ La voie sèche

La voie sèche se caractérise par l'emploi de mélanges (granulats + liant) sous forme pulvérulente (faiblement humide) et pulsés par de l'air comprimé à très grande vitesse (100 m/s) dans une conduite avec introduction de l'eau de gâchage au niveau de la lance de projection.



4



5

© FRANCIS VIGOUROUX/PHOTOTHÈQUE VINCI ET FILIALES

→ La voie mouillée

La voie mouillée (flux dense) correspond à l'emploi de béton de consistance très plastique à fluide (grâce à l'emploi d'un superplastifiant) pompé à environ 0,30 m/s dans une conduite avec introduction d'air comprimé et d'un adjuvant raidisseur-accelerateur au niveau de la lance de projection.

LES BÉTONS À RÉSISTANCE GRADUÉE

Lorsque le besoin consiste à remplir un volume donné (cavités, tranchées, vide annulaire entre le revêtement préfabriqué et le diamètre d'excavation du tunnel) avec un matériau auquel on demande de présenter une mise en œuvre simple, des caractéristiques mécaniques similaires à celle d'un (très) bon sol et de ne pas présenter de tassements différés, il peut être fait avantageusement appel à des bétons de comblement de cavités. Des besoins similaires avec, en sus, une exigence de faible perméabilité du produit fini peuvent également apparaître pour la réalisation de parois en béton étanches. Enfin, selon le niveau de sollicitations appliqué sur une structure donnée, le niveau de performance mécanique du béton devra être adapté, dans une gamme de résistance à la compression comprise entre 20 et 200 MPa, par le biais du choix des constituants et de la formulation du béton.

LES BÉTONS DE COMPLEMENT DE CAVITÉS

Ces matériaux se caractérisent par une faible (voire très faible) résistance

4- Opération de talochage du voussoir.

5- Décoffrage et manutention en sortie de poste d'étuvage.

4- Segment floating operation.

5- Formwork removal and handling on leaving a curing station.

mécanique requise, une durée pratique d'utilisation (DPU) maximale, de gros volumes mis en œuvre et donc impérativement un prix unitaire optimisé.

→ Les remblais auto-compactants

Utilisés pour le remblaiement de tranchée, ces matériaux doivent être mis en place sans compactage ni vibration. Ils doivent de surcroît rester ré-excavables avec des moyens classiques à long terme, ainsi leur résistance mécanique sera comprise entre 0.5 et 2 MPa et pas plus. Il s'agit de produits comportant entre 25 et 100 kg/m³ de liant hydraulique et généralement un puissant générateur d'air entraîné (> 20% d'air occlus) permettant de minimiser les coûts. Il existe deux catégories de produits :

Les produits essorables

La capacité portante est essentiellement obtenue par évacuation dans le terrain d'une large proportion de l'eau

de gâchage qui, étant surabondante, confère initialement au béton une très grande fluidité. Ces produits sont adaptés aux terrains perméables, et pour des fouilles de largeurs limitées.

Les produits non-essorables

La capacité portante est obtenue par la prise et le durcissement du liant, la fluidité du produit à l'état frais étant obtenue par l'utilisation d'un superplastifiant.

→ Les mortiers de bourrage pour tunnelier

Les mortiers de bourrage sont utilisés pour le comblement du vide annulaire laissé entre les voussoirs en béton et le terrain lors du creusement d'un tunnel par un tunnelier (appelé également TBM (Tunnel Boring Machine)). Ils doivent présenter certaines caractéristiques rhéologiques et mécaniques à court et long terme pour garantir un parfait comblement du vide annulaire existant autour des voussoirs, avec comme points forts :

→ Une ouvrabilité et DPU compatibles avec les moyens de mise en œuvre du produit (> 12 heures) (figure 6).

→ Une cohésion à court terme après injection derrière les voussoirs (calage et support des voussoirs préfabriqués) (figure 7).

→ Des performances mécaniques suffisantes, mais non surabondantes à long terme (de l'ordre de 1 MPa).

Les mortiers de bourrage semi-actifs sont formulés avec de faibles quantités de liant (ciment ou chaux hydraulique) (< 50 kg/m³), compensés par de fortes quantités de fines (< 0.063 mm) (cendres volantes, fillers calcaires, sable

fillérisé) et un volume d'eau adapté, afin d'obtenir un rapport entre le volume des fines et l'eau voisin de 0.65. L'utilisation d'un retardateur de prise est généralement nécessaire pour garantir la très longue DPU requise.

LES BÉTONS ÉTANCHES

Certains chantiers peuvent nécessiter la réalisation de parois étanches, comme par exemple sous le corps d'un barrage ou pour un diaphragme permettant le démarrage d'un tunnelier dans un milieu saturé en eau. Pour ces applications on utilise des bétons formulés en incorporant une certaine quantité de bentonite afin de conférer au béton à l'état durci une faible perméabilité à l'eau et en contrepartie une faible résistance mécanique (entre 1 et 10 MPa). Leurs principales caractéristiques à l'état frais sont similaires à celles du paragraphe sur les bétons de fondations profondes non vibrés.

LES BÉTONS DE BÂTIMENT OU DE GÉNIE-CIVIL

Les chantiers de bâtiment et/ou de génie-civil utilisent de grandes quantités de bétons traditionnels de gamme de résistance mécanique comprise entre C20/25 à C50/60 dont le niveau de performance dépend de la qualité intrinsèque des constituants (granulats, liant) et des paramètres de formulation (notamment le dosage en liant (typiquement compris entre 280 et 380 kg/m³) et le rapport Eau efficace/Liant équivalent, appelé E/C par la suite, (généralement compris entre 0.60 et 0.45)) selon le niveau de performance requis. ▷

LES BHP

Certaines parties d'ouvrages fortement sollicitées (poteaux, poutres de grandes portées, ouvrages précontraints) ou présentant des exigences de durabilité accrues peuvent nécessiter l'utilisation de bétons présentant une forte compacité et des performances mécaniques élevées. On peut alors avoir recours aux bétons de Hautes Performances (BHP) correspondant à la gamme C60/75 à C80/95.

Les BHP sont formulés avec une plus forte quantité de liant que les bétons ordinaires (typiquement entre 380 et 420 kg/m³) et un faible rapport E/C (< 0.40). Ils contiennent souvent une certaine proportion de fumées de silice (5 à 8 % du poids de liant) et l'utilisation d'un superplastifiant est obligatoire.

LES BFUHP

Cette nouvelle génération de matériaux cimentaires présente des performances d'un ordre de grandeur supérieur en mécanique et de deux à trois supérieurs en termes de durabilité que les bétons dits classiques. L'ajout de fibres métalliques permet de limiter le caractère fragile de la matrice cimentaire en compression et confère au matériau une certaine ductilité.

Les Bétons Fibrés à Ultra Hautes Performances (BFUHP) sont caractérisés par la très faible quantité d'eau qu'ils contiennent (E/C < 0.2) grâce à l'emploi d'un superplastifiant à fort dosage et par l'optimisation de l'empilement granulaire (le D_{max} est généralement < 2 mm).

LES BÉTONS À DURABILITÉ ADAPTÉE

Un des enjeux majeurs lors du choix des paramètres de formulation du béton est de lui conférer une durabilité suffisante pour la période escomptée d'utilisation des ouvrages. Une démarche rationnelle d'analyse de la durabilité d'une structure en béton armé ou précontraint consiste en une analyse des principaux mécanismes pouvant affecter la durabilité des ouvrages, qu'ils soient d'origine interne au béton (alcali-réaction, formation d'ettringite différée), ou d'origine extérieure affectant le directement matériau béton (Cycles de gel dégel des bétons [XF selon terminologie de la norme EN 206-1]/Attaques externes par le milieu environnant (Sulfates, acides, ...) [XA] ou enfin d'origine extérieure affectant le béton armé ou précontraint (corrosion des armatures par carbonatation [XC] du béton d'enrobage et/ou pénétration de chlo-

rures [XS et XD]). Il convient alors de procéder au choix de constituants et à la mise au point des formules de béton permettant de répondre aux agressions potentielles.

Le choix de constituants adaptés (granulats/ciments et additions), l'application de règles adaptées de formulation des bétons et/ou la réalisation d'essais normalisés permettent généralement de répondre aux agressions potentielles d'origine interne ou d'attaque de gel/dégel et chimique extérieure. En effet, ces mécanismes relèvent d'un problème général de durabilité sans nécessiter une véritable quantification de durée.

En revanche la cinétique du mécanisme de corrosion des armatures a une incidence directe sur la durée de vie escomptée des ouvrages. En général, on entend par « durée de vie » la période avant laquelle le mécanisme de corrosion des armatures n'est pas susceptible de se produire. Dans ce cas la qualité (et l'épaisseur) du béton d'enrobage est donc le facteur clé qui peut être quantifié au moyen d'indicateurs de durabilité, mesurés par des essais en laboratoire, tels que porosité accessible à l'eau, perméabilité aux gaz et à l'eau, coefficient de diffusion des ions chlorure, etc.

Les normes actuelles proposent des spécifications pour formuler des bétons avec une durée de vie supposée égale à 50 ans (NF EN 206-1) ou 100 ans (Fascicule 65). La conception de bétons pour une durée de vie plus importante (120 ans pour certains grands ouvrages, plusieurs siècles pour les bétons destinés au confinement de déchets radioactifs) nécessite la mise

en œuvre d'une démarche performante, globale et prédictive de la durabilité des structures en béton (armé ou précontraint). Cette approche est basée sur la notion d'indicateurs de durabilité et combinant des mesures en laboratoire et des simulations numériques par le biais de modèles de calcul prédictifs (par exemple le Model Code Fib 2010).

LES BÉTONS DE MASSE

Certaines parties d'ouvrages sont constitués d'éléments de structure de plusieurs mètres d'épaisseur tels que les barrages, des éléments de structure de viaducs (semelles, piles, voussoirs sur pile), de radiers de centrales thermiques ou nucléaires ou d'ouvrages

enterrés (stations de métro), de centrales hydroélectriques, etc.

Pour la réalisation de ces structures de forte épaisseur, l'enjeu essentiel est de minimiser le dégagement de chaleur du béton lors de son hydratation afin de se prémunir des risques de Réaction Sulfatique Interne d'une part, et des risques de fissuration accrues au jeune âge et liés aux gradients de température d'autre part.

Compte tenu des forts volumes en jeu, le prix unitaire du béton est nécessairement à optimiser pour l'économie globale du projet.

LES BÉTONS ARMÉS DE GRANDE ÉPAISSEUR

Outre l'aspect thermique mentionné ci-dessus, les bétons armés utilisés pour la réalisation de pièces épaisses doivent généralement répondre à une problématique de durabilité, de résistance mécanique adaptée, mais également de consistance adéquate pour une mise en œuvre aisée malgré souvent une forte densité d'armatures (figure 8). Ces bétons sont formulés en incorporant une forte proportion d'additions minérales (cendres volantes et/ou laitier moulu) en substitution partielle du ciment Portland. Le diamètre du plus gros granulats peut être augmenté (32 voire 40 mm) afin de réduire la quantité de ciment dans la formule. Le béton est produit en minimisant sa température initiale à l'état frais (protection des granulats de l'ensoleillement, refroidissement de l'eau de gâchage, incorporation de glace pilée en remplacement d'une certaine proportion d'eau de gâchage, refroidissement du béton frais à l'azote liquide).

6- Mortier de bourrage à l'état frais.

7- Illustration de la cohésion du mortier frais juste après essais de consolidation (essorage) sous 1 bar pendant 1/2 h.

6- Packing mortar in fresh condition.

7- Illustration of the fresh mortar's cohesion just after consolidation tests (water extraction) at 1 bar for half an hour.



6



7

© LIONEL LINGER



8

© THIERRY DUVIER, TRILOGIC/PHOTOTHÈQUE VINCI ET FILIALES

Enfin, dans certains cas extrêmes, la mise en place d'un système de refroidissement du béton dans la masse (circulation d'eau dans des serpents placés avant bétonnage) pendant le durcissement du béton pourra également être envisagée.

LES BÉTONS COMPACTÉS AU ROULEAU (BCR)

Ces bétons sont décrits en détail dans le paragraphe, *les bétons de consistance intermédiaire (plastique à fluide)*, dédiés aux bétons de barrage tel que le barrage de Wadi Dahqah au Sultanat d'Oman (figure 1).

Les BCR ont une résistance à la compression à long terme (90 jours) comprises entre 10 et 15 MPa, présentent une consistance très ferme (terre humide). Ils sont formulés avec une très faible quantité de liant (80 à 140 kg/m³) de faible exothermie ainsi qu'un squelette granulaire continu comportant des granulats de forte dimension (> 50 mm).

LES BÉTONS LOURDS

Certaines applications industrielles peuvent nécessiter l'emploi de bétons ou coulis présentant une densité plus élevée (> 3,0) que les valeurs de 2,2 à 2,5 traditionnellement obtenus avec les bétons conventionnels. Il s'agit d'applications spécifiques pour la réalisation d'écrans de protection biologique contre les radiations atomiques ou les rayons X ou gamma comme par

8- Préparation ferrailage sur un plot de radier du barrage de Naga Hammadi en Égypte.

8- Preparation of reinforcing bars on a foundation raft section of Naga Hammadi dam in Egypt.

exemple dans des salles de radiothérapie des hôpitaux. Il existe également des bétons neutrophages. Il peut également s'agir de bétons de lests (contre-poids) pour permettre de minimiser le volume de matériaux mis en œuvre. Ces bétons sont conçus en incorporant des granulats spéciaux de densité élevée (hématite, magnétite, barytine) pour atteindre des densités de l'ordre de 3,0 à 4,0, voire de matériaux ferreux comme des riblons (chutes d'aciers) ou de plomb permettant de produire des bétons de densité supérieure à 5,0.

LES BÉTONS LÉGERS

A contrario du paragraphe précédent, certains cas nécessitent de rechercher à gagner du poids et donc de chercher à utiliser des bétons présentant le meilleur compromis entre résistance mécanique et densité la plus faible possible. Dans d'autres cas, le carac-

tère majeur recherché est d'optimiser les propriétés d'isolation thermique du béton pour certaines applications de construction ou de réhabilitation de bâtiments.

LES BÉTONS TRÈS LÉGERS NON-STRUCTURELS

Les principales propriétés recherchées sont le gain de poids et l'isolation thermique voire acoustique car la résistance structurelle de ce type de béton ne joue alors qu'un rôle secondaire. Il s'agit notamment de travaux de remplissage ou reprofilages de dalles sans alourdir considérablement les structures. Il existe plusieurs sortes de bétons très légers non-structurels :

→ Le **béton colloïdal** obtenu à partir d'un ciment, d'un sable fin, d'en entraîneur d'air puissant et d'un agent colloïdal. Les granulats sont en quelque sorte remplacés par des bulles d'air. La densité obtenue est voisine de 1,1 pour des résistances comprises entre 5 et 10 MPa.

→ Le **béton de mousse** en mélangeant un coulis ou mortier fluide avec une mousse générée par un pistolet ou un générateur de mousse. La densité obtenue peut descendre jusqu'à 0,6 dans la mesure où les performances mécaniques souhaitées restent de l'ordre de 1 à 2 MPa.

→ Le **béton de polystyrène** obtenu en incorporant des billes de polystyrène expansé dans un mortier. Il est possible d'atteindre des densités de 0,5 à 1,2

avec des résistances mécaniques variant de 2 à 4 MPa.

LES BÉTONS LÉGERS STRUCTURELS

L'utilisation de bétons légers structurels peut être préconisée pour des applications de type bâtiment car ils présentent de meilleures propriétés d'isolation thermique grâce à leur plus faible conductivité thermique $\lambda = 0,6$ à $0,8$ W/m.K contre $\lambda \approx 1,6$ W/m.K pour un béton traditionnel.

Il s'agit de bétons dont la densité varie de 1,2 à 1,8 et la résistance mécanique peut atteindre une gamme de performance entre C20/25 et C35/45. Ils sont formulés en incorporant des granulats légers naturels (roches volcaniques) ou des granulats légers artificiels de type argiles, laitiers ou schistes expansés en substitution de tout ou partie des gravillons et/ou du sable d'une formule de béton traditionnel.

LES BÉTONS « À DENSITÉ MODIFIÉE »

Les bétons « à densité modifiée », présentant une densité légèrement inférieure au béton traditionnel, c'est-à-dire dans une gamme [1,8 - 2,1], peuvent être utilisés pour des parties de structures nécessitant une réduction de poids (caissons flottants) tout en conservant des performances mécaniques importantes (pouvant aller jusqu'à 60 MPa). Ils sont formulés selon les mêmes principes que les BHP en ▷

remplaçant une certaine proportion de gravillons par des granulats artificiels de bonne qualité (argiles ou schistes expansés).

LES BÉTONS ET LEUR COMPORTEMENT AU FEU

LES BÉTONS RENFORCÉS DE FIBRES DE POLYPROPYLÈNES

Certaines structures en béton (notamment les tunnels) sont susceptibles d'être soumises à un incendie. Plus la montée en température au niveau des éléments de structures en béton est rapide et élevée, plus le risque de voir le béton s'écailler en surface est accru. Ce risque est d'autant plus important pour des bétons compacts (type BHP) compte tenu de la forte compacité de la matrice cimentaire qui freine le mouvement de l'eau/vapeur d'eau dont le front de pression provoque un décrochage successif de morceaux de béton exposant petit à petit les aciers au feu. Pour abaisser la pression hydrique, des fibres polypropylènes (fibres PP) peuvent être incorporées dans le béton avec un dosage compris entre 1 kg/m³ et 2 kg/m³. Ces fibres fondent à une température voisine de 170°C soit une température légèrement moindre que celles rencontrées au cours de l'éclatement (autour de 200°C). Les fibres fondues sont absorbées par la pâte de ciment formant un vide au sein de la structure et offrant ainsi un volume supplémentaire à la vapeur d'eau pour circuler. Lorsque les fibres fondent, elles se dilatent de 10% engendrant l'apparition de microfissures créant un système poreux par percolation. De nombreux tests et d'études ont montré que la présence des fibres PP suffisait pour prévenir le risque d'éclatement.

LES BÉTONS RÉFRACTAIRES

Afin de résister à des températures élevées (> 1 000 °C) pour des applications de type fours, bétons de protections,

etc., il faut que le liant et les granulats eux-mêmes ne se désagrègent pas sous l'effet des transformations chimiques ou physiques et restent intègres.

Ces bétons dits réfractaires sont formulés à base d'aluminates de calcium (ciment alumineux à plus ou moins forte teneur en alumine) et, selon les cas, de granulats alumineux. Notons que la résistance mécanique de tels bétons dans les zones qui ont été soumises à haute température est très limitée. Par contre le développement des résistances mécaniques des bétons formulés à base de ciment alumineux est très rapide, ce qui fait qu'ils s'avèrent très performants pour certaines applications de réparation nécessitant une remise en service rapide. Le rapport E/C de ces bétons doit être inférieur à 0.40 pour éviter le risque de conversion chimique de certains des hydrates formés accompagné d'une altération des propriétés mécaniques du béton durci.

LES BÉTONS DE « NICHES »

Pour certaines applications très spécifiques (« niches »), il existe enfin un certain nombre de bétons spéciaux présentant des caractéristiques particulières décrites dans les paragraphes suivants.

LES BÉTONS DRAINANTS

Les bétons drainants sont surtout utilisés en surface horizontale, généralement sous un radier, et peuvent être associés aux dispositifs de drainage ou d'étanchéité. Il s'agit de béton présentant une forte perméabilité à l'eau avec un coefficient de perméabilité voisin de 10⁻³ m/s (contre 10⁻¹² m/s pour un béton conventionnel). Ils sont formulés avec une forte proportion de gravillon par rapport à la quantité de sable de manière à générer un fort volume de vides (porosité ouverte) dans le béton durci.

« LES DOMAINES D'UTILISATIONS DU BÉTON DANS LA CONSTRUCTION SONT TRÈS VASTES ET DE NOUVELLES VOIES RESTENT TRÈS CERTAINEMENT À EXPLORER »

LES BÉTONS RÉSISTANTS À L'ABRASION

Pour certaines applications (autoroutes à fort trafic, éléments de quai, ...) il peut s'avérer nécessaire de mettre en œuvre des bétons présentant une résistance améliorée à l'abrasion. La résistance à l'abrasion d'un béton est fonction de sa résistance en compression, du volume et de la dureté du gravillon et de l'état de surface du béton. Il conviendra donc de sélectionner une roche massive présentant une forte dureté (granite, gabbro, basalte par exemple) et de minimiser le rapport E/C. Afin d'améliorer la dureté de surface, il peut être également envisagé de mettre en place en fond de coffrage une Nappe de Coffrage à Perméabilité Contrôlée.

LES BÉTONS À BAS pH

Il s'agit de bétons chimiquement inertes vis-à-vis d'un environnement argileux et donc spécialement formulés pour être utilisable dans la construction de structures pour le stockage en profondeur de déchets radioactifs.

Dans ces bétons, le pH de la solution interstitielle du béton qui est de l'ordre de pH 13 (donc très fortement basique) dans un béton classique est abaissé au voisinage de pH 10.5 à 11 grâce à la substitution d'une forte quantité de ciment Portland par des laitiers moulus, cendres volantes et/ou fumées de silice, ceci afin de consommer et fixer la majorité des alcalins et de la Portlandite. Ces bétons présentent en outre des échauffements très faibles lors de l'hydratation du liant ce qui est optimal pour des coulages en grande épaisseur.

LES BÉTONS NEUTROPHAGES

Les bétons neutrophages permettent d'assurer la protection biologique des personnes contre les rayonnements neutroniques qui sont les rayonnements les plus difficiles à arrêter.

Ils sont formulés à base de ciment alumineux, d'eau de gâchage, d'un plastifiant compatible avec le ciment alumineux et surtout de granulats de colémanite (2CaO·3B₂O₃·5H₂O), roche très friable mais contenant une importante proportion de bore qui est l'un des éléments non-radioactifs les plus efficaces pour absorber les neutrons.

CONCLUSION

La démarche consistant à sélectionner le type de béton adéquat pour une application donnée consiste à définir avec précision la fonctionnalité recherchée et les objectifs de performances à atteindre afin de pouvoir réfléchir sur la formulation permettant de remplir au mieux ces critères.

Les domaines d'utilisations du béton dans le domaine de la construction sont très vastes et de nouvelles voies restent très certainement à explorer, notamment dans le domaine des bétons à faible impact environnemental (c'est-à-dire contenant des quantités de ciment limitées au strict minimum des performances visées). □

ABSTRACT

FIELDS OF APPLICATION OF CONCRETE

LIONEL LINGER & LAURENT BOUTILLON, VINCI

This non-exhaustive overview of the fields of application of concrete covers civil engineering. *The approach adopted is to present the subject starting from a need and describing the response to be provided via the concrete mix design rather than present a sort of "catalogue of types of concrete". This chapter demonstrates, if that were still necessary, the "customised" nature of concrete which requires adapting to the resources available locally for the best response to precise requirements.* □

ÁMBITOS DE UTILIZACIÓN DEL HORMIGÓN

LIONEL LINGER & LAURENT BOUTILLON, VINCI

El campo que cubre esta presentación no exhaustiva de los ámbitos de utilización del hormigón se refiere al ámbito de la Ingeniería Civil. *El procedimiento adoptado consiste en presentar el tema a partir de una necesidad y describiendo la respuesta que debe aportarse a través de la formulación del hormigón en vez de la presentación de una especie de "catálogo de tipos de hormigón". Este capítulo demuestra, por si aún fuera necesario, el carácter "a medida" del hormigón que es necesario adaptar a los recursos disponibles localmente para responder lo mejor posible a un pliego de condiciones preciso.* □

LA FABRICATION, LA MISE EN ŒUVRE ET L'ASSURANCE QUALITÉ

AUTEURS : JEAN-MARC POTIER, CHARGÉ DE MISSION TECHNIQUE, SNBPE - FRANÇOIS CUSSIGH, EXPERT BÉTON, VINCI CONSTRUCTION FRANCE

LA NORME DE RÉFÉRENCE CONCERNANT LA FABRICATION DES BÉTONS DE STRUCTURE EST LA NORME EUROPÉENNE NF EN 206-1, COMPLÉTÉE DE SON ANNEXE NATIONALE NF EN 206-1 CN. POUR LA MISE EN ŒUVRE, LA NORME DE RÉFÉRENCE EST LA NORME NF EN 13670 ET LES COMPLÉMENTS NATIONAUX : DTU 21 POUR LES OUVRAGES DE BÂTIMENT ET FASCICULE 65 POUR LES OUVRAGES D'ART EN MARCHÉS PUBLICS. CES NORMES FONT PARTIE D'UN ENSEMBLE HOMOGENE, ET SONT COMPLÉTÉES PAR DES DOCUMENTS COMME, PAR EXEMPLE, LES RECOMMANDATIONS LCPC (IFSTTAR) POUR LA PRÉVENTION DE LA RÉACTION SULFATIQUE INTERNE.

LA FABRICATION DES BÉTONS

LA NORME DE RÉFÉRENCE : NF EN 206-1

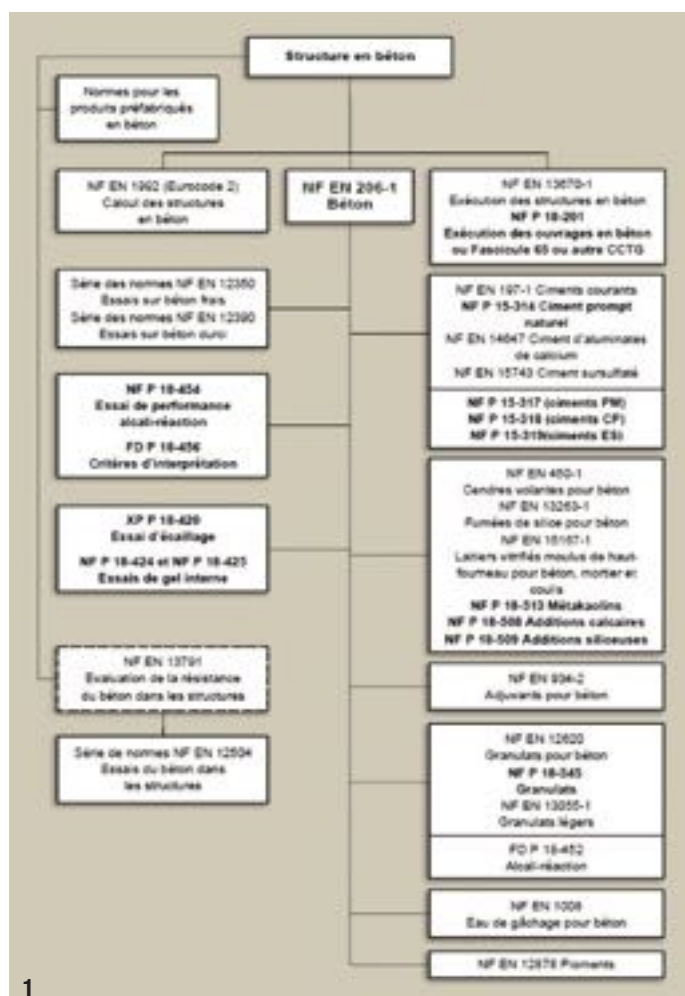
La norme de référence concernant la fabrication des bétons est la norme européenne NF EN 206-1, complétée de son annexe Nationale NF EN 206-1 CN.

La norme NF EN 206-1 s'applique aux bétons de structure qu'ils soient des bétons prêts à l'emploi ou des bétons réalisés sur chantier par l'utilisateur du béton, destinés aux bâtiments et aux ouvrages de génie civil.

Pour les bétons utilisés dans les produits structurels préfabriqués en usine et couverts par une norme, les conditions particulières d'application sont définies dans la norme NF EN 13369, et dans les normes produits concernées.

1- La NF EN 206-1 dans le corpus normatif Français (Extrait de la NF EN 206-1).

1- French standard NF EN 206-1 (excerpt from NF EN 206-1).



Pour les bétons de chaussées et de voirie d'aménagements urbains, il y a lieu en complément, de se conformer à la norme européenne EN 13877-1 complétée par la norme française NF P 98-170 « Chaussées en béton de ciment - exécution et contrôle ».

Elle s'applique également aux bétons lourds et à certains bétons légers.

Elle ne s'applique pas aux bétons qui ne sont pas structurels (béton de remplissage, béton de calage pour les bordures de trottoir, béton de propreté, etc...), ainsi qu'à des bétons spéciaux, tels que :

- Bétons aérés ;
- Bétons mous ;
- Bétons cavernaux ou semi-cavernaux ;
- Bétons réfractaires ;
- Bétons réalisés avec des granulats non minéraux ;
- Bétons de masse volumique inférieure à 800 kg/m³.

Cette norme s'inscrit dans une démarche globale (figure 1) qui comprend notamment la mise en place :

- Des normes de constituants : granulats pour béton (NF EN 12620), ciments courants (NF EN 197-1), adjuvants pour bétons (NF EN 934-2), eau de gâchage (NF EN 1008), additions...
- Des normes d'essais (séries NF EN 12350 et NF EN 12390).

→ Des normes de dimensionnement, les Eurocodes, en particulier la norme NF EN 1992 ou Eurocode béton (EC 2).
→ Les normes d'exécution bâtiment (NF EN 13670, NF P 18-201 (DTU 21), DTU d'application dallages, fondations...) ou génie civil (Fascicule 65, Livret SNCF...).

L'UNITÉ DE PRODUCTION DU BÉTON (figures 2 et 3)

→ Le stockage et l'approvisionnement des constituants

Approvisionnés par route, rail ou voie d'eau, les constituants du béton doivent faire l'objet d'un stockage compatible avec les besoins de l'unité de production.

Le stockage du ciment

le ciment livré en vrac par camion-citerne est déchargé par voie pneumatique et stocké dans des silos verticaux de forme cylindrique d'une capacité généralement supérieure à 30 tonnes.

Le stockage des granulats

Il convient d'éviter tout mélange entre des granulats de natures, d'origines ou de classes granulaires différentes. Pour éviter la pollution des granulats, le stockage se fait sur une aire aménagée. L'aire de réception des granulats doit permettre un écoulement correct des eaux. Celui-ci est souvent obtenu grâce à la réalisation d'une aire bétonnée, légèrement inclinée.

Le stockage en silos ou trémies est également utilisé. Ce mode de stockage permet de grandes réserves de matériaux et de gros débits. Les silos peuvent comporter plusieurs compartiments permettant le stockage de différents granulats. Leur capacité peut être supérieure à 150 m³.

Le stockage des adjuvants

Les adjuvants sont stockés en bidons ou en containers fermés, bien identifiés. Les précautions concernant le stockage par temps froid, ainsi que les dates limites d'emploi doivent être scrupuleusement respectées.

→ Le dosage et les automatismes de production

Le ciment est acheminé du silo à la trémie de dosage par des vis sans fin (vis d'Archimède) qui assurent un débit régulier et à l'abri de l'humidité ambiante, ou par transport pneumatique. Il est dosé de manière pondérale. En ce qui concerne les granulats, ils sont repris par skip ou dragline et acheminés jusqu'au doseur pondéral par bande ou tapis. La teneur en eau des granulats est mesurée régulièrement afin de déduire de l'eau de gâchage l'apport d'eau contenu dans les granulats.

LA CENTRALE À BÉTON



2



3

© SNBPE

L'eau est dosée par compteur volumétrique ou en pondéral.

Les opérations de dosage sont gérées depuis le poste de commande : l'opérateur sélectionne la composition programmée dans la mémoire de l'ordinateur et inscrit le volume à fabriquer ; les dosages se font alors automatiquement en fonction de ces paramètres.

L'ensemble de ces opérations est archivé afin d'assurer la traçabilité de la production du béton.

→ Le malaxage

Le malaxage des constituants dans des malaxeurs (figure 4) à poste fixe est une garantie de régularité des bétons. Les malaxeurs sont généralement à

2- La centrale à béton.

3- Unité de production de BPE.

2- The concrete mixing plant.

3- Ready-mixed concrete production unit.

axe vertical, ce qui assure un brassage efficace des constituants, ils ont généralement une capacité comprise entre 1 et 3 m³ ; la gâchée est ensuite déversée directement dans les camions de livraison.

LE TRANSPORT DU BÉTON

Le transport du béton est le plus souvent effectué par camion-malaxeur afin d'éviter la ségrégation (seuls les bétons très secs comme ceux destinés aux chaussées peuvent être transportés par camion-benne). Sur le chantier, l'acheminement vers les coffrages se fait en général à l'aide de benne à manchette (ce qui requiert une consistance très plastique ou fluide) mais pour des volumes importants la solution préférentielle est le pompage à l'aide de pompe automotrice (figure 5) ou stationnaire (avec le cas échéant un mât de bétonnage (figure 6) en bout de circuit). Dans le cas de fabrication du béton à l'aide d'une centrale de chantier, le pompage peut être réalisé depuis la centrale si la distance et le type de béton s'y prêtent. De plus, avec les bétons très fluides ou auto-plaçants, on peut injecter le béton en pied de coffrage.

LA MISE EN ŒUVRE DES BÉTONS

LA NORME DE RÉFÉRENCE : NF EN 13670

Les documents de référence concernant l'exécution des ouvrages en béton sont aujourd'hui la norme européenne NF EN 13670 et les documents nationaux qui viennent en complément : DTU 21 pour les ouvrages de bâtiment et Fascicule 65 pour les ouvrages d'art en marchés publics. La norme NF EN 13670 donne des règles générales concernant la spécification du béton, les opérations préliminaires au bétonnage, la cure et la protection ainsi que les opérations après bétonnage. Les documents nationaux permettent d'apporter les précisions nécessaires, en particulier sur des sujets où des choix sont à faire au niveau des spécifications de projet (classes d'exécution, classes de cure, ...).

LES RÈGLES DE MISE EN ŒUVRE

Concernant le serrage, les bétons de structure doivent soit être vibrés soit présenter des propriétés de béton auto-plaçant, à l'exception des bétons de fondations profondes qui sont des bétons très fluides bénéficiant d'un serrage gravitaire dans des conditions de bétonnage spécifiques.

Le béton au jeune âge doit faire l'objet d'une cure et d'une protection, afin d'éviter la fissuration par retrait plastique et d'assurer une hydratation correcte du béton d'enrobage.

Les bétons modernes (BHP, BAP, BFUP) qui présentent de faibles rapports eau sur fines sont particulièrement sensibles aux défauts de cure. La durée de cure est fonction de l'évolution de la maturité du béton : lorsque l'hydratation n'est pas suffisamment avancée, la porosité capillaire reste connectée et la vitesse d'évaporation de l'eau est élevée (alors qu'ensuite la multiplication des produits d'hydratation segmente la porosité capillaire et réduit grandement les échanges hydriques avec le milieu extérieur).

C'est pourquoi les paramètres principaux considérés sont la vitesse de durcissement du béton (rapport R2/R28)



4
© SNBPE

4- Intérieur d'un malaxeur à béton.

4- Inside of a concrete mixer.

TABLEAU 1 : DURÉE MINIMALE DE CURE POUR LA CLASSE DE CURE 2 (CORRESPONDANT À UNE RÉSISTANCE À LA SURFACE DU BÉTON ÉGALE À 35 % DE LA RÉSISTANCE CARACTÉRISTIQUE SPÉCIFIÉE)

Température de la surface du béton (t) en °C	Durée minimale de cure, jours ^(a)		
	Évolution de la résistance du béton ^(c, d) (f _{cm2} /f _{cm28}) = r		
	rapide r ≥ 0,50	moyenne 0,50 > r ≥ 0,30	lente 0,30 > r ≥ 0,15
t ≥ 25	1,0	1,5	2,5
25 > t ≥ 15	1,0	2,5	5
15 > t ≥ 10	1,5	4	8
10 > t ≥ 5 ^(b)	2,0	5	11

(a) Ajouter toute durée de prise excédant 5 h.
 (b) Pour les températures inférieures à 5°C, il convient d'augmenter la valeur indiquée dans le tableau par la durée pendant laquelle la température est restée inférieure à 5°C.
 (c) L'évolution de la résistance du béton est le rapport de la résistance moyenne à 2 jours à la résistance moyenne après 28 jours, déterminé par des essais préalables ou basé sur l'expérience d'un béton de composition comparable (voir EN 206 1 paragraphe 7.2).
 (d) Pour une évolution très lente (r < 0,15) de la résistance du béton, il convient de formuler des exigences particulières dans les spécifications d'exécution.

TABLEAU 2 : DÉFINITION DE LA CATÉGORIE DE BAP

Intervalle d'écoulement	Longueur maximale de cheminement	Application horizontale				Application verticale	
		Épaisseur ≤ 300 mm		Épaisseur > 300 mm		Inférieur à 5 m	Entre 5 et 10 m
		Inférieur à 5 m	Entre 5 et 10 m	Inférieur à 5 m	Entre 5 et 10 m		
	l ≥ 100	Cat. 1		Cat. 2a	Cat. 2b	Cat. 2a	Cat. 2b
	80 ≤ l < 100	Cat. 2a	Cat. 2b	Cat. 2a	Cat. 2b	Cat. 2a	Cat. 2b
	l < 80	Cat. 3a	Cat. 3b	Cat. 3a	Cat. 3b	Cat. 3a	Cat. 3b

TABLEAU 3 : SPÉCIFICATIONS EN FONCTION DE LA CATÉGORIE

Lithologie	Cat. 1	Cat. 2a	Cat. 2b	Cat. 3a	Cat. 3b
Valeur maximale au tamis	20 %	20 %	15 %	15 %	10 %
Valeur minimale à la boîte en L	Pas de prescription particulière	0,80 avec 2 barres	0,80 avec 2 barres	0,80 avec 3 barres	0,80 avec 3 barres

et la température du béton de peau (tableau 1). La cure naturelle n'est suffisante que lorsque les conditions pendant toute la période requise pour la cure sont telles que le taux d'évaporation de la surface du béton est faible, par exemple dans le cas de brouillard, de pluie ou de forte d'humidité atmosphérique.

LES PARTICULARITÉS DES BAP

La norme EN 13670 ayant été mise au point avant que les BAP ne fassent l'objet de spécifications particulières dans la norme EN 206, celle-ci contient peut de précisions concernant les règles de mise en œuvre des BAP. Il est conseillé de se reporter aux « Recommandations pour l'emploi des BAP » publiées par l'AFGC en 2008 (tableaux 2 et 3).

Pendant la mise en œuvre du béton dans le coffrage, il faut respecter les hauteurs de chute et longueurs de cheminement retenues pour le choix de la catégorie de BAP.

De façon générale, on considère que la hauteur de chute doit être au maximum de 5 mètres (hors considération d'aspect de parement ; les risques de

bullage étant amplifiés par la hauteur de chute) et que la longueur de cheminement doit être limitée à 5 m ou 10 m suivant le degré de résistance à la ségrégation du BAP.

Dans le cas de BAP de faible viscosité (t₅₀₀ < 2 secondes), le délai maximal de recouvrement entre couches est de l'ordre de 90 minutes. Pour des BAP plus visqueux et en particulier pour des mises en œuvre en couches de faible épaisseur (inférieure à 10 cm), ce paramètre doit être justifié par une étude spécifique (incluant éventuellement des dispositions particulières de bétonnage). Pour les applications verticales, plusieurs méthodes de mise en œuvre des BAP peuvent être retenues suivant qu'on bétonne par le haut (benne à manchette en haut de coffrage, benne avec tube plongeur, pompe avec tube plongeur) ou par le bas (pompe avec pipe d'injection (figure 7)). Un des gros avantages offerts par le BAP pour des ouvrages de génie civil à forte densité d'armatures réside dans la possibilité de réduire le diamètre des conduits d'alimentation à 80 mm ou 100 mm en écoulement gravitaire (manchette souple, tube plongeur) voire 50 mm en pompage. On bénéficie ainsi, outre la capacité du béton à bien enrober les armatures et les inserts, d'une facilité à éviter la ségrégation lors de la mise en œuvre.

LES PRÉCAUTIONS PARTICULIÈRES

→ Par temps chaud

La problématique première concerne le maintien de la rhéologie du béton (risques de raidissement précoce) et le risque de dessiccation des surfaces libres. Il faut aussi vérifier, sur des éléments de dimension critique par rapport à l'évacuation des calories générées par les réactions d'hydratation du béton, que les élévations de température au sein du béton ne risquent pas de générer des fissurations (par retrait thermique gêné) ou la formation délétère d'ettringite différée. Pour ce dernier point, ce sont les « Recommandations pour la prévention des désordres dus à la réaction sulfatique interne » (figure 9) publiées par le LCPC en 2007 qui font référence en France.

→ Par temps froid

Il faut faire en sorte d'éviter le gel du béton pendant la prise, susceptible d'engendrer un endommagement irréversible du matériau. La norme NF EN 206-1 impose que la température du béton frais à la livraison soit d'au moins 5°C.



© VINCI CONSTRUCTION FRANCE

5

La norme NF EN 13670 exige pour sa part que la température de surface du béton ne descende pas en-dessous de 0°C tant que la résistance à la compression de la surface du béton n'a pas atteint une valeur minimale de 5 MPa. Il n'existe pas d'adjuvant « anti-gel », par contre le choix de l'adjuvantation et du type de liant employés peut favoriser la vitesse de prise et durcissement du béton et permettre une mise hors gel par effet d'auto-étuvage, en fonction des conditions d'isolation de l'élément en béton et de la température du béton à la mise en œuvre.

L'ASSURANCE QUALITÉ LA CONFORMITÉ À LA NORME PRODUIT

La norme NF EN 206-1 décrit très précisément la nature et la fréquence des contrôles (tableau 4), et les critères de conformité, selon que la production fasse l'objet ou non d'une certification. Les essais de conformité peuvent être effectués soit sur chaque composition de béton prise individuellement, soit sur des familles de bétons dont la représentativité est établie par le producteur.

L'ORGANISATION QUALITÉ DE LA PRODUCTION

Le plan qualité du producteur doit inclure les mesures nécessaires pour maintenir le béton conforme aux exigences spécifiées, entre autres :

- La sélection des matériaux ;
- La formulation du béton ;
- La production du béton ;
- Les inspections et les essais ;
- L'utilisation des résultats des essais sur les constituants, sur le béton frais et durci, et sur l'équipement.

Il doit être passé en revue régulièrement.

5- Bétonnage avec pompe automotrice.
6- Mât de bétonnage.

5- Concreting with self-propelled pump.
6- Concreting mast.



6

© ALDA SILVA / GRAPHIX IMAGES

Des contraintes supplémentaires sont définies dans le Fascicule 65 et s'appliquent dans le cas des ouvrages d'art en marchés publics. Il s'agit en particulier des corrections de dosage en eau autorisées en production pour prendre en compte l'incertitude d'humidité des granulats (qui sont limitées à plus ou moins 10 litres par mètre cube), des tolérances de dosage des constituants

et du temps de malaxage (qui doit conduire à une stabilisation des valeurs wammétriques). Le fascicule 65 reprend les prescriptions du règlement particulier de la marque NF-BPE (applicables quel que soit le lieu de fabrication : centrale de béton prêt à l'emploi, centrale de chantier ou centrale de préfabrication) et renforce donc certaines d'entre elles

pour s'adapter au types d'ouvrage concernés.

LES APPORTS DE LA MARQUE DE QUALITÉ (NF BPE)

La certification de conformité aux normes, matérialisée par la marque NF, délivrée par AFNOR Certification apporte la garantie aux utilisateurs et prescripteurs que :

TABLEAU 4 : FRÉQUENCE MINIMALE D'ÉCHANTILLONNAGE POUR L'ÉVALUATION DE LA CONFORMITÉ. EXTRAIT DE LA NORME NF EN 206-1

Production	Fréquence minimale d'échantillonnage		
	50 premiers m ³ de la production	Au delà des 50 premiers m ³ de production ^(a)	
		Béton avec certification du contrôle de la production	Béton sans certification du contrôle de la production
Initiale (jusqu'à ce que 35 résultats d'essai au moins aient été obtenus)	3 échantillons	1 échantillon tous les 200 m ³ ou 2 échantillons par semaine de production	1 échantillon tous les 150 m ³ ou 1 échantillon par jour de production
Continue ^(b) (une fois que 35 résultats au moins ont été obtenus)		1 échantillon tous les 400 m ³ ou 1 échantillon par semaine de production	

(a) L'échantillonnage doit être réparti sur l'ensemble de la production et ne doit normalement pas comporter plus d'un échantillon pour 25 m³.
(b) Lorsque l'écart-type calculé pour les 15 derniers résultats d'essai est supérieur à 1,37 σ, la fréquence d'échantillonnage doit être portée à la fréquence requise pour la production initiale pour les 35 résultats d'essai suivants.



7



8

→ Le producteur a mis en place un système qualité et vérifie par des essais sur constituants et sur bétons le respect des caractéristiques normalisées ;

→ L'application des procédures est effective, le producteur dispose d'une exploitation de ses contrôles internes et engage des actions correctives ;

→ Les produits livrés sont conformes à la norme, des audits et des essais tierce-partie sont réalisés chaque année.

Aujourd'hui, plus de 1 300 unités de production sur 1 800 sont titulaires de la marque NF BPE.

LES ESSAIS SUR BÉTON

Les essais sur béton applicables sont aujourd'hui pour la plupart l'objet de normes européennes, de la série EN 12350 pour les propriétés à l'état frais et EN 12390 pour les propriétés à l'état durci. On peut noter que la série des normes EN 12350 a été

récemment enrichie des parties 8 à 12 concernant la caractérisation des BAP à l'état frais. Les parties 8 (étalement au cône d'Abrams) (figure 8), 10 (essai à la boîte en L) et 11 (stabilité au tamis) correspondent aux essais recommandés par l'AFGC. L'essai d'écoulement à l'entonnoir en V décrit dans la norme EN 12350-9 peut permettre d'apprécier la viscosité du béton avec plus de précision que la mesure du t_{500} lors de l'essai d'étalement. L'essai d'écoulement à l'anneau (EN 12350-12) est un essai alternatif à l'essai à la boîte en L, la mesure du palier de blocage est toutefois très délicate.

Pour ce qui concerne les essais de durabilité dans le cadre de l'approche performantielle, il existe aujourd'hui peu d'outils disponibles au niveau européen et l'on se réfère aux normes développées en France (porosité à l'eau, perméabilité au gaz, migration des ions chlorure et carbonatation accélérée). □

7- Injection de BAP en pied de voile.

8- Essai d'étalement au cône d'Abrams.

9- Guide LCPC.

7- Injection of self-placing concrete at the shear wall base.

8- Slump cone spread test.

9- LCPC guide.



9

ABSTRACT

PRODUCTION, PLACING AND QUALITY ASSURANCE

JEAN-MARC POTIER, SNBPE - FRANÇOIS CUSSIGH, VINCI

The reference standard concerning concrete production is European standard NF EN 206-1, supplemented by its National Annex NF EN 206-1 CN. It applies to structural concretes, whether they be ready-mixed concrete or concrete produced on site by the concrete user. For placing, the reference standard is standard NF EN 13670 and the supplementary national documents are DTU 21 for building structures and Fascicle 65 for engineering structures for public contracts. These standards form part of a uniform series of standards, such as test and inspection standards, supplemented by a series of documents such as the LCPC recommendations (IFSTTAR), for example, for the prevention of damage due to internal sulphate reaction. □

LA FABRICACIÓN, LA UTILIZACIÓN Y EL ASEGURAMIENTO DE LA CALIDAD

JEAN-MARC POTIER, SNBPE - FRANÇOIS CUSSIGH, VINCI

La norma de referencia relativa a la fabricación de los hormigones es la norma europea NF EN 206-1, completada por su anexo NF EN 206-1 CN. Se aplica a los hormigones estructurales ya sean hormigones listos para el empleo u hormigones realizados en obra por el usuario del hormigón. En lo relativo a la utilización, la norma de referencia es la norma NF EN 13670 y los documentos nacionales que la complementan: DTU 21 para las obras de construcción y Fascículo 65 para las estructuras en contratación pública. Estas normas forman parte de un conjunto homogéneo de normas, normas de ensayos y de control, por ejemplo, completado por un conjunto de documentos, como las recomendaciones LCP (Laboratorio Central de Puentes y Calzadas) del IFSTTAR (Instituto francés de ciencias y tecnologías del transporte, ordenación y redes) para la prevención de las alteraciones debidas a la reacción sulfática interna, por ejemplo. □



1- Viaduc de Millau, ouvrage pour lequel une durée de vie de 120 ans était exigée à la construction.

1- The Millau viaduct, a structure for which a service life of 120 years was demanded at construction.

PHOTOTHÈQUE EIFFAGE

LA DURABILITÉ ET LE CYCLE DE VIE DES BÉTONS

AUTEURS : BERNARD QUÉNÉE, DIRECTEUR GÉNÉRAL DÉLÉGUÉ, LERM - ABDELKRIM AMMOUCHE, DIRECTEUR DÉPARTEMENT MATÉRIAUX, LERM - CHRISTOPHE CARDE, DIRECTEUR DÉPARTEMENT OUVRAGES, LERM - NOUREDDINE RAFAÏ, EXPERT DURABILITÉ DES BÉTONS, LERM - ISABELLE MOULIN, DIRECTRICE COMITÉ SCIENTIFIQUE, LERM

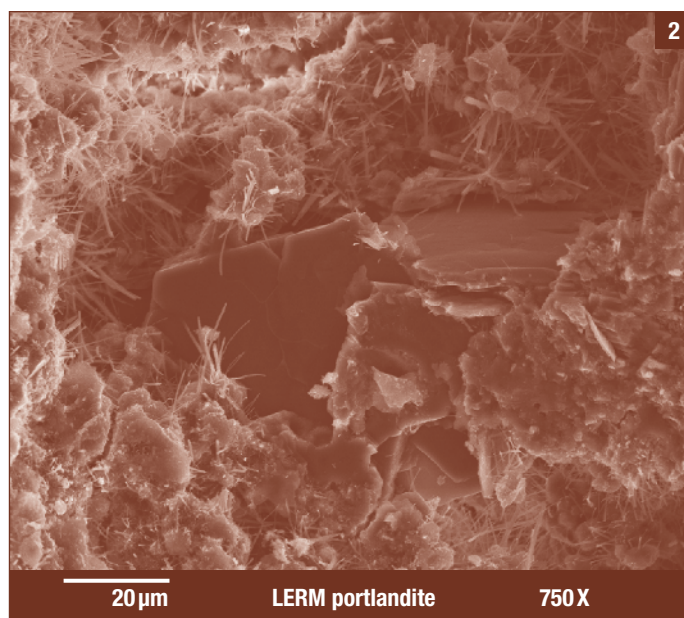
LA DÉMARCHÉ DE DURABILITÉ DES BÉTONS COMPLÈTE LES RÈGLES DE DIMENSIONNEMENT ET DE FABRICATION. LES PERFORMANCES SONT LIÉES AU CIMENT, AUX ADDITIONS MINÉRALES ET AUX PARAMÈTRES DE FORMULATION. LES STRUCTURES EN BÉTON EXPOSÉES À DES ENVIRONNEMENTS AGRESSIFS RÉSISTERONT D'AUTANT MIEUX QU'ELLES S'OPPOSERONT À LA PÉNÉTRATION DES AGENTS CHIMIQUES. LES CONCEPTEURS PEUVENT LIMITER LES RISQUES D'ALTÉRATION, DES MODÈLES PRÉDICTIFS PERMETTENT DE PRÉVOIR LA DURÉE DE VIE À PARTIR D'INDICATEURS DE DURABILITÉ. LE RECYCLAGE DU BÉTON EST EN VOIE DE GÉNÉRALISATION POUR LES ANNÉES À VENIR.

INTRODUCTION

À l'heure où les audaces des constructeurs surpassent des records, dans une vertigineuse démesure architecturale, notre époque est paradoxalement marquée par la fin d'un cycle, celui des ouvrages tristement arrivés au terme de leur vie et appelés à être démolis, ou démantelés lorsqu'il s'agit de centrales nucléaires... comme si finalement le béton, aussi dur et résistant soit-il, était programmé pour ne durer qu'un temps donné.

Un retour dans l'imaginaire collectif montre toujours qu'il est bel et bien associé à un matériau dur « ...en béton », tandis que sa capacité à durer et traverser les époques est sans nul doute moins reconnue. Une raison objective à ce constat tient au manque de recul dont nous disposons (les premiers ouvrages n'ayant guère plus de 150 ans), ne permettant pas de tirer des conclusions très réalistes au-delà. Pour comparaison, son concurrent naturel qu'est la pierre de construction, dont le savoir faire transmis précieusement de générations en générations, depuis les architectes de l'antiquité jusqu'aux compagnons modernes, a laissé son empreinte dans l'humanité pour l'éternité « ...durable comme le granite ».

Certes, l'image du béton a été vite ternie par des défauts de jeunesse marquant nos mémoires, telles les stigmates apparus sur des constructions peu flatteuses...



2- Vue au microscope électronique à balayage (MEB) d'une pâte de ciment hydratée (C-S-H et cristaux de portlandite visibles).

2- Scanning electron microscope (SEM) view of a hydrated cement paste (C-S-H and visible portlandite crystals).

Qu'en est-il réellement ? La durabilité des bétons (ou l'étude de leur capacité à durer dans le temps), est une démarche récente, apparue dans les années 1980, très longtemps après l'apparition des règles de calcul et de fabrication, les concepteurs ayant surtout saisi l'immense avantage apporté par son coût avantageux, sa capacité à accepter de grandes portées, comme à sa simplicité d'emploi à toute épreuve... Une frontière a ainsi progressivement disparue, celle qui séparait les ingénieurs concepteurs d'un côté des producteurs industriels de l'autre, comblée

par l'apport d'autres disciplines : les uns, minéralogistes, s'appropriant ce matériau qualifié aussi de pierre artificielle, au point de retrouver de fortes analogies de comportement avec des matériaux naturels utilisés dans la construction... laissant présager une durée de vie proche des roches silicatées naturelles, avec les mêmes facteurs environnementaux aggravants ; les autres, en appliquant les théories physiques des empilements granulaires, tout comme l'utilisation audacieuse d'adjuvants à base de chaînes polymères carbonées, ont quant à eux idéalisé ce produit rustique et grossier en une pâte souple et onctueuse, conforme à souhait et dont la durée de vie peut être programmée...

BASES DE LA PÉRENNITÉ DES BÉTONS

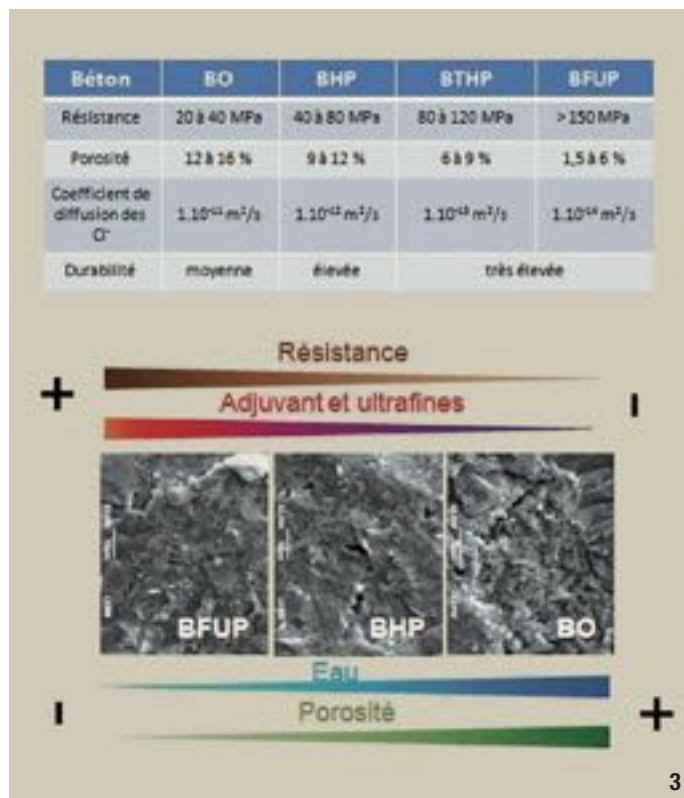
→ **Fondements de la résistance mécanique**

Le développement des performances mécaniques du béton est lié à l'hydratation du ciment. Cette réaction est un phénomène très complexe qui implique une dissolution des composés de base du clinker Portland (C3S, C3A, C2S et C4AF) au contact de l'eau, suivie d'une précipitation et d'une cristallisation de nouveaux composés, insolubles dans l'eau et qui avec le temps forment une masse rigide. Parmi les hydrates formés, les silicates de calcium hydratés (C-S-H) sont des particules extrêmement petites, ▷

assemblées les unes aux autres, qui en raison de leur dimension (cristaux nanométriques) peuvent être décrits comme étant un « gel ». Ils représentent environ 75 % des composés de base du ciment et dominent donc le comportement de la pâte de ciment, notamment sa prise, et lui procurent sa résistance mécanique. La source de cette résistance peut être expliquée par des liens physiques (force de van der Waals) liés au rapprochement entre les particules qui ne sont séparées que par des pores de gel nanométriques, ainsi que par des liens chimiques. Des phases minoritaires cristallisées, telles que les aluminates, sulfoaluminates et portlandite ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), ont aussi un rôle important dans la résistance initiale du matériau (figure 2).

La résistance mécanique du béton, matériau hétérogène multiphasique, résulte de la résistance intrinsèque de la pâte de ciment, qui dépend des paramètres de formulation (rapport Eau/Ciment, présence d'additions minérales influant sur la compacité, ...) mais aussi de la qualité de la liaison avec les granulats. La zone de contact entre la matrice et les granulats, appelée zone de transition, présente dans le cas des bétons classiques des caractéristiques microstructurales et minéralogiques particulières (porosité accrue, cristaux de portlandite développés et orientés, ...). L'utilisation des additions minérales (cendres volantes, laitier, fumée de silice, ...) modifie avantageusement la microstructure du matériau y compris au niveau de la zone de transition, améliorant les performances mécaniques finales. La résistance mécanique intrinsèque des granulats revêt une importance accrue dans le cas des bétons de forte résistance mécanique (BHP, BTHP) (figure 3).

Comme la plupart des matériaux à matrice fragile, la résistance à la traction des bétons classiques est faible comparativement à leur résistance à la compression (de 10 fois environ). Son module d'élasticité dépend de celui de la pâte de ciment et des granulats. Les bétons acquièrent leurs performances mécaniques de façon évolutive en fonction du degré d'hydratation du ciment. Le taux d'accroissement de la résistance dépend de la composition minéralogique du ciment et du rapport E/C. L'augmentation de la résistance exprimée en pourcentage de la résistance finale des bétons à faible E/C est plus rapide que celle des bétons à E/C plus élevé, du fait du rapprochement des grains de ciment et de l'établisse-



© PHOTOTHÈQUE LERM

ment d'un réseau de gel continu de façon plus rapide avec un faible E/C. Enfin, il est à mentionner l'importance de la température sur la cinétique d'hydratation du ciment et donc sur l'évolution des températures (notion de maturité).

→ Les facteurs clés de la durabilité

La durabilité des structures en béton, exposées à des environnements agressifs de différentes natures, est liée à l'aptitude du matériau, d'une part à s'opposer à la pénétration des agents chimiques agressifs véhiculés par l'eau (barrière physique) et d'autre part à la limitation des effets délétères des espèces agressives ayant pénétré dans le matériau, grâce à une composition chimique et minéralogique adéquate (barrière chimique). Les connaissances acquises sur les mécanismes de vieillissement des bétons ont permis d'élargir considérablement les possibilités de formulation et d'optimisation de ces barrières et de les adapter à l'exposition de l'ouvrage.

D'un point de vue physique, la limitation des propriétés de transfert des bétons (perméabilité aux liquides, aux gaz et diffusivité ionique) est l'un des facteurs clés pour atteindre la durée de vie visée pour une structure en béton. Un avantage majeur du matériau béton est lié au fait que la perméabilité intrinsèque des principaux hydrates (C-S-H)

3- Aspect au MEB de la matrice de bétons de différentes classes (BO : béton ordinaire, BHP : béton à hautes performances, BTHP : béton à ultra-hautes performances), montrant le gain de compacité des matrices cimentaires, constituées essentiellement de C-S-H, portlandite et ettringite fibreuse, et tableau résumant la relation entre résistance, porosité et durabilité.

3- Appearance under SEM of the matrix of concretes of various classes (OC: ordinary concrete, HPC: high-performance concrete, VHPC: very-high-performance concrete), showing the gain in compactness of the cement matrices, consisting mainly of C-S-H, portlandite and fibrous ettringite, and table summarising the relationship between resistance, porosity and durability.

qui constituent la pâte de ciment est très faible, en raison de sa texture fine, comparée par exemple à celle de nombreuses roches. À l'échelle de la microstructure du béton, la réduction de la porosité capillaire et l'accroissement de la sinuosité du réseau poreux constitue un critère important de la durabilité. La capacité du béton à protéger les aciers vis-à-vis de la corrosion, est l'un des atouts majeurs du matériau, permettant de pérenniser les performances mécaniques du béton armé. Cela constitue encore aujourd'hui un enjeu majeur de la durabilité des structures. Intrinsèquement, le béton offre « naturellement » une protection initiale aux aciers d'armatures grâce au pH élevé (≈ 13) de sa solution interstitielle. Les propriétés des hydrates de sa matrice cimentaire permettent ensuite une résistance aux agressions extérieures, comme illustré par les deux exemples suivants :

En milieu marin, la pâte de ciment hydraté possède la capacité de fixer les chlorures ayant pénétré dans le matériau, retardant ainsi leur progression vers les armatures. Cette fixation est à la fois physique, par adsorption sur la surface des C-S-H, et chimique, par réaction avec les aluminates et formation de chloroaluminates (figure 4). Dans le cas de structures exposées à l'air ambiant et aux intempéries : la pénétration du CO_2 atmosphérique au travers de la porosité du béton induit une carbonatation de la matrice cimentaire, réduisant à terme le pH de la solution interstitielle au voisinage des armatures. La portlandite joue un rôle tampon, réagissant en présence d'humidité avec le CO_2 pour former de la calcite. Les silicates de calcium hydratés se carbonatent également fixant le CO_2 . Cette carbonatation s'accompagne d'un affinement de la porosité, de sorte que la frange superficielle carbonatée contribue à ralentir le phénomène (figure 5).

Il est souligné que, si certains facteurs régissant la durabilité du matériau, comme ceux évoqués dans ce paragraphe lui sont inhérents, d'autres sont extrinsèques notamment la mise en œuvre et la cure aux jeunes âges.

En effet, une cure adaptée aux conditions climatiques du chantier est très importante afin d'assurer une hydratation suffisante du ciment à même de limiter la porosité du béton de peau.

Elle permet également d'éviter une fissuration résultant d'une dessiccation précoce et pouvant s'avérer préjudiciable par la suite.

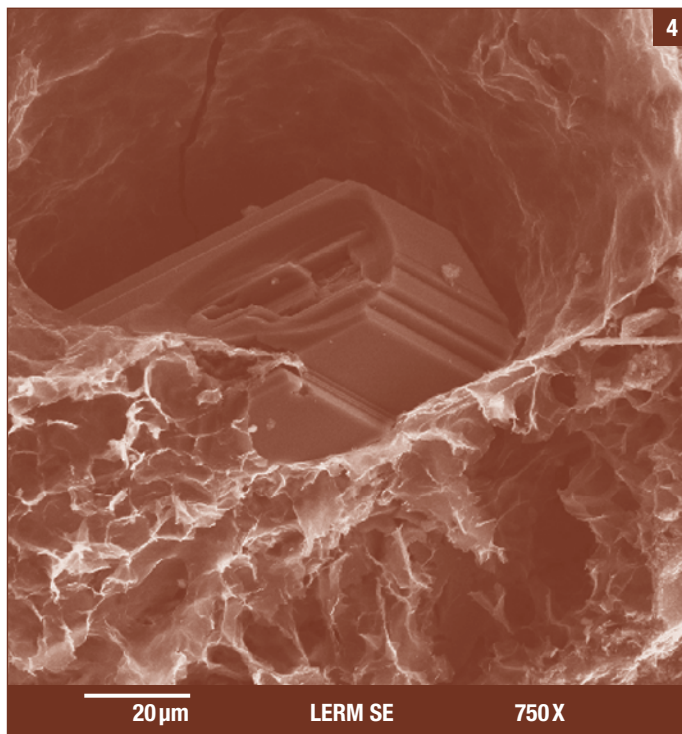
APPROCHE PRESCRIPTIVE

La norme NF EN 206-1 fixe des valeurs limites en termes de paramètres de formulation des bétons (teneurs minimale en liant équivalent L_{éq.}, rapport Eau efficace /L_{éq.} maximal, ...) en fonction des différentes classes d'exposition qu'elle définit (XC : corrosion induite par carbonatation, XD : corrosion induite par les chlorures d'origine autre que marine, XS : corrosion induite par les chlorures d'origine marine et XF : attaque gel-dégel avec ou sans agents de déverglaçage, XA : attaques chimiques). Cette norme est reliée à un ensemble de normes d'essais sur les bétons et de contrôle de conformité de leurs constituants. Par ailleurs, l'Eurocode 2 EN 1992.1.1, définit les épaisseurs d'enrobage minimales requises vis-à-vis de la durabilité, en fonction des classes d'exposition et des classes structurales. Cet ensemble constitue l'approche prescriptive (obligation de moyens) permettant d'atteindre l'objectif de durabilité des structures courantes, avec une durée de vie du projet minimale de 50 ans pour les bâtiments et de 100 ans ou plus pour les ouvrages d'art.

APPROCHE PERFORMANTIELLE

L'approche performantielle fournit un ensemble d'outils permettant de sélectionner ou de qualifier une formule de béton destiné à un environnement connu et pour une durée de vie minimale prédéfinie.

Basée notamment sur la mesure d'indicateurs et de durabilité avec des méthodes d'essais très encadrées (modes opératoires normalisés ou recommandés), cette approche, complétant l'approche prescriptive de la norme NF EN 206-1, permet de mieux



appréhender le cas des structures dont la durée de vie exigée est plus longue, telles que bâtiments et ouvrages de génie civil (50 à 100 ans), grands ouvrages (100 à 120 ans) ou ouvrages exceptionnels (> 120 ans).

MAÎTRISE DU VIEILLISSEMENT ET PRÉVENTION DES PATHOLOGIES

→ Corrosion des armatures (XC, XD, XS)

La maîtrise du risque de corrosion des armatures sous l'effet de la carbonatation ou de la pénétration des chlorures peut être obtenue en respectant deux conditions essentielles :

1- garantir un béton d'enrobage compact par une formulation adaptée à

4- Cristaux de chloro-aluminates de calcium hydraté, fixant minéralogiquement les ions chlore ayant pénétré à l'intérieur de la matrice (chlorures liés).

5- Mise en évidence de la frange carbonatée d'un béton par coloration à la phénolphthaleine alcoolique (en rose : pH > 13, incolore : frange carbonatée au pH < 10).

4- Chloro-aluminate crystals of hydrated calcium, mineralogically fixing the chlorine ions that have penetrated inside the matrix (bound chlorides).

5- Highlighting the carbonated fringe of a concrete by colouring with alcoholic phenolphthalein (in pink : pH > 13, colourless : carbonated fringe of pH < 10).

la classe d'exposition et une mise en œuvre maîtrisée ;

2- respecter les épaisseurs d'enrobage requises, comme évoqué plus haut. Notons que l'approche performantielle permet aujourd'hui au concepteur de mieux maîtriser ce risque par le respect de critères sur des indicateurs majeurs de durabilité : porosité accessible à l'eau, perméabilité au gaz, coefficient de diffusion des chlorures.

→ Résistance aux cycles de gel-dégel (XF)

Les bétons de formulations adaptées peuvent résister à des climats froids rigoureux. De façon générale, cela passe encore une fois par la limitation de la porosité du béton et donc de sa capacité d'absorption d'eau, en limitant le rapport E/C et en choisissant des granulats à porosité réduite. L'adjonction d'un réseau de microbulles suffisamment rapprochées (facteur d'espacement des bulles d'air Lbarre) par l'emploi d'un entraîneur d'air permet de prémunir le béton vis-à-vis du gel. Le guide technique LCPC donne la démarche préventive selon la sévérité du climat, en faisant notamment référence aux essais performantiels normalisés.

→ Résistance aux milieux chimiquement agressifs (XA)

Le béton résiste bien aux agressions chimiques quand il est compact, correctement dosé en ciment, en adéquation avec son usage et son environnement. Les hydrates de la pâte de ciment, en équilibre avec la phase interstitielle présente dans les pores, sont susceptibles de s'altérer et de se transformer au contact d'agents agressifs, tels l'eau pure, les acides, les sels... Le choix de ciments et liants produisant peu de portlandite associé à une porosité réduite du béton permet de mieux résister au mécanisme de lixiviation. Le fascicule FD P18-011 définit une classification des environnements agressifs et oriente le choix du ciment en fonction du milieu (solutions ou sols riches en sulfates, milieux acides et eaux pures).

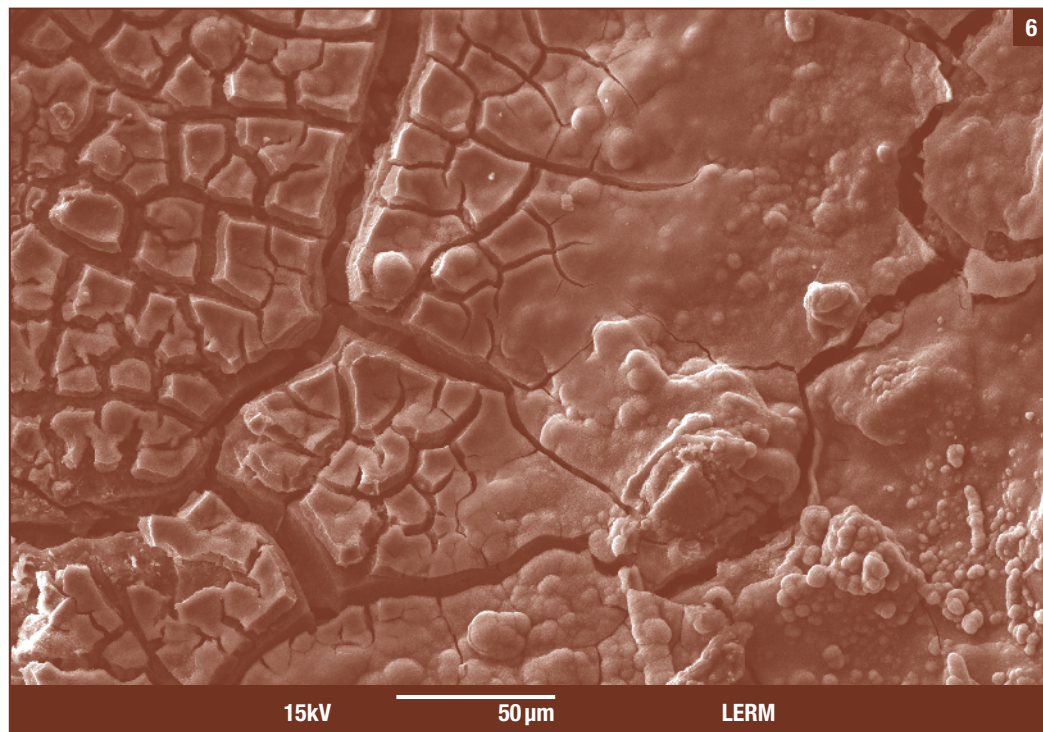
→ Réactions endogènes

L'**alcali-réaction** est un terme qui regroupe un ensemble de réactions chimiques entre les alcalins contenus dans la solution interstitielle du béton et des phases minérales des granulats, engendrant la production de gels gonflants, de composition silico-calco-alcaline (figure 6). Cette réaction peut engendrer d'importants désordres (fissuration, gonflements, voire une perte de la capacité portante des éléments). ▷



Elle se produit lorsque trois conditions sont réunies : présence dans les granulats du béton d'espèces minérales sensibles en milieu alcalin, comme certaines formes de silice ou de silicate, une teneur élevée en alcalins actifs dans le béton et une exposition à un taux d'humidité élevé, supérieur à 80-85%. En France, les recommandations LCPC de 1994, définissent les moyens à mettre en œuvre pour la prévention des désordres liés à cette réaction. Ces recommandations sont basées sur la notion de niveaux de prévention (A, B et C) selon la catégorie d'ouvrage liée à son importance et son exposition à l'environnement climatique. Sur le plan normatif, ces recommandations sont actuellement complétées par : le fascicule FD P 18-542 concernant les critères de qualification des granulats (NR : non réactifs, PR : potentiellement réactifs ou PRP : potentiellement réactifs à effet pessimum), la norme XP P18-594 relative aux méthodes d'essai de réactivité aux alcalis des granulats naturels et les normes NF P 18-454 ainsi que le fascicule FD P18-456 relatif à la réalisation de l'essai performantiel, dont la durée est de 3 à 5 mois, et aux critères de son interprétation.

La **réaction sulfatique interne** (RSI) est une réaction endogène (sans apport externe de sulfates) qui se traduit par la formation dans le béton durci et sous des conditions particulières, à plus ou moins à long terme (quelques mois à quelques années), d'une ettringite dite différée (DEF), à caractère expansif (figure 7). Cette réaction peut engendrer des désordres dont les symptômes sont similaires à ceux de l'alcali-réaction (gonflement et fissuration). Les principaux paramètres de cette réaction sont : l'élévation de la température du béton aux jeunes âges au-delà de 65°C à 70°C environ et la durée du maintien de cette température, le contact avec l'eau ou l'exposition à une humidité élevée et la composition chimique et minéralogique du ciment (teneurs en sulfates et en aluminat tri-calcique et teneur en alcalins du béton). Peuvent être concernés par cette réaction des éléments préfabriqués ou des éléments coulés en place de grandes dimensions (dits éléments massifs ou plutôt critiques vis-à-vis de l'échauffement). Cette pathologie peut être évitée en respectant la démarche préventive donnée dans le guide LCPC d'août 2007. Selon le même principe que pour l'alcali-réaction, cette démarche est basée d'abord sur la détermination du niveau de pré-



© PHOTO THÉQUE LERM

vention à atteindre (As, Bs, Cs ou Ds) en fonction de l'importance de l'ouvrage ou d'une partie de l'ouvrage et de son exposition à l'humidité. Il s'agit ensuite de prendre des dispositions permettant de limiter l'échauffement du béton aux jeunes âges, en agissant sur tout ou partie des leviers suivants : formulation du béton (choix d'un ciment ou d'un liant à faible chaleur d'hydratation et optimisation de sa teneur), conditions de fabrication (limiter température du béton frais) et de mise en œuvre (fractionner le bétonnage, éviter le bétonnage par temps chaud...). Par ailleurs, le respect de certaines dispositions au niveau de la formulation (ciment ES, teneur en sulfates du ciment, en aluminat tri-calcique du clinker et en alcalins du béton, incorporation d'additions minérales, ...) permet de relever la température maximale pour un niveau de prévention donné. Celles-ci sont détaillées dans les recommandations récemment mises à jour. Il est à noter que pour les éléments préfabriqués en béton soumis à une accélération du durcissement par traitement thermique, la norme NF EN 13369 donne la température maximale admissible en fonction de l'exposition de l'élément en service. Enfin, l'essai performantiel LPC n°66 permet de valider l'utilisation d'une formule de béton associée à un cycle d'échauffement représentatif du cycle réel, sur un critère d'amplitude de gonflement maximum d'éprouvettes de laboratoire ainsi que de son évolution.

6- Empreinte de granulats, tapissée par un gel d'alcali-réaction, de composition silico-calco-alcaline (MEB).

6- Imprint of aggregate, coated with an alkali-aggregate reaction gel, of silico-calco-alkaline composition (SEM).

Cependant, la durée de l'essai est de 12 ou 15 mois et doit donc être programmé suffisamment en amont d'un projet.

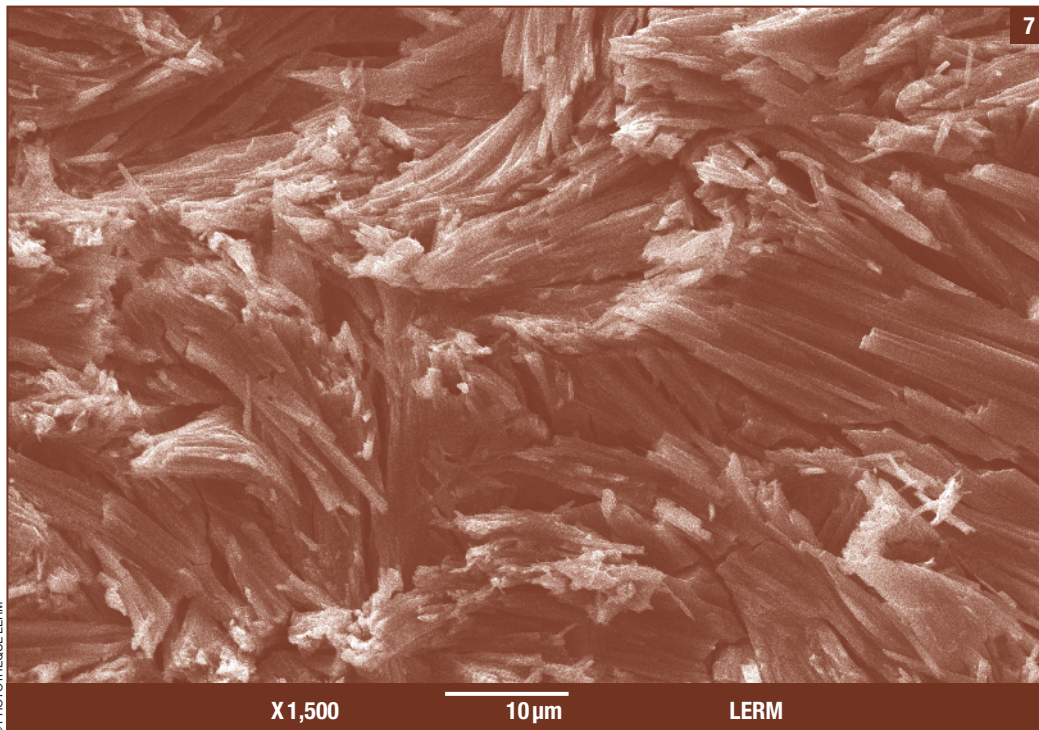
L'ADAPTATION TECHNOLOGIQUE DU BÉTON ET SES LIMITES D'UTILISATION

Réduit à sa plus simple expression à ses débuts, un mélange ciment/granulats/eau, le béton a su s'adapter à de nouvelles exigences de performances, à la faveur notamment de son association avec l'acier (béton armé) et du développement de la précontrainte. Ces nouvelles technologies ont poussé les concepteurs vers de nouveaux défis architecturaux (augmentation des portées, diminution des sections, ...) assortis d'une notion de durabilité grandissante. Car s'il est désormais un fait acquis, c'est bien que le béton est un

matériau durable qui ne nécessite pas, s'il est correctement formulé et mis en œuvre, d'entretien régulier, contrairement aux structures métalliques.

Le béton est un matériau vivant, qui interagit avec l'environnement dans lequel il est placé. Le retour d'expérience depuis une centaine d'années, a conduit à une bonne connaissance des mécanismes susceptibles de limiter sa durée de vie. Fort de ces connaissances, la communauté scientifique a mis à disposition des concepteurs une large gamme de possibilités permettant de limiter les risques d'altération du béton.

Une des principales avancées en matière de durabilité, a été de diminuer la porosité du béton sans nuire à ses qualités de mise en œuvre. Cette amélioration a été rendue possible par l'utilisation d'adjuvants plastifiants et superplastifiants réducteurs d'eau, permettant de conserver la maniabilité et l'ouvrabilité des bétons avec des dosages en eau extrêmement réduits, conduisant ainsi à des matériaux de faibles porosités et de performances mécaniques par conséquent accrues. L'amélioration de la compacité des bétons a également été favorisée par l'optimisation du squelette granulaire, en particulier par l'utilisation de particules fines et ultra-fines. Cette amélioration de la compacité des bétons a par ailleurs été associée à une définition précise des profondeurs d'enrobage des armatures en fonction des classes



© PHOTOHÉQUE LERM

d'exposition, afin d'optimiser la durabilité des structures.

La durabilité du béton ne peut néanmoins pas être réduite à une simple question de porosité. L'adaptation, à des règles d'utilisation particulière, des matériaux qui le constitue, a également joué un rôle essentiel dans les améliorations technologiques du béton.

En premier lieu, le ciment a connu des développements importants par :

1- Une meilleure maîtrise de sa composition : ciment prise mer (PM) ou résistant aux sulfates (ES), ciment à faible chaleur d'hydratation (CP), ciment à faible teneur en alcalins,

2- L'utilisation d'additions minérales en substitution d'une partie du clinker (laitier de haut fourneau, cendres volantes, fumées de silice, ...), conduisant à des bétons à durabilité accrue en raison notamment de la faible teneur en chaux hydratée dans le matériau durci. Le béton a également su s'adapter à des dispositions constructives particulières, notamment par l'utilisation d'adjuvants spécifiques et de ciments à prise de résistance rapide permettant de raccourcir les délais de décoffrage, ou encore par le développement de bétons très fluides (bétons autoplaçants - BAP) permettant d'améliorer la mise en œuvre dans des éléments à forte densité d'acier et/ou de forme particulière.

L'ensemble des avancées technologiques a également eu un impact considérable sur les caractéristiques

7- Cristallisations d'ettringite massive expansive (attaque sulfatique ou RSI)(MEB).

7- Crystal-lisations of expansive massive ettringite (sulphate attack or ISR) (SEM).

mécaniques des bétons, permettant ainsi de limiter les sections des éléments de structure. Alors que dans les années 1940 on ne parlait que du béton, sous entendu ordinaire (résistance comprise entre 20 et 40 MPa), à partir des années 1980 sont apparus les bétons à hautes performances (BHP - 60 à 80 MPa), puis les bétons à très hautes performances (BTHP - 80 à 120 MPa), grâce à l'évolution des superplastifiants et à l'apparition de la fumée de silice. Enfin, plus récemment ont été développés les bétons à ultra hautes performances (BUHP - >120 MPa) parmi lesquels les BFUP (Bétons Fibrés Ultra hautes Performances) qui atteignent des résistances comprises entre 120 et 200 MPa avec des porosités inférieures à 6%, largement inférieure à 15% environ pour béton ordinaire. Cette nouvelle gamme

de bétons, à durabilité fortement accrue, est en train de révolutionner les dispositions constructives, ouvrant ainsi de nouvelles perspectives architecturales dès lors que leur coût supérieur sera intégré dans une démarche de coût de revient global.

L'utilisation du béton n'est finalement limitée que par des critères structuraux, bien que les évolutions récentes permettent de repousser un peu plus loin les limites, ou économiques, lorsque des matériaux locaux ne permettent par exemple pas d'atteindre les performances souhaitées.

Longtemps considéré comme un matériau conduisant à la construction de blocs grisâtres et tristes, le béton permet, par ses adaptations technologiques, de concevoir des bâtiments et des ouvrages aux volumes et aux formes très harmonieux. Elle réside finalement bien là, la noblesse du béton : être écologique, durable, esthétique et innovant.

Le besoin d'accroître la durée de vie des ouvrages est aujourd'hui une nécessité évidente, dictée par un développement durable. À l'échelle du matériau, cela se traduit par la nécessité de satisfaire simultanément différentes exigences, pas toujours facilement conciliables, notamment en fonction des matériaux disponibles localement ou des spécificités liées à la conception de l'ouvrage. Les moyens techniques dont dispose aujourd'hui la profession permettent de rechercher les solutions les plus

optimales, à condition de considérer la durabilité du matériau suffisamment en amont d'un projet.

LE SUIVI DURABILITÉ

La durabilité des bétons des ouvrages d'art est aujourd'hui intégrée dès l'étape conception des projets, les maîtres d'ouvrages imposant une durée de vie spécifiée dans leur cahier des charges. Parmi les premiers ouvrages européens ayant fait l'objet de cette démarche, citons par exemple les ponts Vasco de Gama à Lisbonne, Rion Antirion en Grèce, comme le viaduc de Millau pour lesquels une durée de vie de 120 ans était demandée à la construction (figures 1 et 8).

Comment se pose la problématique de la durabilité, et de son suivi dans le temps ?

Le concepteur doit, dans un premier temps, effectuer et justifier des choix de matériaux (formulation des bétons) et de dispositions constructives (enrobage des armatures par exemple) permettant de garantir le critère de durée de service requise. Dans ces conditions, la démarche consiste à choisir des indicateurs de durabilité adaptés à l'agressivité de l'environnement dans lequel sont placés les ouvrages. Pour chaque indicateur, des seuils d'acceptation, initialement basés sur les données de la littérature scientifique, permettent de valider les formulations de béton. Le retour d'expérience maintenant acquis depuis quelques années, permet de mieux cerner ces seuils d'acceptation. Néanmoins, la vérification des seuils d'acceptation des critères de durabilité retenus n'est pas, à elle seule, suffisante. Le concepteur doit en effet utiliser des modèles prédictifs permettant d'accéder aux témoins de durée de vie (sorties numériques des modèles) à partir des indicateurs de durabilité (données d'entrée des modèles). De nombreux modèles existent pour prévoir la pénétration d'agents agressifs dans le temps, avec des données d'entrée plus ou moins riches, et donc des témoins de durée de vie plus ou moins précis. Certains sont des modèles basés sur une approche physique des phénomènes, alors que d'autres sont purement probabilistes. Dans tous les cas, ces modèles nécessitent de disposer de données expérimentales suffisamment riches pour pouvoir notamment mettre en évidence les paramètres majeurs qui gouvernent les phénomènes de transfert, l'évolution de ces paramètres dans le temps, ou encore l'influence de défauts tels que la fissuration. ▷

La mise en place d'un suivi durabilité pour ce type d'ouvrages apparaît donc essentielle, notamment pour :

- 1-** Déterminer, sur les bétons d'ouvrage, l'évolution des paramètres de transfert (définition de lois d'évolution) ;
- 2-** Préciser les conditions limites à la surface des bétons ;
- 3-** Déterminer les interactions entre les agents agressifs et la pâte de ciment ;
- 4-** Mesurer les profils réels de pénétration à une échéance donnée, afin de les confronter aux profils théoriques issus des modèles prédictifs. La répétition de cette démarche permettra, à terme, de lever certaines incertitudes et de fiabiliser les hypothèses à prendre en compte dans les modèles prédictifs. Par exemple, dans le cas d'ouvrages placés en environnement marin, le principal risque de dégradation est la corrosion des armatures par action des chlorures. Les principaux indicateurs de durabilité retenus pour valider les formulations de béton étaient donc la résistance des bétons à la pénétration des chlorures (par mesure du coefficient de diffusion des chlorures ou essai accéléré de perméabilité aux ions chlore - RCPT test) et la perméabilité à l'oxygène. Ces essais étaient pratiqués dans un premier temps sur des éprouvettes confectionnées en laboratoire, puis sur des éprouvettes fabriquées sur chantier, et enfin sur des échantillons extraits de l'ouvrage lui-même, à différents âges. À ces critères de durabilité était bien entendu associée une profondeur minimale d'enrobage des armatures, conforme à la réglementation en vigueur, et généralement majorée pour garantir le respect du critère de durabilité (enrobage de 70 mm pour le pont Vasco de Gama et de 85 mm pour le pont de Rion Antirion dans les zones de marnage, les plus agressives)(figure 9).

LE RECYCLAGE

Les restructurations urbaines et notamment la déconstruction du parc immobilier des années 1970 conduisent à la démolition de nombreux bâtiments et ouvrages en béton. En 2008, l'ADEME estimait que la production des déchets inertes du bâtiment s'élevait à 27,7 millions de tonnes dont 14% de bétons et 17,7% de déchets en mélange contenant également du béton.

Le concept de déconstruction sélective émergeant au début des années 2000 a favorisé la valorisation de ces bétons grâce à la mise en place de tri dès le chantier. Depuis fin 2011, le diagnostic déchets avant déconstruction devient obligatoire pour les bâtiments d'une



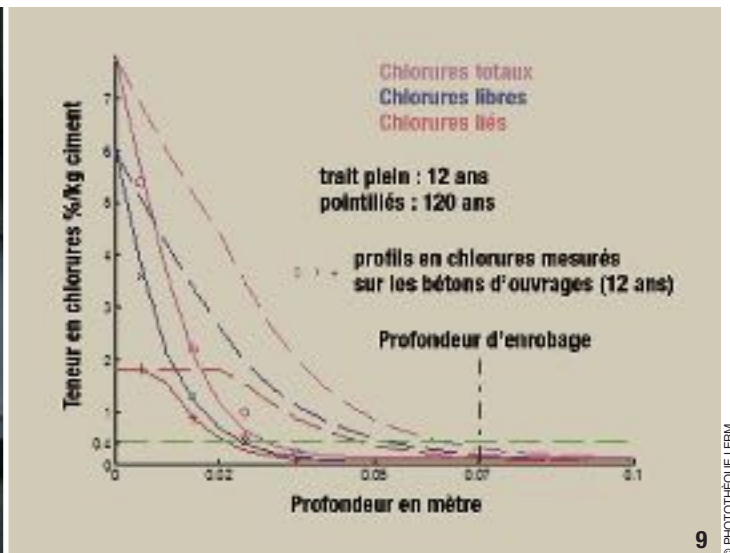
8

surface hors œuvre brute supérieure à 1 000 m² ou ayant accueillis certaines activités spécifiques. Cette réglementation va continuer à faire évoluer les pratiques et devrait conduire à améliorer le taux de valorisation des déchets de démolition.

En référence à l'arrêté du 28 octobre 2010, les bétons provenant de démolition et déconstruction, lorsqu'ils sont triés, sont considérés comme inertes à l'exclusion de ceux provenant de sites contaminés. Cette étape de tri permettant notamment la séparation du béton et du plâtre et limitant ainsi l'apport de sulfates est indispensable pour une valorisation ou un recyclage. Lorsque le béton est trié directement sur le chantier son taux de valorisation est de 77,7% contre seulement 12% pour les déchets en mélange.

Actuellement, les granulats de béton recyclés sont élaborés par des installations fixes ou mobiles similaires à celles utilisées pour les granulats naturels auxquelles s'ajoutent un prétraitement (réduction des plus gros éléments à l'aide d'un brise roche hydraulique (BRH) et cisaillement des armatures les plus longues), et une à plusieurs phases de tri notamment de déferailage électromagnétique. Certaines de ces installations de traitement sont très sophistiquées disposant de deux, voire trois niveaux de concassage, de criblage et d'épuration (figure 10).

En France, les granulats issus de bétons concassés sont majoritairement employés en infrastructure routière : remblais, couches de forme, chaussées réservoir, couches d'assises de chaussée. À la fin des années 1970, des chantiers expérimentaux réutilisant des granulats de bétons dans la



9

© PHOTOHÉQUE LERMI

8- Pont Vasco de Gama à Lisbonne pour lequel une durée de vie de 120 ans était exigée à la construction.

9- Simulation numérique réalisée sur ouvrage après 12 ans d'exposition (traits pleins) avec comparaison avec les profils expérimentaux, et projection sur 120 ans (pont Vasco de Gama, Lisbonne).

8- Vasco da Gama Bridge in Lisbon, for which a service life of 120 years was demanded at construction.

9- Numerical simulation performed on a structure after 12 years' exposure (solid lines) and comparison with the experimental profiles, and projection over 120 years (Vasco da Gama Bridge, Lisbon).

fabrication de béton de chaussées routières et aéroportuaires ont été réalisés en région Île-de-France mais ces pratiques se sont peu développées. La normalisation actuelle prévoit néanmoins leur utilisation dans la formulation de nouveaux bétons (NF EN 12620) et différentes expériences se développent dans d'autres pays européens.

Depuis la fin des années 1990, de nombreuses équipes travaillent sur l'amélioration des performances de ces bétons de granulats de bétons recyclés. Mais les techniques d'élaboration actuelles mettent en œuvre des techniques de concassage peu sélectives générant des granulats composites formés à la fois du granulat naturel d'origine et d'une gangue de mortier. Leurs propriétés dépendent de la nature des bétons déconstruits, de la qualité du tri et des techniques de traitement utilisées. Leur introduction dans la formulation de nouveaux bétons fait apparaître des problématiques particulières, comme notamment une demande en eau élevée ou des résistances mécaniques limitées.

Le Projet National RECYBETON vise à faire évoluer ces pratiques en apportant des réponses aux questions qui subsistent. Le projet s'intéresse également au recyclage des matériaux hydrauliques issus de la déconstruction des bétons comme matière première dans la production de liants hydrauliques (pour produire le clinker ou comme constituant de nouveaux produits). D'autres travaux de recherche se concentrent sur les techniques de traitement avec l'objectif de libérer les granulats naturels de leur gangue de mortier. C'est le cas du projet ANR COFRAGE qui s'intéresse aux technologies innovantes

de fragmentation du béton, comme la fragilisation par chauffage micro-ondes et l'endommagement par voie électro-hydraulique.

Ces techniques prometteuses permettraient d'obtenir le granulats naturels d'un côté et le mortier de l'autre probablement sous forme de fines. Le granulats se recycleraient ainsi très facilement dans un nouveau béton et les fines de mortiers pourraient trouver des voies de valorisation dans la production de ciment. Le recyclage du béton serait alors complet, et le cycle de vie du béton bouclé.

La préservation de l'environnement devenant un enjeu majeur, il est devenu légitime de s'interroger désormais sur les impacts environnementaux générés

par les matériaux de construction au sens large et donc par les produits béton au cours de leur cycle de vie.

L'ANALYSE DE CYCLE DE VIE

Cette méthode globale et multicritère permet d'évaluer les flux de matières et d'énergies et les impacts environ-

10- Installation de concassage de béton.

10- Concrete crushing plant.

nementaux d'un produit, pour chaque étape du cycle de vie (production, mise en œuvre, vie en œuvre et fin de vie). En France, la norme NF P01-010 sélectionne les dix indicateurs environnementaux pour les produits de construction et définit le format et le contenu des FDES (Fiches de Déclaration Environnementale et Sanitaire).

La réalisation de ce type d'analyse est de plus en plus fréquente, elle permet d'identifier les possibilités d'amélioration des performances environnementales des produits.

Début 2011, la base INIES (www.inies.fr) recensait 31 FDES de produits béton (produits préfabriqués et bétons prêts à l'emploi). Le Syndicat National du Béton Prêt à l'Emploi met également à

la disposition de ces adhérents un outil de calcul baptisé BETie qui permet de réaliser un bilan environnemental pour leur réalisation en BPE et ainsi de créer des FDES sur mesure pour chacun de leur projet.

Pour les ouvrages d'art, l'utilisation de l'ACV pour l'évaluation des impacts environnementaux commence à se pratiquer mais de nombreuses données d'entrée ne sont pas encore disponibles. C'est dans ce contexte que l'AFGC a créé le groupe de travail DIOGEN avec l'objectif d'aboutir à la création d'une base de données spécifique aux ouvrages d'art et librement accessible par la profession. Ce groupe travaille d'une part au recensement des données existantes, à leur évaluation vis-à-vis d'un usage en génie civil et d'autre part à l'enrichissement de ces données.

CONCLUSION

À l'appui de tous les exemples d'ouvrages anciens parfaitement conservés, la durabilité du béton n'est plus à démontrer, dès lors que le choix de ses composants et les choix de formulation ont été adaptés à son usage, et plus particulièrement encore à son environnement. Enfin et surtout, la qualité de sa mise en œuvre sera décisive, depuis le respect de l'enrobage des armatures jusqu'à la cure finale, soulignant ainsi la valeur et le savoir faire des constructeurs, indispensables dans la réussite de toute construction durable. Ce que résume bien la définition de la durée de vie donnée par l'Eurocode 2 : « une structure durable doit satisfaire aux exigences de l'aptitude au service, de résistance et de stabilité pendant toute la durée d'utilisation du projet, sans perte significative de fonctionnalité ni maintenance imprévue excessive ». □



© PHOTOTHÈQUE LERM
10

ABSTRACT

THE DURABILITY AND LIFE CYCLE OF CONCRETE

LERM: B. QUÉNÉE - A. AMMOUCHE - C. CARDE - N. RAFAI - I. MOULIN

The durability approach to concretes supplements their design and production codes. Concrete's mechanical properties are related to hydration of the cement, the compounds of which depend mainly on the mix design parameters and the use of mineral additions. The resistance of concrete structures exposed to aggressive environments will be enhanced by preventing the penetration of chemical agents. Designers can limit the risks of damage, since predictive models can be used to predict concretes' service life on the basis of durability indicators. The recycling of concrete, currently seeing major technical, scientific and regulatory changes, will probably become commonplace over the coming years. □

DURABILIDAD Y CICLO DE VIDA DE LOS HORMIGONES

LERM: B. QUÉNÉE - A. AMMOUCHE - C. CARDE - N. RAFAI - I. MOULIN

El procedimiento de durabilidad de los hormigones completa sus reglas de dimensionamiento y de fabricación. Las prestaciones mecánicas dependen de la hidratación del cemento, cuyos compuestos resultan principalmente de los parámetros de formulación y de la utilización de adiciones minerales. Las estructuras de hormigón expuestas a entornos agresivos resistirán mejor cuanto más se opongan a la penetración de los agentes químicos. Los diseñadores pueden limitar los riesgos de alteración, ya que los modelos predictivos permiten prever la vida útil a partir de indicadores de durabilidad. En los próximos años debería generalizarse el reciclaje del hormigón, en plena transformación técnica, científica y reglamentaria. □



© SETRA - GÉRARD FORQUET

RÉGLEMENTATION ET NORMALISATION, LES INSTANCES CONCERNÉES

AUTEURS : EMMANUEL BOUCHON, CHEF DE LA DIVISION DES GRANDS OUVRAGES, SETRA - MICHEL MOUSSARD, CONSULTANT GÉNIE CIVIL ET OUVRAGES D'ART, ARCADIS

LES RÈGLES DE CONCEPTION ET DE CALCUL VISENT À CONCILIER SÉCURITÉ ET ÉCONOMIE, SANS FREINER LE PROGRÈS, TOUT EN GUIDANT LA DÉMARCHE DE L'INGÉNIEUR. DEPUIS LES RÈGLES DE 1906, PUBLIÉES SOUS FORME D'INSTRUCTIONS D'UN MINISTRE À SES SERVICES, JUSQU'AUX EUROCODES, NORMES EUROPÉENNES AUXQUELLES A CONTRIBUÉ L'ENSEMBLE DE LA COMMUNAUTÉ INTERNATIONALE DU GÉNIE CIVIL, CET ARTICLE RETRACE L'ÉVOLUTION DES RÈGLES ET DES IDÉES QUI LES SOUS-TENDENT. IL MET L'ACCENT SUR LE RÔLE MAJEUR DES ASSOCIATIONS INTERNATIONALES DANS LA FORMALISATION ET LA DIFFUSION DES THÉORIES QUI FONDENT TOUS LES CODES MODERNES DE CALCUL.

LES RÈGLEMENTS AUX CONTRAINTES ADMISSIBLES

PRINCIPES DE LA MÉTHODE

Les premières théories relatives au calcul du béton armé ont été développées à partir de 1890 et c'est en 1897, à l'école des Ponts et Chaussées, que Charles Rabut créa le premier cours de béton armé. Les méthodes de la résistance des matériaux en élasticité linéaire, bien adaptées aux matériaux

homogènes, ne sont pas applicables directement au béton armé, en raison d'une part de son hétérogénéité, conséquence de l'association de deux matériaux aux propriétés très différentes, et d'autre part de la faible résistance du béton à la traction, qui fait que le béton peut être fissuré en flexion sous de faibles niveaux de charge. L'extension de ces méthodes à ce nouveau matériau passe par la formulation d'hypothèses complémentaires : adhérence

entre métal et béton et non prise en compte du béton tendu. Le calcul des contraintes normales est alors possible, moyennant la connaissance du coefficient d'équivalence, rapport entre les modules de déformation des matériaux. Le principe des justifications aux contraintes admissibles est alors très simple. On calcule les contraintes normales, de compression pour le béton, de compression ou de traction pour les armatures, sous les charges que

l'ouvrage est effectivement destiné à supporter.

Ces contraintes doivent rester inférieures aux valeurs admissibles, qui sont elles-mêmes des fractions de la résistance à la compression pour le béton et de la limite d'élasticité pour les armatures. Cette méthode se trouve à la base de tous les règlements de calcul jusqu'à la fin des années 1960. Elle est toujours utilisée pour les justifications aux états-limites de service.

LES RÈGLES FRANÇAISES DE 1906 À 1970

Le béton armé : de la circulaire de 1906 au CCBA 1968

La circulaire du 20 octobre 1906 accompagne les « Instructions relatives à l'emploi du béton armé », premier règlement français de calcul des constructions en béton armé. Il s'agit d'instructions et non d'un règlement car, comme le soulignent les rédacteurs, le mot « instructions », tout en ayant le même caractère obligatoire pour les ingénieurs, s'annonce comme moins permanent (ce qui n'empêchera pas ces instructions de rester en vigueur pendant près de trente ans). Ce texte est le fruit du travail de la Commission du ciment armé, créée en 1900 par le ministre des travaux publics. Cette commission réunit les spécialistes les plus éminents de l'époque : Considère, Harel de la Noë, Mesnager, Rabut, Rézal, Coignet, Hennebique et bien d'autres. Elle accomplit un travail considérable, aussi bien sur le plan théorique qu'expérimental. À partir de ses propositions, une commission spécialisée du conseil général des ponts et chaussées élabore les textes définitifs de l'instruction et de la circulaire qui, tout en restant très proches des projets de départ, constituent un compromis entre les positions, divergentes sur certains points, des membres de la commission du ciment armé. L'instruction elle-même occupe trois pages et demie et la circulaire explicative en compte un peu moins de vingt. Une bonne partie du texte explicatif est consacrée à l'exposé détaillé des méthodes de calcul - calcul des efforts et calcul des contraintes dans une section - qui sont encore peu répandues et qu'il importe de diffuser le plus largement possible. L'instruction proprement dite

n'impose aucune méthode de calcul, elle se borne à exiger l'utilisation de méthodes scientifiques, telles celles fondées sur la résistance des matériaux (figure 2), et écarte les méthodes empiriques. La contrainte admissible du béton, dénommée « limite de fatigue à la compression » est fixée à vingt-huit

centièmes de la résistance à quatre-vingt-dix jours mesurée sur cube. Cette valeur est notablement plus élevée (50 à 60%) que celles autorisées par les règlements étrangers, et notamment les règlements allemand et suisse, publiés quelques années auparavant. Mais eu égard aux rapides progrès des techniques et des connaissances sur le béton armé, les règlements étrangers sont déjà anciens. De plus, les valeurs proposées correspondent à celles en usage dans la pratique. Le règlement permet de plus de porter la compression admissible du béton jusqu'à soixante pour cent de la résistance à 90 jours en prenant en compte l'effet de frettage apporté par les armatures transversales. Par contre, les armatures passives ne sont pas prises en compte pour la résistance à l'effort tranchant. Celle-ci repose uniquement sur le béton dont les contraintes de cisaillement sont limitées au dixième des contraintes admissibles en compression. Enfin, les armatures longitudinales peuvent travailler jusqu'à la moitié de leur limite élastique, soit environ 12 kg/mm². L'instruction ne traite pas du coefficient d'équivalence, mais la circulaire y consacre plus d'une page et recommande de choisir sa valeur entre 8 et 15, suivant les dispositions des armatures. Il est admis que le module de déformation du béton est constant et que la valeur du coefficient d'équivalence dépend essentiellement des diamètre et espacement des armatures et de la plus en moins grande facilité de mise en œuvre du béton (la vibration n'a pas encore été inventée), ces deux aspects sont liés et conditionnent l'adhérence. Tout cela sera corrigé lors de la refonte de 1934.

Les règles de 1906 n'étaient d'application obligatoire que pour les ouvrages

dépendant du ministère des travaux publics. Dans les faits, elles ont été utilisées pour toutes les constructions en béton armé. En 1928, la Chambre syndicale des constructeurs en ciment armé de France soumet au ministre des travaux publics un ensemble de clauses qui intègre l'expérience et les avancées des vingt ans précédents et qu'elle souhaiterait voir prises en compte dans les textes à venir. Ces propositions seront publiées en 1931, par la Chambre syndicale sous le titre « Règlement sur les constructions en béton armé ». Ce document sera très peu appliqué mais certaines des idées qu'il apporte seront intégrées aux instructions de 1934, remplaçant celles de 1906. Ces nouvelles instructions, sans apporter de changement fondamental, sont plus détaillées et plus précises que celles de 1906 :

→ Elles imposent la méthode de calcul des poutres en section fissurée, qui n'était que proposée auparavant ; le choix du coefficient d'équivalence est libre mais il est proposé de prendre pour les cas courants une valeur unique égale à 10 ;

→ Les contraintes admissibles de traction, de cisaillement et d'adhérence se réfèrent à la résistance à la traction du béton ;

→ La contrainte admissible des armatures en acier doux est fixée à 13 kg/mm² sous charge permanente, surcharge et température ;

→ Pour l'effort tranchant, on doit d'une part vérifier les contraintes et d'autre part placer des armatures transversales capables d'assurer seules l'équilibre en cas de fissuration ; les mots « treillis » et « bielle » n'apparaissent pas mais leur utilisation est fortement suggérée, l'analogie du treillis de Ritter-Mörsch datait en effet du début du siècle et devait être bien connue des ingénieurs ;

→ Plusieurs articles sont consacrés aux dispositions constructives, qui étaient à peine évoqués auparavant. Après la Seconde Guerre mondiale, 1945 voit la création du ministère de la Reconstruction et de l'Urbanisme (MRU). Une commission présidée par Albert Caquot est chargée de rédiger un nouveau règlement, qui tirera parti des progrès dans la science du béton armé pour permettre une construction plus économique, vitale en ces périodes de pénurie. Ces nouvelles règles, dites règles BA 1945, sont applicables aux travaux dépendant du ministère de la reconstruction et de l'urbanisme et aux travaux privés. Elles vont donc coexister avec les instructions de 1934. ▷

1- Viaduc de Compiègne (Oise). Mis en service en 2009. Pont en caisson à voussoirs préfabriqués, justifié entièrement avec les versions finales des Eurocodes.

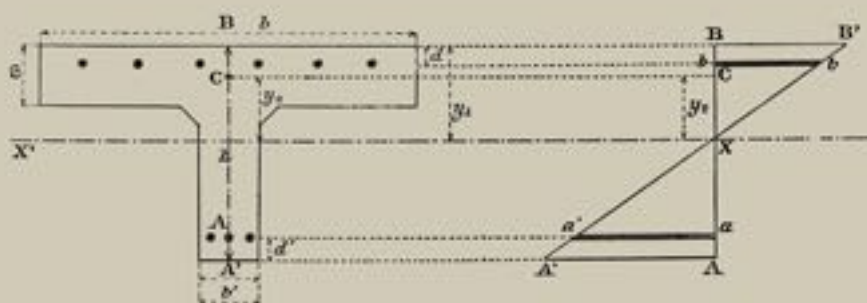
2- Figure extraite des instructions de 1906 et 1934, illustrant la méthode de calcul des contraintes en section fissurée.

1- Compiègne viaduct (Oise region). Commissioned in 2009. Box-girder bridge with prefabricated segments, verified entirely with the final versions of the Eurocodes.

2- Figure excerpted from the instructions of 1906 and 1934, illustrating the method for calculating stresses in a cracked section.

MÉTHODE DE CALCUL DES CONTRAINTES EN SECTION FISSURÉE

Figure extraite des instructions de 1906 et 1934



La traction autorisée dans les aciers est portée à 14,4 kg/mm², ce qui conduit à une réduction des quantités d'acier de 10%. Mais, surtout, ces règles permettent le calcul des efforts dans les ossatures de bâtiment par une méthode simplifiée, tenant compte des possibilités d'adaptation du béton armé et des redistributions qui en découlent dans les structures hyperstatiques. Cette méthode, dite méthode Caquot, présente le double avantage d'être facile et rapide d'emploi et de conduire à un dimensionnement économique. De plus, les règles BA 45 autorisent une majoration des contraintes admissibles du béton sur les appuis intermédiaires des poutres continues. Enfin, pour tenir compte du fait que les contraintes en flexion composée ne sont pas proportionnelles au moment fléchissant, et que par conséquent le respect des contraintes admissibles ne suffit pas à assurer une sécurité homogène, les règles BA 45 imposent des vérifications supplémentaires de sécurité, sous charges variables majorées.

Les règles BA 45 sont remplacées en 1960 par les règles BA 60, publiées sous le statut de document technique unifié (DTU). Naturellement, elles admettent des limites de contraintes plus élevées que les règles précédentes, mais de plus elles modulent les contraintes admissibles en fonction de la nature des sollicitations. Par exemple, la contrainte maximale sur la fibre extrême comprimée d'une pièce en flexion simple peut atteindre le double de celle admise en compression simple. Elles généralisent aussi les vérifications complémentaires de sécurité, apparues dans les règles de 1945, par l'introduction des vérifications sous « sollicitations totales pondérées du second genre », ancêtres des vérifications à l'état-limite ultime de résistance.

En 1964, trente ans après les instructions de 1934, le ministère des travaux publics publie le fascicule 61 titre VI, qui constitue une refonte complète des règles applicables à ses ouvrages. Il s'inspire pour ce faire très largement des règles BA 60, notamment en ce qui concerne les valeurs admissibles des contraintes et la définition des sollicitations pondérées des premier et second genres. Il consacre aussi un chapitre à la maîtrise de la fissuration, qui ne donnait lieu à aucune vérification ou prescription particulière dans les instructions de 1934.

Les deux codes fusionnent en 1968 en ajoutant au contenu du fascicule de 1964 un chapitre regroupant les



© SETRA - GÉRARD FORQUET

clauses inspirées des règles BA 60 concernant les bâtiments courants (en particulier la méthode Caquot).

Le nouveau document est publié comme DTU sous le nom de règles CCBA 68 et comme fascicule du cahier des prescriptions communes applicables aux marchés de l'État (et plus seulement aux marchés de l'administration des ponts et chaussées). Ces textes resteront en vigueur, moyennant des mises à jour mineures, jusqu'au début des années 1980 et l'avènement du BAEL.

Le béton précontraint :
*l'instruction provisoire n°1 -
IP1 (1953 et 1965)*

La publication, par le ministre des travaux publics, des instructions provisoires de 1953 relatives à l'emploi du béton précontraint répond au développement rapide des utilisations de ce matériau. Si, dans le cas du béton armé, le terme « instructions » avait été adopté pour son caractère moins permanent que « règlement », l'ajout de l'adjectif « provisoire » vient probablement du

3 & 4- Pont du Lion d'Angers (Maine et Loire). Mis en service en 2002, c'est le premier pont type (dalle précontrainte) calculé avec les Eurocodes. Seul le tablier a été justifié avec l'Eurocode 2, en version provisoire.

3 & 4- Lion d'Angers Bridge (Maine et Loire region). Commissioned in 2002, this is the first standard bridge (prestressed slab) designed with the Eurocodes. Only the deck was verified with Eurocode 2, in a provisional version.

fait que les connaissances sur le comportement du béton précontraint étaient jugées encore plus incertaines en 1953 que celles sur le béton armé au début du siècle. Ce texte ne s'applique qu'aux ouvrages totalement précontraints, il n'exclut pas la précontrainte partielle mais constate l'insuffisance des connaissances théoriques en ce domaine et renvoie à l'essai et l'expérience la justification des constructions qui utiliseraient cette technique. Dans les pièces en flexion, aucune contrainte de traction n'est autorisée sur les fibres extrêmes et une compression minimale est même exigée au niveau des armatures de précontrainte. Le texte est très prudent sur l'effort tranchant pour deux raisons : d'une part les ruptures par effort tranchant sont fragiles et, d'autre part, étant donné la réduction d'effort tranchant qu'est susceptible d'apporter la précontrainte, une faible variation des charges peut entraîner une variation relative très importante de l'effort tranchant. Il est par ailleurs prescrit des justifications de sécurité sous un doublement des surcharges et de l'action du vent, à l'image des vérifications sous sollicitations du second genre requises par le CCBA 68.

En 1960, une commission créée par l'Association scientifique de la précontrainte (ASP) commence l'élaboration d'un ensemble de règles de calcul et d'exécution des ouvrages précontraints tenant compte des rapides avancées de la technique et de l'expérience et de l'évolution des réflexions au niveau international. Ses travaux se concrétisent par la publication en juin 1965 d'un texte de recommandations dont le domaine d'emploi est beaucoup plus large que celui des instructions provisoires. Elles détaillent notamment les justifications à apporter en cas de recours à la précontrainte partielle. Elles définissent les trois classes que l'on retrouvera plus tard dans le BPEL : la classe 1 représente la précontrainte totale, seule couverte par les instructions provisoires de 1953 ; la classe 2 autorise des tractions modérées dans le béton et utilise des armatures passives pour éviter la fissuration systématique des zones tendues ; la classe 3 correspond à la précontrainte partielle, la traction du béton n'y est pas limitée et le calcul des contraintes se fait comme en béton armé, en négligeant le béton tendu.

En 1965 également, l'instruction provisoire est remise à jour, sans que ses principes de base évoluent. La principale modification des conditions de dimensionnement porte sur la



contrainte admissible en compression, qui passe de 28 % de la résistance à 90 jours à 42 % de la résistance à 28 jours. La nouvelle version de l'instruction apporte de nombreux compléments sur les modalités du calcul, sur la précontrainte transversale, sur les justifications à l'effort tranchant et sur les dispositions constructives.

Elle ajoute aussi une précision importante : elle peut s'appliquer aux ouvrages précontraints dans une direction et armés dans la direction perpendiculaire, ce qui correspond à bon nombre de tabliers de ponts. Mais elle reste bien en retrait des recommandations de l'ASP qui garderont longtemps la faveur des ingénieurs par leur caractère plus général et pratique.

Dans la continuité du fascicule 61 titre VI mentionné plus haut, il était prévu la publication d'un titre VII, qui aurait traité du béton précontraint. Il n'a jamais vu le jour et il faudra attendre 1983, avec le BPEL pour disposer d'un règlement qui ne soit pas considéré comme provisoire. À partir de 1973, l'instruction de 1965 prend le nom d'instruction provisoire n°1 (IP 1), pour coexister avec l'IP 2, basée sur la méthode des états-limites. Des compléments lui sont apportés en 1975, concernant les ponts en caisson construits par encorbellements successifs, pour corriger les insuffisances constatées sur de nombreux ouvrages. Ces compléments traitent notamment des redistributions par fluage, de la diffusion (il est demandé d'appliquer sur cet aspect les règles plus détaillées prescrites par l'IP 2), du gradient thermique et des poussées au vide dans les hourdis courbes.

LIMITES DE LA MÉTHODE

Au fil des mises à jour successives, en même temps que l'on intégrait les progrès des connaissances et les retours

5 & 6- Second Viaduct de Pont-Salomon (Haute-Loire). Mis en service en 2000, c'est le premier pont français calculé avec les Eurocodes, le tablier est justifié avec l'Eurocode 2. Pour le premier viaduc, à l'extérieur de la courbe, mis en service en 1980, on a utilisé le CCBA 68 et l'IP1.

5 & 6- Second Pont-Salomon viaduct (Haute-Loire region). Commissioned in 2000, this is the first French bridge designed with the Eurocodes; the deck is verified with Eurocode 2. For the first viaduct, outside the curve, commissioned in 1980, CCBA 68 and IP1 were used.

d'expérience, de nombreuses corrections et améliorations ont été apportées pour obtenir une sécurité homogène. Les vérifications sous sollicitations pondérées du second genre en font partie, mais également les modulations des contraintes admissibles en fonction du mode de sollicitation.

Les règlements sont devenus de plus en plus complexes, juxtaposant des principes clairs et compréhensibles

avec des règles justifiées par l'expérience mais ne s'appuyant sur aucun modèle théorique. C'est ainsi par exemple que, dans les règles CCBA 68, la résistance admissible du béton à la compression est le produit de sa résistance nominale, déduite des mesures sur éprouvettes, par cinq paramètres empiriques.

Par ailleurs, on ne peut pas dissocier la valeur des contraintes admissibles de l'ensemble des hypothèses du calcul et notamment du coefficient d'équivalence retenu. Les premières instructions laissaient l'ingénieur libre de choisir ce coefficient. À partir des règles BA 60, les règlements sont plus directifs et imposent systématiquement la valeur de 15, plutôt favorable pour le béton, quelles que soient les conditions de chargement de l'élément.

Cela illustre bien le caractère conventionnel des vérifications, dont l'objet n'est pas de prédire de manière précise les contraintes mais d'assurer la sécurité et le bon fonctionnement de la construction.

Mais, malgré les raffinements et perfectionnements apportés, le principe même des règlements aux contraintes admissibles, où les contraintes sont calculées dans l'hypothèse d'un comportement élastique des matériaux et comparées à des valeurs limites fixées a priori, peut conduire dans certains cas à des insuffisances et dans d'autres à de larges surdimensionnements.

C'est particulièrement vrai dès que l'on s'éloigne du domaine des structures courantes, à partir desquelles ont été calibrés les différents paramètres du calcul. Enfin, si l'objectif d'une sécurité homogène est difficile à atteindre pour les constructions en béton armé, il est encore plus éloigné si l'on cherche à harmoniser les règles du béton armé et celles du béton précontraint, sans parler de la construction métallique.

Pour corriger ces défauts, certains ingénieurs ont développé des méthodes de calcul à la rupture, basées sur l'interprétation de nombreux essais. On peut définir un coefficient de sécurité global, comme le rapport de la sollicitation de rupture à la sollicitation de service. Ces méthodes permettent d'exploiter les capacités des matériaux bien au-delà du domaine élastique, ainsi que les possibilités d'adaptation et de redistribution des efforts. Elles traitent mieux l'aspect sécurité que les méthodes aux contraintes admissibles mais elles ne donnent aucune information sur le comportement en service de l'ouvrage. Elles n'ont jamais été transcrites dans les textes réglementaires français.

LE RÔLE PRÉCURSEUR DES ASSOCIATIONS INTERNATIONALES

Dès les années 1950, dans le cadre des courants de pensée européens qui conduiront à la signature du Traité de Rome de 1957, l'idée de créer des associations internationales ayant pour objet le partage et le développement des connaissances dans le domaine du béton fait son chemin au sein de la communauté scientifique et technique, et conduit successivement à la création de la Fédération Internationale de la Précontrainte et du Comité Européen du Béton.

La création de ces deux associations marque un tournant vers l'internationalisation de la démarche pré-normative et normative dans le domaine des structures en général, et des structures en béton en particulier.

Le 16 octobre 1950, quatre ingénieurs, l'Italien Rinaldi, le Néerlandais Bruggeling, l'Anglais Gooding et l'Espagnol Fernandez Conde proposent la création d'une fédération internationale pour promouvoir la connaissance et la diffusion de la précontrainte dans le monde. ▷

Cette fédération voit le jour en 1952 sous le nom de Fédération Internationale de la Précontrainte, FIP ; elle est officiellement créée au cours d'une réunion à Cambridge en Angleterre, et Eugène Freyssinet en sera le président jusqu'en 1958.

À l'initiative de la Fédération Nationale du Bâtiment (devenue la Fédération Française du Bâtiment) le Comité Européen du Béton est créé en 1953 par André Balency-Béarn (France), Louis Baes (Belgique), Emile Nennig (Luxembourg), Hubert Rüschi (Allemagne), Eduardo Torroja (Espagne) et Georg Wästlund (Suède). La FNB héberge ce Comité et en assure le secrétariat. Yves Saillard est nommé Secrétaire Permanent, avant de devenir Vice-Président délégué en 1968 puis Président délégué en 1971.

En 1959 le CEB précise ses objectifs et les définit ainsi :

→ Coordonner et faire la synthèse des recherches et innovations dans le domaine du béton de structures ;

→ Définir au niveau international les principes et les règles de conception, de calcul, de construction et de maintenance des ouvrages en béton ;

→ Établir progressivement, par étapes successives, des codes et des documents de synthèse pour diffuser les principes et les règles internationalement reconnus.

C'est afin de mettre en œuvre ces objectifs que sont créées les premières Commissions du CEB.

En 1962 la FIP et le CEB créent un Comité Mixte CEB-FIP pour la rédaction de Recommandations pour le Béton Précontraint.

En 1964 les premières Recommandations Internationales du CEB sont publiées en 15 langues, comme « une première tentative de recommandations pratiques pour tous les aspects de la conception et de la construction », et contribuent largement à la rédaction de règlements nationaux dans une vingtaine de pays.

En 1968 l'importance des travaux du CEB est officiellement reconnue par les Nations Unies, et par la publication par l'UNESCO du « Code et manuel d'application pour le calcul et l'exécution du béton armé », conçu spécifiquement pour les pays en voie de développement, sur la base des recommandations publiées en 1964.

En 1970 est publiée la seconde édition de ce qui deviendra ensuite les « Recommandations Internationales CEB-FIP » puis le « Code Modèle CEB-FIP », après ratification par les deux



© SETRA - GÉRARD FORQUET

associations. Ce document couvre l'ensemble des ouvrages en béton non-armé, armé et précontraint. De nombreux manuels d'application sont publiés dans les années qui suivent. En 1974 à l'initiative du CEB, la FIP, la CECM (Convention Européenne de la Construction Métallique), le CIB (Conseil International du Bâtiment, créé en 1953), la RILEM (Réunion Internationale des Laboratoires et Experts des Matériaux, systèmes de construction et ouvrages, créée en 1947 à l'initiative de Robert l'Hermite) et le CEB s'associent pour promouvoir un ensemble international de codes des bonnes pratiques unifiés et standardisés dans le domaine des structures, le CEB étant chargé des règles unifiées communes aux différents types de constructions et du code modèle pour les structures en béton. En 1976 le Comité Européen du Béton devient le Comité Euro-International du Béton, en conservant le sigle CEB.

En 1977 la 19^e session plénière du CEB réunie à Grenade approuve la version finale de ce qui deviendra l'année suivante le Code Modèle CEB-FIP de 1978. En 1978 les premiers volumes du Système International de Codes de Bonne Pratique Unifiés et Standardisés sont publiés :

→ **Volume I** : Règles Communes Unifiées pour les différents types de constructions et de matériaux ;

→ **Volume II** : Code Modèle CEB-FIP pour les structures en béton.

Ce dernier document a été la référence de base pour le développement de l'Eurocode 2, et a profondément influencé la mise à jour des règlements dans de nombreux pays. Dans les années qui suivirent le CEB publia de nombreux documents d'application.

En 1985 le CEB publie le code modèle pour la conception parasismique des structures, et se fixe comme objectif

7- Viaduc de Compiègne (Oise). Mis en service en 2009. Pont en caisson à voussoirs préfabriqués, justifié entièrement avec les versions finales des Eurocodes.

7- Compiègne viaduct (Oise region). Commissioned in 2009. Box-girder bridge with prefabricated segments, verified entirely with the final versions of the Eurocodes.

de publier un nouveau code modèle en 1990, qui sera approuvé par la 28^e session plénière du CEB à Vienne en 1991. En septembre 1996 l'Assemblée Générale de la FIP, réunie à Londres, approuve le projet de fusion entre la FIP et le CEB, proposé par un groupe de travail commun aux deux associations. Cette proposition est approuvée à son tour par la 31^e assemblée générale du CEB à Stockholm en juin 1997. Cette fusion donne naissance le 28 mai 1998 à la fédération internationale du béton, la *fib*, qui, par reconnaissance envers ses origines et envers le rôle historiquement éminent des ingénieurs français dans ce domaine, conserve un nom français.

Fidèle à ses origines, la *fib* regroupe au sein de dix commissions des groupes de travail internationaux travaillant sur l'ensemble des sujets relatifs à la conception, à la construction et à la conservation des ouvrages en béton,

et publie régulièrement des bulletins comprenant les codes-modèles, les manuels d'application, les guides et recommandations, les rapports de synthèse ou d'état de l'art, et les rapports techniques. Depuis 1998 la *fib* a publié plus de 60 bulletins, et vient de publier le Code Modèle 2010, qui succède au Code Modèle 1990 et marque de nouveau une étape importante dans l'évolution des connaissances et des pratiques, avec la prise en compte de nouveaux impératifs et de nouvelles approches : impératifs liés aux exigences développement durable, prise en compte du cycle de vie, approche performantielle de la prescription.

LES RÈGLEMENTS AUX ÉTATS-LIMITES

PRINCIPES DE LA MÉTHODE. PROBABILISME ET SEMI-PROBABILISME. MÉTHODE DES COEFFICIENTS PARTIELS

Un état-limite est un état au-delà duquel une condition requise d'une construction ou d'un de ses éléments n'est plus satisfaite. On distingue les états-limites ultimes, relatifs à la sécurité des personnes et des biens (équilibre statique, résistance à rupture, flambement...) et les états-limites de service, relatifs à l'aptitude au service et à la durabilité (déformations, fissuration, vibrations, etc.). Le principe des méthodes aux états-limites consiste à vérifier que l'on dispose d'une marge de sécurité suffisante par rapport à chacun de ces états-limites. Idéalement, cette marge de sécurité est évaluée sur la base de considérations probabilistes. Les différentes grandeurs intervenant dans le calcul ont un caractère aléatoire. Supposant connues les lois de probabilité des actions, des propriétés des matériaux et des caractéristiques géométriques de la structure, on est théoriquement en mesure de déterminer la probabilité de dépassement d'un état-limite donné que l'on compare à la valeur jugée acceptable. Mais dans la pratique, les choses ne sont pas aussi simples. On ne connaît généralement pas les lois de probabilité des différents paramètres, on connaît encore moins les corrélations qui les relient et il n'est pas aisé de définir la probabilité acceptable de dépassement d'un état-limite. Par ailleurs, à supposer que l'on surmonte ces difficultés, l'outil probabiliste peut être bien adapté à la vérification d'une structure dont tous les détails sont connus, il ne fournit pas pour autant de critère de dimensionnement facilement utilisable.

Pour contourner cet obstacle, on a recours au semi-probabilisme. Pour les actions et les propriétés des matériaux, on définit des valeurs caractéristiques, considérées comme ayant une probabilité donnée d'être dépassée dans le sens défavorable. À partir de ces valeurs, on forme des combinaisons d'actions (ensemble d'actions à considérer simultanément pour le dimensionnement) dans lesquelles les valeurs caractéristiques sont affectées de coefficients de prise en compte d'autant plus importants qu'on souhaite réduire la probabilité d'atteinte des effets des combinaisons en cause (ces coefficients sont donc plus grands dans les combinaisons aux ELU que dans les combinaisons aux ELS). Les effets des actions peuvent être des efforts internes, des déformations, des contraintes, des déplacements... Les effets de calcul ainsi obtenus doivent être comparés aux capacités de résistance de la structure, elles-mêmes estimées à partir, non pas des valeurs caractéristiques des propriétés mécaniques des matériaux, mais à partir de leurs valeurs de calcul, obtenues en divisant les premières par des coefficients partiels d'autant plus importants qu'on vise une fiabilité plus grande. Les règles de vérification prennent la forme : $E_d \leq R_d$ pour les justifications vis-à-vis des états-limites ultimes et $E_d \leq C_d$ pour les justifications vis-à-vis des états-limites de service. E_d est la valeur de calcul de l'effet des actions, déterminée à partir de la combinaison appropriée, R_d est la valeur de calcul de la résistance correspondante et C_d la valeur de calcul du critère d'aptitude au service considéré. Vis-à-vis des états-limites de service, on considère que les effets des actions doivent être réversibles et donc que les matériaux restent élastiques. Vis-à-vis des états-limites ultimes, au contraire, on accepte qu'ils entrent dans leur domaine de fonctionnement plastique. En théorie, les coefficients partiels devraient être déterminés sur des bases probabilistes. Dans la pratique, faute de données suffisantes, on a retenu des valeurs qui permettent de retrouver les dimensionnements issus des pratiques antérieures. Les principes du calcul aux états-limites ont été exposés pour la première fois en 1926 par un ingénieur allemand, Max Meyer, et ont été appliqués de manière pratique en Union Soviétique après la Seconde Guerre mondiale. Mais c'est sous l'impulsion des associations internationales, CEB et fib, qu'ils vont être formalisés et diffusés très largement pour servir de base à la rédaction des codes de calcul.



8
© SETRA - GÉRARD FORQUET

8- Viaduc sur la Durance, liaison Est-Ouest (LEO) d'Avignon. Pont mixte, mis en service en 2009, justifié avec les Eurocodes 2, 3 et 4.

8- Viaduct over the Durance, Avignon East-West link. Composite bridge, commissioned in 2009, verified with Eurocodes 2, 3 and 4.

LES RÈGLES FRANÇAISES

Les calculs aux états-limites ont été introduits en 1971 dans la réglementation française par les directives communes relatives au calcul des constructions (DC 71), sur lesquelles devait s'appuyer la rédaction des futurs règlements de calcul. Deux règlements seront basés sur ces directives, le règlement de calcul des ponts et ouvrages métalliques (fascicule 61 titre V) et l'instruction provisoire n°2 sur l'emploi du béton précontraint, publiée en 1973. Outre les calculs aux états-limites, l'IP 2 apporte de nombreuses innovations : elle traite de la précontrainte par prétension, exclue du champ d'application de l'IP 1, elle autorise - tout en restant d'une grande prudence et se maintenant très en retrait des recommandations de l'ASP - la précontrainte partielle et donc le fonctionnement en section fissurée avec participation des armatures passives et elle propose des règles détaillées pour la diffusion de la précontrainte et la justification des

zones d'about. Cependant, compte tenu des bouleversements qu'elle apporte et des difficultés d'application que l'on peut craindre, elle n'abroge pas l'IP 1, et les deux règlements vont coexister. Si les utilisateurs ont le choix entre deux textes, l'un simple et bien connu, l'autre beaucoup plus touffu et apportant des concepts nouveaux, il est peu probable qu'ils s'orientent vers la deuxième voie. De fait, ce texte sera jugé trop compliqué par les ingénieurs et ne sera pratiquement pas appliqué, sauf pour les ouvrages à poutres précontraintes par armatures adhérentes.

Les directives communes sont remises à jour en 1979 et le premier règlement français de béton armé aux états-limites est publié l'année suivante sous le nom de BAEL 80. Ces deux textes s'inspirent largement des travaux internationaux et plus particulièrement des deux premiers volumes - Volume I, règles communes et volume II, Code-modèle CEB/fip - du Système international de réglementation technique unifiée des structures. Le BAEL est divisé en deux parties, la première traite des règles générales, applicables à toutes les constructions, et la seconde des règles applicables aux bâtiments courants, reprenant et adaptant le chapitre correspondant des règles CCBA 68 (y compris la méthode Caquot). Le BAEL est remis à jour en 1983, en même temps qu'est publié le BPEL 83 - règles de conception et de calcul des ouvrages et constructions en béton précontraint suivant la méthode des états-limites. Pour permettre aux utilisateurs de se familiariser progressivement avec les nouvelles règles, une période de transition est prévue. Les anciennes règles relatives au béton armé seront abrogées le 31 décembre 1984 et celles relatives au béton précontraint un an plus tard.

En béton armé, la principale rupture

avec les habitudes de calcul antérieures concerne les justifications en flexion vis-à-vis des états-limites ultimes, avec l'apparition de la méthode des trois pivots. En béton précontraint, les nouveautés portent aussi sur les vérifications vis-à-vis des ELS : prise en compte des valeurs caractéristiques de la précontrainte (calcul en « fourchette ») et possibilité de recours à la précontrainte partielle de manière moins restrictive qu'avec l'IP 2. Le texte du BPEL concrétise de plus le souci de simplification, de clarté et de pédagogie qui n'a cessé d'animer ses rédacteurs. Il est aussi bien adapté à l'évolution des outils de calcul informatique.

On trouve notamment en annexe des indications sur les méthodes de calcul des effets à long terme (fluage et retrait du béton, relaxation des armatures de précontrainte) qui ne sont utilisables en pratique qu'au moyen de l'ordinateur. Le BAEL et le BPEL, qui existent en version DTU et en version fascicule du CCTG, ont été remis à jour en 1991 puis en 1999, principalement pour étendre leur domaine d'emploi à des bétons dont la résistance est de plus en plus élevée. La résistance maximale de calcul est ainsi passée de 40 MPa en 1983 à 60 MPa en 1991 puis 80 MPa en 1999. À partir du milieu des années 1990, le BAEL et le BPEL coexistent avec l'Eurocode 2. La version DTU a été retirée en 2010, les fascicules du CCTG sont restés en vigueur jusqu'en mai 2012.

LA RÉGLEMENTATION EUROPÉENNE - L'EUROCODE 2

Le programme des Eurocodes - règles de conception et de calcul des constructions - participe à l'élimination des obstacles aux échanges et à l'harmonisation des spécifications techniques entre les pays membres. Les premiers travaux de rédaction sont lancés en 1976, sous le pilotage de la Commission et les premiers textes, dont l'Eurocode 2 (béton) sont disponibles dès le début des années 1980. Ils ont été abondamment commentés et ont même donné lieu à des actions de formation, mais n'ont jamais été appliqués à des ouvrages réels. En 1989, à la suite de la publication de la directive sur les produits de construction (DPC), le programme Eurocode est transféré au Comité européen de normalisation (CEN) : les Eurocodes seront des normes européennes. Commence alors l'élaboration des versions ENV (normes provisoires) dont la publication s'échelonne de 1991 à 1998.



Devant la difficulté à trouver un accord sur l'ensemble des textes, de nombreux paramètres sont indiqués sous forme de valeurs encadrées, susceptibles d'être modifiées au niveau national. Pendant la phase provisoire, qui devait durer trois ans, chaque Eurocode est complété par un document d'application nationale (DAN) qui permet le raccordement avec les règles nationales et modifie le cas échéant les valeurs encadrées. Le délai de trois ans est quelque peu optimiste et la conversion en norme définitive (EN), commencée en 1998, ne s'achève qu'en 2005. Les Eurocodes et leurs annexes nationales sont alors transcrits en normes nationales, tâche qui en France prend fin en 2008. Les paramètres que le texte européen se contente de recommander et qu'il est permis de modifier au niveau national sont beaucoup moins nombreux qu'au stade ENV et les annexes nationales ont un contenu moins libre que les DAN de la période provisoire. On ne peut notamment s'écarter des valeurs recommandées que moyennant justifications. Après une période de coexistence, le retrait des règles nationales contradictoires avec les Eurocodes a lieu à partir de 2010. L'Eurocode 2 (EC2), intitulé « calcul des structures en béton », comporte quatre parties qui sont autant de normes :

- **EN 1992-1-1, EC2 partie 1-1** : règles générales et règles pour les bâtiments ;
- **EN 1992-1-2, EC2 partie 1-2** : règles générales - calcul du comportement au feu ;

→ **EN 1992-2, EC2 partie 2** :

ponts en béton, calcul et dispositions constructives ;

→ **EN 1992-3, EC2 partie 3** :

silos et réservoirs.

Les parties 2 et 3 ne comportent que les modifications ou les compléments à la partie 1-1 rendus nécessaires par le caractère spécifique des ouvrages auxquelles elles s'appliquent.

À la différence des règles françaises, l'Eurocode 2 couvre le béton armé et le béton précontraint, il comporte même un chapitre sur le béton non armé ou faiblement armé. Il y a de ce fait une plus grande homogénéité des règles, que l'on utilise ou non la précontrainte. Avec la publication du premier BPEL, une certaine harmonisation s'est opérée entre les textes français, par exemple pour les propriétés des matériaux. Mais chacun des textes reste l'héritier des générations qui l'ont précédé et il existe de nombreuses différences entre BAEL et BPEL, dont une différence majeure qui reflète la différence de philosophie de conception des ouvrages. Très schématiquement, en béton armé, on dimensionne vis-à-vis des états-limites de résistance et on vérifie les états-limites de service. En béton précontraint c'est exactement l'inverse : le nombre et le tracé des armatures de précontrainte sont déterminés pour satisfaire aux conditions des états-limites de service, les vérifications à l'état-limite ultime de résistance viennent en complément pour déterminer les sections d'armatures passives éventuellement nécessaires. Cela se traduit

9 & 10- Deuxième pont du Cadre Noir, à Saumur. Pont en béton précontraint construit par encorbellements successifs. Justifié avec l'Eurocode 2. Mis en service en 2010.

9 & 10- Second Cadre Noir Bridge, in Saumur. Prestressed concrete bridge built by successive cantilevering. Verified with Eurocode 2. Commissioned in 2010.

dans la structure des règlements : le BAEL traite les ELU avant les ELS et le BPEL fait l'inverse. Mais au-delà de cette différence d'organisation des documents, existent un certain nombre de divergences difficilement justifiables sur le contenu des règles, notamment celles qui traitent de l'effort tranchant : calcul des contraintes, inclinaison des bielles, contribution des membrures comprimées, etc. Le fait d'avoir un document unique évite ce type de discordances. L'Eurocode 2 introduit par ailleurs un certain nombre de nouveautés par

rapport aux règles françaises, parmi lesquelles :

- Prise en compte détaillée des objectifs de durabilité dans la détermination des enrobages et dans les justifications aux ELS.
 - Règles de calcul et de justifications pour les modèles à bielles et tirants.
 - Justifications à l'effort tranchant par la méthode des bielles d'inclinaison variable.
 - Règles de justification à la fatigue.
- Bien que les principes de base soient inchangés par rapport aux règles françaises, l'application détaillée de l'Eurocode 2 modifie assez profondément les habitudes et les usages des ingénieurs français. Le seul aspect sur lequel il n'y a pas de bouleversement est le calcul en flexion, qu'il s'agisse des vérifications à l'ELU de résistance ou du calcul des contraintes normales à l'ELS.

Les retours d'expérience de l'application des Eurocodes sont encore limités. Cependant, le processus de révision de l'ensemble des textes est engagé. La publication de la seconde génération d'Eurocodes est envisagée pour l'année 2020, objectif plutôt optimiste si l'on considère le temps qui a été nécessaire pour parvenir à publier les textes actuels. En ce qui concerne l'Eurocode 2, les utilisateurs souhaitent un minimum de stabilité, la révision du texte doit répondre aux besoins identifiés d'évolution mais ne doit en aucun cas constituer une révolution. Les révisions auront donc pour principaux objectifs : rendre l'utilisation plus facile, en améliorant la clarté du texte

et en facilitant la navigation à travers les Eurocodes ; corriger ou compléter les règles ne donnant pas entière satisfaction ; intégrer l'évolution des connaissances et des techniques ; intégrer de nouveaux concepts ou modes de pensée, comme le développement durable ; étendre le domaine d'application lorsqu'un besoin aura été identifié. On vise aussi la réduction du nombre de paramètres déterminés au niveau national, voire leur suppression. Pour l'Eurocode 2, il est envisagé, dans un souci de simplification, de ne conserver qu'une partie générale et une partie sur le calcul au feu, partant du constat que les parties 2 (ponts) et 3 (silos et réservoirs) ne comportaient que très peu de règles spécifiques au type de structure concerné. Du point de vue technique, plusieurs sujets doivent être améliorés : l'effort tranchant (il n'y a actuellement pas de distinction entre dalles et poutres), le poinçonnement, la maîtrise de la fissuration, notamment pour les pièces massives, les procédures de justification à la fatigue, la prise en compte des effets différés (fluage, retrait, relaxation), etc. Il n'est pas question pour ce faire de lancer des actions de recherche : on s'appuiera sur des résultats disponibles et validés ou sur des théories largement admises, on se basera en priorité sur le nouveau code modèle de la fib. Le domaine d'application pourrait aussi être étendu aux structures existantes, à l'utilisation de composites pour le renforcement des structures en béton ou en tant qu'armatures, aux bétons de fibre, au béton projeté, aux armatures en acier inoxydable, etc. La consistance du travail à entreprendre est en cours de discussion et la validation du programme devra tenir compte des moyens humains et financiers mobilisables.

CONCLUSION

La codification des règles de calcul répond à plusieurs objectifs : concilier la sécurité et l'économie, contribuer à répandre les bonnes pratiques sans nuire à l'innovation. Historiquement, l'évolution des techniques précède la réglementation. Et c'est pour encadrer et harmoniser les pratiques, autant que pour favoriser le développement de techniques prometteuses, que les textes réglementaires ont été élaborés. Ces préoccupations sont omniprésentes dans les règles françaises jusqu'aux années 1960 : les textes sont plus des guides que des règles absolues et une grande liberté est laissée à l'ingénieur. Depuis, on constate plusieurs évolutions parallèles : les textes sont de plus en plus volumineux et complexes, les prescriptions prennent un caractère de plus en plus obligatoire et le délai est de plus en plus court entre l'apparition d'une technique et la publication des règles correspondantes.

Les Eurocodes peuvent sembler plus complexes et plus touffus que les règles françaises qu'ils remplacent.

Cela n'est pas complètement faux et certaines clauses sont inutilement compliquées. Mais, en contrepartie, ils offrent un ensemble de règles cohérentes applicables à tous les domaines de la construction, ce qui n'a jamais été le cas. Et si la navigation au sein des règles françaises peut paraître plus aisée, c'est surtout parce que nous y sommes habitués. Le BPEL, par exemple, fait intervenir les valeurs caractéristiques des actions, mais les règles de charge des ponts routiers, antérieures à l'arrivée des états-limites, définissent des valeurs nominales. Il faut, pour passer aux valeurs caractéristiques, multiplier celles-ci par un coefficient que l'on trouve dans l'une des annexes du BPEL, et qui est différent pour l'ELS et l'ELU. Et que dire du gradient thermique, qu'il faut aller chercher dans la circulaire d'accompagnement ! Les Eurocodes ne guident pas l'utilisateur pas à pas comme les règles françaises, mais ils établissent une relation plus claire entre les phénomènes que l'on veut éviter et les règles qu'ils proposent, ce qui permet

en théorie de ne pas être démuné si l'on se trouve en dehors du domaine d'application de la règle. En cela, les Eurocodes sont plus ouverts que nos anciennes règles et valorisent mieux le jugement de l'ingénieur. La France a honnêtement joué le jeu des Eurocodes et a entrepris un effort sans précédent pour les diffuser et en faciliter l'emploi : formation initiale et continue, guides d'emploi, etc. Dans plusieurs domaines, dont celui des ponts, on dispose aujourd'hui de plus de dix ans d'expérience de leur application : pont du Lion d'Angers (figures 3 et 4), viaduc de Pont-Salomon (figures 5 et 6), viaduc de Compiègne (figures 1 et 7), viaduc sur la Durance (figure 8), pont du Cadre Noir (figures 9 & 10).

Pour conclure, deux remarques qui permettent de ne pas oublier que l'application des codes n'est qu'une petite partie du travail de l'ingénieur :

→ Les règles de conception et de calcul sont mises au point à partir de l'observation du comportement réel des structures, en laboratoire ou sur le terrain. Elles permettent d'assurer un niveau homogène de sécurité et de durabilité à la plupart des constructions courantes, mais elles ne s'appliquent que de manière imparfaite aux ouvrages innovants ou exceptionnels.

→ La conception générale d'une structure n'est pas une affaire de code de calcul mais de réflexion sur le comportement mécanique de l'ouvrage et sur la circulation des forces. Le strict respect des clauses d'un code ne permet pas de compenser les défauts d'une mauvaise conception. Bien plus, comme l'a souvent répété et écrit Roger Lacroix : « La conformité aux prescriptions d'un code n'est une condition ni nécessaire ni suffisante pour que soient assurées la stabilité et la durabilité d'une construction » ! □



10
© SETRA - GÉRARD FORQUET

ABSTRACT

REGULATIONS AND STANDARDISATION, THE RELEVANT AUTHORITIES

EMMANUEL BOUCHON, SETRA - MICHEL MOUSSARD, ARCADIS

Design and calculation codes aim to reconcile safety and economy, without curbing progress, while guiding the engineer's approach. From the 1906 codes, published in the form of instructions by a minister to his departments, through to the Eurocodes, European standards to which the entire international civil engineering community contributed, this article recounts the changes in the codes and in the ideas underpinning them. It emphasises the major role played by international organisations in the formalisation and dissemination of the theories on which all modern design codes are based. □

REGLAMENTACIÓN Y NORMALIZACIÓN, INSTANCIAS IMPLICADAS

EMMANUEL BOUCHON, SETRA - MICHEL MOUSSARD, ARCADIS

Las reglas de diseño y de cálculo tienen como objetivo conciliar seguridad y ahorro, sin frenar el progreso, al mismo tiempo que guían el procedimiento del ingeniero. Desde las reglas de 1906, publicadas en forma de instrucciones de un ministro a sus servicios, hasta los Eurocódigos, normas europeas a las que ha contribuido el conjunto de la comunidad internacional de la ingeniería civil, este artículo relata la evolución de las reglas y de las ideas subyacentes. Hace hincapié en el importante papel que desempeñan las asociaciones internacionales en la formalización y difusión de las teorías en las que se basan todos los códigos modernos de cálculo. □



**1- Réflexion,
Immeuble de
Grande Hauteur
à La Défense.**

**1- Reflection,
high-rise
building in
the Défense
business area
near Paris.**

© EFB / L. IZORET

LES NOUVEAUX BÉTONS ET LA RECHERCHE

AUTEURS : FRANÇOIS CUSSIGH, EXPERT BÉTON VINCI CONSTRUCTION FRANCE - LAURENT IZORET, DIRECTEUR DE LA FONDATION ÉCOLE FRANÇAISE DU BÉTON - JEAN-MICHEL TORRENTI, DIRECTEUR ADJOINT RECHERCHE ET DÉVELOPPEMENT DU DÉPARTEMENT MATÉRIAUX ET STRUCTURES DE L'IFSTTAR

DEPUIS SA MISE AU POINT, ET AU FUR ET À MESURE DE L'INTÉGRATION DES CONNAISSANCES SCIENTIFIQUES, LE BÉTON EST EN PERPÉTUELLE ÉVOLUTION TANT SUR LE PLAN THÉORIQUE QU'EXPÉRIMENTAL. APRÈS UNE LONGUE ÉTAPE D'OPTIMISATION DES SEULES RÉSISTANCES MÉCANIQUES, LES MÉTHODES DE FORMULATION DES BÉTONS ONT INTÉGRÉ LES CARACTÉRISTIQUES DE RHÉOLOGIE, D'ASPECTS DE PAREMENTS, DE DURABILITÉ EN ENVIRONNEMENTS VARIÉS, ÉVENTUELLEMENT COMBINÉS ET PLUS RÉCEMMENT LES PROPRIÉTÉS TECHNIQUES LIÉES AU DÉVELOPPEMENT DURABLE. AINSI, LA PERFORMANCE DES BÉTONS EST DEVENUE UNE NOTION OBJECTIVE MULTICRITÈRES QUI S'EFFORCE DE DEVENIR QUANTITATIVE ET CET ARTICLE NOUS GUIDE DANS L'HISTOIRE, DÉCIDÉMENT CONTEMPORAINE, DE LA RECHERCHE SUR LE BÉTON ET DRESSE LES PERSPECTIVES DE DÉVELOPPEMENT.

INTRODUCTION

Depuis sa mise au point, le béton est en perpétuelle évolution tant sur le plan théorique qu'expérimental, au fur et à mesure de l'intégration des connaissances scientifiques dans ses formulations, servant ainsi de terreau à la créativité des ingénieurs comme des architectes. Cette évolution permanente n'en finit pas de nous étonner...

Les bétons demain seront multifonctionnels, plus maniables, plus écologiques, plus durables, plus recyclables, plus beaux, plus réguliers, plus robustes, ...

Une fois les premières bases de la formulation posées, les travaux menés sur l'ouvrabilité des bétons ont permis la mise au point de bétons dits auto-plaçants (BAP), bétons très fluides, homogènes et stables destinés à une mise en œuvre facile, sans faire appel à la vibration, ce qui présente de nombreux avantages sur le chantier, tant au niveau de la sécurité que de la diminution des nuisances sonores et des conditions de travail sur chantier.

L'affinement des travaux de formulation appliquant les principes fondamentaux de composition granululaire en direction des particules de petite et très petite taille, en association avec les avancées de la technologie des adjuvants, a donné naissance aux bétons à haute

performance (BHP) et aux bétons fibrés à hautes performances (BFUP).

Avec l'émergence du développement durable, les deux composantes principales de la Recherche ont recentré leurs préoccupations sur des thématiques complémentaires, à savoir :

→ Une recherche technologique et industrielle qui s'articule autour de plusieurs axes majeurs qui sont la prévision de la durabilité avec l'approche dite performantielle, l'efficacité énergétique dans la perspective de mieux maîtriser les déperditions thermiques dans les bâtiments, l'impact environnemental avec les travaux sur la recyclabilité totale du béton, les liants à faible impact environnemental, l'enjeu sanitaire à travers les préoccupations sur la lixiviation des molécules organiques et la qualité de l'eau potable et la qualification des bétons vis-à-vis de la qualité de l'air intérieur, le tout sur fond de réduction des coûts de la construction.

→ Une recherche scientifique fondamentale qui se focalise d'une part sur les études multi-échelles établissant des ponts entre la structure à l'échelle nanométrique et le niveau macroscopique, depuis la dynamique moléculaire modélisant la matière à l'échelle nanométrique jusqu'aux propriétés au niveau macroscopique pour développer des structures durables. Il est impor-

tant de noter que la caractérisation de la matière à l'échelle nanométrique ne signifie absolument pas qu'il puisse y avoir des nanoparticules physiques susceptibles d'être extraites du matériau. Par ailleurs, les études des interactions entre la matrice cimentaire et les adjuvants précisent les interdépendances entre les minéraux et les molécules organiques qui forment de véritables hybrides dont les propriétés allient légèreté, résistance et fonctionnalités spécifiques ouvrant sur les matériaux des structures de demain.

Après avoir présenté la gamme des bétons modernes, nous développons spécifiquement dans ce chapitre les aspects de recherche technologique et industrielle.

LES BÉTONS MODERNES BÉTONS À HAUTES ET TRÈS HAUTES PERFORMANCES

Les Bétons à Hautes et Très Hautes Performances (BHP & BTHP) se sont développés en France à la fin des années 1980 au travers d'ouvrages de prestige comme le Pont de l'Île de Ré, le Pont de Normandie ou la Grande Arche de La Défense.

Leur formulation est basée sur une importante diminution du rapport eau/liant (E/L) grâce à l'emploi de superplastifiants fortement dosés tout en

conservant une consistance fluide. Cette dernière est d'ailleurs le plus souvent nécessaire pour une ouvrabilité satisfaisante étant donné l'augmentation sensible de viscosité liée au faible E/L (en général entre 0,30 et 0,40).

L'utilisation d'ultrafines telles les fumées de silice peut contribuer à l'obtention de BTHP, avec des résistances caractéristiques en compression comprises entre 50 et 80 MPa. Même s'il est d'usage de traduire la performance des BHP et BTHP par leur niveau de résistance en compression, il est bien établi que l'abaissement du rapport E/L permet également d'améliorer d'autres propriétés et en particulier la durabilité. C'est pourquoi ces bétons sont aujourd'hui systématiquement employés sur les grands ouvrages de génie civil en milieu marin (plateformes offshore, extension de port, barges en béton, viaducs, ...) : ils possèdent une résistance à la pénétration des chlorures qui autorise des durées de vie supérieures à 100 ans sans entretien particulier.

Les BHP permettent également de concevoir des structures avec des portées plus importantes, un plus grand élanement ou de réduire l'encombrement des structures.

On les utilise parfois pour des bâtiments fortement sollicités comme des tours de grande hauteur (figure 1).



2a

© IFSTTAR / JM TORRENTI

Ils sont largement utilisés dans le domaine de la préfabrication où sont exploitées leurs très bonnes résistances à court terme. Ainsi, la préfabrication de voussoirs de tunnel se fait souvent en usine avec un étuvage léger (environ 40°C) permettant d'atteindre 15 MPa à 6h (et donc de démouler les voussoirs à cette échéance). Pour du béton coulé en place sans étuvage autre que l'auto-étuvage lié à l'exothermie d'hydratation du béton, on peut atteindre 20 MPa à 13h d'âge équivalent à 20°C (voussoirs du Pont de Normandie). Ceci permet d'accélérer les cadences de production tout en assurant la sécurité du chantier lors des opérations de décoffrage ou mise en tension des opérations de précontrainte.

BÉTONS AUTO-PLAÇANTS

Les bétons auto-plaçants (BAP) constituent la dernière évolution des bétons utilisés pour la construction d'ouvrages de bâtiment et de génie civil. Leur très grande fluidité à l'état frais leur procure de multiples avantages en termes de facilité de mise en œuvre et d'impact socio-économique, avec une réduction significative de la pénibilité du travail des ouvriers en charge du bétonnage et une suppression du bruit généré par les habituels appareils de vibration utilisés pour compacter les bétons de fluidité ordinaire (les BAP ne se vibrent pas). En termes de qualité de béton mise en œuvre (résistance, durabilité, esthétique), leur potentiel est également supérieur à celui des bétons classiques qui est fortement dépendant du savoir-

faire du personnel d'exécution. C'est d'ailleurs pour résoudre des problèmes de qualité de mise en œuvre que les BAP ont été développés au Japon à la fin des années 1980.

Les BAP présentent des contraintes de mise en œuvre largement limitées par rapport aux bétons ordinaires vibrés. On rappelle que dans le cas traditionnel des bétons vibrés la mise en œuvre doit se faire par couches d'au plus 50 cm (proportionnée à la hauteur du corps des aiguilles vibrantes), avec une hauteur de chute inférieure à 1,5 m et en évitant de déplacer le béton par effet de la vibration sur une distance de plus de 2 m. Pour les BAP, on admet des hauteurs de chute jusqu'à 5 m (le béton est beaucoup plus résistant à la ségrégation) et des déplacements horizontaux dans le coffrage de 5 à 10 m (suivant la résistance à la ségrégation du BAP et la densité de ferrailage). Ceci permet une mise en œuvre beaucoup plus rapide, qui est toutefois en général limitée par la vitesse maximale de montée dans le coffrage (pour des questions d'évacuation des bulles d'air qui s'échappent par gravité lors de la mise en œuvre du BAP ou de limitation de la poussée exercée sur les coffrages). Toutefois, les BAP ne tolèrent aucun manque de soin dans l'étanchéité des coffrages mais l'obtention de parements homogènes est facilitée par leur cohésion qui évite les ségrégations localisées (sable délavé, auréoles sombres, ...).

De nombreux ouvrages, très diversifiés, ont été réalisés en BAP en France depuis la fin des années 1990.

2a & 2b- Gare de Bordeaux - Résille BFUP.

2a & 2b- Bordeaux Station - UHPFRC lattice.

À l'heure actuelle, le BAP est largement utilisé dans le domaine de la préfabrication (ils sont moins agressifs pour les outils coffrants) et son utilisation progresse dans le domaine du coulé en place (horizontaux de petits bâtiments, béton architectonique, ouvrages exigus ou très ferrailés, ...). Il a été utilisé, en particulier sur certains grands chantiers à l'étranger, pour des ouvrages majeurs de génie civil. Ceci démontre que c'est un matériau à potentiel élevé et qui est aujourd'hui bien maîtrisable (et bien maîtrisé par des entreprises spécialisées de fabrication et de mise en œuvre).

BÉTONS FIBRÉS À ULTRA HAUTES PERFORMANCES

Les Bétons Fibrés à Ultra Hautes Performances (BFUP) sont des matériaux à matrice cimentaire de résistance caractéristique à la compression conventionnellement comprise entre 150 et 250 MPa. Ces matériaux contiennent des fibres (métalliques ou synthétiques) de façon à obtenir un comportement ductile en traction et à éviter les ruptures explosives sous forte compression. Les rapports E/L des for-

mulations de BFUP sont très bas (inférieurs à 0,20) grâce à l'utilisation de forts dosages de superplastifiant et de ciment. À l'état frais, le BFUP est très visqueux mais peut être très fluide voire auto-plaçant. À l'état durci, il développe un fort retrait initial qui limite fortement les possibilités de coulage en place : la plupart du temps, les éléments en BFUP sont préfabriqués. Leur granulométrie très fine (absence de gravillons et utilisation de sables fins) et leur performance mécanique en traction permet la réalisation de pièces très minces (de l'ordre du cm). Leur richesse en éléments fins et leur grande fluidité leur confère des propriétés de moulage exceptionnelles permettant de reproduire en parement des motifs texturés (figures 2a et 2b).

Pour dimensionner des ouvrages en BFUP, on s'appuie aujourd'hui sur les Recommandations éditées par l'AFGC en évaluant la dispersion des comportements en traction (liée à l'anisotropie de répartition des fibres à partir d'éprouvettes prélevées sur des éléments témoins. Les BFUP n'ont pas encore trouvé toute leur place dans le domaine de la construction mais possèdent un potentiel énorme notamment parce qu'ils permettent de nouvelles formes architecturales mais aussi dans le domaine de la durabilité puisqu'ils sont extrêmement compacts (porosité capillaire réduite au maximum, il ne reste principalement que la porosité des hydrates) et donc très résistants à la pénétration d'agents agressifs (figure 3).

LA MESURE DE LA PERFORMANCE DES BÉTONS

DURABILITÉ

De nombreux développements d'essais, indispensables pour la mise au point de bétons à durabilité améliorée, ont été effectués récemment ou sont encore en cours.

Ainsi, les mesures de porosité à l'eau, perméabilité au gaz et migration des chlorures ont été normalisées en France. Un essai de caractérisation de la résistance aux eaux faiblement minéralisées et aux acides, appelé « essai de lixiviation à pH constant », est en cours de normalisation.

La thèse de S. Messad [MESSAD, 2009], financée par la FNTP, a permis de proposer un essai accéléré d'attaque sulfatique externe des bétons. Cet essai est en cours d'examen par la commission de normalisation ad-hoc. Enfin, le LCPC a également développé un essai accéléré d'attaque sulfatique interne.

Par ailleurs, des travaux de thèse sont en cours concernant la résistance des bétons à l'action des sels de déverglaçage (Qjang et Bouteille, IFSTTAR), la détermination du seuil critique en chlorures correspondant à la dépassement des armatures (V. Garcia, FNTP) et la modélisation des phénomènes de carbonatation et de pénétration des chlorures (M. Thiery et V. Baroghel-Bouny, IFSTTAR).

Les développements actuels concernent l'approche performantielle de la durabilité des bétons, soit par approche directe soit par approche comparative. Le Projet National PerfDuB vis à synthétiser les démarches et à en préciser les domaines d'emploi et l'applicabilité.

RHÉOLOGIE

Les bétons modernes sont caractérisés par l'emploi d'adjuvants fortement dosés qui modifient sensiblement la rhéologie par rapport aux bétons traditionnels. En particulier, la traditionnelle mesure de consistance (affaissement au cône d'Abrams) n'est plus suffisante pour décrire les propriétés d'écoulement de ces matériaux à l'état frais. C'est pourquoi des outils permettant de quantifier la viscosité (rhéomètres ou essais technologiques) ont été développés. En outre, les capacités de structuration par des liaisons réversibles (effet de gélification au repos, comportement thixotrope) des bétons modernes sont à prendre en compte pour maîtriser leur mise en œuvre. La thixotropie joue un rôle déterminant pour ce qui concerne



la pression exercée par les BAP lors de bétonnages en grande hauteur [ROUSSEL, 2011] ou encore le délai maximum admissible entre couches successives.

SENSIBILITÉ À LA FISSURATION

Le projet national Ceos.fr, qui est entré dans sa dernière phase, s'est intéressé à la question de la fissuration de pièces massives sous les angles d'une recherche expérimentale à l'échelle 1, de la modélisation et des règlements de calcul. En effet, ces derniers ne sont pas actuellement calibrés pour des structures massives ce qui peut conduire, lors du dimensionnement, à des pourcentages d'armatures très importants qui entraînent eux-mêmes des difficultés de bétonnage.

Les expériences réalisées (retrait gêné, flexion de poutre, cisaillement d'un voile) ont permis de caler les modèles qui, à leur tour, permettront de simuler le comportement de structures sous différentes configurations (taux de ferrailage, enrobage notamment). Ces expériences numériques doivent enfin permettre d'élaborer des règles de calcul adaptées.

D'autre part, la raréfaction de la ressource en granulats naturels a conduit à autoriser dans les bétons de structure l'emploi de granulats, naturels ou recyclés, présentant des propriétés dégradées par rapport aux exigences traditionnelles. Ceci concerne en particulier la porosité (quantifiée par l'essai d'absorption d'eau). Les travaux de thèse de R. Cortas [CORTAS, 2012]

pour le compte de la FNTP ont permis de mettre en évidence les différences de comportement des bétons vis-à-vis du retrait et de la résistance en traction au jeune âge du fait de l'incorporation de granulats à porosité élevée et en fonction de leur état de saturation en eau.

BÉTON ET HAUTES TEMPÉRATURES

Le comportement du béton face aux élévations de températures est un champ d'investigation qui concerne la stabilité des mortiers et coulis pour puits de forages pétroliers ou géothermiques, ou encore le stockage profond des déchets, ainsi que la stabilité des bétons aux incendies.

Pour les températures inférieures à 400°C associées à un faible taux de montée en température, il s'agit surtout de caractériser l'effet de la déshydratation des silicates de calcium hydratés et de relier l'évolution de ces hydrates aux propriétés macroscopiques comme la porosité, l'endommagement et les propriétés de transfert associées [CARATINI, 2012].

Le cas de la résistance au feu des bétons est tout autre ; les montées en températures peuvent être extrêmement rapides et le pic de température peut atteindre 1100°C selon le scénario considéré (feu ISO, ...). Ces situations concernent surtout les bétons à hautes et très hautes résistances mécaniques (BTHP et BFUP) qui sont le siège de processus thermiques, hydriques et mécaniques couplés dont

les effets varient selon le profil de feu, la nature des matériaux, le type de béton, sa teneur en eau et sa situation structurelle. Les recherches en cours s'intéressent non seulement à la durabilité du béton en situation d'incendie mais également à sa résistance résiduelle post-feu, ainsi que celle des solutions de réparation.

L'une des solutions efficaces de protection contre l'écaillage réside dans la prise en compte lors de la formulation du béton, d'ajout de fibres de polypropylène. Le comportement du polypropylène en fonction de ses caractéristiques physico-chimiques est en phase de modélisation. Celui-ci en fondant lors de la montée en température génère une porosité macroscopique organisé en réseau plus ou moins connecté et favorable à la circulation de la vapeur d'eau sous pression (Thèse TRAN, U. Cergy).

LA MAÎTRISE DE LA FABRICATION ET DE LA MISE EN ŒUVRE MALAXAGE DES BÉTONS, CONTRÔLE DE LA TENEUR EN EAU

Avant l'apparition des bétons adjuvants, la recherche sur le malaxage était principalement dirigée vers l'étude de l'évolution de l'homogénéité de la composition et des propriétés d'usage après le malaxage.

Les travaux de D. Chopin [CHOPIN, 2001], le Projet National B@P, puis les travaux du projet européen INNOCONCRETE [CAZACLIU, 2006] fournissent des informations sur la différence de comportement de malaxeurs suivant leur système d'agitation, leur taille ou leur protocole d'incorporation des constituants.

La compréhension de phénomènes en jeu a nécessité un nouveau regard sur la transformation de la microstructure du produit pendant le malaxage [CAZACLIU, 2009], [COLLET, 2010].

Outre sa fonction d'homogénéisation et de structuration, le malaxeur est un outil privilégié pour suivre en ligne les propriétés du béton.

Aux mesures plus classiques d'humidité et de puissance absorbée, on rajoute aujourd'hui des mesures de consistance à l'aide de capteurs spécifiques, qui peuvent permettre de mesurer en ligne la rhéologie d'un béton autoplaçant.

Ces mesures en ligne ne doivent pas faire oublier l'importance des contrôles sur les constituants du béton, comme la mesure d'humidité des granulats. ▷

La principale faiblesse de cette mesure est un calibrage déficitaire, qui peut s'améliorer soit en proposant une évolution des capteurs (projet SIMH - HYDROSTOP/IFSTTAR), soit en coordonnant l'ensemble des mesures de la centrale, comme les nouvelles technologies de pilotage et supervision le permettent [LE, 2007]. Nous ne sommes sans doute qu'au début de cette démarche intégratrice qui débouchera sur une nouvelle génération de systèmes de supervision/pilotage pour la centrale à béton.

VIBRATION DES BÉTONS

La thèse de G. Grampeix (FNTP-IFSTTAR), porte sur la vibration des bétons modernes. Actuellement, les recommandations techniques traditionnelles sont basées sur des résultats empiriques et théoriques ayant eu lieu au cours de la moitié du siècle dernier. Cependant, l'écoulement de ces bétons était dicté principalement par des contacts frictionnels entre les granulats. Dans les bétons modernes, on écarte le squelette granulaire et les propriétés rhéologiques de la pâte sont très influentes sur l'aptitude à la mise en œuvre. Les règles de mise en œuvre et vibration doivent être révisées en conséquence. Cette thèse doit aussi permettre de déterminer plus précisément les cas où la vibration reste nécessaire (limites entre BAP et bétons vibrés).

RÈGLES D'EMPLOI DES BAP

Les résultats obtenus dans le cadre du Projet National B@P ont permis de mettre à jours les Recommandations provisoires de l'AFGC et ont servi de base à l'introduction des BAP au sein des normes européennes, tant du point de vue des normes d'essai que de la norme EN 206. Ils ont également été intégrés au Fascicule 65 publié en 2007 et qui est en cours de révision. Ainsi, les limites concernant les propriétés des BAP à l'état frais (écoulement à la boîte en L, stabilité au tamis) et celles concernant la mise en œuvre (hauteur de chute, longueur de cheminement horizontal) sont définies en fonction du type d'ouvrage à réaliser (en particulier son épaisseur et sa densité d'armatures). Il a également été confirmé que les BAP présentent des propriétés à l'état durci similaires à celles des bétons traditionnels vibrés, ce qui a permis de les introduire dans l'EN 206-1 et l'EN 13670 avec application des règles de calcul données dans les Eurocodes.



© VINCI CONSTRUCTION FRANCE - FRANCIS VIGOURLOUX

LE DÉVELOPPEMENT DURABLE : ENVIRONNEMENT ET SANTÉ RECYCLAGE DES BÉTONS

Dans une approche de développement durable du recyclage et vu l'important volume de déchets mélangés, des moyens efficaces de séparation des composants des matériaux de démolition devront être mis au point et appliqués de manière systématique. Cette pratique devrait être par ailleurs accompagnée par la promotion de la déconstruction sélective des bâtiments et des structures de génie civil afin d'éviter les mélanges complexes à trier et parfois chimiquement incompatible avec la réutilisation. Enfin, on remarque l'importance des déchets provenant des produits à base de ciment, mortier et béton non armé (figure 4). Ceux-ci, ajoutés à ceux correspondant au béton armé, constituent plus de 35 % du total des déchets inertes du bâtiment selon la dernière étude citée ci-dessus.

Le Projet National de Recherche et Développement « RECYBETON » vise principalement à démontrer la faisabilité industrielle de recyclage complet

du béton c'est à dire la réutilisation de l'intégralité des matériaux issus des bétons déconstruits, y compris les fines, comme constituants des nouveaux bétons. Ces fines pourront aussi être utilisées en tant que matière première dans la production de liants hydrauliques, c'est-à-dire pour produire le clinker ou comme constituant de ciments et de liants recomposés.

D'autres recherches se concentrent sur les techniques de traitement avec l'objectif de libérer les granulats naturels de leur gangue de mortier : le projet ANR COFRAGE s'intéresse aux technologies innovantes de fragmentation du béton, comme la fragilisation par chauffage micro-ondes et l'endommagement par voie électro-hydraulique.

3- Mise en place du pont de Chabotte.

3- Setting up Chabotte Bridge.

En outre, le projet ANR CRAC (Carbonated Recycled Aggregates for Concrete) a montré les potentialités d'amélioration des propriétés des granulats de béton recyclé simplement par une carbonatation naturelle obtenue par un stockage de quelques mois à l'air ambiant.

LES PROPRIÉTÉS THERMIQUES DES BÉTONS

Parmi les grands enjeux du développement durable, la lutte contre les déperditions de chaleur des bâtiments constitue un axe majeur. En effet, dans un contexte réglementaire qui vise à réduire la consommation énergétique des bâtiments et par là-même les émissions de gaz à effet de serre, le renforcement de l'isolation de la structure s'avère primordial. Les nombreuses recherches sur ces propriétés thermiques commencent déjà à déboucher sur des applications pratiques, avec la mise sur le marché de bétons rupteurs thermiques d'une part et l'incorporation de matériaux à changement de phase d'autre part.

LES BÉTONS FACE À LA LIXIVATION : MÉTAUX LOURDS ET MOLÉCULES ORGANIQUES

Avec l'intensification des préoccupations liées au développement durable, la démonstration que les matériaux utilisés par l'industrie de la construction ne sont pas dommageables pour l'environnement et la Santé est devenue une thématique majeure. Cette thématique est d'autant plus aigüe qu'elle touche également les conditions d'acheminement de l'eau potable.

Une fois la démonstration faite que les matrices cimentaires stabilisent les métaux lourds de manière quantitative et qualitativement intense dans la chimie des hydrates [MOULIN, 1999], il a fallu s'intéresser au devenir des molécules organiques qui entrent dans la composition de la plupart des bétons (agents de mouture des ciments, superplastifiants). Sur la base d'analyses physico-chimiques, on a pu démontrer récemment [Guérandel, 2009], qu'après lixiviation de mortiers et bétons dans des conditions très agressives (protocole Soxhlet modifié) et pour des concentrations en superplastifiant de 10 % par rapport à la masse de ciment, les solutions lixiviantes ne révèlent que moins de 1,5 ppm (partie par million) du polymère initial. Pour des concentrations usuelles (1,2 % par rapport à la masse de ciment), seules des traces inférieures à 1 ppm sont détectées.

LES BÉTONS ET LA QUALITÉ DE L'AIR (COV)

Le décret 2011-321 du 23 mars 2011 oblige les producteurs de matériaux de construction destinés à l'usage intérieur à prouver que ces matériaux une fois mis en œuvre n'émettront pas de substance organiques volatiles susceptibles de perturber la santé des habitants. Ces polluants n'étant pas réputés présents dans le ciment et dans le béton, des recherches coordonnées entre l'industrie cimentière, l'industrie du béton prêt à l'emploi, l'industrie de la préfabrication et les fabricants d'adjuvants ont été entreprises d'une part pour caractériser le niveau d'émissivité des produits à base de matrices cimentaires et d'autre part pour comprendre et maîtriser l'influence des paramètres technologiques de mise en œuvre (type de béton ou de mortier, rapport E/C, taux d'adjuvantation, ...). Les résultats des mesures effectuées en collaboration avec le CSTB démontrent l'impact sanitaire inexistant des matériaux à base de liants hydrauliques.

PERSPECTIVES

L'évolution des bétons du point de vue de leur composition et de leurs performances fait l'objet de développements nombreux et variés tant en laboratoire qu'en vraie grandeur. Il convient de les accompagner par le développement des techniques de fabrication et de mise en œuvre permettant d'exploiter le potentiel des bétons modernes. Ces matériaux sont à même de révolutionner le monde de la construction avec un impact positif significatif du point de vue de la qualité et du développement durable. La qualité tout d'abord, avec des fonctionnalités de plus en plus complexes



4
© IFSTTAR / HUGUES DELAHOUSSE

4- Carrière de bétons de démolition.

4- Demolition concretes quarry.

et ciblées, pour répondre aux exigences croissantes du développement durable. À titre d'exemple, la mise en œuvre des BAP possède des avantages incontestables en termes d'impact positif de réduction des nuisances (disparition des vibreurs), de réduction du coût de la construction par l'accélération de la cadence de mise en œuvre pour une qualité globale améliorée. Ces fonctionnalités nécessitent une rigueur croissante dans les contrôles de la fabrication et de mise en œuvre des ciments et des bétons. Au-delà de la consolidation des acquis relativement récents (BAP, BHP,

BFUP, ...) les recherches en cours vont apporter des solutions toujours plus spécifiques pour répondre à des besoins parfaitement ciblés qui concernent l'amélioration de l'habitat, l'augmentation de la durabilité des constructions, l'empreinte environnementale et la diminution du coût de la construction et l'optimisation de sa maintenance. Au final les bétons d'aujourd'hui et de demain ne seront plus seulement « résistants » mais seront « multi-performants » non seulement sur le plan mécanique mais également avec des ouvrabilités maîtrisées, une durabilité ciblée et calculée, et une empreinte environnementale de plus en plus faible. La recherche des produits de demain se concentre donc sur l'attribution d'une ou de plusieurs fonctionnalités, en plus de la résistance mécanique, transformant ainsi une problématique de construction en sa réponse « matériau » destiné à être mis en œuvre dans un système constructif lui-même performant. □

[Références bibliographiques]

[CARATINI, 2012] Approche multi-échelle de l'évolution des propriétés mécaniques et de transport des matériaux cimentaires soumis à des élévations de température. Thèse de doctorat Université Paris- Est.

[CAZACLIU, 2006] Cazacliu B., Guieysse B., de Larrard F., Lallemand-Gamboa I., Chanut S., Comparison method of concrete mixing systems efficiency, 17th International congress of chemical and process engineering, Prague, pp. 876-877, August 2006 [5] Cazacliu, B. In-mixer measurements for describing mixture evolution during concrete mixing (2008) Chemical Engineering Research and Design, 86 (12), pp. 1423-1433.

[CAZACLIU, 2009] Cazacliu B., Roquet N., A new analysis of concrete mixing kinetics by means of power measurement, Concrete and Cement Research, Vol.39, 182-194, 2009.

[CHOPIN, 2001] David Chopin, Malaxage des bétons à hautes performances et des bétons auto-plaçants: optimisation des temps de malaxage, thèse de doctorat, École Centrale de Nantes.

[COLLET, 2010] Romain COLLET, Critères de malaxabilité des mélanges granulaires humides, thèse de l'Institut National Polytechnique de Toulouse.

[CORTAS, 2012] Nouvelle Approche expérimentale pour la maîtrise de la fissuration du Béton jeune : Influence de la nature et de la saturation des Granulats. Thèse de doctorat École Centrale de Nantes - Université Libre de Bruxelles.

[GUERANDEL, 2009] Étude de la qualité du piégeage des matières organiques par la matrice cimentaire vis-à-vis de la lixiviation. Thèse de doctorat Université de Metz.

[LE, 2007] Ngoc-Dong LE, Amélioration de la régularité du béton en production, thèse de doctorat, thèse de l'École centrale de Nantes.

[MESSAD, 2009] Mise au point d'un essai de vieillissement accéléré de l'attaque sulfatique externe pour l'application au concept de performance équivalente dans le cadre de la norme EN 206-1. Thèse de doctorat Université de Toulouse III (Paul Sabatier).

[MOULIN, 1999] Spéciation du Plomb du Cuivre, du Zinc et du Chrome (III et VI) dans les hydrates de ciment. Thèse de doctorat Université d'Aix Marseille.

[ROUSSEL, 2011] Understanding the rheology of concrete, editions Woodhead, 2011.

[ROZIERE, 2007] Étude de la durabilité des bétons par une approche performantielle. Thèse de doctorat École Centrale de Nantes.

[LCPC, 2010] Recommandations provisoires sur l'application de l'approche performantielle pour la maîtrise de la durabilité des ouvrages d'arts en béton. 17 novembre 2009.

[FNTP, FFB, CERIB, FIB, 2009] - Méthodologie d'application du concept de performance équivalente des bétons - Recommandations professionnelles provisoires.

ABSTRACT

NEW CONCRETES AND RESEARCH

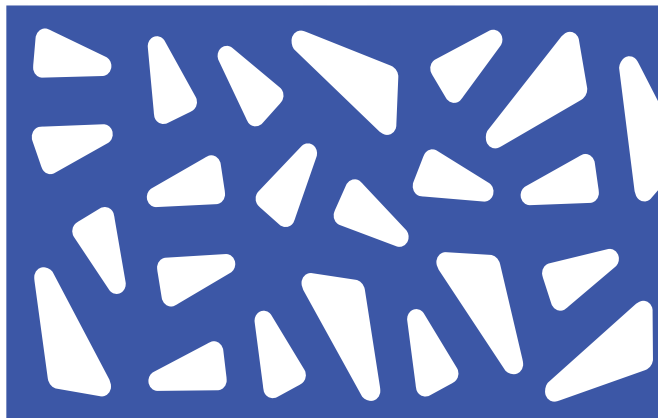
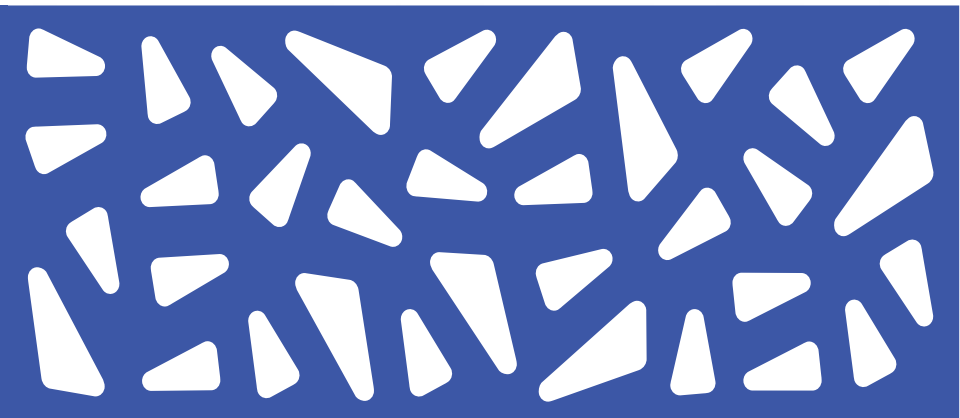
FRANÇOIS CUSSIGH, VINCI - LAURENT IZORET - JEAN-MICHEL TORRENTI, IFSTTAR

Academic and industrial research on concretes has constantly brought about changes in this material, which has now become a high-tech product. Constant improvements to concrete have aimed - and still do aim - to incorporate almost "genetically" increasingly specific functionalities designed in response to targeted needs concerning housing improvement, increased durability of buildings, the environmental footprint, a reduction in construction costs and optimisation of building maintenance. Ultimately, the concretes of today and tomorrow will no longer be merely strong, but will be multi-efficient from not only the mechanical viewpoint but also with controlled workability, targeted and calculated durability, and an increasingly small environmental footprint. □

LOS NUEVOS HORMIGONES Y LA INVESTIGACIÓN

FRANÇOIS CUSSIGH, VINCI - LAURENT IZORET - JEAN-MICHEL TORRENTI, IFSTTAR

La investigación sobre los hormigones, tanto académica como industrial, ha permitido una evolución permanente de este material que, actualmente, es un producto altamente tecnológico. Las constantes mejoras del hormigón han tenido y siguen teniendo como objetivo, integrar de forma casi "genética" funcionalidades cada vez más específicas destinadas a cubrir las necesidades seleccionadas relativas a la mejora del hábitat, al aumento de la durabilidad de las construcciones, a la huella ecológica, a la disminución del coste de la construcción y a la optimización de su mantenimiento. Con el tiempo, los hormigones del presente y del futuro ya no serán solamente resistentes, sino que serán multicompetitivos y no sólo en el aspecto mecánico, también se dominará su trabajabilidad, su durabilidad será dirigida y calculada, y su huella ecológica será cada vez más reducida. □



RÉSILLE DE BÉTON FIBRÉ DU STADE JEAN BOUIN © DR



LE BÉTON

LES RÉALISATIONS

LES PONTS

AUTEUR : MICHEL PLACIDI, CONSEILLER SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE DE L'ENTREPRISE RAZEL-BEC

PARMI LES PREMIÈRES ET PLUS IMPORTANTES APPLICATIONS DU BÉTON FIGURENT LES PONTS. DE DIFFÉRENTS TYPES, AUX CARACTÉRISTIQUES VARIÉES, CES OUVRAGES FONT APPEL À DES TECHNIQUES ET MÉTHODES DE CONSTRUCTION SPÉCIFIQUES AUXQUELLES LES STRUCTURES SONT ADAPTÉES. PONTS POUSSÉS, CONSTRUITS SUR CINTRES, EN ENCORBELLEMENT, EN ARC OU À HAUBANS, EN BÉTON ARME OU PRÉCONTRAIT, SEUL OU ASSOCIÉS À DES STRUCTURES MÉTALLIQUES, CET ARTICLE PASSE EN REVUE LES DIFFÉRENTS TYPES D'OUVRAGES EN CITANT QUELQUES EXEMPLES REPRÉSENTATIFS.



1
© JMV

Si il est un domaine dans lequel le béton, de son origine et jusqu'à ses derniers développements, a véritablement acquis ses lettres de noblesse, c'est bien celui des Ponts. En effet, si depuis que les hommes ont participé à l'acte de construire, ils se sont préoccupés de réaliser des ouvrages leur permettant de franchir différents obstacles, rivières ou larges vallées, qu'il s'agisse de ponts pour piétons puis pour engins de

circulation, ou d'aqueducs pour assurer la desserte en eau des zones habitées, la construction des ponts, comme en témoigne les remarquables vestiges dont nous admirons aujourd'hui encore la beauté et parfois la hardiesse, a toujours été pour les hommes le moyen d'exprimer leur sens et leur génie de la construction, autant que leur audace. Si nous cherchons à classer de façon chronologique les grandes étapes de l'histoire des ponts, nous pouvons

1- Pont génois en voute simple en Corse.

1- Single-arch Genoese bridge in Corsica.

aisément le faire en distinguant deux grandes périodes, les ponts d'avant l'apparition du béton, puis les ponts d'après l'apparition du béton.

Avant l'apparition du béton, on rencontrait principalement, du moins pour les ouvrages de moyenne ou de grande portée, des ponts en pierres en forme de voute, voutes simples, souvent en plein cintre (figure 1) ou voutes multiples, à un, voire à plusieurs niveaux (figure 2), ces structures en voute tra-



2

© STRUCTURAE



4

© STRUCTURAE



5

© STRUCTURAE

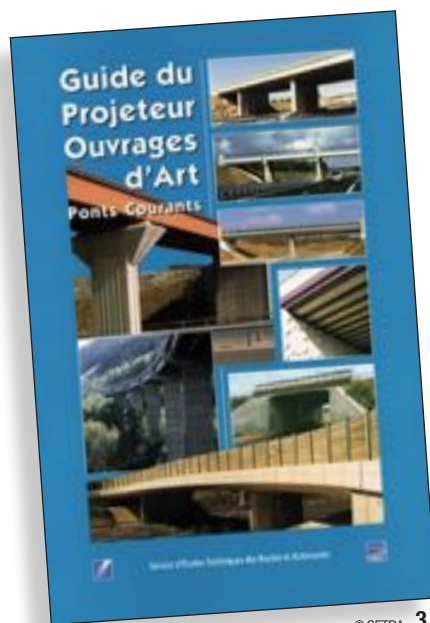
2- Pont du Gard, à voutes multiples, datant du 1^{er} siècle de notre ère.

3- Page de garde du Guide du Projeteur Ouvrages d'Art - Ponts courants.

4- Viaduc de Théroouanne formé de poutres PRAD - ligne LGV Rhin Rhône.

5- Ouvrage d'Auxonne formé de poutres VIPP - ligne LGV Rhin Rhône.

6- Viaduc de Gorbio en cours de construction sur cintre auto-lanceur.



© SETRA 3

2- Pont du Gard bridge, with multiple arches, dating from the first century of our era.

3- Title page of the "Guide du Projeteur Ouvrages d'Art - Ponts courants" (bridge designer's handbook).

4- Théroouanne Viaduct formed of bonded post-tensioned girders - Rhine-Rhone high-speed rail line.

5- Auxonne bridge formed of independent prestressed girders - Rhine-Rhone high-speed rail line.

6- Gorbio Viaduct undergoing construction on self-launching centre.

vaillant essentiellement en compression, c'est-à-dire suivant un mode de fonctionnement parfaitement adapté à ce matériau naturel qu'est la pierre. La pérennité de ce type de structures est démontrée par le fait qu'un très grand nombre d'entre eux, très anciens, demeurent, aujourd'hui encore en excellent état.

L'apparition du béton, notamment du béton armé puis surtout du béton précontraint, a permis un extraordinaire développement de ces ouvrages et une grande diversification des types de structures. Aujourd'hui, un classement couramment admis des ponts consiste à les classer selon leur structure longitudinale (ponts à poutre, ponts en arc, ponts suspendus ou à haubans), c'est-à-dire selon le mode de fonctionnement structural de l'élément porteur principal : fonctionnement en flexion pour les ponts à poutres, fonctionnement en compression pour les ponts en arc ou fonctionnement en traction pour les ponts suspendus ou les ponts à haubans. Mais, cela ne suffisant pas pour distinguer les différents types de ponts à poutres puisqu'ils représentent la grande majorité des ouvrages réalisés, plus de 80% en moyenne selon les années, on utilise aussi très souvent un classement en fonction de leur mode de construction (ponts à poutres préfabriqués, ponts coulés sur cintres ou préfabriqués et posés à l'avancement, ponts poussés, ponts construits par encorbellement, etc.).

Ce sont ces deux classements que nous allons utiliser ici pour présenter quelques uns de ces ouvrages, les plus

représentatifs de leurs catégories, en tant que réalisations remarquables et comme applications du matériau béton dans ce domaine de la construction.

LES OUVRAGES COURANTS

La première catégorie de ponts, qui constitue d'ailleurs une large majorité des ouvrages construits, même si ils ne sont pas très spectaculaires, et de ce fait peu médiatisés, concerne ceux que l'on appelle les « ouvrages courants », ou encore les « ouvrages types ». Ce sont des ouvrages de petite, voire de moyenne portée, permettant le franchissement de brèches ou d'obstacles d'une vingtaine de mètres de largeur environ, parfois même beaucoup moins. On les classe, en fonction de leur fonctionnalité, en Passages Inférieurs (couramment appelés P.I.), ou Passages Supérieurs (couramment appelés P.S.), selon que la voie principale passe au dessus ou au dessous de la voie secondaire. On trouve, dans cette catégorie, des ouvrages en forme de cadre fermé ou de portique ouvert, des ponts dont le tablier est une simple dalle, ces dalles pouvant être pleines, parfois élégies ou nervurées, avec une ou plusieurs nervures, des ouvrages en forme de voûte, mince ou épaisse, des ponts à poutres, ces poutres pouvant être préfabriquées ou coulées en place. Ces ouvrages sont généralement en béton armé, parfois en béton précontraint dès l'instant où la portée de leur travée dépasse une vingtaine de mètres. Ils assurent le franchissement de voies routières, autoroutières ou ferroviaires, de petits cours d'eau, ou de brèches de faible ouverture et peuvent se situer aussi bien en zone urbaine qu'en rase campagne.

Une autre catégorie d'ouvrages courants, faisant appel, comme élément structural porteur, non plus seulement au béton mais aussi à l'acier, est constituée des ponts à poutrelles enrobées. La structure est alors formée de poutrelles métalliques en forme de I, noyées dans une dalle pleine en béton. ▷



© BOUSSIGNON

6



7 © STRUCTURAE

8 © GTM

9 © STRUCTURAE

Les principaux avantages de ces ouvrages résident à la fois dans leur robustesse et dans la simplicité de leur construction. La pose à la grue des poutrelles métalliques directement à leur emplacement définitif et l'utilisation de dalles en béton appuyées sur les ailes inférieures des profilés et servant de coffrage au béton permettant d'éviter tout recours à un quelconque étalement ou à des coffrages.

L'extraordinaire développement de ces ouvrages courants et leur grande variété, avec notamment l'extension du réseau autoroutier français, dans les années 1970, ont conduit le SETRA (Service Technique des Routes et Autoroutes) à constituer des « Dossiers pilotes » pour chacune des catégories de ces ouvrages courants et à écrire des logiciels de calcul automatique qui permettent d'en simplifier grandement le calcul et les études. Ces recommandations sont regroupées dans le Guide du projeteur Ouvrages d'Art - Ponts courants, édité par le SETRA (figure 3). Pour le franchissement des brèches plus importantes, nous trouvons les ouvrages dits « non courants » que l'on classe en fonction de leur structure et de son mode de fonctionnement mais aussi en considérant leur mode de construction. Dans chacune de ces catégories, après avoir expliqué les principes généraux, soit du fonctionnement structurel de ce type d'ouvrage, soit de son mode de construction, nous présentons, à titre d'exemples, quelques uns d'entre eux parmi les plus représentatifs ou les plus remarquables, soit parce qu'ils ont marqué leur époque soit pour leurs caractéristiques exceptionnelles. Comme indiqué précédemment, nous allons voir tout d'abord les ponts à poutres travaillant en flexion, avec les ponts à poutres isostatiques indépendantes et les ponts à poutres continues et parmi ces derniers, les ponts coulés sur cintres, fixes ou auto-lanceurs, les ponts posés à l'avancement, les ponts poussés et les

ponts construits par encorbellements successifs. Nous verrons ensuite les ponts en arc et les ponts à haubans, avant de voir quelques exemples de ponts mixtes acier-béton et enfin les ouvrages récents comportant une structure en béton exceptionnelle.

LES PONTS À POUTRES ISOSTATIQUES

Le principe général consiste à concevoir l'ouvrage, qui peut être de plus ou moins grande longueur, en une succession de travées indépendantes, chacune comportant un certain nombre de poutres isostatiques parallèles, en fonction de la largeur de l'ouvrage. Ces poutres supportent un hourdis supérieur formant la dalle sous chaussée, lui-même en béton armé ou précontraint transversalement.

On distingue deux types principaux d'ouvrages de ce type : ceux comportant des poutres précontraintes par fils adhérents, couramment appelés PRAD, et ceux comportant des poutres précontraintes par post-tension, couramment appelés V.I.P.P.

Dans le cas des ouvrages de type PRAD, les poutres sont généralement préfabriquées en usine dans des bancs de préfabrication spécialement conçus et aménagés à cet effet, les torons étant préalablement mis en tension

7- Viaduc de Gorbio sur l'auto-route A8 à Menton - ouvrage fini.

8- Viaduc des Egratz en cours de construction sur cintre auto-lanceur.

9- Viaduc des Egratz entre Saint Gervais et Les Houches (Haute Savoie).

10- Pont de Bubiyan au Koweït - pose des voussoirs suspendus à la poutre.

7- Gorbio Viaduct over the A8 motorway at Menton - completed structure.

8- Egratz Viaduct undergoing construction on self-launching centre.

9- Egratz Viaduct between Saint Gervais and Les Houches.

10- Bubiyan Bridge in Kuwait - placing the segments suspended from the beam.

avant coulage du béton dans le moule. C'est le relâchement du banc une fois le béton durci qui transfère l'effort de tension à la poutre et en assure ainsi par adhérence la mise en précontrainte. Les poutres ainsi préfabriquées sont ensuite transportées sur chantier et généralement mises en place à la grue ou avec un engin de pose spécifique. Les portées les plus courantes de tels ouvrages sont généralement de l'ordre d'une vingtaine de mètres.

Les poutres de type V.I.P.P., de portées sensiblement plus importantes, de l'ordre de 30 à 40 m, pouvant atteindre 50 m, sont en général préfabriquées sur le chantier. Le béton est alors coulé dans des coffrages outils spécifiques. Les câbles de précontrainte, enfilés dans des gaines métalliques préalablement mises en place dans le ferrailage passif, sont mis en tension après durcissement du béton. Compte tenu de leur poids, qui peut atteindre, pour les poutres de grande longueur, une centaine de tonnes, elles sont généralement mises en place à l'aide d'une charpente métallique spéciale appelée lanceur.

La réalisation de la dalle en béton, après la pose des poutres, peut se faire soit directement par coulage en place sur un coffrage outil spécifique d'une dizaine de mètres de longueur se déplaçant en roulant sur les poutres elles-mêmes, soit en utilisant des dalles préfabriquées de toute la largeur du tablier, la connexion de ces dalles aux poutres se faisant alors par bétonnage de « fenêtres » ménagées dans ces dalles, soit encore en utilisant des pré-dalles servant de coffrages au béton coulé en place, ces pré-dalles pouvant être considérées comme collaborantes ou comme coffrages perdus.

Il y a quelques années, les poutres de type V.I.P.P. comportaient généralement un certain nombre d'entretoises intermédiaires les reliant entre elles et assurant le monolithisme de leur fonctionnement transversal. Aujourd'hui,



© MICHEL PLACIDI

10



11

© STRUCTURAE



12

© RAZEL



13

© RAZEL

les moyens de calcul performants dont nous disposons, notamment avec les éléments finis, permettent d'appréhender beaucoup mieux ce fonctionnement complexe, et seules les entretoises d'about, au droit des appuis, sont conservées.

Ces ouvrages peuvent comporter une travée unique ou plusieurs travées, voire un grand nombre de travées. Dans ce cas, du fait de l'isostaticité des poutres et de leur indépendance, ils comportent des joints de chaussée entre chaque travée, c'est-à-dire au droit de chaque ligne d'appui. Pour des raisons à la fois de confort des usagers et de maintenance, on leur préfère aujourd'hui des dispositifs d'attelage des poutres qui permettent de supprimer ces joints tout en maintenant le fonctionnement isostatique des poutres.

Parmi quelques ouvrages importants de ce type nous pouvons citer, comme ouvrage de type PRAD, outre de nombreux ouvrages autoroutiers, un ouvrage récent, le Viaduc de la Thérrouane, pour la nouvelle ligne ferroviaire du TGV Est Européen (figure 4), tandis que, comme ouvrages de type V.I.P.P., des ouvrages plus anciens mais remarquables comme le viaduc permettant au Boulevard Périphérique sud de Paris de passer au dessus du parc des expositions de la Porte de Versailles, le Viaduc d'accès au Pont de Tancarville sur la Seine près du Havre, les viaducs d'accès au Pont de Saint Nazaire sur l'estuaire de la Loire, ainsi qu'un ouvrage récent, l'ouvrage de décharge d'Auxonne, en Côte d'Or, pour la ligne ferroviaire du TGV Est Européen (figure 5).

LES PONTS COULÉS SUR CINTRE OU SUR CINTRE AUTO LANCEUR

Pour les ouvrages de portée plus importante que les ouvrages courants et pour éviter les désagréments et l'inconfort pour les usagers que présentent les poutres isostatiques, on a recours à des structures continues avec des

11- Viaduc du contournement de Compiègne, en cours de construction.

12- Viaduc de la Bresle pour l'autoroute A29 en cours de poussage.

13- Viaduc du Scardon sur l'autoroute A16 à Abbeville.

14- Viaduc de Ventabren sur la ligne ferroviaire TGV Méditerranée.

11- Viaduc of the Compiègne bypass, under construction.

12- La Bresle Viaduct for the A29 motorway during pushing.

13- Le Scardon Viaduct over the A16 motorway at Abbeville.

14- Ventabren Viaduct over the Mediterranean high-speed railway line.

sections transversales généralement en caisson, mieux adaptées à la répartition des moments de flexion dans la poutre. Si l'ouvrage n'est pas très important, et surtout s'il n'est pas très haut au dessus du sol, la solution la plus simple pour le construire consiste alors à couler le béton dans des coffrages disposés sur un cintre appuyé au sol, comme cela se fait pour les ouvrages courants. Dès que le nombre de travées augmente, le cintre est limité à une travée et on le déplace d'une travée à la suivante au fur et à mesure du coulage du béton. Lorsque l'ouvrage se trouve à une grande hauteur au dessus du sol, ou franchit une zone inaccessible dans laquelle tout appui au sol est proscrit, on peut avoir recours à une technique, développée dans les années 1960, de coulage sur un cintre dit « auto lanceur ». Il s'agit d'une charpente métallique de grande dimension, franchissant la travée entière et supportant un platelage général sur lequel est placé le coffrage. Ce cintre, équipé en sa partie antérieure d'un avant- bec et de dispositifs de roulement adaptés, se déplace de travée à travée de façon autonome, en ne s'appuyant que sur les piles et la partie du tablier déjà réalisé. Il y a deux types de cintres auto lanceur, selon que la poutre métallique se trouve au dessus ou au dessous du tablier à

construire. La construction du tablier se fait à l'avancement, d'une extrémité de l'ouvrage vers l'autre extrémité, travée après travée. Ce procédé a pour principaux inconvénients de nécessiter un matériel important et lourd, coûteux en investissement et à l'usage (montage, déplacement, démontage) et surtout lent, le cycle moyen pour réaliser une travée d'une quarantaine de mètres de portée étant d'environ quatre à six semaines. Le domaine privilégié de ce type d'ouvrage se situe dans des portées de l'ordre de 30 à 50 m, voire jusqu'à 60 m, limité par les capacités et les tailles des cintres, ces derniers devant pouvoir supporter, sans déformation importante, tout le poids de la travée.

Parmi les ouvrages importants réalisés en France par ce procédé, nous pouvons citer les viaducs de l'autoroute A8 entre Roquebrune Cap Martin et la Frontière Italienne, notamment les viaducs de Cabrolles, et de Gorbio (figures 6 et 7), le viaduc d'accès au Pont de Caronte pour l'autoroute A55, sur le Canal du même nom donnant accès à l'Etang de Berre, ou encore le viaduc des Egratz, de l'autoroute blanche, entre Saint Gervais et Les Houches, près de Chamonix (figures 8 et 9). Bien développé en France dans les années 1965-1975, ce procédé de construction n'est pratiquement plus utilisé aujourd'hui, du moins en France, principalement à cause de sa lenteur, de sa lourdeur et du coût de ses investissements en matériels. Il l'est toutefois encore à l'étranger, notamment en Espagne, au Portugal ou en Allemagne.

LES PONTS EN VOUSOIERS PRÉFABRIQUÉS POSÉS À L'AVANCEMENT

Pour pallier au principal inconvénient de la technique du cintre auto lanceur, à savoir sa lenteur, sachant que cette technique n'est intéressante que pour les ouvrages importants de façon à amortir le coût du montage ▷

© STRUCTURAE



14



15

© RAZEL



16

© MICHEL PLACIDI



17

© STRUCTURAE

et du démontage du cintre, une technique basée sur le même principe de construction de l'ouvrage à l'avancement, travée par travée, s'est développée en France dans les années 1975, utilisant la méthode de préfabrication des voussoirs à joints conjugués. Cette méthode qui consiste à préfabriquer les voussoirs l'un contre l'autre, la tranche du voussoir précédent servant de coffrage à la tranche du voussoir suivant, a été inventée et mise au point dans les années 1965 pour la construction des ponts en encorbellement. Dans le cas des ouvrages posés à l'avancement, il s'agit de placer ces voussoirs préalablement préfabriqués sur une poutre métallique, assimilable au cintre auto lanceur, puis de les assembler en les mettant en précontrainte pour constituer le monolithisme de la poutre et lui conférer sa résistance propre. Un tel procédé, utilisé aux États-Unis sur un projet d'ingénierie française (Pont de Long Key, en Floride, conçu par JMI) a permis de construire une travée de 36 m de portée par jour. Le cintre, supportant l'ensemble des voussoirs de la travée peut, comme dans le cas des cintres auto lanceurs se trouver sous le tablier ou au dessus du tablier, comme ce fut le cas pour le Pont de Boubiyan, réalisé par Bouygues au Koweït (figure 10). Pour éviter d'avoir recours à une poutre métallique très lourde, capable de supporter le poids de toute la travée, avant sa mise en précontrainte, Campenon Bernard a développé en 1975 un procédé consistant à supporter la travée par un haubannage provisoire, accroché à un mât métallique retenu par des haubans arrières. Chaque voussoir est alors acheminé en roulant sur le tablier déjà réalisé et mis en place à l'aide d'une potence spéciale. Parmi les ouvrages réalisés en France avec haubannage provisoire, notamment les premiers, les ponts de Rombas et Woippy, deux plus récents, le Viaduc des Barrails pour l'autoroute A89 à Libourne, ou le Via-

duc du contournement de Compiègne (figure 11). Comme pour les ouvrages sur cintres auto lanceurs, le domaine privilégié de ce type d'ouvrage se situe aussi dans des portées d'une quarantaine de mètres.

LES PONTS POUSSÉS

Le principe consiste à préfabriquer le tablier de l'ouvrage en dehors de la brèche à franchir, dans son prolongement, en arrière de l'une des culées, puis à le pousser par une translation longitudinale destinée à l'amener à sa position définitive. Le tablier se déplace ainsi sur ses piles par l'intermédiaire de patins en néoprène téflon glissant sur des platines en acier inoxydable. La principale spécificité de ce procédé de construction vient du fait que chaque section de la poutre du tablier se trouve successivement, au cours du poussage, en position sur appui, puis en travée, un certain nombre de fois. Cela nécessite une conception particulière du câblage de précontrainte qui doit apporter à la structure une compression sensiblement centrée, ceci étant obtenu généralement par la mise en œuvre d'une précontrainte provisoire, antagoniste de la précontrainte définitive. Le franchissement de la travée à l'avant du poussage nécessite l'utilisation soit d'un avant-bec métallique fixé à

15- Pont de Rochemaure sur le Rhône du TGV Méditerranée en construction.

16- Viaduc de Poncin sur l'autoroute A40 dans l'Ain.

17- Viaduc de la Sioule sur l'autoroute A89.

18- Viaduc de Tulle en Corrèze sur l'autoroute A89.

15- Rochemaure Bridge over the Rhone for the Mediterranean high-speed railway line under construction.

16- Poncin Viaduct over the A40 motorway in the Ain region.

17- La Sioule Viaduct over the A89 motorway.

18- Tulle Viaduct in the Corrèze region over the A89 motorway.

l'avant du tablier (figure 12), soit d'un mât avec des haubans, soit encore des palées provisoires réduisant la portée de cette travée. La principale contrainte de ce procédé concerne la géométrie de l'ouvrage qui, pour être poussable, doit être définie suivant un axe dont le tracé est superposable à lui-même par une translation (droite ou cercle, en plan et en élévation). Le domaine privilégié d'utilisation de cette méthode se situe dans des portées de 30 à 50 m environ, voire au maximum une soixantaine de mètres. Ce procédé de construction, qui a vu le jour en France dans les années 1960 s'est rapidement et fortement développé et a permis la réalisation d'un très grand nombre d'ouvrages routiers aussi bien que ferroviaires, dont les longueurs totales dépassent fréquemment les 1 000 m. Parmi quelques uns de ces ouvrages remarquables, nous pouvons citer des ouvrages routiers et autoroutiers tels que les viaducs du Scardon pour l'autoroute A16 (figure 13), de la Bresle pour l'autoroute A29, Jules Verne pour le contournement d'Amiens, des Bergères pour l'autoroute A89, ou des ouvrages ferroviaires pour les lignes nouvelles de TGV, tels que les viaducs de La Roche, de la Digoine, du Serein, de Saulieu, de la Saône à Mâcon, de la Loire à Tours, ou plus récemment de la Grenette ou de Ventabren (figure 14).



18

© STRUCTURAE

LES PONTS CONSTRUITS PAR ENCORBELLEMENTS SUCCESSIFS

Le principe consiste à construire le tablier de l'ouvrage non plus par travées successives mais par fléaux successifs, c'est-à-dire par tronçons de tablier appuyés sur chaque pile, en équilibre sur celle-ci, un peu à l'image du fléau d'une balance. Chaque fléau est constitué de voussoirs de longueur limitée, généralement comprise entre 2 et 4 m, qui sont réalisés successivement et de façon symétrique de part et d'autre de la pile, de façon à maintenir l'équilibre.



19

© MICHEL PLACIDI



20

© CAMPENON



21

© BOUYGUES

Cet équilibre est assuré par un encastrement provisoire sur la pile. Une fois les fléaux successifs construits, ils sont reliés entre eux par clavage rendant la structure continue.

Le domaine privilégié d'utilisation de ce procédé de construction est très vaste puisqu'il couvre une gamme qui va d'environ 35 à 40 m de portée jusqu'au-delà de 200 m, voire 300 m pour des ouvrages exceptionnels détenant un record. Jusqu'à une soixantaine de mètres de portée, la hauteur de la poutre est en général constante, de façon à simplifier la conception des coffrages et la réalisation des voussoirs. Au-delà de cette portée d'environ 60 m, la hauteur de la poutre est généralement variable de façon parabolique, plus haute sur appui et plus fine en travée, de façon à réduire le poids des voussoirs centraux.

Nous trouvons deux techniques de construction de ces ponts en encorbellement. Ils peuvent être coulés en place dans des coffrages outils spécifiques appelés « équipages mobiles », qui travaillent alors par paire (figure 15) et avancent sur chaque demi-fléau symétriquement par rapport au voussoir sur pile, qui lui-même est coulé dans un coffrage spécial. Parmi les nombreux ouvrages construits en France suivant cette technique, depuis les premiers d'entre eux, le Pont de la Pyle et le Pont de Savine, réalisés dans les années 1960, nous pouvons en citer quelques uns de remarquables, tels que le Viaduc du Magnan sur l'autoroute A8 à Nice, le Viaduc de Gennevilliers sur l'autoroute A15, le Viaduc de Poncin sur l'autoroute A40 (figure 16), le Viaduc de Nantua, le Viaduc de Champ du Comte entre Albertville et Moutiers, ou plus récemment les viaducs de Saint Paul et de la Ravine Trois Bassins pour la Route des Tamarins sur l'île de La Réunion (ce dernier disposant d'ailleurs d'une précontrainte extradossée), ou encore les grands viaducs de l'autoroute A89, tels que les viaducs de La Barricade,

19- Poutre de lancement du Pont sur la Seine à Saint Cloud de l'autoroute A13.

20- Viaduc des Neyrolles sur l'autoroute A40 - poutre de lancement AREA.

21- Viaduc reliant l'île de Ré au continent - poutre de pose des voussoirs.

22- Pont de Trelins sur l'Isère.

19- Launching girder for the bridge over the Seine at Saint Cloud on the A13 motorway.

20- Les Neyrolles Viaduct over the A40 motorway - AREA launching girder.

21- Viaduct linking the île de Ré island to the continent - segment placing beam.

22- Trelins Bridge over the Isère.

de la Sioule (figure 17) ou de Tulle en Corrèze (figure 18).

Lorsque l'ouvrage est très long, de façon à accélérer la cadence de réalisation de ces voussoirs et réduire le délai de construction, on a parfois recours à la préfabrication de ces voussoirs suivant le principe des joints conjugués, précédemment évoqué. Les voussoirs sont alors posés à leur position définitive et de façon symétrique pour constituer le fléau. Cette pose des voussoirs peut se faire à l'aide d'une grue de forte puissance, comme pour les deux ponts du franchissement de la Seine par le Boulevard Périphérique de Paris, d'un engin de levage spécifique comme pour le Pont d'Ottmarsheim ou le Viaduc de Calix à Caen, ou plus fréquemment avec une poutre de lancement spéciale, autonome dans son déplacement. Depuis les années 1965 où la première poutre de lancement est apparue pour la construction du Viaduc de l'île d'Oléron, de nombreuses poutres ont été conçues et réalisées, de tailles, de caractéristiques et de cinématiques parfois bien différentes, mais toutes basées sur le même principe, c'est-à-dire leur autonomie pour la pose des voussoirs, y compris les voussoirs sur piles, et leur déplacement de pile à pile par auto-lancement. Parmi quelques ouvrages

remarquables dont les voussoirs ont été ainsi posés à l'aide d'une poutre de lancement, nous pouvons citer, le Pont sur la Seine à Saint Cloud pour l'autoroute A13 (figure 19), les viaducs de l'autoroute B3 Sud à Rosny sous Bois, les viaducs des autoroutes alpines AREA (figure 20), le Viaduc reliant l'île de Ré au continent (figure 21) et plus récemment le Viaduc d'Avignon sur le Rhône pour la ligne ferroviaire du TGV Méditerranée.

LES PONTS EN ARC

Les ponts en arc, dont le fonctionnement structurel sollicite le matériau en compression, sont, bien entendu, les ouvrages les mieux adaptés au béton. Mais ce fonctionnement en compression n'est assuré qu'une fois l'ouvrage terminé. Pendant très longtemps ces ouvrages étaient construits sur cintre, certains d'ailleurs remarquables, comme celui utilisé en 1928 par Eugène Freyssinet pour la construction des trois arcs du Pont Albert Louppe, sur l'Elorn à Brest. Mais l'évolution du coût de la main d'œuvre avait rendu la construction de ces ouvrages trop coûteuse.

Aujourd'hui, le renouveau de ces grands ponts en arc est dû au développement de leur méthode de construction en encorbellement avec haubanage provisoire. Chaque demi arc est ainsi réalisé en encorbellement progressif à partir de ses culées par bétonnage en place de voussoirs en équipage mobile jusqu'au clavage central, ce demi arc étant suspendu par des haubans provisoires ancrés en arrière. Trois grands ponts en arc ont ainsi été réalisés en France.

Le premier de ces ouvrages a été le Pont de Trelins, sur l'Isère, à Vinay, en aval de Grenoble (figure 22), construit en 1984, avec une portée de l'arc de 138 m. Le tablier supérieur est constitué d'une dalle à deux nervures en béton précontraint, préfabriquée sur une rive et mise en place par poussage. ▷

© STRUCTURAE



22



23 © MICHEL PLACIDI



24 © MICHEL PLACIDI



25 © STRUCTURAE

Le second ouvrage a été le Pont Chateaubriand, sur la Rance, réalisé en 1988, avec une portée de l'arc de 244 m. Le tablier supérieur est une structure de type bi-poutre mixte acier béton.

Le troisième ouvrage est le Pont du Morbihan, à La Roche Bernard, sur la Vilaine (figure 23), réalisé en 1992, avec une portée de l'arc de 201 m. Comme pour le Pont Chateaubriand, le tablier supérieur est une structure de type bi-poutre mixte acier béton.

LES PONTS À HAUBANS

Dans la troisième catégorie d'ouvrages dont le mode de fonctionnement du système structurel porteur est la traction, nous trouvons à la fois les ponts suspendus et les ponts à haubans. Bien qu'utilisant tous les deux des câbles d'acier pour reprendre ces efforts de traction, les schémas statiques de ces deux types d'ouvrages ne sont pas les mêmes.

Dans les ponts suspendus, le tablier est accroché à des suspentes verticales, elles-mêmes accrochées aux câbles porteurs qui, en forme de chaînettes relient les sommets des pylônes. Dans le cas des ponts à haubans, les câbles suspendant le tablier relient directement ce dernier aux pylônes. Ils sont donc inclinés et, de ce fait, engendrent dans le tablier un effort de compression, alors que dans un pont suspendu, les suspentes étant verticales, le tablier n'est pas comprimé. C'est une des raisons, sinon la principale, pour lesquelles il peut être intéressant de réaliser les tabliers des ponts à haubans en béton, alors que les tabliers des ponts suspendus sont toujours métalliques. Le fonctionnement d'un tel pont à haubans à tablier en béton est en fait un peu semblable à celui d'un pont en encorbellement dont les câbles de fléau auraient été sortis du tablier pour les faire passer au dessus, dans le pylône, afin d'augmenter leur bras de levier et donc leur efficacité.

Le tablier peut être suspendu par une seule nappe de haubans (suspension axiale) ou par deux nappes accrochées de part et d'autre du tablier (suspension bi-latérale). De même, la disposition des haubans en élévation peut être différente, parallèles entre eux, convergents en tête du mât, ou plus fréquemment rayonnant en harpe.

Les tabliers de ponts à haubans, notamment pour les ouvrages de grande portée, sont, dans la plupart des cas, construits en encorbellement à partir des pylônes. Ce fut notamment le cas pour les grands ponts à haubans à tablier en béton réalisés en France, tels que le premier d'entre eux, le Pont de Brotonne, sur la Seine, en aval de Rouen, avec ses 320 m de portée pour la travée centrale, le Pont d'Iroise sur l'Elorn à Brest (figure 24), avec sa travée centrale de 400 m de portée, le Pont de Bourgogne sur la Saône à Chalons, le Pont sur le Rhône entre Beaucaire et Tarascon, et plus récemment le Pont de Térénez, sur l'Aulne, dans le Finistère (figure 25), remarquable par la courbure en plan très prononcée de son tablier. Une des principales difficultés dans ce cas est alors la maîtrise du réglage de la tension des haubans et de la géométrie du tablier, l'ensemble étant dans un schéma hautement hyperstatique et éminemment

23- Pont du Morbihan à La Roche Bernard.

24- Pont d'Iroise sur l'Elorn à Brest.

25- Pont de Térénez sur l'Aulne dans le Finistère.

26- Pont sur le Var à Puget Théniers, mis en place par rotation.

23- Morbihan Bridge at La Roche Bernard.

24- Iroise Bridge over the Elorn at Brest.

25- Térénez Bridge over the Aulne in the Finistère region.

26- Bridge over the Var at Puget-Théniers, placed in position by slewing.

variable au fur et à mesure de l'avancement de la construction du fléau. C'est pourquoi, chaque fois que cela est possible, notamment pour des ouvrages de portée moyenne, il peut être intéressant de construire le tablier de l'ouvrage sur appuis provisoires, puis, une fois le tablier terminé, de mettre en tension les haubans pour l'amener dans sa configuration statique définitive. Ceci peut être réalisé soit en réalisant le tablier par poussage sur des palées provisoires (pont de Seyssel), soit en construisant l'ouvrage parallèlement à la brèche à franchir, puis après mise en tension des haubans, à l'amener dans sa position finale par rotation. Ce fut le cas pour des ouvrages comme la Passerelle de Meylan sur l'Isère à Grenoble, celle de l'Illhoff à Strasbourg, le Pont de Gilly-sur-Isère à Albertville, le Pont de Puget Théniers sur le Var (figure 26) ou le Pont de Beauvais sur l'autoroute A16. Outre les ponts, comme ceux que nous venons de voir, dont la structure porteuse est entièrement en béton, armé ou précontraint, nous trouvons aussi des ponts dont le tablier associe l'acier au béton autrement que par les simples armatures passives ou actives. Il s'agit généralement de charpente métallique associée au béton, ou de profilés métalliques, voire de panneaux de tôles, intégrés à la poutre porteuse en béton.



© RAZEL

26

LES PONTS DE TYPE BI-POUTRE MIXTE

Dans le cas de ces ouvrages la structure porteuse est constituée de deux poutres métalliques de section en I, couramment appelées P.R.S. (Profilés Reconstitués Soudés), associées à un hourdis supérieur en béton formant dalle sous chaussée. Cette dalle en béton participe, notamment en milieu de travée où elle est comprimée, à la flexion générale de la poutre.

En fonction de la largeur du tablier, ces ouvrages peuvent être soit « à entretoises », soit à « pièces de pont ». Pour des largeurs de tablier généra-



27

© RAZEL



28

© RAZEL



29

© RAZEL

lement inférieures à une quinzaine de mètres, les poutres sont simplement entretoisées par des profilés métalliques, disposés tous les 8 à 10 m, et soudés à ces dernières en leur partie médiane ou basse. La dalle en béton du hourdis supérieur, qui supporte les équipements du tablier et les charges roulantes travaille alors en flexion transversale simplement appuyée sur les poutres longitudinales.

Pour des largeurs plus importantes, pouvant aller jusqu'à une trentaine de mètres, l'ouvrage est dit « à pièces de pont ». Dans ce cas, les poutres principales sont beaucoup plus espacées et les entretoises, appelées pièces de pont, plus rapprochées, tous les 4 m environ, sont placées en partie supérieure des poutres, le hourdis supérieur en béton s'appuyant alors sur ces pièces de pont.

Généralement, lorsque la géométrie de l'ouvrage le permet, les poutres métalliques sont assemblées sur une des rives, en arrière de la culée d'extrémité, puis amenées dans leur position définitive par lançage, sur des rouleaux métalliques appelées chaises à galets. Lorsque ce lançage n'est pas possible, les poutres métalliques sont alors placées à la grue et soudées entre elles en place.

Le hourdis supérieur est ensuite réalisé. Selon le type d'ouvrage, différentes techniques de construction pour ce hourdis sont utilisées. Pour les ouvrages à entretoises, il est généralement coulé en place sur un coffrage suspendu à un cintre métallique se déplaçant sur la charpente (figure 27). Il peut être aussi constitué de dalles préfabriquées et posées, ou, dans certaines configurations, mis en place par poussage.

Dans le cas des ouvrages à pièces de pont, généralement le hourdis est coulé sur des pré-dalles posées sur les poutres et les pièces de pont.

Le domaine économique privilégié de ce type d'ouvrage varie d'une cinquantaine de mètres aux environs

27- Pont sur le Golo en Corse - bétonnage de la dalle sur un équipage mobile.

28- Viaduc de Cheval Blanc sur la Durance pour le TGV Méditerranée.

29- Pont d'Abra sur le Taravo en Corse, à âmes ajourées.

30- Pont du Bras de la Plaine à l'Entre Deux à La Réunion.

27- Bridge over the Golo in Corsica - concreting the slab on a mobile rig.

28- Cheval Blanc Viaduct over the Durance for the Mediterranean high-speed railway line.

29- Abra Bridge over the Taravo in Corsica, with perforated webs.

30- Bras de la Plaine Bridge at Entre Deux on Reunion Island.

de 120 m, et on trouve de très nombreux exemples d'application tant pour des ouvrages routiers que pour des ouvrages ferroviaires tel que les viaducs de Cavillon ou de Cheval Blanc sur la Durance pour la ligne ferroviaire du TGV Méditerranée (figure 28).

LES PONTS EN BÉTON PRÉCONTRAIT À ÂMES SPÉCIALES EN BÉTON OU MÉTALLIQUES

Depuis plusieurs années, les ingénieurs de bureaux d'études ont cherché à améliorer les caractéristiques et les performances de ces structures.

Les recherches effectuées ont montré que cet objectif devait, pour être atteint, répondre à deux impératifs : d'une part l'augmentation du rendement mécanique de la poutre (c'est-à-dire augmenter son inertie en réduisant sa section) et d'autre part l'utilisation optimale des matériaux. Pour cela, partant du constat que le matériau béton travaille parfaitement bien à la compression mais très mal en traction et en cisaillement, la logique a conduit les ingénieurs à chercher des solutions permettant d'améliorer, voire de remplacer les âmes des caissons, jusqu'ici réalisées en béton traditionnel. En effet,

ces âmes, reliant les hourdis supérieur et inférieur, étant destinées à résister aux efforts tranchants, sont sollicitées principalement en cisaillement.

Ainsi les recherches se sont orientées, depuis les années 1980, dans trois directions principales. D'une part sont apparus des ouvrages dits « à âmes ajourées », c'est-à-dire dont les âmes ne sont pas continues mais se présentent sous forme de triangles, comme dans le cas du Pont sur le Vecchio, ou le Pont d'Abra sur le Taravo (figure 29), tous deux en Corse. D'autre part des ouvrages en treillis, les hourdis supérieur et inférieur étant reliés par un réseau de tubes métalliques disposés en diagonale, comme dans le cas du Pont du Bras de la Plaine sur l'Île de La Réunion (figure 30), ou les viaducs du Boulonnais pour l'autoroute A16. Enfin, est apparue une nouvelle catégorie d'ouvrages associant de façon intelligente acier et béton, dans la mesure où les âmes sont constituées de panneaux métalliques transmettant l'effort tranchant mais ne subissant pas de compression du fait de leur déformabilité longitudinale. On obtient ainsi des structures dont le « rendement mécanique » est particulièrement élevé. Dans cette catégorie nous trouvons d'une part les ouvrages dits « à âmes plissées », suivant un brevet déposé par Campenon Bernard, tels que le Pont de Cognac ou le Viaduc de Charolles (figure 31), et d'autre part les ouvrages dits « à âmes plano-tubulaires », suivant un brevet détenu par Razel, tel que le Viaduc de Meaux (figure 32).

LES PILES ET PYLÔNES DE GRANDE HAUTEUR

Une autre application du béton particulièrement intéressante et importante dans le domaine des ponts, même si, dans ce cas, les tabliers sont très souvent constitués de structures métalliques, concerne les piles de grande hauteur et les pylônes des ponts suspendus et des ponts à haubans. ▷

© MICHEL PLACIDI



30



31

32

33

© STRUCTURAE

© MICHEL PLACIDI

© EIFFAGE TP

De tels ouvrages, dont les hauteurs dépassent aujourd'hui assez couramment les 100 ou 150 m, sont maintenant assez fréquents. Trois exemples particulièrement représentatifs de cette catégorie sont donnés par les piles du Viaduc de Verrières et plus encore par celles du Viaduc de Millau sur l'autoroute A75 (figure 33), ces dernières atteignant, pour la pile P2 de Millau la hauteur de 245 m (record du monde actuel), ainsi que par les pylônes du Pont de Normandie sur la Seine, près du Havre (figure 34) qui culmine à 215 m de hauteur.

CONCLUSION

Comme nous venons de le voir, les applications du béton dans le domaine de la construction des ponts sont extrêmement nombreuses et très variées. L'avenir de ces applications est lié à la fois à celui du matériau béton proprement dit et aux recherches menées dans ce domaine mais aussi aux innovations qui ne manqueront pas de voir le jour tant en ce qui concerne les structures que les méthodes de construction. Je pense personnellement que les innovations, dans les années et les décennies qui viennent, devraient se développer dans trois directions.

Tout d'abord, en profitant de l'amélioration des caractéristiques des matériaux, et notamment du béton, mais aussi d'une plus grande maîtrise des procédés de construction et des enseignements tirés de l'expérience. Cela devrait se traduire par une augmentation des performances des structures et surtout par une amélioration encore plus forte de leur qualité, de leur pérennité et de leur durabilité. Ensuite, l'utilisation des nouveaux bétons, des BHP et des BFUP devraient permettre de poursuivre les recherches visant à améliorer les performances des structures en associant intelligemment les matériaux de façon à leur permettre de travailler dans les meilleures conditions. Ainsi par exemple, l'association d'âmes en BFUP dans des structures en caisson dont les hourdis supérieur et inférieur seraient en béton classique, voire en BHP, devraient conduire à des structures à la fois beaucoup plus légères et plus performantes, ouvrant la voie à des ouvrages de plus grandes portées. Enfin, les caractéristiques exceptionnelles des BFUP, et leurs spécificités, doivent nous conduire à les considérer comme véritablement un matériau nouveau, certes issu du béton, mais nouveau néanmoins. Ce n'est pas de

31- Viaduc de Maupré à Charolles à âmes plissées.

32- Viaduc de Meaux à âmes plano-tubulaires.

33- Pile P2 du Viaduc de Millau sur l'autoroute A75.

34- Pylône du Pont de Normandie.

31- Maupré Viaduct at Charolles, with creased webs.

32- Meaux Viaduct with flat tubular webs.

33- Pier P2 of the Millau Viaduct on the A75 motorway.

34- Tower of the Normandy Bridge.

Ce n'est pas non plus du béton traditionnel, bien que leur mode de fabrication s'en inspire, mais leurs valeurs de résistance et leur comportement en sont radicalement différents. Et à matériau nouveau doivent être imaginées, inventées, créées des structures nouvelles, avec des méthodes de construction adaptées à ce matériau et à ces structures nouvelles. C'est probablement dans cette direction que les innovations devraient être les plus remarquables et les plus importantes. □



34

© STRUCTURAE

l'acier, bien que certaines valeurs de résistance en soient très proches, mais leur mode de fabrication et leurs modes d'assemblage ne sont pas les mêmes.

ABSTRACT

BRIDGES

MICHEL PLACIDI, RAZEL-BEC

Among the earliest and most important applications for concrete were bridges. *Of various types, with sometimes highly varied characteristics, bridges make use of specific construction techniques and methods for which the structures are appropriate. The article reviews various categories of bridges, classified according to their construction technique or their structural functioning, mentioning for each of them a few representative examples: bridges cast on centres, fixed or self-launching, launched bridges, bridges built by successive cantilevering, cast in situ or prefabricated, arch bridges and cable-stayed bridges, but also composite steel-concrete bridges and new structures with enhanced features (pierced webs, metallic webs or lattices).* □

LOS PUENTES

MICHEL PLACIDI, RAZEL-BEC

Los puentes figuran entre las primeras y más importantes aplicaciones del hormigón. *Estas obras de ingeniería de diferentes tipos, con características a veces muy variadas, recurren a técnicas y métodos de construcción específicos a los que se adaptan las estructuras. El artículo analiza las diferentes categorías de estructuras, clasificadas según su método de construcción o su funcionamiento estructural, citando algunos ejemplos representativos para cada una de ellas: puentes colados sobre cimbras, fijas o autolanzables, puentes pretensados, puentes contruidos por velos sucesivos, colados en situ o prefabricados, puentes en arco y puentes atirantados, pero también puentes mixtos de acero y hormigón, así como nuevas estructuras con prestaciones mejoradas (almas alveoladas, almas metálicas o en celosía).* □



1

© EDF / OLIVIER GUERRIN

BÉTONS DE BARRAGE

AUTEUR : MICHEL GUERINET, DIRECTEUR SCIENTIFIQUE, EIFFAGE CONSTRUCTION

LES BARRAGES EN BÉTON ONT PARTICIPÉ DE FAÇON NOTABLE AU PROGRÈS DE CE MATÉRIAU. ILS ONT BÉNÉFICIÉ EN RETOUR DES POSSIBILITÉS OFFERTES PAR L'UTILISATION DE LA VIBRATION IMAGINÉE PAR EUGÈNE FREYSSINET. CELA EXPLIQUE LE DÉVELOPPEMENT UN PEU TARDIF DES BARRAGES VOÛTE OUVRANT UNE VOIE ROYALE À DES COMBINAISONS VARIÉES. DANS CE DOMAINE, LES CONCEPTEURS FRANÇAIS ONT APPORTÉS DES SOLUTIONS REMARQUABLEMENT INNOVANTES. APRÈS UNE TRAVERSÉE DU DÉSERT, LA RENAISSANCE DES BARRAGES EN BÉTON A ÉTÉ RENDUE POSSIBLE GRÂCE À UNE NOUVELLE TECHNIQUE, LE BCR (BÉTON COMPACTÉ AU ROULEAU) EXPLOITANT LES ÉCONOMIES GÉNÉRÉES PAR LE MATÉRIEL DE TERRASSEMENT.

INTRODUCTION

Parmi les différents ouvrages réalisés en béton, les barrages sont certainement ceux qui utilisent les plus grandes quantités de ce matériau. À titre d'exemple, le barrage de la Grande Dixence, réalisé en Suisse et terminé en 1961, présente un volume de béton de 6 millions de mètres cube (figure 2). Plus récemment mais aussi plus éloigné, l'aménagement des Trois Gorges en Chine a nécessité la production de 27 millions de mètres cube. Un domaine aussi consommateur a évidemment participé de façon nota-

1- Barrage de Grandval - 1955.

1- Grandval Dam - 1955.

ble aux progrès du matériau béton :
→ Par la nécessité de limiter les transports favorisant l'utilisation des ressources locales ;
→ Par les contraintes économiques de tels projets imposant, entre autres, une

approche rigoureuse et optimisée des formulations du béton ;

→ De par la situation de sites en altitude où sont souvent réalisés ces ouvrages et qui sont généralement exposés à des conditions climatiques sévères. De telles conditions ont favorisé le développement de dispositions destinées à protéger le matériau du gel ;
→ De par le dégagement de chaleur associé à la prise du béton, particulièrement important dans de tels ouvrages, et qui a conduit à des méthodologies d'exécution spécifiques ;
→ Du fait des incontournables équipe-

ments hydrauliques associés à un barrage et qui doivent résister à l'abrasion générée par des écoulements importants, voire aux risques de cavitation. Les barrages ont ainsi contribué au développement des bétons spéciaux. C'est donc un domaine particulièrement moteur dans le développement du matériau béton que nous allons évoquer dans ce chapitre.

Si les contraintes éditoriales nous imposent un parcours rapide, nous essaierons de compenser par des images d'ouvrages qui sortent de l'ordinaire et font rêver !



2

© CIGB LAUSANNE

LES ORIGINES DES BARRAGES EN BÉTON

Le premier abandon de la maçonnerie au profit du béton en matière de barrage s'est fait lors de la réalisation d'un barrage poids aux États-Unis d'Amérique achevé en 1888. Il s'agit du barrage de San Mateo (Lower Crystal Springs), haut de 50 m environ et long de 200 m (120 000 m³ de béton) qui a été construit près de San Francisco pour retenir de l'eau potable destinée à cette ville.

En France, c'est le barrage d'Eguzon, construit de 1921 à 1926, qui est recensé comme étant le premier barrage français réalisé en béton.

Le « béton coulé » était alors « surmouillé » pour faciliter une mise en place souvent réalisée à l'aide de goulottes formant toboggan. Le matériau frais était ensuite simplement serré par « damage ». De gros enrochements y étaient incorporés afin de former un béton dit « cyclopéen ». Ce n'est qu'avec le recours à la vibration, méthode imaginée par Eugène Freyssinet vers 1917 et destinée à assurer un serrage efficace du béton, que la tendance s'est orientée vers des bétons « plastiques », à consistance « terre humide », présentant un retrait moindre et de meilleures résistances. Le béton de barrage avait alors trouvé sa voie. Les dispositions de jointoiment ont évoluées rapidement, bénéficiant

2- Barrage de la Grande Dixence en Suisse (plus haut barrage poids du monde).

3- Types de barrage - coupe horizontale.

4- Évolution de la hauteur au fil des décennies.

2- Grande Dixence Dam in Switzerland (highest gravity dam in the world).

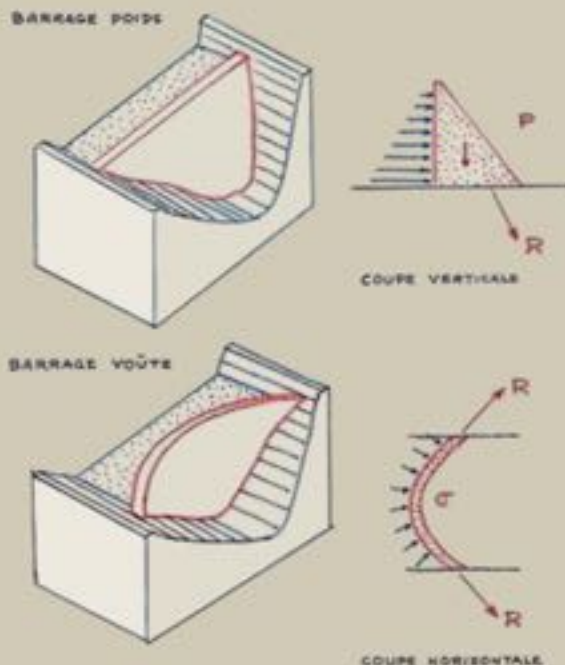
3- Types of dam - horizontal section.

4- Changes in height over the decades.

d'une expérience de plus en plus riche. Cette expérience a permis de mieux gérer une problématique complexe dans le domaine de la construction des barrages.

Les joints dits « doubles » furent d'abord constitués en aménageant un espace entre plots de l'ordre du mètre. Ces espaces étaient destinés à faciliter le refroidissement du béton. Les évidements ainsi constitués étaient ensuite bétonnés lorsque la température des

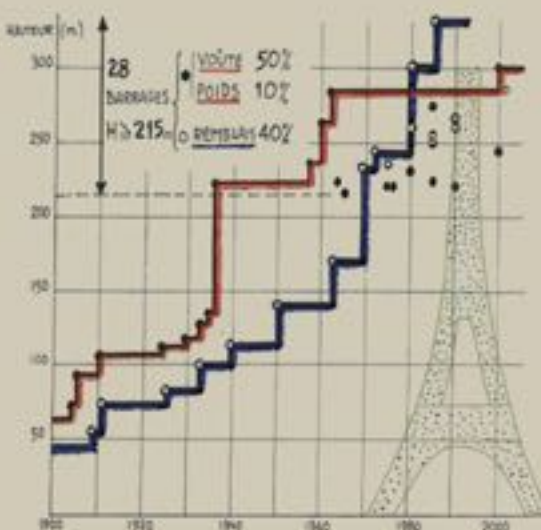
TYPES DE BARRAGE - COUPE HORIZONTALE



3

© PIERRE LONDE

ÉVOLUTION DE LA HAUTEUR DES BARRAGES AU FIL DES DÉCENNIES

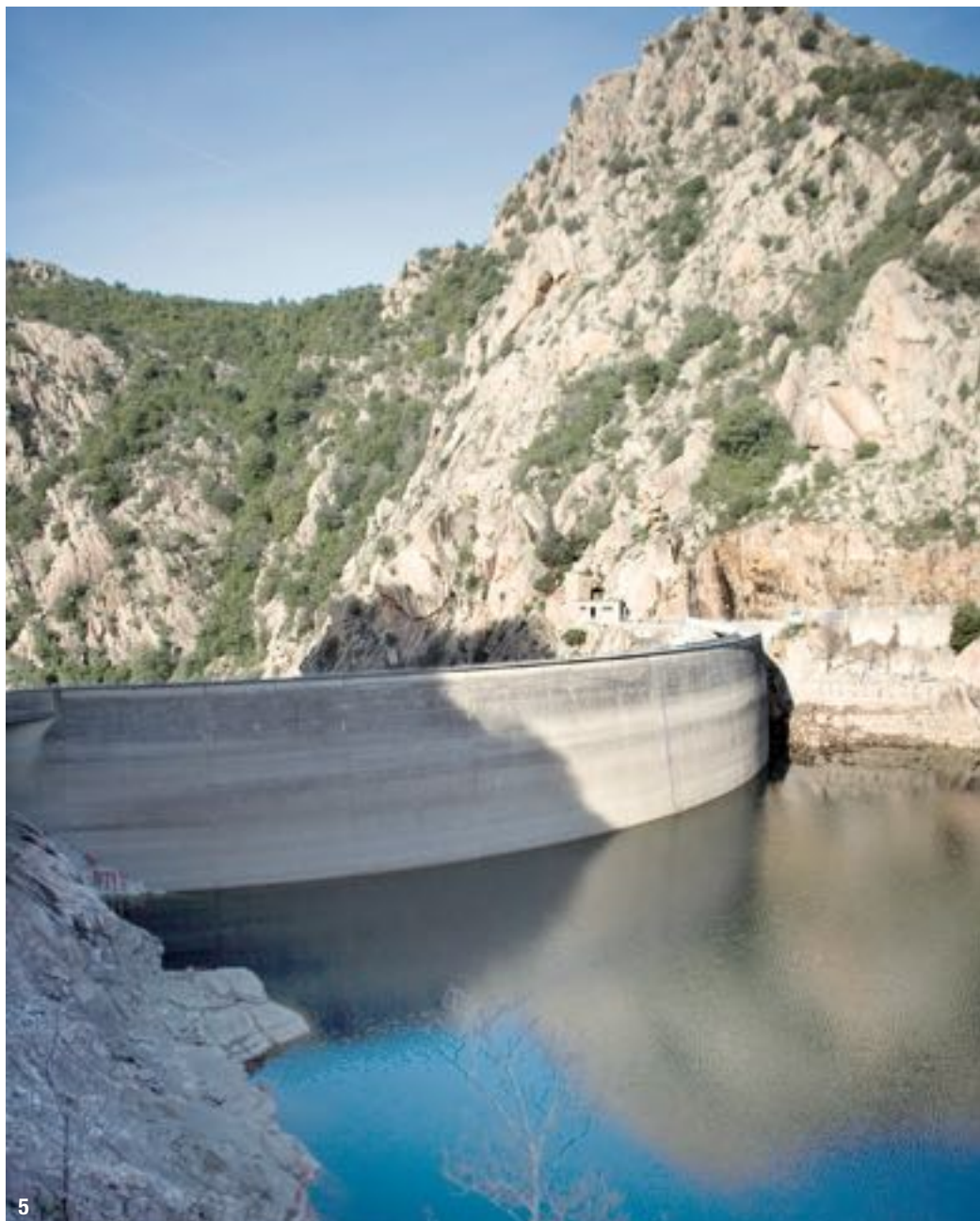


4

© PIERRE LONDE

bétons, situés de part et d'autre du joint, avait suffisamment diminuée. Mais cela conduisait à doubler le plan d'étanchéité à l'amont, plan qui impose des dispositions assez délicates à gérer. Ces joints doubles ont naturellement évolué par la suite pour donner naissance à la technique moderne des joints simples, injectés si nécessaire, en particulier lorsque des efforts doivent les traverser. Dans le domaine de la mise au point de telles dispositions

techniques délicates, la contribution importante de la Commission Internationale des Grands Barrages (CIGB-ICOLD) se doit d'être mentionnée. Cette société savante, dont le premier congrès a eu lieu en Scandinavie en 1933, a toujours accompagné (et continue à le faire) le développement des barrages. En particulier, et pratiquement depuis leur origine, elle a fortement œuvré à perfectionner la technique des barrages en béton.



5

© EDF / LAURENT VAUTRIN

ÉVOLUTION DES BARRAGES EN BÉTON, QUELQUES REPÈRES DU BARRAGE POIDS À LA VOÛTE

Le barrage poids présente un profil tel que la stabilité est assurée pour chaque tranche verticale de l'ouvrage (figure 3). La conception des barrages poids est donc simple et rassurante a priori. Lorsque le recours au béton est apparu, cette conception s'était déjà affinée au cours du temps à travers de nombreuses réalisations de barrages en maçonneries. L'étude du comportement du barrage de Bouzey a permis à Maurice Lévy de définir le principe de stabilité de ce type d'ouvrage. Ce principe conditionne le dimensionnement de l'ouvrage à la vérification

5- Barrage de Tolla en Corse - 1958 (type voûte optimisée).

5- Tolla Dam in Corsica - 1958 (optimized arch type).

d'une contrainte de compression sur le parement amont toujours supérieure à la pression de l'eau de la retenue au niveau correspondant : les conséquences d'une fissure éventuelle au contact de la retenue sont alors limitées. Les masses de béton mis en

œuvre dans les barrages poids sont conséquentes. Il est donc naturel de chercher à les limiter. C'est ainsi que les dosages en ciment ont été réduits au cœur des ouvrages, moins sollicités par rapport aux parements qui sont, eux, soumis de plus aux agressions climatiques. Puis sont apparus les barrages poids évidés.

Le développement des barrages voûte est plus tardif, peut-être parce que les moyens de calcul disponibles n'étaient pas faciles à appliquer à ces structures fortement hyperstatiques. Le barrage Zola en France fait figure de remarquable précurseur en la matière, avec ses 42 m de hauteur de maçonnerie et sa mise en service en 1854. Mais une période assez longue s'est écoulée

sans que les conceptions en voûtes ne soient reprises et appliquées aux ouvrages en béton.

La voûte de Marèges, une des premières grandes voûtes en béton à double courbure, a été achevée en France en 1935. Elle marque une étape remarquable ! D'abord par la taille de cet ouvrage (hauteur de 90 m et développée de 200 m environ), mais également par les multiples inventions qu'André Coyne a mis au point à l'occasion de cette réalisation (évacuateur en saut-de-ski, murs à échelle, stabilisation des culées par ancrages de fortes puissances, extensomètres à cordes vibrantes, Etc.). Cette réalisation exceptionnelle, qui a apporté la preuve de la maîtrise du béton spécifique à ces barrages exigeants, est certainement à l'origine des développements rapides qui ont suivi dans la conception et la réalisation des voûtes. La hauteur de ces ouvrages a doublé en quelques années, ouvrant ainsi la porte vers des barrages dont les hauteurs dépasseront 200 mètres et constitueront des records. Notons que la technique française a largement contribué à ce développement (figure 4).

Les méthodes de calcul d'ajustement des déformations entre arcs et consoles (Trial Load Methods) se développent pour permettre de justifier ces ouvrages complexes. Mais leur lourdeur d'application empêche de traiter les nombreux cas de charge que subissent ces ouvrages au cours de leur mise en eau. La réalisation du barrage de Tolla dans les années soixante marquera une étape importante. Elle permettra d'illustrer, sur une voûte particulièrement optimisée (hauteur de 90 m et développée en crête de 125 m avec une épaisseur de 1,5 m en tête et de 1,84 m en pied pour un volume global de béton de 17 000 m³ seulement), les effets prépondérants des cas de chargement intermédiaire. Elle sera renforcée par la suite avec un appoint de 51 000 m³ de béton (figure 5).

LE DÉVELOPPEMENT DE CONCEPTIONS ORIGINALES

Les conceptions des barrages ont toujours dû s'adapter au mieux aux particularités des différents sites à équiper. En déclinant les multiples possibilités qu'offrent les combinaisons des contreforts et des voûtes, les concepteurs français ont su apporter des réponses intéressantes. Dans ce domaine, il faut citer le barrage de Grandval achevé en 1959 et présentant une hauteur de 88 m pour une longueur de 400 m. ▷

Cet ouvrage illustre une optimisation du volume de béton difficilement imaginable de nos jours (figure 1).

La réalisation la plus impressionnante de ce point de vue est certainement le barrage de Roselend dans les années soixante. Sa conception très originale a été imposée à la fois par les exigences du niveau de la retenue et par la topographie particulière du site. Ce projet particulièrement complexe a fait l'objet de nombreuses études pour aboutir à un véritable chef d'œuvre. La solution qui est apparue la mieux adaptée est constituée d'un barrage à contreforts de 50 m de hauteur se développant sur plus de 800 m de longueur et s'appuyant sur un éperon rocheux dont l'embase forme un barrage naturel. Cet ouvrage doit franchir une gorge désaxée, qui coupe profondément l'éperon rocheux. La solution retenue consiste à prolonger les contreforts en les appuyant sur une impressionnante voûte plongeante de 150 m de hauteur et de 200 m environ de développement ! (figure 6).

Les possibilités offertes par le matériau béton permettaient d'imaginer un projet adapté aux spécificités très particulières du site. Mais la justification d'une telle structure dépassait nettement les moyens de calcul disponibles à l'époque. L'analyse des formes définitives de cet ouvrage exceptionnel a donc été menée à l'aide de modèles réduits. Au départ en caoutchouc à l'échelle 6/1000 et chargée par de l'eau, le modèle a, par la suite, évolué en faisant appel au plâtre, plus représentatif du comportement du béton. La maquette était chargée par des vérins. Ces essais ont permis d'affiner la solution et d'aboutir à la réalisation de ce projet exceptionnel qui s'apparente ici à du génie. Son comportement satisfaisant, ainsi qu'a posteriori l'utilisation des moyens de calculs modernes, ont pu confirmer la justesse d'une conception aussi originale.

RETOUR SUR LE MATÉRIAU BÉTON

L'optimisation du matériau béton a toujours accompagné la démarche des concepteurs de barrages. Depuis 1935 et jusqu'après 1950 de nombreux travaux, dont ceux de J. Faury et d'Albert Caquot en particulier, ont fournis des outils applicables aux formulations des bétons de barrages. Ces outils ont participé évidemment, et ceci de façon très générale, aux progrès en matière de composition des matériaux à base de liants hydrauliques.

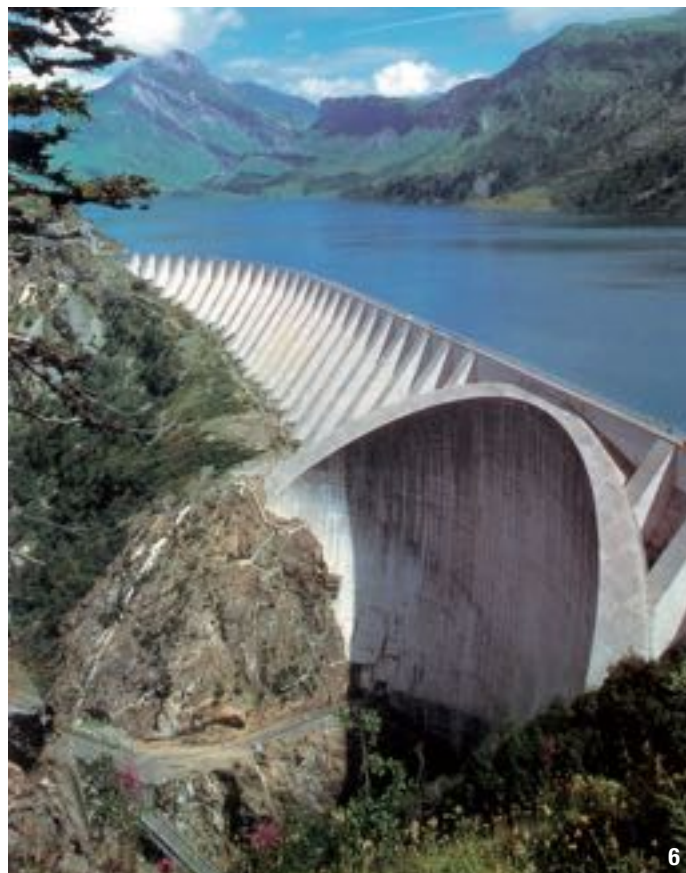


FIGURE 6 © CIGB LAUSANNE / FIGURE 7 © PHOTOTHÈQUE EIFFAGE TP

L'utilisation de coffrages semi-grimpants, directement accrochés dans le béton de la levée sous-jacente, impose une résistance suffisante aux jeunes âges lors du coulage de la levée suivante (cette disposition est particulière aux barrages en béton pour lesquels les tiges reliant les coffrages entre eux ne peuvent être employées). Et ceci de façon à permettre de respecter un planning d'exécution calé en tenant compte de nombreux critères, dont le nombre de plots à réaliser mais surtout le temps d'attente suffisant qui permettra de limiter la chaleur interne du béton avant recouvrement par la levée suivante. Lorsque cela devient trop complexe à

maîtriser, le recours à la réfrigération des constituants ou au refroidissement du béton dans la masse deviennent parfois inévitables comme ce fut le cas pour le barrage du Dokan (réalisé en Irak dans les années soixante par des entreprises françaises).

La formulation des bétons pour barrages est basée sur l'utilisation de granulats de fortes dimensions permettant d'obtenir les résistances recherchées en minimisant le dosage en ciment (D_{max} pouvant atteindre 200 mm par exemple à Roselend). Le problème de fond reste, en effet, celui d'arriver à limiter une élévation de température directement liée au dosage en ciment tout en assurant une résistance nécessaire apportée par le liant hydraulique. Cette capacité de résistance doit être atteinte aux jeunes âges, mais aussi en service à des échéances calées sur 90 jours et 1 an pour ce type d'ouvrage. C'est ainsi que des résistances de plus de 30 MPa ont pu être atteintes avec des dosages en ciment limités à seulement 220 Kg/m³ de ciment à base de laitier.

L'étude du projet doit prendre en compte une rapidité d'exécution compatible à la fois avec à une réalisation guidée par des considérations économiques, mais aussi par le respect des périodes de risques liées aux crues. Et ceci pour une construction qui s'étale en général sur plusieurs années. C'est ce qui va conduire au dimensionnement des ateliers constituant la chaîne de production des bétons, allant de l'exploitation de la carrière à la mise en place du béton par des outils spéciaux tels que les blondins. Ces moyens de levage et de transport particuliers sont capables de déplacer des charges pouvant atteindre 25 tonnes. Bien sûr, les installations de concassage et de criblage des matériaux ainsi que le traitement des eaux de lavage des granulats doivent s'inscrire dans cette capacité de production, ce qui pose souvent des problèmes complexes à solutionner.

6- Barrage de Roselend dans son environnement.

7- Barrage du Sep (département du Puy-de-Dôme).

6- Roselend Dam in its environment.

7- Le Sep Dam (Puy-de-Dôme region).

L'APPARITION DU BCR « BÉTON COMPACTÉ AU ROULEAU »

Mais cette épopée des barrages en béton s'est heurtée à une limite dans les années quatre-vingt. Le développement de moyens de terrassement puissants a permis de concevoir et de réaliser des solutions économiques de grandes dimensions en enrochements. Ces ouvrages ont rattrapé, puis dépassé les records de hauteur établis par les barrages en béton, venant



8

© VINCI / FRANCIS VIGOUROUX

empiéter ainsi sur leur domaine de prédilection. Parallèlement, cette forte mécanisation a favorisée les ouvrages en remblais plus modestes qui ont progressivement envahi ce domaine.

Les barrages en béton ont alors connu une traversée du désert. Mais ce domaine de la construction a su renaître en développant une nouvelle technique originale. L'apparition du concept de BCR a offert au domaine des barrages en béton la possibilité de bénéficier à son tour des économies offertes par les matériels de terrassement. Cette technique moderne permet de réduire notablement les dosages en liant grâce à la puissance de serrage disponible apportée par les compacteurs vibrants. Elle offre également la possibilité de pratiquer des vitesses de montée des ouvrages particulièrement performantes, avec un avancement voisin du mètre de hauteur au cours d'une journée de travail sur un barrage courant. La production du béton peut se faire en continu avec des centrales routières configurées pour fournir de

8- Barrage de Wadi Dayqah au Sultanat d'Oman.

8- Wadi Dayqah Dam in the Sultanate of Oman.

fortes cadences de production, supérieures à 400 tonnes par heure.

C'est donc un béton nouveau et très particulier qui apparaît grâce encore aux barrages. Du fait de sa formulation mais aussi de son mode de fabrication, de transport et de mise en place particulièrement performants sur le plan économique, le BCR constitue une nouvelle alternative parmi les multiples solutions offertes par les bétons modernes.

Cette technique, analysée en France à travers les travaux du Projet national BaCaRa, a montré son intérêt et quelques limites à connaître. En particulier la nécessité de disposer de

surfaces de travail suffisantes pour que le rendement optimal des engins de terrassement puisse être réellement atteint. Cela élimine les petits ouvrages pour lesquels les bétons et méthodes classiques restent mieux adaptées. Cela conduit également à des profils nouveaux pour les barrages poids dont la crête s'élargit pour faciliter la circulation des engins de terrassement.

Une technique française performante a ainsi été développée. Elle a permis de réaliser de très beaux ouvrages dont le barrage du Sep près de Clermont-Ferrand (hauteur supérieure à 40 m, figure 7) ou le barrage de Petit-Saut en Guyane (hauteur de 47 m) avec une retenue record de 3,5 milliard de mètres cube pour un volume de BCR de 240 000 m³ mis en œuvre en cinq mois.

CONCLUSION

Les sites français permettant la création de barrages sont aujourd'hui quasi saturés. Mais de magnifiques projets restent encore à réaliser dans le monde

entier. Ils offrent un potentiel d'activité important pour nos entreprises dans un domaine où elles ont largement fait leurs preuves.

Les nombreux barrages existants en France exigent suivi et entretien, mais également modernisation.

Par exemple il est souvent nécessaire de revoir le calibrage des évacuateurs de crue ou des vidanges de fond après quelques décennies de service du barrage. Et ceci car il est toujours indispensable de chercher à améliorer la sécurité de ces aménagements.

La rehausse des barrages, permettant d'augmenter les volumes d'eau stockés ou les hauteurs de chute, constitue également une activité intéressante permettant de renforcer notablement la capacité de certains aménagements. Le domaine des barrages en béton continue donc d'offrir un potentiel d'activité important.

Ils justifient un intérêt continu de la profession et devraient nous offrir encore une activité très technique et particulièrement passionnante. □

ABSTRACT

DAM CONCRETES

MICHEL GUERINET, EIFFAGE

Concrete dams are undoubtedly among the structures that use the largest quantities of concrete. *Accordingly, they have obviously made a significant contribution to the progress of this material. They led to the development of a truly specific technique only through the use of vibration as imagined by Eugène Freyssinet. The development of arch dams, which took place later, opened the way for combinations of buttresses and arches, a field in which French designers provided innovative answers. Then concrete dams went through an uneventful period. The renaissance came with an original new technique, RCC (roller-compacted concrete), which made it possible to benefit from the savings offered by earthworks equipment. □*

HORMIGONES DE PRESA

MICHEL GUERINET, EIFFAGE

Las presas de hormigón figuran entre las obras que utilizan las mayores cantidades de hormigón. *Debido a ello, han contribuido en gran medida al progreso de este material. Sólo han permitido desarrollar realmente una técnica específica con la utilización de la vibración descubierta por Eugène Freyssinet. El desarrollo de las presas de bóveda, más tardío, abrió la vía a las combinaciones de contrafuertes y de bóvedas, ámbito en el que los diseñadores franceses aportaron respuestas innovadoras. Después, las presas de hormigón no evolucionaron. El resurgimiento se produjo con una nueva técnica original, el BCR (Hormigón Compactado con Rodillo), que permitió beneficiarse de los ahorros que ofrecen los materiales de excavación. □*



1- Pont de
Rion Antirion -
remorquage
d'une embase.

1- Rion Antirion
Bridge - Greece -
towing a base.

© PHOTOTHÈQUE VINCI

LES OUVRAGES MARITIMES ET FLUVIAUX, LES STRUCTURES OFFSHORE

AUTEUR : PATRICK CHASSAGNETTE, PROFESSEUR ECP – ENPC PARIS-TECH, GÉRANT SUNAJ CONSEIL

LE BÉTON, MATÉRIAU MASSIF ET RÉSISTANT AUX AGRESSIONS EXTÉRIEURES, EST DEPUIS LONGTEMPS UTILISÉ DANS LA CONSTRUCTION EN MILIEU AQUATIQUE. LES AMÉLIORATIONS RÉCENTES DE SES QUALITÉS (RÉSISTANCE, DURABILITÉ, MANIABILITÉ) ET LES NOUVELLES MÉTHODES DE RÉALISATION (PLATEFORMES AUTO-ÉLÉVATRICES, PRÉFABRICATION DE GRANDES STRUCTURES REMORQUÉES ET ÉCHOUÉES, ETC.) AUGMENTENT ENCORE L'ÉTENDUE DE SON DOMAINE D'APPLICATION.

Le béton est le matériau le plus utilisé lors de la construction de structures en milieu aquatique. En effet, les éléments à réaliser sont, en général, massifs pour pouvoir affronter des conditions d'utilisation parfois sévères dues principalement au milieu marin (houles, tempêtes, ...) mais également assurer les opérations portuaires (accostages et amarrages, surcharges d'exploitation, ...). Par ailleurs les propriétés physico-chimiques du béton lui permettent de résister raisonnablement bien à l'agressivité du milieu extérieur.

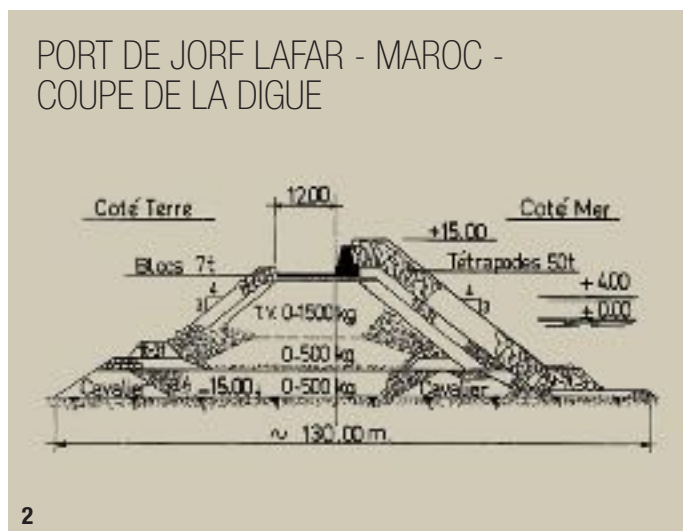
LES PORTS

Les principaux ouvrages portuaires peuvent être classés en deux catégories :
→ Les ouvrages de protection,
→ Les ouvrages d'amarrage.

LES OUVRAGES DE PROTECTION

Les ouvrages de protection (digues lorsqu'ils sont reliés à la terre et brise-lames lorsqu'ils sont isolés au milieu de l'eau) ne sont vraiment nécessaires que dans le cas des ports maritimes. Ils ont pour vocation de réaliser une zone dans laquelle les conditions nautiques, beaucoup plus favorables qu'en mer ouverte, permettent la manœuvre et l'accostage des navires.

Les digues et les brise-lames présentent donc des sections transversales dissymétriques avec, sur leur face extérieure (côté mer) une carapace de blocs qui a pour fonction de les protéger des effets de la houle et des



© SPIE BATIGNOLLES

2- Port de Jorf Lafar - Maroc - Coupe de la digue.

2- Jorf Lafar Port - Morocco - Cross section of the breakwater.

tempêtes (figure 2). Ces blocs doivent être d'autant plus massifs et lourds (plusieurs tonnes, voire dizaines de tonnes) que les conditions maritimes sont agressives. Si, aux alentours de la zone portuaire, il n'y a pas de carrière permettant la

production de blocs naturels (volume exploitable trop faible, nature du matériau inappropriée, fissuration excessive, ...) ou si la distance de transport est trop grande, cette carapace est réalisée avec des blocs en béton, préfabriqués et stockés sur le site, puis mis en place, un à un, à la grue (figures 3 et 4).

Ces blocs, qui ont fait l'objet d'études spécifiques, ont des formes variées (Tétrapodes, Dolos, Accropodes, ...) dont certaines sont brevetées (figure 5).

LES OUVRAGES D'ACCOSTAGE ET D'AMARRAGE

Les ouvrages d'accostage (quais) des ports maritimes et des ports fluviaux ont des conceptions identiques.

De différents types, ils permettent l'immobilisation des navires et les opérations de chargement et de déchargement.

→ Les quais à mur vertical

Les quais en blocs

Les anciens quais, construits par les phéniciens, les grecs, romains, ... découverts autour de la Méditerranée étaient constitués de blocs de pierre empilés pour réaliser un mur de soutènement vertical et continu contre lequel venaient accoster les navires. C'est donc tout naturellement que, lors de la réalisation de nouvelles installations au cours des siècles derniers, les blocs de pierre ont été progressivement remplacés par des blocs en béton préfabriqués (figure 6).

Les quais en parois moulées

Actuellement, c'est la technique des parois moulées qui, très souvent, est mise en œuvre pour la réalisation de cette surface verticale continue. Lorsque la profondeur nécessaire à la réception des navires au droit du quai est importante, des tirants assurent la stabilité de l'ensemble (figure 7). C'est, en particulier, le cas pour le grand projet Port 2000 au Havre (figure 8).

Les caissons en béton armé préfabriqués

Il est également possible de préfabriquer, à terre ou dans une forme de radoub, des caissons circulaires creux qui seront mis à l'eau et amenés par flottaison à leur emplacement définitif. Ils sont alors alignés, échoués et lestés avec un matériau pulvérulent (figure 9). ▷



© PATRICK CHASSAGNETTE

Il est possible d'achever le bétonnage de la partie supérieure de chaque caisson pendant qu'il est en flottaison, ce qui permet de libérer plus rapidement la zone de fabrication (figure 10).

→ Les quais sur pieux

Pour empêcher la réflexion de la houle sur la paroi verticale et éviter l'établissement d'un système d'ondes stationnaires d'amplitude double (clapotis), il a été mis au point une structure constituée d'un platelage en béton armé reposant sur des pieux verticaux. Dans ce cas, l'énergie cinétique de la houle est dissipée dans la zone libre située sous le quai, en avant du talus du remblai. Un revêtement en enrochements est mis en place sur la pente du talus pour le protéger des vagues et assurer sa stabilité (figure 11).

Une fois les pieux mis en place (battage, fonçage, ...), la réalisation du platelage, conduite de manière tout à fait traditionnelle, comparable à celle des planchers de bâtiment, fait très largement appel à la préfabrication d'éléments en béton armé (poutres, dalles, ...) liaisons entre-eux par des bétons, de deuxième phase, coulés *in situ*.

→ Les caissons « Jarlan »

Du nom de son inventeur, ce type de caisson est, à ce jour, une des formes les plus abouties de la construction des quais.

Il s'agit, en effet, de caissons en béton armé, creux, de forme parallélépipédique, dont les parois latérales sont percées de trous généralement circulaires.

La dissipation de l'énergie de la houle se fait par laminage de l'eau lors de son

passage à travers les opercules circulaires et par turbulence à l'intérieur des caissons.

Le nombre, l'implantation, les dimensions de ces trous dépendent des conditions maritimes locales de la zone concernée.

Ils sont, comme les caissons circulaires précédemment mentionnés, préfabriqués dans une forme de radoub, amenés par flottaison (après avoir pris soin d'obturer les trous situés dans la partie inférieure), alignés et échoués, mais laissés vides.

LES TRAVERSÉES SOUS-FLUVIALES

La technique choisie pour la réalisation, il y a quelques années, de la traversée sous le Vieux Port à Marseille et plus récemment à Paris pour celle de la Seine par la ligne de métro Météor, consiste à préfabriquer des caissons

3- Port de Tanger - Maroc - Coffrage d'un accropode.

4- Port de Tanger - Maroc - Stockage des accropodes.

5- Port de Jorf Lasfar - Maroc - Coffrage d'un tétrapode.

3- Port of Tanger - Morocco - Formwork of an accropode.

4- Port of Tanger - Morocco - Accropode storage.

5- Jorf Lasfar Port - Morocco - Formwork of a tetrapod.

en béton armé ou précontraint. Ces caissons, de forme parallélépipédique, sont creux pour laisser, en service, le passage à la voie routière ou ferroviaire. Ils sont flottés et échoués au fond d'une tranchée préalablement creusée dans le fond du fleuve. La souille est ensuite remblayée pour réaliser une protection complète du tunnel ainsi construit. Cette méthode est également très utilisée dans les pays nord-européens (Pays-Bas, Scandinavie, ...).

LES GRANDES STRUCTURES PRÉFABRIQUÉES FLOTTÉES

Les différentes méthodes de construction des ouvrages précédents mettent en évidence une tendance, maintenant très marquée, à la réalisation de d'éléments en béton armé ou précontraint, préfabriqués, amenés par flottaison à leur emplacement définitif et échoués. Dans cette catégorie, on peut citer :

LES PLATEFORMES OFFSHORE

La construction de ce type de plateformes offshore en béton a connu un développement très important à l'occasion de la mise en exploitation des champs pétroliers en Mer du Nord. La construction de ces nombreuses plateformes en béton, commencée dans les installations portuaires proches de leur localisation finale et susceptibles de les accueillir, a été terminée au large. Une fois achevées, elles ont été remorquées jusqu'à leur implantation définitive.

Ces installations sont constituées d'un socle massif en béton, servant d'assise à la plateforme, composé d'alvéoles destinées au stockage du pétrole



© PHOTOTHÈQUE SPIE BATIGNOLLES

PORT DE CASABLANCA - MAROC - COUPE DU QUAÏ EN BLOCS

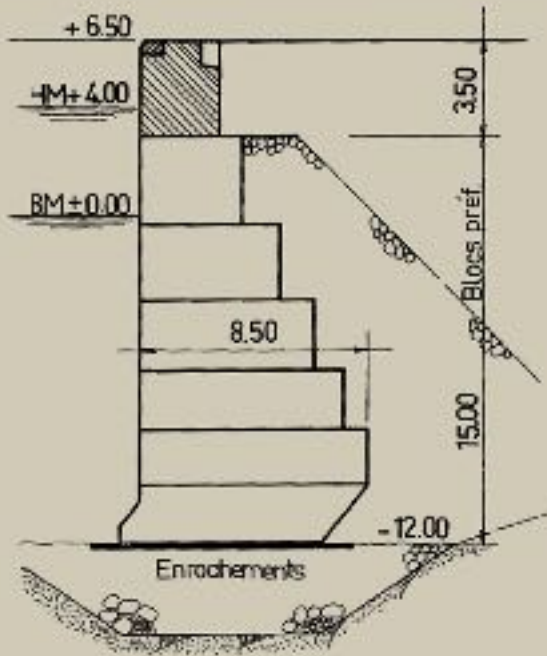


FIGURE 6 © SPIEBANTIGNOLLES / FIGURE 7 © PATRICK CHASSAGNETTE / FIGURE 8 © PHOTOTHÈQUE SOLETANICHE BACHY

6



8

brut et prolongé vers le haut par des colonnes en béton qui dépassent le niveau de la mer et servent de support à la plateforme de travail supérieure.

LES GRANDS CAISSONS

Les structures parallélépipédique, dont il est question, peuvent mesurer plusieurs centaines de mètres de long et ont été déplacés sur des distances très importantes. Dans cette catégorie on peut citer :

→ La barge N'Kossa, longue de deux cent vingt mètres, réalisée en France et remorquée jusque dans le golfe de Guinée pour les besoins de l'industrie pétrolière ;

→ La digue de La Condamine, longue de trois cent cinquante mètres, construite en Espagne (près d'Algésiras) et installée à l'entrée du port de Monaco, pour en augmenter les capacités d'accueil. Cette digue présente en plus la particularité, compte tenu de la très forte pente des fonds marins au large de la Principauté, d'être flottante. Elle est reliée au continent par une rotule en acier de huit mètres de diamètre et maintenue en position (côté

6- Port de Casablanca - Maroc - Coupe du quai en blocs.

7- Le Havre Port 2000 - Mise en place des tirants.

8- Le Havre Port 2000 - vue d'ensemble.

6- Port of Casablanca - Morocco - Cross section of the pier built of blocks.

7- Le Havre Port 2000 - Placing tie anchors.

8- Le Havre Port 2000 - General view.

mer) par des amarres ancrées dans le fond marin. L'espace intérieur est aménagé en parking (400 places).

LES OUVRAGES DIVERS

De nombreux ouvrages maritimes ou fluviaux font appel au béton pour leur réalisation ou pour leur réhabilitation. À titre d'exemple on peut citer :

LES ÉCLUSES ET FORMES DE RADOUB

Ces sas, qui ont un fond et des bajoyers latéraux en béton épais, peuvent atteindre des dimensions très importantes lorsqu'elles sont localisées dans les grands ports ou sur les grands canaux de navigation au gabarit européen.

LES ASCENSEURS À BATEAUX ET PENTES D'EAU

Ces installations ont pour originalité de permettre le franchissement du bief à la péniche et à l'eau qui l'entourne. Elles remplacent généralement plusieurs écluses successives et permettent d'économiser l'eau consommée lors de chaque éclusée.

LES ÉMISSAIRES EN MER

Ce sont des tuyaux immergés, généralement destinés à canaliser les eaux émises par une usine de traitement et de les rejeter, pour répondre aux nouvelles normes environnementales, en des points toujours plus éloignés de la côte. Ces émissaires sont souvent réalisés en béton armé ou précontraint.

LES PHARES

Actuellement ils ne sont plus utilisés pour la navigation, mais leur conservation, dans le cadre de la sauvegarde du patrimoine, fait l'objet de travaux confortatifs réalisés en béton mis en œuvre à partir de plates-formes auto-élevatrices (figure 12).

LES FONDATIONS EN MILIEU AQUATIQUE

La réalisation d'une fondation en milieu aquatique est toujours une opération délicate.

LA MÉTHODE HABITUELLE

C'est celle du béton coulé sous l'eau qui consiste, à l'intérieur d'un batardeau qui permettra la réalisation à sec de l'appui, ▷



10

11

FIGURE 9 © SPIE BATIGNOLLES / FIGURE 10 © PATRICK CHASSAGNETTE / FIGURE 11 © SPIE BATIGNOLLES

à bétonner en continu, en commençant par le fond et en remontant, à l'aide d'un « tube plongeur » dont l'extrémité inférieure doit rester dans le béton coulé de façon à ce que celui-ci soit constamment « nourri de l'intérieur ».

QUELQUES DÉVELOPPEMENTS RÉCENTS

À l'occasion de certaines réalisations exceptionnelles récentes, des méthodes particulièrement innovantes et des technologies avancées ont été mises en œuvre. Parmi ces réalisations, on peut citer :

→ Les piles du Viaduc de Rion-Antirion

Les embases des piles ont été construites en cale sèche, remorquées (figure 1) et échouées à leur emplacement définitif sur un sol de fondation complètement remanié compte tenu des contraintes sismiques (inclusions dans le sol constituées de pieux acier de 2 mètres de diamètre et de 25 à 30 mètres de long, recouverts

d'un tapis de gravier de 2,75 mètres d'épaisseur).

→ Les piles du pont levant Gustave Flaubert à Rouen

En prenant appui sur les pieux métalliques forés, les batardeaux des deux grands pylônes de levage des tabliers (et des Ducs d'Albe de protection) ont été construits hors d'eau par assemblage d'éléments préfabriqués en béton (figure 13).

L'ensemble de chaque batardeau ainsi réalisé a été descendu au fond du fleuve par vélinage, vidés et enfin lesté.

→ Les fondations des éoliennes offshore

Généralement les éoliennes en mer sont installées sur une mono-pile cylindrique en béton armé, ancrée dans le sol sous-marin.

De nouveaux types de fondation ont été étudiés et mis au point parmi lesquels :

- Les fondations gravitaires superficielles qui consistent à amener par flottaison une large embase en béton qui, après immersion, repose

9- Port de Jorf Lafar - Maroc - Alignement de caisson cylindriques préfabriqués.

10- Port de Tanger - Maroc - Bétonnage d'un caisson en flottaison.

11- Quai sur pieux - Vue de dessous.

9- Jorf Lafar Port - Morocco - Alignment of prefabricated cylindrical box girders.

10- Port of Tanger - Morocco - Concreting a floating box girder.

11- Pier on piles - Bottom view.

sur le fond marin par l'intermédiaire de vérins servant à régler son horizontalité. L'injection d'un béton à prise rapide sous l'embase permet de combler les irrégularités du fond et réaliser ainsi une surface d'appui continue. La déconstruction pourra se faire par déballastage.

- Dans les zones très profondes, les caissons en béton immergés mais flottants, amarrés au fond.

CONCLUSION

Les exemples présentés montrent que le béton a été depuis toujours, et continue à être, très largement utilisé lors de la réalisation d'ouvrages en milieu aquatique.

Dans l'avenir, cette utilisation pourra être encore accrue et améliorée en orientant les développements simultanément dans les directions suivantes :

- L'accroissement des qualités intrinsèques du matériau béton utilisé : non pas tant dans le domaine de l'augmentation de sa résistance mécanique si ce n'est dans des cas parti-



© EIFFAGE TP

12



13

culiers comme les mâts des grandes éoliennes off-shore où l'utilisation du BFUP pourra être envisagée compte tenu de l'importance des efforts de flexion ou pour diminuer l'épaisseur des éléments préfabriqués et réduire ainsi leur poids, mais plutôt dans celui de sa durabilité (diminution de sa porosité,

augmentation de son étanchéité et de sa résistance à l'agressivité marine), sans oublier l'amélioration de son ouvrabilité ;
→ L'utilisation de plateformes auto-élevatrices qui offrent des surfaces de travail stables et permettent de faire abstraction des effets de la houle et de

12- Estuaire de la Gironde - Confortement du phare de Cordouan.

13- Rouen - pont levant Gustave Flaubert - caissons de fondation des pylônes.

12- La Gironde estuary - Consolidation of Cordouan lighthouse.

13- Rouen - Gustave Flaubert lift bridge - tower foundation box girders.

la marée, tant pour la réalisation des travaux neufs en zone moyennement profondes que pour les réhabilitations de structures existantes ;

→ Le développement et la diversification des méthodes de construction fondées sur la réalisation de grandes structures en béton précontraint, préfabriquées, déplacées par flottaison et échouées à leur emplacement définitif. Certaines de ces grandes structures pourront d'ailleurs rester, de façon permanente, en flottaison et constituer ainsi des îlots, soit mobiles, soit ancrés au voisinage des côtes. Les destinations de ces structures flottantes pourront être très diverses (plateformes multifonctions, habitations, ...). □

ABSTRACT

MARITIME AND RIVER ENGINEERING STRUCTURES, OFFSHORE STRUCTURES

PATRICK CHASSAGNETTE

Massive and resistant to external attacks, concrete is often used for construction in aquatic environments. It is used for the execution of a great variety of structures such as breakwater protection blocks, various types of pier, locks, offshore platforms, under-river crossings, water slopes and discharge channels. The execution techniques are described: self-elevating platforms, prefabrication of large structures floated in and grounded, and some recent examples of foundations of large structures. Finally, guidelines for future developments are discussed: improvement in the quality of concretes (resistance, durability, workability) and development of the technique of large prefabricated elements, floated in and grounded. □

LAS OBRAS MARÍTIMAS Y FLUVIALES, LAS ESTRUCTURAS OFFSHORE

PATRICK CHASSAGNETTE

Macizo y resistente a las agresiones externas, el hormigón está muy presente en la construcción en medio acuático. Se utiliza en la construcción de estructuras muy diversas como bloques de protección de diques, diferentes tipos de muelles, esclusas, plataformas offshore, cruces subfluviales, pendientes de agua y emisarios. Se presentan los métodos de realización: plataformas autoelevadoras, prefabricación de grandes estructuras transportadas en flotación y varadas, así como algunos ejemplos recientes de cimientos de grandes estructuras. Por último, se mencionan orientaciones de futuros desarrollos: mejora de la calidad de los hormigones (resistencia, durabilidad y manejabilidad) y desarrollo de la técnica de grandes elementos prefabricados, flotados y varados. □



1
© DIDIER MARC

LES SPÉCIFICITÉS DU BÉTON DANS LES INSTALLATIONS CLASSÉES. LES CENTRALES NUCLÉAIRES DE PRODUCTION D'ÉLECTRICITÉ

AUTEURS : E. GALLITRE, EXPERT GÉNIE CIVIL, EDF - G. HEINFLING, DIRECTEUR ADJOINT AMÉNAGEMENT FLAMANVILLE 3

LES CENTRALES NUCLÉAIRES SONT DES OUVRAGES EXCEPTIONNELS QU'ON PEUT ANALYSER À TRAVERS DEUX PRISMES : CELUI DES SOLlicitATIONS POUR LESQUELLES ELLES SONT CONÇUES ET CELUI DES EXIGENCES QU'ON ATTEND D'ELLES EN FONCTION DES SITUATIONS. CES DIFFÉRENTES EXIGENCES SE TRADUISENT EN DE MULTIPLES CRITÈRES ET DISPOSITIONS APPLICABLES AUX DEUX MATÉRIAUX ACIER ET BÉTON. LES PRINCIPALES SOLlicitATIONS ET EXIGENCES SONT PRÉSENTÉES. LEUR PRISE EN COMPTE EST ILLUSTRÉE SUR TROIS OUVRAGES OU ENSEMBLE D'OUVRAGES EMBLÉMATIQUES D'UNE CENTRALE NUCLÉAIRE : L'ENCEINTE DE CONFINEMENT DES BÂTIMENTS RÉACTEURS QUI ABRIENT LA CHAUDIÈRE NUCLÉAIRE, LE BÂTIMENT EN CROIX DE L'ÎLOT NUCLÉAIRE DE L'EPR ET LES AÉRO-RÉFRIGÉRANTS.

QUELLES EXIGENCES POUR LE BÉTON DES CENTRALES NUCLÉAIRES ?

CONTEXTE ET DÉFINITIONS

Les Centrales Nucléaires (figures 1 & 2) sont définies comme des ouvrages à risque « spécial » dont les conséquences de la défaillance vont bien au-delà des limites physiques du

site sur lequel elles sont implantées. Le risque est d'autant plus important pour les Centrales Nucléaires que les conséquences pourraient se faire ressentir sur une durée très longue. La notion de « sûreté » découle de ce risque spécial, dont l'importance est bien identifiée. On la distingue de la « sécurité », cette dernière étant

1- Aéro-réfrigérants de la centrale de Chooz.

1- Cooling towers of the Chooz power station.

relative aux personnes se trouvant à l'intérieur ou à proximité immédiate de l'ouvrage : c'est pour la sécurité qu'ont été élaborées les règles courantes de construction (risque « normal »).

Pour prendre en compte l'importance du risque spécial associé à la notion de sûreté, il est nécessaire d'assigner aux Centrales Nucléaires une forte exi-



2

© DIDIER MARC

gence de fiabilité, en d'autres termes, un objectif de probabilité de défaillance annuelle particulièrement faible. Pour atteindre cet objectif il conviendrait de considérer chaque sollicitation (ou chargement) comme définie par sa probabilité d'occurrence en fonction de son intensité.

En pratique, cette vérification est faite a posteriori par les calculs de probabilité de défaillance effectués à la fin des études de dimensionnement puisque ces calculs sont effectués sur la base d'un objet bien défini. Pour définir cet objet, on fixe d'emblée en dimensionnement des niveaux de chargement de faible probabilité d'occurrence, donc d'intensité très forte. Cette approche dite « déterministe » est l'approche recommandée par l'AIEA (Agence Internationale de l'Energie Atomique) et est appliquée dans tous les pays pour la phase de dimensionnement des projets.

LES EXIGENCES LIÉES AUX CHARGEMENTS (SOLLICITATIONS)

Les ouvrages de génie civil des Centrales Nucléaires sont conçus pour subir trois types de chargements : les chargements permanents, les chargements variables et les chargements accidentels. Les deux premiers étant traités comme pour les bâtiments courants, ils ne sont pas abordés ici.

Au titre des chargements accidentels, on distingue les agressions externes (séismes, chutes d'avion, tornades, inondations externes, explosions externes, actes de malveillance, ...) et

2- Centrale Nucléaire de Dampierre.

2- Dampierre nuclear power station.

les agressions internes (inondations internes, accidents à l'intérieur du bâtiment réacteur, ...).

Le séisme pris en compte pour le dimensionnement enveloppe le « séisme majoré de sécurité », c'est-à-dire d'occurrence déca-millénaire (susceptible de se produire une fois tous les 10 000 ans). Ce séisme de dimensionnement ne donne lieu qu'à des calculs élastiques pour le génie civil, ce qui revient à définir par convention des sollicitations élevées pour le béton et l'acier. Ainsi pour l'EPR de Flamanville, compte tenu de la configuration des bâtiments et bien que ceux-ci soient tous contreventés par des voiles dans les deux directions, on peut atteindre localement pour ces conditions accidentelles hypothétiques, des contraintes de cisaillement à la base des bâtiments de l'ordre de 6 à 8 MPa. Une première conséquence de ce niveau de contrainte est la présence de quantités importantes de ferrailage dans les parties basses des bâtiments. Une deuxième conséquence est le traitement des reprises de bétonnage : les surfaces sont rendues rugueuses

de manière à ne pas augmenter encore les densités d'armatures.

En outre, suite à l'accident de Fukushima au Japon consécutif au tsunami, la vérification des structures est faite à des niveaux fixés forfaitairement plus haut et certaines dispositions constructives sont tout particulièrement analysées.

Les accidents internes au bâtiment réacteur

- sont de 3 types :
- Accident de fusion de cœur, appelé « accident grave » ;
 - Rupture de tuyauterie du circuit primaire ;
 - Rupture de tuyauterie du circuit secondaire.

Ces trois types d'accidents conduisent à une montée en pression et en température du volume libre à l'intérieur de l'enceinte très élevée.

Le cas le plus pénalisant pour l'EPR est l'accident grave avec une pression de 0,65 MPa absolue et une température de 170°C maintenues pendant 12h. Pour répondre à ces sollicitations, l'enceinte est en béton précontraint et revêtue à l'intrados par une peau métallique qui assure l'étanchéité. La température accidentelle se traduit par une mise en compression du béton à l'intrados de l'enceinte dont le revêtement métallique doit absolument rester étanche. Malgré l'effet positif du caractère bi-axial de cette compression, seul un béton d'une valeur caractéristique de 60 MPa peut convenir.

L'enceinte devant assurer sa fonction de confinement tout au long de sa vie (60 ans), malgré les pertes de précon-

trainte principalement dues aux déformations différées du béton par fluage, le concepteur a choisi un béton à faible fluage propre et de dessiccation et a recommandé l'emploi de fumées de silice (15% pour Civaux 2 et près de 10% sur Flamanville 3).

La rupture de tuyauterie du circuit secondaire donne lieu à des niveaux de pression inférieurs à ceux présentés ci-dessus et ne nécessite pas d'études particulières de dimensionnement du génie civil.

La prise en compte de la chute d'avion sur EPR se traduit par deux mesures essentielles :

→ Le regroupement sur un radier commun des bâtiments (les 4 bâtiments entourant le réacteur et formant une « croix ») afin de diminuer les effets d'ébranlement pouvant affecter le fonctionnement des matériels de sûreté requis en pareille circonstance ;

→ Le choix d'une caractéristique élevée en compression du béton des parois externes, soient 45 MPa pour la coque protégeant l'îlot nucléaire et 60 MPa pour la station de pompage. Ces parois externes qui forment une véritable coque de protection contre la chute d'avion se caractérisent également pas une quantité tout à fait exceptionnelle de ferrailage à la fois longitudinal et transversal.

LES EXIGENCES FONCTIONNELLES

Les exigences fonctionnelles fondamentales sont la durabilité, la stabilité, le supportage des équipements, l'étanchéité (aux liquides) et le confinement (des gaz).

Les deux premières exigences fonctionnelles de durabilité et de stabilité sont satisfaites par le respect des règles courantes de construction, adaptées à la nature des ouvrages. Vis-à-vis de la stabilité et de la durabilité, l'Eurocode 2 est appliqué avec peu d'adaptations. L'une d'entre elles concerne l'effort tranchant pour lequel nous nous sommes rapprochés des pratiques antérieures du BAEL (réglementation française antérieure aux Eurocodes). Vis-à-vis de la durabilité, quelques précisions sur la prise en compte du retrait du béton sont apportées pour la justification de la fissuration à long terme. D'une manière générale, le choix du B40/50 s'est imposé pour la plupart des ouvrages en cohérence avec les gains décrits dans l'Eurocode 2.

La fonction « supportage » est atteinte en durcissant à bon escient les critères de conception classiques. ▷

Pour cette exigence bien spécifique aux Centrales Nucléaires, une doctrine complète qui comprend plusieurs volets a été développée à la fois au stade de la conception et au stade de la réalisation. Sa philosophie générale est de concevoir et réaliser une fixation aussi rigide que possible pour éviter une amplification dynamique éventuelle et des mouvements erratiques, voire des chocs pouvant affecter les fonctionnalités des matériels.

Plusieurs types de supportage sont utilisés : tiges précontraintes (traversantes ou non), platines pré-scellées et chevillage. Cette dernière méthode comporte un inconvénient vis-à-vis de la fissuration en condition accidentelle qui lui fait préférer les deux premières. Pour le béton, la principale conséquence du choix de conception par platines pour l'EPR est la présence d'un nombre important d'inserts métalliques qui s'ajoutent au ferrailage déjà dense. Il convient donc de veiller à la fois à une bonne fluidité du béton, à la présence de cheminées de bétonnage et de zones de vibration.

En dehors de l'enceinte réacteur, l'**exigence d'étanchéité aux liquides**, quand ils sont à la fois permanents et radioactifs, est satisfaite par un liner : celui-ci est en général en tôle d'inox. La mise en place des liners requiert une finition soignée du parement béton, pour laquelle on privilégie une réalisation en deux phases (phase de bétonnage et phase d'enduit fin). Les tentatives de réalisation en une seule phase avec mise en place du liner en préalable ou non se sont révélées décevantes en termes de délais compte tenu de toutes les sujétions et tolérances requises.

Cependant, une voie est en cours de développement qui consiste à disposer des tôles épaisses pouvant à la fois jouer le rôle de platines d'ancrage, de liner et de ferrailage. Cette dernière méthode est utilisée pour l'AP 1000 mis au point aux États-Unis. Cette voie nouvelle présente l'inconvénient de devoir finaliser les études d'installation détaillées suffisamment tôt pour que les tôles ne soient pas modifiées in situ (ce qui ferait perdre le gain planning de cette solution pré-fabricable). Cet inconvénient est moindre pour les zones de piscines qui par définition contiennent peu d'équipements.

La fonction confinement qui concerne l'enceinte du réacteur est satisfaite en disposant une précontrainte capable de reprendre à elle seule les effets de pression sur la paroi



3
© ALEXIS MORIN

interne du bâtiment réacteur, revêtu d'un liner métallique pour l'EPR.

Le confinement est bien l'exigence la plus contraignante du nucléaire à laquelle la forme-même du bâtiment réacteur est dédiée : de sphérique et métallique pour la tranche graphite-gaz de Chinon A1 qui illustre nos livres d'école autrefois, elle est devenue cylindrique et en béton précontraint pour la totalité des tranches de la filière « pressurisée de puissance » en France. L'ensemble des critères liés à ces fonctions pris en compte dans la phase de dimensionnement est regroupé dans un code de conception et de construction spécifique. Ce code édité par l'**AFCEN** traduit la pratique industrielle répondant aux exigences de sûreté requises pour les ouvrages de génie civil des Centrales Nucléaires (RCC-G pour les paliers en exploitation et ETC-C pour l'EPR).

ILLUSTRATIONS

LES ENCEINTES DE CONFINEMENT DU BÂTIMENT RÉACTEUR

Les enceintes de confinement (figure 3) sont des ouvrages très exceptionnels pour plusieurs raisons, principalement du fait du chargement pour lequel elles sont conçues. Il s'agit d'une pression interne à minima de 4 bars relatifs, soit 2 fois la pression des pneumatiques de votre voiture. Ce chargement en pression provient de la rupture potentielle du circuit primaire (filiale pressurisée) qui s'accompagne de sollicitations ther-

3- Chantier enceinte Flamanville 3.

3- Site of the Flamanville 3 enclosure.

miques (140°C pour les accidents de référence). Par ailleurs, l'exigence en ces circonstances accidentelles étant le confinement des gaz, la paroi en béton est précontrainte par des unités de forte capacité qui sont les suivantes :

- Câbles 19T15 de capacité utile de 3000 kN pour le palier 900 MWe ;
- Câbles 37T15 de capacité utile de 6000 kN pour les paliers 1300 et 1450 MWe ;
- Câbles 55T15 de capacité utile de 9000 kN pour l'EPR.

Par ailleurs, deux concepts différents ont vu le jour pour ces enceintes :

→ Les enceintes dites « simple paroi » avec liner métallique où les fonctions résistance et étanchéité sont assurées par des éléments séparés : paroi précontrainte pour la résistance et liner pour l'étanchéité. Ce premier concept est né aux États-Unis et a été adopté en Europe pour la première génération de réacteurs à eau sous pression, dont le palier 900 MWe en France.

→ Les enceintes dite « double paroi » dont la fonction étanchéité est assurée d'une part par une première paroi en

béton précontraint (la précontrainte intervenant aussi bien dans la résistance que dans l'étanchéité de cette première paroi) et d'autre part par une seconde paroi enveloppant la première. Cette conception permet de maintenir une dépression dans l'espace ainsi créé à l'aide d'un système de ventilation apte à traiter les produits nocifs en condition accidentelle. Ce concept a été retenu en France pour les paliers 1300 et 1450 MWe.

Le cas de l'EPR combine les avantages de ces deux systèmes puisqu'il dispose à la fois d'un liner métallique à l'intrados de la paroi interne et d'une paroi externe qui assure également une protection contre la chute d'avion.

Pour l'EPR, les accidents graves (accidents de fusion du cœur avec perte d'étanchéité de la cuve réacteur) étant pris en compte dès la conception de l'enceinte, on a opté pour un béton de meilleure caractéristique que pour les centrales de conception antérieure. C'est un béton B60 qui a été choisi pour résister aux sollicitations thermiques des premiers instants suivant l'accident, évitant un endommagement excessif pouvant conduire à une perte d'étanchéité du liner. Par ailleurs, pour limiter le fluage à long terme (60 ans), ce béton a été enrichi en fumées de silice ; de plus un critère de 39 GPa a été imposé sur le module instantané, puisqu'on connaît le lien entre module instantané et comportement à long terme. Le diamètre des granulats du



4

© ALEXIS MORIN

béton Haute Performance ainsi formulé a été limité à $D_{max} = 20$ mm pour s'assurer d'un parfait remplissage des coffrages. S'agissant du bétonnage d'éléments de forte épaisseur pouvant atteindre 4 m pour le radier par exemple, des plots d'essais sont réalisés pour s'assurer à la fois de la limitation de la montée en température du béton au cours de la prise ($T < 65^{\circ}\text{C}$ pour la prévention du risque d'ettringite différée) et d'une absence de fissuration lors de la phase de refroidissement (dispositions constructives spécifiques pour maîtriser la cinétique de refroidissement).

En France, toutes les enceintes des bâtiments réacteurs de la filière pressurisée ont leurs câbles de précontrainte injectés au coulis de ciment, alors qu'aux États-Unis par exemple ils sont injectés à la graisse. Il en découle des philosophies très différentes en termes de maintenance et d'essais périodiques et une culture technique à laquelle chaque pays est désormais attaché. La tendance générale pour les enceintes de confinement est le recours à des unités de précontrainte de plus en plus importantes, avec aujourd'hui un liner métallique sur tous les projets de la filière pressurisée. Le recours à la technologie de câbles gainés et graissés individuellement, fortement utilisée aujourd'hui en précontrainte externe, est envisagée pour les réacteurs futurs. Elle offre l'avantage d'une excellente protection des câbles vis-à-vis de la

4- Vue générale chantier Flamanville 3.

4- General view of the Flamanville 3 site.

corrosion et la possibilité de retarder ces derniers durant la vie de l'ouvrage. Pour le béton, l'utilisation des BHP se généralise pour toutes les raisons évoquées ci-dessus.

LE BÂTIMENT DE « LA CROIX » DE L'EPR DE FLAMANVILLE

L'ensemble de « la croix » de l'EPR (figure 4) se caractérise par un radier commun à cinq bâtiments : le bâtiment réacteur au centre, le bâtiment combustible et les trois bâtiments de sauvegarde. Ce choix du monolithisme a été opéré pour diminuer les déplacements différentiels entre bâtiments à long terme et en condition accidentelle ainsi que pour procurer une masse maximale à cet ensemble en cas de chute d'avion.

En corollaire, les deux points suivants doivent être traités :

- Les sollicitations sismiques entraînent des demandes de ferrailage importantes aux différentes jonctions entre bâtiments, en particulier dans les zones dont la géométrie est complexe ;
- Les déformations à long terme,

notamment celles dues au retrait de dessiccation du béton (pour lequel la formulation de l'Eurocode 2 est plus pénalisante que l'était le BAEL) pourraient également entraîner l'ajout de ferrailage supplémentaire dans certains cas.

Le premier point a été traité en faisant appel à des modèles et méthodes de calcul sophistiqués : calcul sur modèle 3D complet de toutes les structures sur le radier commun avec la représentation du sol pour les calculs sismiques (modèle dynamique à 100 000 éléments).

Le second point a été traité en considérant le retrait comme consommant une partie des largeurs de fissures autorisées sous chargement quasi-permanent. Ceci permet ensuite de procéder à une vérification de ce cas de charge en considérant une contrainte admissible par les aciers minorée (celle donnant l'ouverture de fissure « résiduelle » autorisée).

La densité d'armatures demandée en cas de séisme est très élevée. Conjugée à une géométrie complexe des structures, à laquelle s'ajoute une multitude d'ouvertures (pour permettre le passage des fluides), cette densité atteint 250 kg/m^3 en moyenne avec des pointes pouvant aller jusqu'à 500 kg/m^3 dans certains nœuds. De plus, la quasi-totalité des équipements sont fixés par l'intermédiaire de platines pré-scellées dont l'encombrement est important compte tenu de leur

conception (tiges profondes se terminant pas des rondelles de blocage).

Il est intéressant de noter les particularités des zones où les voiles extérieurs formant la « coque avion » viennent rejoindre la paroi cylindrique du bâtiment réacteur : ces zones assurent en cas de chute d'avion le transfert des efforts horizontaux des faces exposées vers la zone centrale constituée du cylindre (enceinte externe). Ce transfert se traduit par un ferrailage particulièrement dense. Pour réaliser de tels ouvrages, l'ouvrabilité est un facteur déterminant lors des études du béton. La coque avion a également donné lieu à des techniques originales en partie terrasse : profilés métalliques noyés ajourés formant raidisseur en phase de bétonnage, bétonnages sur des vérins rétractables et retirables verticalement, et bien sûr bétonnage en plusieurs phases. Un béton B45/55 a été retenu compte tenu des sollicitations mécaniques envisagées.

En dehors de la coque avion, un béton B40/50 a été utilisé dans la majorité des cas. Le B60/75 a été réservé pour la table de groupe turbo-alternateur, la station de pompage et bien sûr l'enceinte interne.

LES AÉRO-RÉFRIGÉRANTS

Les aéro-réfrigérants (figure 1) ne sont pas des ouvrages spécifiques aux Centrales Nucléaires et ne remplissent pas de fonction de sûreté.

Ils sont cependant intéressants à analyser vis-à-vis de leur durée de vie car ils sont exposés à bon nombre de facteurs favorisant un vieillissement rapide :

- Intempéries, dont vents cycliques, tempête, soleil et cycles gel/dégel ;
- Cycle de fonctionnement introduisant un contraste thermique et hydrique intrados-extrados de la coque ;
- Minceur de la coque comparée aux dimensions globales ;
- Interaction avec le sol de ces ouvrages toujours implantés à proximité d'un fleuve.

Le concepteur a régulièrement fait évoluer ses règles de dimensionnement et de construction pour prendre en compte ces facteurs. Le paragraphe qui suit présente les raisons de ces évolutions et leurs grands principes.

En France, entre 1977 et 1996, 30 tranches nucléaires ont été mises en service équipées d'aéro-réfrigérants de type humide pour refroidir le circuit principal de circulation lié au fonctionnement de puissance et non au refroidissement des systèmes de sûreté. ▷

Pour ces sites, chaque tranche est équipée d'un aéro-réfrigérant à l'exception de Bugey où les deux dernières tranches construites ont chacune deux aéro-réfrigérants. Il existe donc 32 aéro-réfrigérants sur les Centrales Nucléaires françaises.

Il faut noter que pour des raisons liées à la protection de la faune et la flore aquatiques, les futurs projets (dans les pays européens qui installeront des centrales en bord de fleuve) devront être équipés soit d'une tour telle qu'on les connaît, soit d'un échangeur à convection forcée, soit d'une solution intermédiaire. Il existe deux types d'aéro-réfrigérants à tour :

→ Les aéro-réfrigérants à « contre courant », où l'ensemble des ouvrages d'eau, les corps d'échanges et autres matériels sont placés à l'intérieur de la « tour » (en fait sur une hauteur correspondant aux piles qui supportent la coque elle-même).

→ Les aéro-réfrigérants à « courants croisés » où ces mêmes ouvrages sont localisés à l'extérieur, en périphérie de la tour ; l'eau chaude tombe verticalement en « croisant » l'air circulant horizontalement).

Le génie civil des tours des ouvrages d'EDF existants diffère par la forme des piles en I, en X ou en V, et dans le « couronnement » plus ou moins volumineux, qui constitue une « cerce » fermant le haut de la tour et dont la forme est un début d'évasement (nécessité de raidir le haut de l'ouvrage).

La forme générale de la coque est très voisine d'un tore hyperbolique dont la ligne méridienne exacte est le fruit d'une optimisation de chaque constructeur. Néanmoins la paternité de cette forme d'hyperboloïde revient au

Hollandais Van Iterson qui en 1910 a proposé le béton armé pour construire ces ouvrages : cette forme à double courbure (cercle et hyperbole) confère à l'ouvrage une excellente résistance mécanique vis-à-vis du vent, malgré sa faible épaisseur.

Les dimensions des ouvrages existant en France sur les sites nucléaires vont de 125 à 190 m pour la hauteur, de 100 à 135 m pour le diamètre la base et de 68 à 88 m pour celui du sommet. L'évolution majeure dans la conception des tours fait suite à une série de sinistres dont le plus marquant est l'effondrement simultané en 1965 de 3 tours à Ferrybridge en Angleterre consécutif à un épisode de vent fort, sans que celui-ci puisse néanmoins être considéré comme imprévisible. La cause profonde était liée à un concept de base selon lequel ces tours fonctionnaient en « membrane pure », c'est-à-dire que les effets de moments fléchissant la paroi pouvaient être négligés. Ces parois n'étaient alors ferrillées que par une nappe centrale. En France, où ce même concept prévalait, EDF a été conduit à démolir plusieurs tours des centrales thermiques classiques de Pont-sur-Sambre et des Anserueilles dans les années 1987 et 1988 : pour ces derniers cas l'évolution des amplitudes des défauts géométriques mesurés (hors plan) des parois était devenue préoccupante. À ce jour, toutes les tours du parc nucléaire français disposent de deux nappes de ferrailage pour traiter les effets de flexion ; de plus, elles font l'objet d'une auscultation régulière comprenant :

→ Des relevés photogrammétriques destinés à mesurer les amplitudes des défauts géométriques ;

→ Des mesures de tassement ;
→ Des relevés optiques de toutes les fissures ;

Aujourd'hui, les règles générales de conception et de construction d'EDF ont donné lieu aux quelques évolutions suivantes :

→ Pour la partie coque : ferrailage minimal « de traction » suivant l'article 7.3.2 de l'EN1992-1-1 ;

→ Pour le couronnement : armature de peau pour traiter les moments d'origine thermique et hydrique dans cette zone singulière ;

→ Béton avec plus de 350 kg de ciment, E/C < 0,5, porosité < 13%, perméabilité à l'eau < 10⁻⁹ cm/s et enfin absorption capillaire < 0,8 g/cm². Ces mesures sont destinées à améliorer la durabilité du béton.

CONCLUSION

Le domaine du génie civil nucléaire est certes spécifique compte tenu des exigences de sûreté associées à ces ouvrages (application des codes AFCEN pour les centrales) et les concepteurs restent attachés à des principes de base relativement simples qui confèrent au génie civil fiabilité et robustesse.

Néanmoins, pour parvenir à une constructibilité simple et rapide de l'ouvrage ainsi dimensionné et compte tenu des niveaux de chargement toujours à la hausse, les maîtres d'ouvrages s'appuient sur les compétences conjuguées de toute la profession, que sont les laboratoires, les bureaux d'études et bien sûr les entreprises de génie civil. Ces acteurs permettent à la France d'être présente dans un très grand nombre de projets d'ampleur dans le monde. □

« **LES CENTRALES
NUCLÉAIRES SONT
DES OUVRAGES
EXCEPTIONNELS
QU'ON PEUT
ANALYSER
À TRAVERS
DEUX PRISMES :
CELUI DES
SOLLICITATIONS
POUR LESQUELLES
ELLES SONT
CONÇUES ET CELUI
DES EXIGENCES
QU'ON ATTEND
D'ELLES
EN FONCTION
DES SITUATIONS** »

ABSTRACT

SPECIAL REQUIREMENTS FOR CONCRETE IN CLASSIFIED FACILITIES. NUCLEAR POWER STATIONS

E. GALLITRE, EDF - G. HEINFLING

Nuclear power stations are exceptional structures that can be analysed through two prisms: *the loads for which they are designed and the requirements that are expected of them depending on the situation. These various requirements translate into numerous criteria and provisions applicable to the two materials: steel and concrete. The main loads and requirements are described. The allowance made for them is illustrated on three structures or sets of structures emblematic of a nuclear power station: containment of the reactor buildings which house the nuclear boiler, the cross-shaped building of the EPR's nuclear island and the cooling towers.* □

LAS ESPECIFICIDADES DEL HORMIGÓN EN LAS INSTALACIONES CLASIFICADAS. CENTRALES NUCLEARES DE PRODUCCIÓN DE ELECTRICIDAD

E. GALLITRE, EDF - G. HEINFLING

Las Centrales Nucleares son obras excepcionales que se pueden analizar desde dos puntos de vista: *el de las necesidades para las que se diseñan y el de las exigencias que se espera de ellas en función de las situaciones. Estas diferentes exigencias se reflejan en múltiples criterios y disposiciones aplicables a dos materiales: el acero y el hormigón. Se presentan las principales necesidades y exigencias. Su integración se ilustra en tres estructuras o conjunto de estructuras emblemáticas de una central nuclear: el recinto de confinamiento de los reactores que albergan la caldera nuclear, el edificio en cruz de la isla nuclear del reactor europeo presurizado (EPR) y los aero-refrigerantes.* □

LE BÉTON DANS LES OUVRAGES SOUTERRAINS

AUTEURS : CATHERINE LARIVE, CHEF DU PÔLE MATÉRIAUX, STRUCTURES ET VIE DE L'OUVRAGE AVEC LA PARTICIPATION DES PÔLES GÉNIE CIVIL DU CETU - MICHEL LEVY, EXPERT, SETEC TPI - LOÏC DIVET, DIRECTEUR DU LABORATOIRE COMPORTEMENT PHYSICO-CHI-MIQUE ET DURABILITÉ DES MATÉRIAUX, DE L'IFSTTAR

LES OUVRAGES SOUTERRAINS SONT RÉPUTÉS POUR LES DIFFICULTÉS QU'ILS RENCONTRENT AVEC LA GÉOLOGIE, LORS DE LEUR CONSTRUCTION, OU POUR LES PRÉCAUTIONS À PRENDRE VIS-À-VIS DES INCENDIES, PENDANT LEUR EXPLOITATION. MAIS, MÊME SI C'EST MOINS SPECTACULAIRE, ILS SONT AUSSI DE GRANDS CONSOMMATEURS DE BÉTON SOUS TOUTES SES FORMES : BÉTON PROJETÉ, BÉTON COULÉ EN PLACE AVEC OU SANS ARMATURES, BÉTON ARMÉ PRÉFABRIQUÉ, BÉTON FIBRÉ AVEC FIBRES MÉTALLIQUES OU ORGANIQUES. DE GRANDS PROGRÈS ONT ÉTÉ RÉALISÉS DANS LEUR COMPOSITION ET LEUR MISE EN PLACE.



© PHOTOTHÈQUE DU CETU
1

Le béton prend une place très importante dans les ouvrages souterrains :

→ On utilise de façon presque systématique du béton projeté, seul ou associé à des boulons ou à des cintres pour réaliser le soutènement provisoire, au moment de l'excavation ; on utilise également le béton projeté pour réaliser le support des membranes

1- Robot de projection de béton par voie mouillée.

1- Wet shotcreting robot.

d'étanchéité extrados, ou pour réparer les ouvrages ;

→ On utilise du béton coffré pour réaliser le revêtement définitif ;

→ On utilise presque toujours du béton pour réaliser les éléments préfabriqués (voussoirs) mis en œuvre, pour constituer le revêtement des tunnels creusés avec des tunneliers.

De manière générale, les ouvrages

souterrains présentent, en matière de béton, quelques particularités intéressantes :

→ L'emploi courant de béton **non armé** pour le revêtement définitif en béton coffré des tunnels creusés par méthode conventionnelle ou bien, à l'inverse, de béton **fortement armé** pour les voussoirs préfabriqués des tunnels creusés au tunnelier ; dans ce dernier cas, ▷

les performances doivent être élevées pour limiter les épaisseurs et résister aux sollicitations lors du transport et de la pose puis aux poussées du terrain et aux sollicitations accidentelles (chocs, incendie). Cela conduit à des études de formulation du béton et de conception de la structure souvent longues et délicates ;

→ Il faut également mentionner la prise en compte croissante du développement durable qui conduit par exemple, dans le domaine des matériaux, à étudier les possibilités de réutilisation des matériaux excavés.

À QUOI SERT LE BÉTON PROJETÉ POUR LA CONSTRUCTION DES OUVRAGES SOUTERRAINS ?

Le béton projeté est un moyen rapide de mise en œuvre du béton, sans coffrage.

Cet avantage permet le bétonnage de la surface excavée dès sa réalisation, limitant ainsi la décompression du terrain. La préparation de la surface excavée se limite à une purge des éléments instables.

En fonction des propriétés mécaniques et de l'état de contraintes du massif encaissant, le béton projeté peut jouer un rôle allant de la simple peau protectrice destinée à éviter une désorganisation progressive du terrain (altération ou dé-jointolement de blocs), à une peau de stabilisation de l'excavation, jusqu'à une structure résistante capable de reprendre des efforts normaux et des moments (cf. recommandations du GT 9 de l'AFTES dans le TOS 164).

Le béton projeté est le plus souvent utilisé en complément de soutènements métalliques (boulons, cintres réticulés) ou en remplacement de blindages métalliques (entre cintres). Il doit alors être renforcé par un treillis soudé ou par des fibres ; la première solution assure une bien meilleure connexion entre le béton et les éléments métalliques ; la seconde qui est plus rapide et commode à mettre en œuvre, couvre toutefois de nombreux cas courants.

Le béton projeté constitue également le support des procédés d'étanchéité extradados et permet d'obtenir un état de surface (planéité, rugosité, ...) répondant aux exigences du procédé d'étanchéité choisi. Si nécessaire, en cas d'utilisation de fibres métalliques, une couche de finition sans fibre peut être appliquée avant la mise en œuvre du procédé d'étanchéité.



© PHOTOTHÈQUE DE SETEC TPI

LES DIFFÉRENTS TYPES DE BÉTON PROJETÉ

La méthode la plus utilisée est la projection par voie mouillée : elle consiste à apporter au chantier, par camion toupie, un béton déjà malaxé. Une pompe à béton va l'envoyer à la lance de projection où un apport d'air comprimé va projeter le béton. Sa prise rapide est assurée par un adjuvant activateur incorporé au béton dans la lance ; il lui permettra de rester accroché au support avec un pourcentage limité de pertes par rebonds.

En plus des progrès dont bénéficient tous les bétons malaxés en centrale, le béton projeté par voie mouillée a connu, ces dernières années, des améliorations importantes :

→ Mise au point d'activateurs sans alcalins qui évitent de dégrader les performances mécaniques à long terme et qui sont nettement moins dangereux pour les personnels et l'environnement ;

→ Ajout de fibres, pour éviter la longue mise en place de treillis soudés, dans les cas courants de tunnels à convergence limitée ; ces fibres peuvent être soit des fibres métalliques, soit plus récemment, des macro-fibres synthétiques ;

→ Mise au point de robots de projection (figure 1) pouvant atteindre un débit de 25 à 30 m³/h, et permettant d'obtenir un flux de béton quasi continu qui limite le feuilletage entre couches. Il existe même un matériel entièrement automatisé qui réalise un levé au scanner de la surface à recouvrir et contrôle l'épaisseur de chaque couche.

La méthode qui permet d'obtenir les meilleures performances mécaniques est la projection de béton par voie sèche sans adjuvant. Elle est utilisée pour réparer des ouvrages ou pour la projection de béton en petite quantité ; en effet le mélange sec amené en big-

2- Projection de béton par voie sèche avec un mélange pré-humidifié.

2- Dry shotcreting process with a pre-moistened mixture.

bags ou en silo sur le chantier n'est pas tributaire d'un temps limité d'utilisation comme le béton malaxé en centrale. Le mélange sec pulsé par l'air comprimé, reçoit un ajout d'eau en sortie de lance. La projection est délicate et doit être confiée à des porte-lances formés et certifiés.

En contrepartie des performances mécaniques élevées obtenues, on doit accepter des débits limités (jusqu'à 6 à 7 m³/h voire 9 m³/h pour les chantiers nécessitant de gros volumes de béton), des pertes par rebond plus élevées et une quantité de poussière plus importante pendant la mise en place. De ce point de vue, un progrès important a été constitué par une légère pré-humidification des matériaux (3% du poids de ciment) qui limite fortement la quantité de poussière (on parle alors de voie humide). La photo jointe (figure 2) montre l'atmosphère régnant, au tunnel sous la Manche, au cours de la réparation de l'incendie de 2008. La même réparation en 1997 avait nécessité d'enfermer les porte-lances dans des « scaphandres » en toile plastifiée alimentés en air frais par des tubes. La résistance moyenne du béton projeté à la Manche a été de 60 MPa à 28 jours.

Tous les aspects théoriques et pratiques du béton projeté font l'objet de recommandations élaborées (ou en cours d'élaboration) par l'ASQUAPRO (consulter le site www.asquapro.com).

LES REVÊTEMENTS COFFRÉS : POURQUOI UTILISE-T-ON DU BÉTON NON ARMÉ POUR LES REVÊTEMENTS COFFRÉS DE TUNNELS ?

L'une des particularités des tunnels est d'utiliser largement le béton non armé. Ceci peut surprendre les spécialistes d'ouvrages d'art car la conséquence est l'existence de fissures pluri-millimétriques, qui, dans des ouvrages armés, seraient alarmantes.

Dès la mise en œuvre, les bétons ordinaires, de classe C25/30 et de consistance fluide, ont tendance à se fissurer en raison du retrait et des sollicitations dues au poids propre, ainsi que des singularités rarement évitables telles que les hors-profils générant des variations d'épaisseur importantes du revêtement. Sous réserve d'une épaisseur de revêtement suffisante et d'un bon contact entre le terrain et le revêtement, cette fissuration n'est généralement pas préjudiciable à la stabilité du revêtement. Dans les ouvrages récents, il est de plus en plus courant de réaliser quotidiennement un cycle complet de bétonnage en 24 heures et les caractéristiques des bétons à respecter sont :

→ La résistance au moment du décoffrage (souvent 10 MPa à 10h pour les cas courants) ;

→ La durabilité (alcali-réaction, réaction sulfatique interne, gel-dégel, chlorures) ;

→ La résistance à 28 jours (souvent dictée par les exigences de durabilité) ;

→ Dans certains cas, la résistance à l'incendie de la structure.

Les points délicats identifiés à ce jour pour la réalisation des bétons coffrés sont les suivants :

→ La vibration : elle reste très bruyante et pas toujours parfaitement maîtrisée ;

→ Le clavage : fondamental pour remplir au mieux le vide en clé, en particulier pour la bonne efficacité du compartimentage du dispositif d'étanchéité par géo-membrane ; a posteriori, il est délicat de forer dans le béton sans percer la membrane, si l'on n'a pas réussi à claver par les dispositifs mis en place avant le bétonnage ;

→ La cure : non réalisée en général malgré un décoffrage rapide et, souvent, un fort courant d'air ou des températures ambiantes extrêmes (chaudes ou froides) ; lorsqu'elle est prévue, sa durée doit être suffisante pour éviter d'empirer la fissuration (24h ne suffisent pas, compter au moins 4 jours).

Dans certaines configurations, on a bien sûr recours au béton armé.



3

© PHOTO THÉQUE DU CETU

On limite ces cas car la mise en place des armatures est très délicate à l'intérieur des outils-coffrant de tunnels (figure 3), surtout lorsqu'on veut utiliser, en extrados une membrane d'étanchéité.

Que le béton soit armé ou non, sa justification doit être faite suivant les textes adaptés :

→ CETU : Revêtements armés et non armés 1991 - Jean PERA, Christian CHAPEAU, Michel DEFFAYET.

→ GT7R5F1 : L'utilisation du béton non armé en tunnel.

Tunnels et ouvrages souterrains - N° 149 - septembre/octobre 1998.

→ GT29R1F1 : L'utilisation des règles et normes générales de conception et de dimensionnement pour les revêtements de tunnels en béton armé et non armé. Tunnels et ouvrages souterrains - N° 165 - mai/juin 2001.

CONCEPTION SPÉCIFIQUE DES REVÊTEMENTS POUR LES OUVRAGES AU TUNNELIER

Certains types de tunneliers ont la particularité de pouvoir poser directement le revêtement juste après l'excavation, sous la protection de leur jupe. Dans ce cas, le revêtement est constitué de voussoirs préfabriqués : éléments dont l'assemblage constitue à la fois le soutènement et le revêtement du tunnel.

3- Outil-coffrant avec portique intégré.

3- Sectional formwork with integral portal structure.

Le plus souvent aujourd'hui, ces éléments sont en béton armé (figure 4). Servant à la fois de soutènement provisoire et de revêtement définitif, les voussoirs doivent assurer la stabilité de l'anneau vis-à-vis des sollicitations permanentes et des sollicitations s'exerçant durant la construction du tunnel. La densité d'armatures y est importante, avec en moyenne un ratio d'acier de 80 à 150 kg par mètre cube de béton. Dans certains cas spécifiques, ce ratio peut monter à plus de 250 kg d'acier par mètre cube de béton armé. L'épaisseur des voussoirs est variable, limitée pour des raisons de transport et de mise en place par un érecteur. Elle est grossièrement proportionnelle au diamètre de l'excavation, allant de 20 à 30 cm pour les tunnels de diamètre réduit (2 à 5 mètres) et jusqu'à 70 cm d'épaisseur dans certains cas

très particuliers. Pour les tunnels de 10 mètres de diamètre, l'épaisseur des voussoirs est généralement comprise entre 40 et 50 cm.

En dehors des articulations entre voussoirs d'un même anneau, qui sont fretées pour ne pas réduire la résistance à la compression de l'anneau, ce sont souvent les sollicitations en phase de construction qui dimensionnent les armatures, lorsque le tunnelier prend appui sur l'anneau précédent pendant la poursuite du creusement.

En effet, aux conditions de pose et de montage, s'ajoutent les imprécisions de placement des voussoirs dans l'anneau, entraînant des sollicitations ponctuelles de contact et d'appui. Des imprécisions géométriques de quelques millimètres seulement peuvent conduire à des sollicitations ponctuelles très importantes. Cela conduit à faire appel à une résistance élevée du béton, ce qui ne pose pas de problème du fait de la préfabrication des voussoirs.

Par ailleurs, l'utilisation de béton fibré, en complément ou substitution de certains types d'armatures, semble être une solution prometteuse, notamment pour réduire le ratio d'armatures, tout en garantissant des performances mécaniques équivalentes. Ce type de solution reste toutefois aujourd'hui, en France, peu répandu et fait encore

l'objet de mise au point et de travaux de recherche. Une recommandation du GT 38 de l'AFTES traitera prochainement de ce sujet.

APPORTS ET LIMITES DE L'AUGMENTATION DES PERFORMANCES ET DES BÉTONS AUTO-PLAÇANTS POUR LES REVÊTEMENTS DE TUNNELS

UTILISATION DE BHP (BÉTON À HAUTES PERFORMANCES)

Dans le cadre du projet national BHP2000, le tunnel routier de Fontain a été réalisé en 1998-1999 avec un revêtement en béton coulé non armé, de bonnes performances. Il s'agit d'un tunnel à 2 tubes d'environ 240 m, situé sur la voie des Mercureaux dans le département du Doubs. Pour le premier tube, le béton utilisé était un B25 classique alors qu'un B50 a été retenu pour le second tube.

À cette occasion, la faisabilité de réalisation d'un ouvrage en béton de consistance fluide a été vérifiée avec l'utilisation du même coffrage que pour un béton ordinaire de consistance plastique (slump moyen de 11 cm pour le premier contre 23 cm pour le second) moyennant des précautions particulières notamment pour les coffrages d'about. ▷



4

© PHOTO THÉQUE EURO TUNNEL

Le gain en performance du B50 par rapport au B25 a permis de réduire de 0,35 m à 0,25 m l'épaisseur nominale du revêtement ; cependant compte tenu du contexte géologique et des irrégularités de l'excavation et donc des épaisseurs réelles de béton mises en œuvre, le coût de revient du revêtement « BHP » s'est révélé plus élevé de 68 % environ. La fissuration de retrait du « BHP » non armé s'est avérée plus rapide et d'ampleur comparable à celle du béton ordinaire.

UTILISATION DE BÉTON AUTO-PLAÇANT (BAP)

Le tunnel des Monts est situé sur la voie rapide urbaine de Chambéry qui a été mise en service en 1981. Ce tunnel 2x3 voies d'environ 900 mètres de longueur figure parmi les derniers grands tunnels du réseau national construits sans étanchéité en extradors. En raison des nombreuses infiltrations d'eau et de la nécessité de mettre l'ouvrage en conformité avec la nouvelle réglementation sur la sécurité, des travaux de réhabilitation des deux tubes ont été réalisés en 2005 et 2006. Pour le génie civil, ces travaux comprenaient la mise en œuvre d'un chemisage à l'intrados du revêtement existant, dont les fonctions principales étaient d'assurer l'étanchéité de l'ouvrage et de supporter tous les équipements d'exploitation et de sécurité. Pour répondre aux conditions particulières, ce chemisage a été réalisé en béton auto-plaçant.

Ce matériau très fluide a été choisi pour assurer un parfait remplissage des coffrages, même dans les plots armés, pour réduire le temps de bétonnage et obtenir une qualité de parement permettant une mise en peinture sans ragréage préalable (figure 5). Grâce à sa mise en œuvre sans vibration, il a aussi permis d'améliorer l'environnement sonore en phase chantier.

Après quelques années, on note, dans l'ouvrage, une fissuration de retrait assez importante, qui, sans être alarmante, a fait tout de même l'objet d'une surveillance renforcée depuis 2012.

LES INCENDIES EN TUNNELS

De nombreux incendies se sont produits en tunnel, ces dernières années. Citons notamment, le Storebaelt (1994 feu de tunnelier), la Manche (1996 feu de PL, 2008 PL), le Mont Blanc (1999 feu de PL), le Tauern (1999 PL), le St Gothard (2001 PL), le Fréjus (1983, 2005, 2010, tous PL).

Si ces incendies ont hélas fait des victimes, on n'a pas constaté de catastrophes sur le plan des structures ; on a cependant pu observer que :

→ Les bétons à haute performance des tunnels revêtus de voussoirs préfabriqués, connaissent un écaillage important (figure 6) ;

→ Comportement meilleur de la part de la dalle de plafond peu épaisse (15 cm) et de qualité moyenne (35 MPa) au Fréjus en 2005, que de la part des piédroits épais et de meilleure qualité (45 MPa) qui ont perdu, par

4- Revêtement en voussoirs préfabriqués au tunnel sous la Manche.

4- Prefabricated segments lining the Channel Tunnel.

écaillage, jusqu'à 15 à 20 cm d'épaisseur ;

→ Comportement plus mauvais de la dalle de plafond du St Gothard dont les appuis ne permettaient pas de glissement latéral, qu'au Fréjus où ils pouvaient glisser ;

→ Très peu d'écaillage au Mont Blanc dont le béton de revêtement était de qualité médiocre (≤ 25 MPa).

La réglementation de 2000 ayant prévu la prise en compte d'un feu de type HCM (montée très rapide en température jusqu'à 1300°C, maintenue pendant près de 2h), la recherche d'améliorations s'est poursuivie dans plusieurs directions :

→ Mesures systématiques, en four, de l'écaillage de dalles constituées du béton prévu. En France, 3 laboratoires (CERIB, CSTB et EFECTIS France) ont des fours permettant de tester des dalles avec la courbe de température HCM ;

→ Essais comparatifs de plusieurs formules (lorsqu'on dispose d'un temps suffisant), permettant d'optimiser le

ciment, les granulats (calcaires si possible), l'entraîneur d'air, etc ;

→ L'ajout de fibres de polypropylène dans le béton, qui, en fondant, libèrent des canaux qui donnent au béton une perméabilité permettant à la vapeur d'eau de s'échapper sous une moindre pression.

À ce jour, seuls des ouvrages en béton à performance ordinaire ont donné lieu à des ajouts de fibres de polypropylène : 2 tranchées couvertes à Angers et la Défense et le tube Sud du tunnel autoroutier de Toulon.

Enfin, des protections passives peuvent être plaquées ou projetées contre le béton. Signalons le projet SAFE, au tunnel sous la Manche, permettant de brumiser des zones de 800 m où un train en feu peut s'arrêter ; la brumisation dont les besoins en eau peuvent être satisfaits par une conduite incendie (contrairement à l'arrosage par sprinkler) permet d'empêcher le feu de prendre de l'ampleur. Ce type de système est également mis en place dans certains tunnels routiers spécifiques.

LA PRISE EN COMPTE CROISSANTE DU DÉVELOPPEMENT DURABLE : PERSPECTIVES DE VALORISATION DES MATÉRIAUX D'EXCAVATION, EN GRANULATS POUR BÉTON

Tant pour les tunnels situés dans des régions montagneuses que pour ceux qui sont en zones très urbanisées, on peut avoir affaire à de difficiles pro-



5

© PHOTOTHÈQUE DE LA DIR CENTRE-EST

blèmes d'environnement. Les carrières ou emprunts d'agrégats s'épuisent ou rencontrent de fortes oppositions à leur ouverture, les emplacements de dépôts des déblais sont limités, surtout pour les ouvrages longs. Ces deux phénomènes incitent les constructeurs à réutiliser, autant que possible, les déblais extraits du tunnel, en particulier pour son revêtement en béton.

Cette méthode, qui était utilisée, autrefois, pour raison d'économie (tunnel ferroviaire de Ste Marie aux Mines entre 1932 et 1936 et divers tunnels en maçonnerie), a tendance à être réutilisée ; ce fut le cas pour les tunnels ferroviaires récents du Lötschberg et du Gothard.

Compte tenu de toutes les contraintes évoquées par ailleurs (performances mécaniques, alcali-réaction, résistance aux cycles de gel-dégel, etc), la démarche est délicate et demande une grande vigilance lorsque la géologie du terrain encaissant est changeante. Soulignons que le Groupe de travail 35 de l'AFTES, animé par J. Burdin, a déjà publié en 2007 des recommandations sur ce sujet et a récemment entrepris de les mettre à jour [« La gestion et la valorisation des matériaux d'excavation », TOS n°199, pp. 8 - 35].

CAS DES TUNNELS DU LYON-TURIN FERROVIAIRE

La partie transfrontalière de la future liaison ferroviaire entre Lyon et Turin, dont le promoteur est la société LTF, filiale du Réseau Ferré de France (RFF)

5- Chemisage en béton auto-plaçant aux tunnels des Monts.

5- Self-placing concrete lining the Tunnels des Monts.

et du Réseau Ferré d'Italie (RFI), comportera un tunnel à 2 tubes d'environ 57 km et 2 galeries d'interconnexion de 2 km. Les chantiers généreront 16 millions de m³ de déblais et la société LTF souhaite en valoriser un maximum. D'après l'ensemble des études réalisées jusqu'à ce jour, 25% à 35% des déblais seraient d'une qualité permettant de les transformer en granulats à béton pour le revêtement du tunnel. L'un des sujets qui ont été étudiés concerne la teneur en sulfates des matériaux de la zone de Modane.

En effet, ils contiennent une quantité de sulfates variant de 1,6 à 4,3% (exprimée en SO₃) présents sous forme de gypse et d'anhydrite (figure 7). Dans un béton, les sulfates sont susceptibles de réagir avec certains composants du ciment pour donner naissance à des produits expansifs (ettringite, thaumasite) générant alors une détérioration du matériau par gonflement/fissuration. Afin d'éviter ces réactions, des normes limitent la teneur en sulfates pour les différents constituants du béton (gra-

nulats, ciment, eau). En particulier, la norme NF EN 12620-1 intitulée « Granulats pour béton » restreint la quantité de sulfates dans les granulats à 0,2% en SO₃ pour les bétons de structure de génie civil.

Les recherches entreprises

À la demande de LTF et de son conseil Jacques Burdin, l'IFSTTAR a mené un programme de recherche en collaboration avec les sociétés HOLCIM, VICAT et le LERM (groupe Setec). Des études ont été réalisées afin de mieux comprendre les risques de relargage, dans les bétons, des sulfates en termes de quantité et de cinétique ainsi qu'en fonction des caractéristiques du milieu (composition chimique, pH, température ...). Un autre objectif de cette recherche a été d'étudier le comportement de liants susceptibles d'être adaptés à ce type de granulats afin d'éviter toute altération du béton par réaction sulfatique.

Les solutions en perspective

Les premiers résultats de cette recherche montrent que trois solutions novatrices dans le domaine des bétons pourraient permettre de valoriser ces déblais en granulats à béton.

→ Le tri et/ou le lavage des déblais

Il apparaît que les sulfates sont principalement localisés dans la fraction fine (0/0,315 mm) des matériaux d'excavation, de sorte qu'un tri sélectif permettrait de diminuer fortement la teneur en sulfates dans les granulats à béton. Par ailleurs, la cinétique de lixiviation des sulfates est rapide.

Une solution pourrait donc consister à laver ces déblais puisqu'environ 50% des sulfates sont éliminés lors d'un lavage pendant environ 7 heures.

→ Utilisation d'un ciment approprié

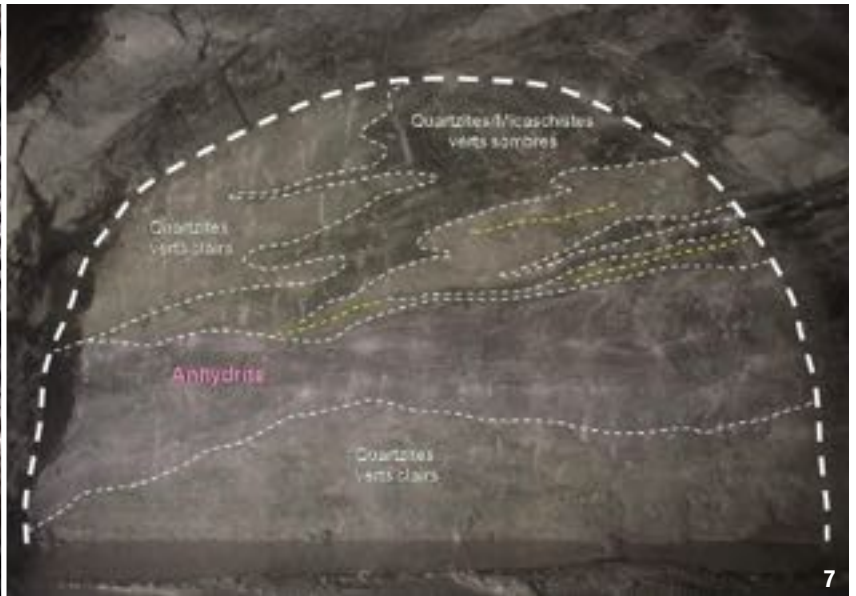
Le comportement de différentes compositions de mortier a été étudié afin de réduire ou de supprimer le risque de dégradation par les sulfates. Après 6 mois d'exposition dans des conditions de vieillissement accéléré, les mortiers formulés avec un ciment Portland de type CEM I ayant une teneur en C3A inférieure à 1% et avec un ciment sur-sulfaté ne présentent aucune expansion. Ces premiers résultats sont encourageants. Le bon comportement du ciment sur-sulfaté peut s'expliquer par le fait qu'il s'agit d'un liant comportant environ 80% de laitier de haut fourneau activé par du gypse. Dans ces conditions, les sulfates contenus dans les granulats participent également à l'activation de ce liant.

→ Utilisation des sulfates contenus dans les granulats pour le gypsage du ciment

Cette étude a été réalisée à partir de mortiers formulés avec un ciment au laitier de haut fourneau de type CEM III/B n'ayant pas fait l'objet d'un gypsage par le cimentier. Le gypsage a alors été effectué par l'apport des sulfates contenus dans la fraction sable des granulats. Les propriétés rhéologiques et mécaniques obtenues sont similaires à celles d'un mortier formulé avec un ciment CEM III/B dosé normalement en gypse par le cimentier. ▷



© PHOTOOTHÈQUE EUROTUNNEL



© PHOTOOTHÈQUE LTF

Au bout de 6 mois, aucun phénomène d'expansion résultant d'une réaction sulfatique n'a été observé.

CAS DU TUNNEL DE SAINT BÉAT

Le tunnel de la déviation de Saint-Béat en Haute Garonne sur la RN 125 dont les travaux commencent, a une longueur de 1 018 m ; il est creusé à l'explosif dans des calcaires métamorphisés. Le Maître d'Ouvrage est la DREAL Midi Pyrénées, le Maître d'œuvre est la DIR Sud-Ouest, assistée du CETU. Le projet a été conçu pour réutiliser, pour les granulats des bétons, les matériaux extraits du tunnel.

L'étude des bétons a dû être réalisée avant l'appel d'offres des travaux par les laboratoires de l'Administration, de façon à adapter les formules à une valeur trop forte du Los Angeles des granulats. La partie « bétons coulés » du Cahier des Clauses Techniques

Particulières (CCTP) du tunnel a été rédigée par le CETU et le DLCF. L'option prise a été de produire des granulats respectant les normes granulats (NF EN 12620 et XP P 18-545) afin de rester dans le cadre de la norme béton (NF EN 206-1).

Une approche performantielle est cependant possible pour la tenue au gel/dégel en présence de sels de déverglaçage (cas des bétons de revêtement à proximité des têtes). De nombreuses questions liées à l'élaboration des granulats sur site, d'ordre technique, ont dû être abordées : matériels, aires de stockage provisoire du marin, procédure de tri rapide, procédures de contrôle des granulats élaborés sur site, étude de la possible pollution des granulats par les résidus d'explosifs, etc. Enfin, la logistique et le planning doivent être analysés de près afin de ne pas compromettre la réalisation du projet

6- Écaillage après feu.

7- Matériaux au front de la descendrière de Modane.

6- Scaling after fire.

7- Materials on the face of the Modane inclined gallery.

Le tunnel de Saint Béat : la valorisation dans les bétons en quelques chiffres :

- Volume de matériaux en place excavés : 110 000 m³ ;
- Volume des bétons (hors béton projeté et béton de fondation du revêtement) : 24 000 m³ ;
- Quantité de granulats élaborés sur site pour les bétons : 42 000 t (16 800 m³ soit environ 15% des matériaux extraits).

EN CONCLUSION

Les bétons utilisés en ouvrages souterrains ont des spécificités particulières. Cependant, ils tirent parti des progrès réalisés dans les bétons de toutes natures pour progresser en matière de réalisation, de durabilité, de résistance au feu, de performances mécaniques et de prise en compte du développement durable. □

(démarches administratives très en amont pour les aires de stockage et les installations). Ainsi, même si cette approche est encore peu développée en France, les expériences étrangères et notamment suisses, ou celles acquises en matière d'élaboration de granulats à partir de roches massives, ont permis de rédiger le CCTP.

ABSTRACT

CONCRETE IN UNDERGROUND STRUCTURES

CATHERINE LARIVE, CETU - MICHEL LEVY, SETEC TPI - LOÏC DIVET, IFSTTAR

Underground structures use concrete in all its forms:

- > Shotcrete, very commonly used during construction, with or without fibres, to help provide temporary support or to act as a support for the membrane barrier on the upper surface, but also to repair old or damaged structures; see the recommendations of French engineering associations ASQUAPRO and AFTES.
- > Cast-in-situ concrete, often without reinforcing bars in France, to form the final lining.
- > Prefabricated reinforced concrete for the segments placed by a tunneller. Measures are taken, in specific cases, to use aggregates resulting from tunnel excavation or to improve the concrete's fire behaviour. □

EL HORMIGÓN EN LAS ESTRUCTURAS SUBTERRÁNEAS

CATHERINE LARIVE, CETU - MICHEL LEVY, SETEC TPI - LOÏC DIVET, IFSTTAR

Las estructuras subterráneas utilizan el hormigón en todas sus formas:

- > El hormigón proyectado, muy utilizado durante la construcción, con o sin fibras, para contribuir al apuntalamiento provisional o para servir de apoyo a la membrana de estanqueidad en extradós, así como para reparar las estructuras antiguas o deterioradas. Véanse las recomendaciones de ASQUAPRO (Asociación para la calidad de la proyección de los morteros y hormigones) y de la AFTES (Asociación francesa de Túneles y del Espacio Subterráneo).
- > El hormigón colado in situ, frecuentemente sin armaduras en Francia, para constituir el revestimiento definitivo.
- > El hormigón armado prefabricado para las dovelas colocadas por una tuneladora. En algunos casos particulares se toman disposiciones para utilizar áridos procedentes de la excavación del túnel o para mejorar la resistencia al fuego del hormigón. □

PASSEZ VOTRE PUBLICITÉ DANS **TRAVAUX** POUR UN MAXIMUM D'IMPACT SUR LES ACTEURS DE LA PROFESSION DES TRAVAUX PUBLICS

REVUE TECHNIQUE DES ENTREPRISES DE TRAVAUX PUBLICS

VADUC DE MILLAU © CEMM

■ NOTRE LECTORAT

41 % - Maîtres d'ouvrage, Maîtres d'œuvre, Bureaux d'études, Laboratoires de recherche, Architectes, Conseils généraux et régionaux, Collectivités locales et territoriales.

5 % - Enseignement.

54 % - Entreprises : Grands groupes / PME.

■ ÉDITEUR



Travaux est une publication de la Fédération Nationale des Travaux Publics (FNTF) qui regroupe 20 Fédérations régionales et 17 syndicats professionnels des travaux publics.

■ DIFFUSION

9 à 10 numéros par an, de 70 à 100 pages, diffusés par abonnement - distribution dans les manifestations professionnelles, mise à disposition du public dans les institutions officielles.

Trage : 2 000 exemplaires.

Diffusion internationale : 1 800 exemplaires.

■ LIGNE ÉDITORIALE

Travaux est un mensuel technique et professionnel qui s'adresse à tous les acteurs de la profession des travaux publics : entreprises, bureaux d'études, maîtres d'ouvrages, maîtres d'œuvre, fabricants de matériel, chercheurs, étudiants, importateurs, exportateurs, etc. Les articles sont rédigés par des directeurs de projets, des ingénieurs et chefs d'opération, ainsi que par des autorités scientifiques. Chaque numéro comporte un éditorial signé par une personnalité et, le plus souvent une interview d'une autre personnalité et un reportage sur une entreprise ou un fournisseur indépendant. Plusieurs pages d'actualités et un calendrier des manifestations viennent compléter l'information.

NOS TARIFS 2013

Surface	Prix (HT)	Format (L x H)	
2 ^e couverture*	3 390 €	215 x 315 mm	
3 ^e couverture*	2 980 €		
4 ^e couverture*	3 660 €		
Page*	2 650 €	215 x 315 mm	
1/2 page	1 630 €	185 x 121 mm	
1/4 page	1 150 €	90,5 x 121 mm	
Encart	Recto/Verso	2 680 €	
	4 pages	4 110 €	Nous consulter
Publi rédactionnel	1 page	2 690 €	
	2 pages	5 315 €	Nous consulter
Répertoire des fournisseurs	Rubrique	102 €	Par ligne/rubrique/an
	Module	235 €	Par cm/colonne/an

* Prévoir 5 mm de fond perdu sur les 4 côtés et ne pas mettre de texte ou logo à moins de 15 mm des bords gauche et droite

■ RENSEIGNEMENTS TECHNIQUES

Remise des éléments d'impression : 5 semaines avant parution.

Documents d'impression acceptés dans les formats : PDF, JPEG, Photoshop EPS ou TIFF (sans compression) avec une définition de 300 dpi.

Délai d'annulation : 2 mois avant parution.

Frais techniques (PAO) : à la charge de l'annonceur. Nous pouvons nous charger de la réalisation de votre annonce avec les éléments que vous nous remettez. Ces travaux sont dans ce cas facturés en sus, avec la première parution. Forfait pour la modification d'une adresse, d'un numéro de téléphone, etc. : 63 € HT.

- **Dégressifs de surface** :
- - 2 à 4 pages : 6 %
- - 5 à 7 pages : 9 %
- - 8 à 10 pages : 12 %
- **Emplacement préférentiel** : + 15 %
- **Dégressifs d'insertions** :
- - 2 à 4 insertions : 3 %
- - 5 à 7 insertions : 6 %
- - 8 à 10 insertions : 9 %
- **Règlement** : 30 jours, à l'ordre de :
- ESI, 9 rue de Berri - 75008 Paris.
- **Conditions de vente sur demande.**

VOTRE CONTACT

Emmanuelle Hammaoui, chef de publicité
9, rue de Berri - 75008 Paris - France
Tél. : +33 (0)1 44 13 31 41 - Email : ehammaoui@fntp.fr



**1- Dubaï (Émi-
rats arabes unis) -
Burj Khalifa, un
record mondial.**

**1- Dubai (United
Arab Emirates) -
Burj Khalifa,
a world record.**

© NANOTECHINNOV.COM

LES GRANDS BÂTIMENTS ET LES STRUCTURES EXCEPTIONNELLES

AUTEUR : BRUNO RADIGUET, INGÉNIEUR CONSULTANT

DEPUIS LA FIN DU XIX^e SIÈCLE, AVEC LES PREMIERS BÂTIMENTS COMME LA MAISON DE F. HENNEBIQUE À BOURG-LA-REINE, JUSQU'À LA FIN DU XX^e SIÈCLE AVEC LA GRANDE ARCHE DE LA DÉFENSE, DES AVANCÉES TECHNOLOGIQUES REMARQUABLES ONT ÉTÉ RÉALISÉES SUR LE MATÉRIAU BÉTON. UN SAUT SPECTACULAIRE DANS LA MAÎTRISE DES HAUTES PERFORMANCES : LES RÉSISTANCES SONT PASSÉES DE 25 À PLUS DE 80 MPA. LES FORMULATIONS ONT ÉTÉ OPTIMISÉES PAR LE DOSAGE EN PRODUITS CIMENTAIRES, EN EAU ET LA RHÉOLOGIE DU MÉLANGE. LA MISE EN ŒUVRE A ÉVOLUÉ GRÂCE AUX PROCÉDÉS DE VIBRATION, DE POMPAGE, PUIS PAR L'APPARITION DE BÉTONS AUTO-PLAÇANTS. L'AVENIR EST PROMETTEUR : LA MAÎTRISE DES BÉTONS FIBRÉS ULTRAPERFORMANTS LAISSE ENTREVOIR DES DÉVELOPPEMENTS INNOVANTS. LE MUCEM À MARSEILLE OUVRE LA VOIE...

HISTORIQUE

Les constructions en béton se sont imposées progressivement depuis le XIX^e siècle grâce à l'impulsion de précurseurs comme Monier, Coignet, Freytag en Allemagne.

Les débuts furent modestes, initiés par la construction des chemins de fer. Les viaducs, ouvrages à voûtes multiples, ont montré les limites techniques de la maçonnerie. Des progrès timides sont apparus grâce à des liants plus innovants. Au début du XIX^e siècle ces nouveaux liants ont été développés à partir de chaux, d'argile, de pouzzolane par L. Vicat en France et J. Aspdin en Angleterre. Les fondations et les piles demandant des quantités de plus en plus importantes de tout venant de carrière et de pierres, demandant main d'œuvre et matière première durent peu à peu évoluer. Les progrès engendrés par les liants cimentaires, mixés avec du sable et des graviers, ont permis de réaliser des économies notables, grâce à la réduction des sections. Progressivement ces liants hydrauliques sont devenus du béton et ont montré des avantages décisifs, la pierre n'était plus nécessaire pour assurer la résistance des ouvrages, les sables et graviers liés par le ciment assuraient par leur compacité une résistance globale supérieure à la maçonnerie. La maniabilité du mélange, grâce au moulage dans



© EUROBAS

2- Bourg-la-Reine - Immeuble pionnier avec château d'eau.

3- Paris 16^e - A. Perret les débuts...

2- Bourg-la-Reine - Pioneer building with water tower.

3- Paris 16^e - A. Perret, the beginning...



© COYAU

des coffrages (pouvant être réutilisés), a permis d'imaginer des formes nouvelles. Parallèlement les ingénieurs par expérimentation et empirisme ont établi les premiers principes de conception du nouveau matériau. De cette époque date la théorie du calcul des sections fissurées donnant aux armatures un module 15 fois celui du béton.

Les premiers immeubles d'habitation se sont imposés au début du XX^e siècle comme l'immeuble de F. Hennebique à Bourg-la-Reine, innovant et précurseur avec le système d'arrosage de la terrasse par un château d'eau (figure 2).

Auguste Perret, jeune architecte, établissait simultanément le projet d'un immeuble rue Franklin à Paris (figure 3). De nombreuses recherches ont été nécessaires avant que les constructions en béton se généralisent, en particulier : assurer une meilleure compacité et garantir la stabilité et l'homogénéité du mélange dans des pièces de grande hauteur. Les travaux menés par les ingénieurs comme Freyssinet et Caquot ont permis de sécuriser la qualité du nouveau matériau grâce à la vibration et à l'apport d'adjuvants assurant la stabilité rhéologique des mortiers.

LA RECONSTRUCTION D'APRÈS-GUERRE

C'est depuis la seconde guerre mondiale que les habitations en béton armé se sont développées par le programme de reconstruction. Des villes entières sont à reconstruire : le Havre sous l'impulsion du ministre R. Dautry, qui confia la conception à l'atelier d'Auguste Perret (ses frères Gustave et Claude fondèrent une entreprise) déjà renommé par de nombreuses réussites avant-guerre comme le théâtre des Champs Elysées en 1913, l'église ND du Raincy 1922 (figure 4). Ce dernier ouvrage a été récemment réhabilité après des désordres liés à un béton trop peu compact. ▶

Il a dessiné le plan de la nouvelle cité du Havre (figure 5) avec souci d'urbanisme en alternant les immeubles d'habitation, commerciaux et administratifs. Tous ces bâtiments utilisaient le béton armé qui s'est imposé comme économiquement avantageux. La réalisation la plus marquante reste l'église Saint Joseph, avec une tour de 110 m de haut reposant sur un cadre de renvoi avec des poutres précontraintes (figure 6). Les structures des immeubles étaient standardisées en offrant une trame régulière de 6,24 m (considérée à l'époque comme un optimum structurel) permettant la répétitivité et une industrialisation des procédés de construction. Des réussites esthétiques intéressantes ont vu le jour par une alternance de parements : béton lavé, béton bouchardé, béton brut... Ces surfaces ont pu orner des éléments architecturaux nouveaux donnant à l'ensemble son harmonie. Aujourd'hui la ville du Havre est inscrite au patrimoine mondial de L'UNESCO. Un tout autre choix a été pris par la ville de Caen qui a choisi une solution mixte sans vision globale qui pouvait s'expliquer par l'abondance de vestiges historiques de la ville. La reconstruction a donc privilégié les bâtiments en pierre calcaire abondante ici, immeubles de style néo-classique. Seul le quartier des Quatrans fit appel au béton armé qui souvent a été caché par un plaquage pierre ; ici, les immeubles sur pilotis permettent la circulation libre au niveau du sol (figure 7).

Le développement du béton armé a donc été largement facilité par la forte demande de reconstruction. L'urgence de la situation a permis de promouvoir cette technologie nouvelle.

L'INDUSTRIALISATION ET LES PREMIERS GRANDS OUVRAGES

Les entreprises, pour faire face à la reconstruction ont dû industrialiser l'acte de construire. En réponse à une demande croissante de logements, les immeubles d'habitation se sont adaptés en devenant de plus en plus épurés et économiques. Cet essor a dynamisé le secteur de la construction faisant de la France un pays pionnier.

F. Bouygues par exemple, a construit son entreprise à partir d'une base logistique de construction : grues, coffrages, camions en les louant aux chantiers. À cette époque s'est établie, à partir de la devise « qualité, délais, prix » la structure de l'entreprise imitant en cela l'industrie américaine. Différents départements fonctionnels sont créés :

achats et matériel, bureau d'études et méthodes, commercial, administration et finances, ceux-ci en support et mutualisés entre les divisions opérationnelles de travaux. Cette révolution de l'organisation s'est accompagnée d'un programme de promotion interne du personnel en bannissant le terme d'ouvrier, s'appropriant le terme de compagnon. En rendant chacun responsable et acteur dans l'organisation du travail, des progrès significatifs ont été accomplis en terme de sécurité et de productivité.

Les délais de construction, souvent incertains alors, ont pu être raccourcis et respectés par la planification des méthodes et des cycles de construction.

D'autres entreprises se sont concentrées sur la préfabrication des éléments d'ossature (dalles ou poutrelles), qui ont permis au béton armé de s'imposer définitivement dans la construction. Les développements ont permis une évolution des matériaux en industrialisant toute la chaîne de production des bétons : les gravières, les centrales livrant le béton prêt à couler, les usines de préfabrication, l'assemblage et la pose des armatures.

Les ouvrages devenant de plus en plus complexes, les entreprises générales ne conservent plus que les tâches ensemblières de conception, organisation, méthodes, administration, mise en œuvre. Quelques ouvrages montrent

la vitalité des constructeurs dans les années 50.

Les 2 hangars de Marignane conçus par N. Esquillan et A. Perret, avec l'entreprise Boussiron, au début des années 1950, de 101,5 m de portée chacun, constitués de 7 arcs reliés par 6 coques en béton de 6 cm de 10 m de portée ont initié des projets audacieux utilisant le béton avec des formes nouvelles comme les coques minces. La construction, préfabriquée au sol, a été hissée en place sur une hauteur de 19 m (figure 8).

Le Palais du CNIT à la Défense, montre l'aboutissement de ces techniques. Les 3 architectes R. Camelot J. de Mailly et B. Zehrfuss, ont fait appel à la créati-



© CC BY

**4- Le Raincy -
Église Notre
Dame : le Cam-
panile de grande
hauteur (1922).**

**5- Le Havre -
Urbanisme
d'ensemble.**

**6- Le Havre -
Église St Joseph,
tour octogonale
centrée sur cadre
de transfert.**

**4- Le Raincy -
Notre Dame
Church: the very
high campanile
(1922).**

**5- Le Havre -
General town
planning.**

**6- Le Havre -
St Joseph
Church, octo-
gonal tower
centred on
transfer frame.**



4

5



6

© VILLE DU HAVRE- ERIK LEVILLY

© BODOKLECKSEL



© KARLDUPART



© STRUCTURAE



© LA DEFENSE-92.FR PREMIERE RENOVATION

tivité de N. Esquillan pour la conception d'une voûte nervurée de 206 m de portée et reposant sur 3 culées. La voûte est constituée de caissons reliés par des voûtes minces en béton (figure 9). La partie centrale en forme étoilée à 3 branches forme est construite sur un cintre général décentré par vérinage sur les culées. Les rives sont construites en réutilisant les cintres centraux. Les poussées des voûtes sont équilibrées par 3 tirants en béton précontraint. Notons les façades vitrées de 50 m de haut, conçues par J. Prouvé, futur architecte du Centre Pompidou.

Très différente, la basilique souterraine St Pie X à Lourdes achevée en 1958 donne une application des techniques imaginées par E. Freyssinet pour la conception du pont de Luzancy sur la Marne construit dès 1946. L'architecte P. Vago, a conçu un projet de basilique souterraine sans piliers de 200 m de long par 61 m, libre. Les piliers sont constitués par des béquilles latérales (figure 10). Les 29 portiques avec traverses en béton précontraint sont reliés par une dalle mince portant l'esplanade engazonnée. L'entreprise Campenon-Bernard en charge de la construction a marqué cette époque en promouvant le béton précontraint. Une surface de 12 500 m² permet l'accueil de plus de 25 000 fidèles.

DES OUVRAGES CONSTRUITS PAR DES METHODES INNOVANTES

Quelques exemples peuvent caractériser la vitalité des constructions en béton. À la fin des années 60 deux projets parisiens ont suscité un débat national : la tour Montparnasse et la reconstruction stade du Parc des Princes. Et plus récemment deux autres ont marqué l'évolution des bâtiments : la Grande Arche par la construction des plateaux et la Tour First à la Défense exemplaire pour la réhabilitation d'un édifice existant.

La **tour Montparnasse** s'intègre dans le projet général de reconstruction de la gare remplacée par un centre

7- Caen - Autre exemple de reconstruction diversifiée.

8- Marignane - Hangars, noter le souci de l'esthétique.

9- Paris la Défense - Palais du CNIT sobriété des formes élancées.

10- Lourdes - Basilique St Pie X, l'ossature apparente inspire le recueillement.

7- Caen - Another example of diversified reconstruction.

8- Marignane - Sheds: note the concern for appearance.

9- Paris la Défense - Palais du CNIT, sobriety of the streamlined shapes.

10- Lourdes - Basilique St Pie X, the visible framework inspires reverence.

commercial surmonté une tour de 210 m de haut, surpassant tous les monuments existant excepté la Tour Eiffel. La Municipalité a réglementé depuis la construction de tours en limitant à 7 étages (35 m) la hauteur des immeubles dans Paris intra muros. Les dérogations ne sont accordées que pour des opérations d'urbanisme particulières. L'ouvrage est construit sur la ligne 6 du métro, nécessitant la réalisation d'une trémie indépendante permettant la réalisation des pieux forés de gros diamètre profonds de 70 m. Les concepteurs ont largement fait appel au béton armé pour la réalisation d'un noyau porteur contenant les 25 cages d'ascenseurs et circulations verticales. Il est réalisé par un coffrage glissant permettant la construction en continu. Les planchers supportés par une ossature mixte reportent les charges sur le noyau. Aujourd'hui la tour a 58 étages, et 6 niveaux de sous sol. Ils sont occupés par des bureaux, dont un restaurant au 56^e étage (figure 11).

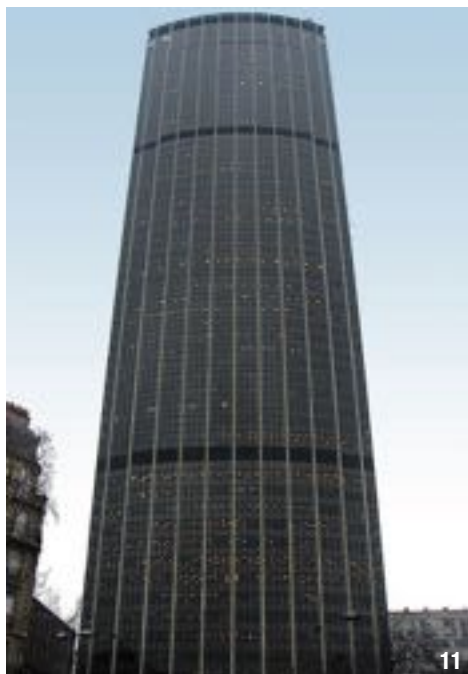
Construit à la même époque le projet de reconstruction du stade du Parc des Princes conçu par l'architecte R. Taillibert cumulait les défis : il enjambe le boulevard périphérique, sa structure totalement en béton offre près de 50 000 places couvertes, la finale

de coupe de France de football 1972 fixe la date d'inauguration, le chantier s'imbrique dans celui de démolition du stade existant. Ces contraintes ont été intégrées au projet de construction confié à l'entreprise Francis Bouygues au début de 1968. Le stade est constitué de portiques en console dont le montant vertical est excentré vers l'extérieur de 7 m pour assurer la stabilité de la fondation. Ces portiques supportent la poutre crémaillère haute recevant les poutres gradins et ils sont espacés de 9 m environ sur l'enveloppe elliptique extérieure. Les poteaux et poutres consoles de 50 m de long sont préfabriqués utilisant la technique des voussoirs à joints collés, serrés par câbles de précontrainte. Les poteaux verticaux étaient d'abord assemblés et réglés puis après matage du joint de pied sont solidarisés par précontrainte en une seule phase. Les voussoirs de la console sont posés en encorbellement grâce à une grue autoportée. Les consoles à l'extrémité sont reliées entre elles 2 à 2 par une poutre caisson surplombant la pelouse et permettant de loger les projecteurs, supprimant ainsi les mâts d'éclairage. Les dilatations de l'anneau sont libres grâce à des joints tous les 2 portiques. Les jambes des portiques sont reliées entre elles par des voiles courbes en béton armé préfabriqués, à double courbure, installés dans des glissières permettant la déformation libre de l'anneau; ils font office de brise-vent (figure 14). La pelouse, après une première saison difficile, a dû être rénovée dès le premier hiver. Ceci a fait débat dans la presse.

En 1983 Le concours pour la construction d'un ouvrage achevant l'axe historique parisien à La Défense a sélectionné le projet du danois O. von Spreckelsen. La Grande Arche, inscrite dans un cube de 110 m de côté, avec un biais de 6° devait être inaugurée pour la commémoration du bicentenaire de la Révolution. Elle abrite de nombreux bureaux dont le ministère de l'équipement.



© ARCHITECTURE MODERNE ET CONTEMPORAINE EN MIDI PYRÉNÉES



11

© DANIEL RODET



12

© PHOTOTHÈQUE - BOUYGUES



13

© HUGUES MITTON (HUGOVOYAGES)

L'ouvrage est implanté sur un nœud de communications : ligne RER, métro ligne 1, SNCF, autoroute A14. Il repose sur 12 piliers elliptiques de 5 m par 3 m en béton armé couronnés par 4 appuis élastomères et fondés chacun sur un puits unique profond de 30 m, reposant sur un banc calcaire de 14 m d'épaisseur au-dessus de marnes, sujettes aux tassements. Les pignons de l'arche sont biais sur environ 25 m, affinant l'aspect du plateau supérieur à 100 m de haut. La structure interne est constituée de 4 méga-portiques distants de 21 m reposant sur 8 piliers (les 4 autres soutenant les pignons biais). Les 2 deux jambes de 20 m de large mis à part les 4 montants qui intègrent les circulations verticales abritent des bureaux, un étage était réalisé en 4 jours. L'originalité réside dans la construction des 2 traverses formant les plateaux, constitués chacun de 4 méga-poutres précontraintes de 9,5 m de haut munies de trémies

pour les circulations intérieures des 3 planchers intégrés. Ces poutres de 70 m de portée sont construites par voussoirs depuis les jambes sur un cintre mobile buté aux jambes supporté par 2 mâts de grue à tour (pour la traverse supérieure), le tout étant ripé en une fois. La construction du plateau supérieur, a demandé lors de l'installation des butons de compensation de 2 fois 70 mm pour maintenir la verticalité des jambes (figure 12). Les 2 fois 4 consoles de 25 m portant les biais des plateaux ont été construites en encorbellement depuis la méga-poutre. La formulation du béton BHP répondait à des exigences strictes facilitées par l'utilisation de fumée de silice : fluidité et rhéologie compatible avec un pompage à 100 m de haut, résistance de 60 MPa nécessaire en service, et retrait minimal, obtention de 25 MPa après 24 heures. Des ornements ont été intégrés, comme un parement en

11- Paris 14° - Tour Montparnasse, Paris à l'heure des gratte-ciel.

12- Paris la Défense - Grande Arche, construction du plateau supérieur.

13- Paris la Défense - Tour First, agrandissement de la structure et réhabilitation interne.

14- Paris - Parc des Princes, audace des courbes.

11- Paris 14° - Tour Montparnasse, Paris in the age of the skyscraper.

12- Paris la Défense - Grande Arche, construction of the upper platform.

13- Paris la Défense - First Tower, enlargement of the structure and internal renovation.

14- Paris - Parc des Princes Stadium, with bold curves.

placage de marbre de Carrare, un ascenseur panoramique extérieur, des structures légères supportées par des câbles figurant les nuages.

La Tour First rentre dans un vaste projet de réhabilitation d'une tour de bureaux de 170 m de haut construit dans les années 1970 à La Défense. Les propriétaires ont lancé en partenariat avec le constructeur cette rénovation audacieuse. Plusieurs objectifs sont fixés : surélever la tour de 10 niveaux portant la hauteur totale à 231 m, tout en écrétant de 3 et 10 niveaux localement, élargir les 3 branches de la tour de 1,50 m en périphérie, adapter l'infrastructure aux charges nouvelles, rechercher une empreinte environnementale minimum (construction et consommation d'énergie), revoir le noyau intérieur remodelant les circulations verticales. Notons que la stabilité de la tour sous l'effet du vent (après les essais en soufflerie) a nécessité un agrandissement du système de fondation. Constitué de voiles précontraints sur un radier, il a pu être allongé et élargi, par un renforcement direct après reprise sur les armatures existantes. Les travaux ont fait appel aux techniques récentes de désamiantage et d'hydro-démolition, pour la préparation des travaux neufs tout en respectant des critères rigoureux de sécurité et de pollution (figure 13). Les murs rideaux en façades, grâce à des panneaux asservis permettent d'utiliser l'énergie solaire selon la saison, faisant de cet immeuble l'un des premiers à recevoir le label HQE (figure 15).



14

© PHOTOTHÈQUE - BOUYGUES

15- Paris La Défense - Tour First, les hauteurs des ailes favorisent la stabilité aérodynamique.

16- Hong-Kong (Chine) - Stone cutter Tower, finesse relative de la structure, habillage en acier inox de la tête.

17- Vladivostok (Russie) - Pylônes en A pour le plus grand pont du monde.

15- Paris La Défense - First Tower, the height of the wings contributes to aerodynamic stability.

16- Hong Kong (China) - Stone Cutter Tower, relative thinness of the structure, stainless steel lining of the head.

17- Vladivostok (Russia) - A-shaped towers for the biggest bridge in the world.



FIGURE 15 © WELXSLIPPER - FIGURE 16 © KITING



© GKNIOCT / HTTP://RUSMOSST.RU

LES DÉVELOPPEMENTS ACTUELS ET LES PERSPECTIVES FUTURES

Les bâtiments ou les grandes structures en béton vont se développer par exemple : la conquête des grandes hauteurs, les habitations en zone maritime, ou l'utilisation de BFUP (Béton Fibré Ultra Performant).

Les grandes hauteurs ont été conquises par les tours des grands centres urbains et par les pylônes des grands ponts. La maîtrise du pompage des

BHP et l'expérience des concepteurs (notamment dans l'aérodynamique du vent) ont permis de réaliser le Burj Khalifa à Dubai, de 828 m (739 m de structure) établissant un record du monde (figure 1). Dans une moindre mesure les ponts haubanés de Stonecutter à Hong Kong (figure 16), ou de Russky à Vladivostok en Russie (travée record de 1104 m) (figure 17) ont des pylônes de 293 et 320 m de haut respectivement. Ces grandes structures sont

très sensibles aux actions du vent. En particulier, les vibrations des structures doivent être contrôlées pour le confort des habitants en limitant les accélérations. Ces oscillations sont aujourd'hui maîtrisées en équipant leur sommet d'amortisseurs dynamiques accordés sur leur fréquence de vibration. De même des recherches sont menées sur les façades pour réduire les forces résultantes et les pressions locales. Les villes de bord de mer vont devoir

en raison du réchauffement climatique reconquérir de l'espace en gagnant du terrain sur la mer, ou même devront être sécurisées contre les assauts répétés des tempêtes. Des structures artificielles pourront ainsi recevoir la construction de quartiers neufs tout en offrant une barrière aux actions des vagues. Ces immeubles devront par nécessité limiter leur impact sur l'environnement : économiser l'énergie, limiter et retraiter les déchets, simplifier les réseaux. Les structures porteuses nouvelles implantées en milieu marin devront avoir une durabilité exceptionnelle en utilisant les plus récentes techniques : compacité des bétons avec ajout de fumée de silice ou autre, une protection cathodique des armatures ou des armatures en acier inoxydable. Un autre axe de développement concerne l'utilisation des BFUP. Malgré les timides débuts de ce nouveau matériau, celui-ci est porteur de potentiels qui sont encore à conquérir : il optimise le poids des structures en apportant des gains significatifs : poteaux, dalles minces de 3 cm, poutrelles, éléments de façade. Le matériau présente aussi d'excellentes performances pour sa durabilité. Les difficultés à ce jour restent le coût élevé et les contraintes de mise en œuvre. Quelques ouvrages sont réalisés ou en cours de construction comme la couverture de la gare de péage du viaduc de Millau, la couverture du stade Jean Bouin et le musée de la culture européenne et méditerranéenne (MUCEM) à Marseille. Avec ces perspectives de développement, la voie de nouvelles formes est tracée pour de grands constructeurs (architectes ou ingénieurs) qui pourront laisser libre cours à leur imagination comme les concepteurs qui eurent à reconstruire la France. □

ABSTRACT

LARGE BUILDINGS AND EXCEPTIONAL STRUCTURES

BRUNO RADIGUET, INGÉNIEUR CONSULTANT

In the past half-century, the rapid expansion of general construction contractors has given rise to exceptional large buildings. Considerable technological improvements in the performance of concrete material have been made through research on the composition, chemistry and rheology of the mix. Processing has been industrialised with the development of prefabrication, sectional formwork, pumping processes and vibration techniques. Spectacular progress has been made regarding concrete's strength, with properties being tripled from 25 MPa to more than 75 MPa at present, for an equivalent price. This progress, combined with research on structural behaviour and model analyses, has provided French firms with world-renowned expertise. □

LOS GRANDES EDIFICIOS Y LAS ESTRUCTURAS EXCEPCIONALES

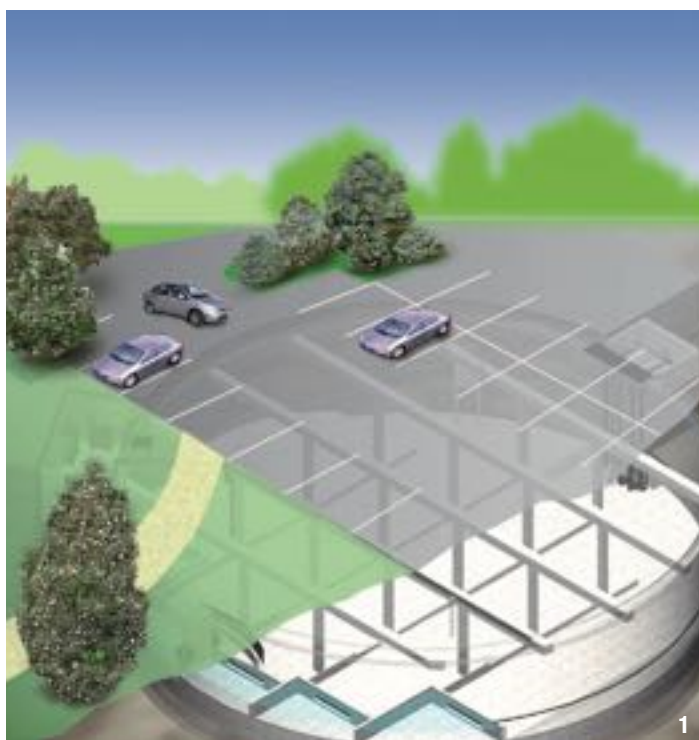
BRUNO RADIGUET, INGÉNIEUR CONSULTANT

Desde hace medio siglo, el auge de las empresas generales de construcción está en el origen de grandes edificios excepcionales. Las aportaciones tecnológicas sobre las prestaciones del material hormigón han sido considerables gracias a las investigaciones sobre la composición, la química y la reología de la mezcla. La utilización se industrializó con el desarrollo de la prefabricación, de los encofrados reutilizables los procedimientos de bombeo y las técnicas de vibración. Los avances realizados sobre la resistencia han sido espectaculares triplicando las prestaciones que, en la actualidad, han pasado de 25 MPa a más de 75 MPa, por un precio equivalente. Estos progresos, junto con las investigaciones sobre el comportamiento de las estructuras y los análisis sobre modelos han aportado a las empresas francesas unos conocimientos técnicos y prácticos mundialmente reconocidos. □

BÉTONS DE FONDATION

AUTEUR : SABINE DARSON, RESPONSABLE LABORATOIRE MATÉRIAUX, SOLETANCHE BACHY

LES BÉTONS DE FONDATION CONSTITUENT UNE FAMILLE À PART DANS LE MONDE DES BÉTONS : ILS SONT COFFRÉS DANS LE SOL, DOIVENT RESTER FLUIDES TOUT AU LONG DU COULAGE, SE METTRE EN PLACE SANS ÊTRE VIBRÉS JUSQU'À PLUS DE 100 M DE PROFONDEUR, RÉSISTER À L'AGRESSIVITÉ DU TERRAIN ET OBTENIR DES RÉSISTANCES MÉCANIQUES POUVANT ATTEINDRE 100 MPA. DE PLUS LEUR FONCTION EST AUSSI BIEN STRUCTURELLE (MUR DE QUAI, PARKING, BASSIN D'ORAGE) QU'HYDRAULIQUE LORSQU'ON VEUT RABATTRE UNE NAPPE OU ÉTANCHÉIFIER UN BARRAGE. UNE VRAIE PERFORMANCE TECHNIQUE OBTENUE GRÂCE AU TRAVAIL DE FORMULATION MAIS ÉGALEMENT AUX MÉTHODES DE MISE EN ŒUVRE CHANTIER.



INTRODUCTION

Évoquer les fondations n'est pas très simple car le fait d'être enterrées fait que souvent on ne les voit pas ou on ne les remarque pas (figure 1). Les travaux de mise en place du béton se font à l'aveugle depuis la surface, ce qui nécessite une maîtrise du matériau en amont afin de garantir la qualité de l'ouvrage. Le sol sert de coffrage aux bétons qui ne sont pas toujours mis au jour et qui doivent donc résister aux agressions

du sol et de l'eau de la nappe tout au long de la vie de l'ouvrage. Les fonctions des bétons de fondation sont assez diverses puisqu'ils doivent assurer la portance des ouvrages de Génie Civil, étanchéifier des barrages, circonscrire des sols pollués, constituer des tunnels, des parkings ou des bassins d'orage (figure 2), ou bien encore former des murs de quai (figure 3). Les bétons de fondation sont donc à part dans la grande famille des bétons.

1- Bassin d'orage de Cholet.
2- Bassin d'orage de Floirac.

1- Cholet stormwater basin.
2- Floirac stormwater basin.

MISE EN ŒUVRE

Une fondation, qu'elle soit constituée de pieux de quelques mètres ou de barrettes d'une profondeur de 125 mètres comme pour les tours Petronas de Kuala Lumpur (figure 4), est réalisée à partir de la surface à l'aide d'équipements de forage importants.

La reconnaissance du sol est primordiale pour sélectionner le matériel, mais également les matériaux qui seront mis en œuvre.

Dans le cas particulier des parois moulées et des barrettes, après que le sol a été excavé, une grue met en place les cages d'armature ainsi que les colonnes de bétonnage qui descendent jusqu'au fond du forage. Toutes ces opérations se font sous boue et cette dernière est pompée en surface

au moment du bétonnage. Le béton est coulé gravitairement depuis la surface par déversement des camions toupie (figure 5). D'autres modes de mise en œuvre existent comme pour les pieux CFA où la cage d'armature est descendue dans l'excavation après que le béton a été coulé.

PARTICULARITÉS

La description de la mise en œuvre d'un béton de fondation fait apparaître qu'il doit être assez fluide pour passer à travers la colonne de bétonnage et les armatures, puis se mettre en place de lui-même sans vibration (classe d'affaissement S4 : 160 à 210 mm de

slump). Il doit également être cohésif et stable pour ne pas expulser son eau sous l'effet de la pression et ne pas se mélanger au fluide de forage (quantité de fines passant à 125 µm > 400 kg/m³).

La rhéologie, notamment le temps d'ouvrabilité ou de maniabilité, est également un critère important pour les bétons de fondation car les charges déversées les une après les autres dans l'excavation (représentées en différentes couleurs sur la figure 6) se mélangent sur une très grande hauteur. Cela signifie que le béton doit rester fluide très longtemps, parfois tout au long du coulage, pour garantir l'unité de la structure.

ÉVOLUTIONS

L'accroissement de la taille des ouvrages nécessite des fondations plus profondes et plus massives, et donc des bétons plus performants.

À l'inverse, le perfectionnement des bétons de fondation a rendu possible la construction de grands ouvrages dans des terrains qui semblaient jusque là peu propices à de telles prouesses. Cette montée en technicité n'a pas encore montré ses limites.

BÉTONS HAUTES PERFORMANCES

Il y a une dizaine d'années, il était presque inconcevable de formuler des bétons de fondation ayant des résistances à la compression supérieures à 45 MPa.

Il semblait difficile d'allier la fluidité, le retard de prise et les fortes montées en résistance.

Les troisièmes et quatrièmes générations de superplastifiants ont ouvert de nouvelles perspectives et ont permis la mise au point des bétons à hautes performances.

Ainsi des projets de très grandes tours à l'international ont pu être envisagés avec des formules qui dépassaient facilement les 80 MPa à 28 jours sans vibration (figure 7). Le principe des bétons de poudre réactive est appliqué pour permettre une montée en résistance importante une fois le coulage terminé.

RHÉOLOGIE LONGUE ET GRANDE FLUIDITÉ

Réaliser des fondations de plus de 100 mètres de profondeur ou des parois de plus de 2 mètres de large n'est possible que si l'homogénéité et la continuité de la structure peuvent être garanties.



© PATRICE LEFEBVRE
3

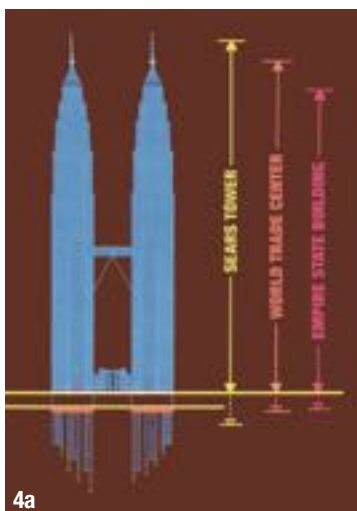
3- Mur de quai du Havre.

4- Tours Petronas (Kuala Lumpur) de 452 mètres de haut fondées sur des barrettes de 125 mètres de profondeur.

3- Le Havre dock wall.

4- Petronas Towers (Kuala Lumpur) 452 metres high supported on foundation units at a depth of 125 metres.

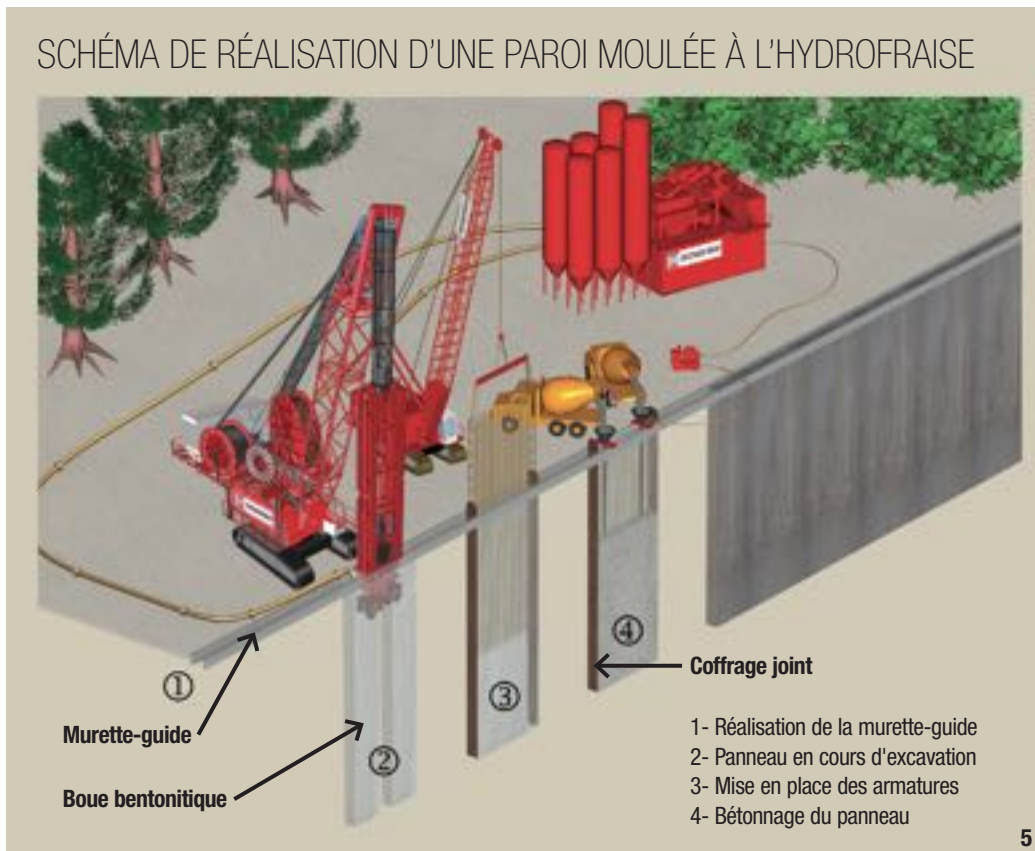
© PHOTO THÉOUE SOULETANICHE BACHY



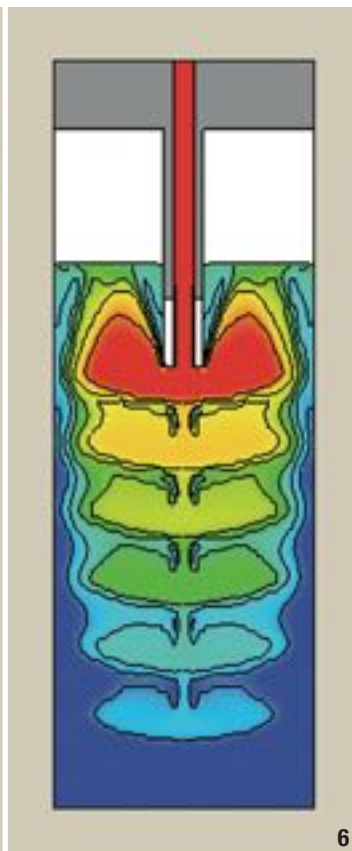
4a

4b

SCHÉMA DE RÉALISATION D'UNE PAROI MOULÉE À L'HYDROFRAISE



5



6

© PHOTOTHÈQUE SOLETANCHE-BACHY

© NICOLAS ROUSSEL IFSTTAR

Les volumes unitaires bétonnés dépassant les 1 000 m³ impliquent des rhéologies de 10 à 12 heures en conservant l'état fluide du béton.

Les adjuvants sont mis à rude épreuve pour obtenir une rhéologie longue car cela implique d'accroître la fluidité de départ du béton. Ainsi le maintien de l'ouvrabilité sur plus de 8 heures, surtout dans les pays chauds, nécessite d'avoir une fluidité initiale proche des BAP (Bétons auto-plaçants) tout en gardant les moyens de production et les cadences d'approvisionnement habituels.

Le diamètre maximal des granulats est légèrement réduit afin qu'ils puissent être portés facilement par la pâte très fluide. La mesure du diamètre d'étalement est privilégiée à la mesure du slump (figure 8).

DEUX CAS PARTICULIERS EN ÉTANCHEIFICATION

Le rôle principal des fondations est de reprendre les charges qui lui sont appliquées, qu'elles soient liées à l'élévation d'une structure (bâtiment, pont), ou liées à la poussée des terres (parking, tunnel, quai). Les résistances requises vont de celles prévues dans la norme EN 206 jusqu'aux hautes performances que nous avons évoquées précédemment.



7

© PHOTOTHÈQUE SOLETANCHE-BACHY

5- Schéma de réalisation d'une paroi moulée à l'HydroFraise.

6- Modélisation du coulage d'une barrette avec les charges de béton représentées en différentes couleurs.

7- Béton hautes performances coulé depuis la plateforme dans des barrettes de plus de 80 mètres de profondeur.

5- Diagram of diaphragm wall execution by hydrofraise.

6- Model of pouring of a supporting wall unit with the concrete loads shown in different colours.

7- High-performance concrete poured from the platform into supporting wall units at a depth of more than 80 metres.

Une fonction moins connue des bétons coulés dans le sol est l'étanchéification, utilisée dans deux cas de figure : en fiche hydraulique dans les parois moulées ou en coupure étanche pour les barrages ou les sites pollués.

BÉTON MAIGRE POUR FICHE HYDRAULIQUE

Le dimensionnement d'une paroi moulée est autant structural qu'hydraulique. En effet, la hauteur de nappe et le gradient induit ont des conséquences sur l'épaisseur et la profondeur de la paroi en cas de rabattement du niveau d'eau dans la fouille.

Pour intercepter l'horizon étanche il est parfois nécessaire d'augmenter la profondeur de la paroi sans que le même niveau de résistance soit requis sur cette partie d'ancrage. Il est alors proposé une paroi dite « mixte » comprenant un béton maigre en fond de panneau avec des résistances de l'ordre de 8 à 10 MPa, relié au béton de fondation par une frange de mélange. La fluidité et la rhéologie de ces deux bétons sont identiques mais l'intérêt environnemental est important avec la forte diminution de la quantité de ciment.

BÉTON PLASTIQUE POUR COUPURE ÉTANCHE

Un type de béton se distingue des autres catégories de par sa formulation et ses propriétés : il s'agit des bétons plastiques. Ces bétons ont la particularité d'avoir une partie de leur liant



© PHOTOTHÈQUE SOLETANCHE-BACHY

8- Béton auto-plaçant à rhéologie longue testé dans les Émirats Arabes Unis.

9- Étanchéité du barrage de la Ganguise en béton plastique.

8- Self-placing concrete of long rheology tested in the United Arab Emirates.

9- Waterproofing of the Ganguise Dam in plastic concrete.

remplacée par de la bentonite : cela les rend très peu résistants, déformables et durables vis-à-vis des agressions chimiques.

Lorsqu'ils sont utilisés pour étanchéifier le cœur d'un barrage ou d'une digue (figure 9), les bétons plastiques doivent pouvoir accompagner le mouvement de l'ouvrage sans fissurer au moment de la mise en eau de celui-ci. Leurs faibles résistances, comprises entre 0,5 et 3 MPa, permettent des taux de déformation de l'ordre de 3 à 5% selon la pression latérale exercée. Ils sont mis en place de la même façon qu'une paroi moulée classique et constituent un noyau étanche qui réhabilite le barrage. Concernant les sites pollués, il sont circonscrits la plupart du temps à l'aide

d'une paroi au coulis ancrée dans un horizon étanche afin de stopper la diffusion des polluants par l'écoulement de la nappe (figure 10). Pour des sites à pH acide ou en présence d'agents agressifs pour le ciment (sulfates, magnésium), la tenue dans le temps d'une paroi au coulis ne peut être garantie. Le béton plastique est alors utilisé, sa pérennité étant assurée par les granulats qu'il contient ainsi que par la faible quantité de liant.

DÉVELOPPEMENT DURABLE

Comme nous avons pu le voir dans les chapitres précédents, la composition des bétons de fondation est adaptée aux terrains dans lesquels ils sont mis en place, afin de répondre à l'application souhaitée (coupure étanche, sol pollué) et garantir leur durabilité. Les normes destinées aux bétons de fondation imposent des dosages en liant supérieurs à ceux prescrits pour les bétons de génie civil, là aussi pour assurer leur durabilité.

Mais les normes environnementales et les bilans carbone incitent à revoir cette pratique pour tendre vers des bétons plus « verts » (tableau 11).

Des études ont démontré que les ciments de laitier ou ceux contenant des cendres volantes avaient une meilleure tenue dans le temps face aux agents agressifs, en particulier grâce à la formation de phases minérales plus compactes (notamment les CSH), mais aussi grâce à une porosité plus fine. ▷



© E. GAFFARD

CIRCONSCRIPTION D'UN SITE POLLUÉ À L'AIDE D'UNE PAROI ÉTANCHE PÉRIMÉTRALE



10

© PHOTO THÉOULE SOLETANCHE BACHY

10- Circonscription d'un site pollué à l'aide d'une paroi étanche périmétrale (schématisée en marron) et de drains horizontaux et verticaux (schématisés en bleu) permettant de protéger la nappe phréatique (flèches bleues) des pollutions du site.

11- Module d'informations environnementales de la production de ciments courants en France, juin 2011.

Ces additions étant respectivement des sous produits de l'industrie sidérurgique et des centrales thermiques, leur utilisation est intéressante en terme d'exploitation des ressources et de dégagement de CO₂.

L'utilisation de ces ciments composés est donc à privilégier. Mais une réelle avancée a cependant été faite grâce à la notion d'équivalence de performances qui offre de plus grandes perspectives d'utilisation du laitier et des cendres dans les bétons en France mais également à l'étranger. Et grâce à la puissance des malaxeurs actuels, les performances des bétons réalisés avec des ciments normalisés co-broyés ne se démarquent plus de celles des bétons composés de ciment Portland et d'additions.

En dehors des liants, un travail important a également été fait sur l'utilisation des matériaux locaux du lieu de

construction afin de limiter le transport des matières premières :

→ La compréhension du comportement des granulats et des liants à travers le monde permet de créer des séquences de malaxage adaptées (saturation préalable des granulats, introduction différée des adjuvants).

→ L'eau pompée sur l'emprise du chantier peut servir à gâcher le béton si sa chimie le permet, ce qui évite d'utiliser de l'eau potable du réseau.

→ Enfin la grande famille des adjuvants permet l'utilisation de matériaux de moindre qualité tout en garantissant les performances du béton. □

10- Circumscription of a contaminated site with a perimeter cutoff wall (shown schematically in light brown) and horizontal and vertical drains (shown schematically in blue) can protect the aquifer (blue arrows) from pollution from the site.

11- Environmental information module on the production of ordinary cements in France, June 2011.

Type de ciment	Appellation	kg eq CO ₂ / t
CEM I	Ciment Portland	866
CEM II/A-S	Ciment Portland au laitier	753
CEM II/A-V	Ciment Portland aux cendres volantes	755
CEM II/A-L	Ciment Portland au calcaire	759
CEM II/B-L	Ciment Portland au calcaire	648
CEM II/B-M	Ciment Portland composé	629
CEM III/A	Ciment de haut-fourneau	461
CEM III/B	Ciment de haut-fourneau	247
CEM V/A	Ciment composé	502

© ARTEL
11

ABSTRACT

FOUNDATION CONCRETES

SABINE DARSON, SOLETANCHE BACHY

Foundation concretes are a separate family in the world of concrete: they are shuttered in the ground, must remain fluid throughout pouring, be placed in position without being vibrated down to depths of more than 100 m, resist the aggressiveness of the ground and achieve mechanical strengths of up to 100 MPa. Moreover, their function can be both structural and hydraulic for building a dock wall, a car park or a stormwater basin, laying foundations for a building or bridge, or else lowering a water table or sealing a dam. A real technical performance obtained thanks to mix design work but also to application methods on site. □

HORMIGONES DE CIMENTACIÓN

SABINE DARSON, SOLETANCHE BACHY

Los hormigones de cimentación constituyen una familia independiente en el mundo de los hormigones: son encofrados en el suelo, deben permanecer fluidos durante todo el colado, aplicarse sin ser sometidos a vibraciones hasta más de 100 m de profundidad, resistir a la agresividad del terreno y obtener resistencias mecánicas que pueden llegar a ser de 100 MPa. Además, su función puede tanto ser estructural como hidráulica cuando se quiere construir un muro de muelle, un aparcamiento o un tanque de tormentas, cimentar un edificio o un puente o, incluso rebajar una capa freática o estanqueizar una presa. Una auténtica proeza técnica obtenida gracias al trabajo de formulación, así como a los métodos de aplicación en la obra. □



1- TCSP T Zen
Melun Sénart
Corbeil.

1- T-Zen Melun
Sénart Corbeil
reserved right-
of-way public
transport system.

© EIFFAGE

POURQUOI DES REVÊTEMENTS EN BÉTON ?

AUTEURS : FRÉDÉRIC GRATESSOLLE, DIRECTEUR D'AGENCE, EIFFAGE TP BÉTON À PLAT / SPECBEA - CHRISTOPHE CHEVALIER, RESPONSABLE TECHNIQUE, AGILIS / SPECBEA - OLMIER GOYAT, RESPONSABLE TECHNIQUE, SIGNATURE / SPECBEA - HAMADOU KABRE, DIRECTEUR TECHNIQUE, CMR EXEDRA / SPECBEA

UNE CHAUSSÉE EN BÉTON RÉPARTIT LES CHARGES ET LIMITE LES SOLLICITATIONS SUR LE SOL SUPPORT. ELLE EST ADAPTÉE AUX CHARGES LOURDES, AUX SOLLICITATIONS SÉVÈRES. APRÈS UN RAPPEL CONCERNANT LA CONCEPTION DES CHAUSSÉES EN BÉTON, PLUSIEURS APPLICATIONS SONT PRÉSENTÉES : TRAVAUX PORTUAIRES, AÉROPORTS, GIRATOIRES, TCSP. CES OUVRAGES ONT EN COMMUN DE RECEVOIR DES CHARGES ÉLEVÉES OU DE SUBIR DES SOLLICITATIONS SÉVÈRES. UN CAS INTÉRESSANT EST PRÉSENTÉ : CELUI DU TUNNEL FERROVIAIRE DU PERTHUS OÙ L'UTILISATION DU COFFRAGE GLISSANT A PERMIS DE RÉDUIRE LES DÉLAIS.

INTRODUCTION

Les mots « chaussée » et « béton » ne sont pas spontanément associés pour la plupart des usagers. Le premier est généralement associé à l'enrobé, le second fait le plus souvent référence à la construction de bâtiments ou d'ouvrages de génie civil. Cette situation n'est pas la même chez nos voisins belges, allemands, suisses ou américains.

C'est avant tout le résultat de politiques d'investissement différentes. Les stratégies d'investissement progressif qui prévalent à l'intérieur de nos frontières

sont plutôt favorables aux solutions souples en raison d'un coût initial de construction plus faible que celui de structures rigides.

Cependant, il existe des domaines d'emploi où les chaussées en béton répondent au cahier des charges des décideurs. Pour cela, l'environnement du projet doit comporter les hypothèses et contraintes suivantes :

- Charges importantes,
- Vitesse de sollicitation faible,
- Investissement à long terme,
- Conditions météorologiques extrê-

mes en matière d'écart de température ou de précipitations,

→ Trafic canalisé.

Les ouvrages où ces conditions sont rencontrées sont :

- Les plates-formes aéroportuaires, les voies de circulation et parkings pour avions,
- Les plates-formes portuaires,
- Les giratoires,
- Les Transports en Commun en Site Propre,
- Les chaussées routières dans les pays émergents.

RAPPEL : FONCTIONNEMENT ET CONCEPTION DES STRUCTURES RIGIDES

Une couche de béton est une dalle rigide, de module constant, indépendant de la température et de la durée d'application de la charge. Elle répartit les efforts de façon uniforme sur le sol support et limite les contraintes. Au sein de la couche apparaissent des contraintes de compression dont la valeur est très inférieure à la résistance en compression du matériau et des contraintes de traction à la base de la couche. ▷

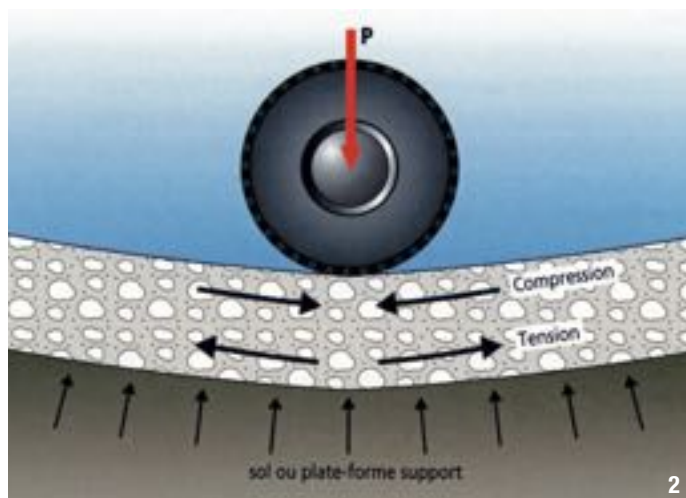
Commençons par démentir une contre vérité qui consiste à croire qu'une chaussée en béton est nécessairement armée.

Le matériau béton est avant tout connu pour ses propriétés de résistance à la compression. Sous l'effet d'une charge roulante, le revêtement va subir le diagramme de contrainte schématisé sur la figure 2.

La partie supérieure est comprimée tandis que la partie inférieure doit reprendre des efforts de traction (figure 2). Le dimensionnement consistera donc à déterminer l'épaisseur suffisante afin que la résistance en traction du béton soit supérieure à celle engendrée par les charges apportées par le trafic. Pour les chaussées routières, une résistance de 2,7 MPa en traction par fendage est requise tandis que pour les plateformes aéroportuaires et portuaires, il est demandé 3,3 MPa.

Une fois l'épaisseur déterminée, il convient de gérer la fissuration de retrait. Au cours de sa prise, le béton va subir des contraintes qui vont être supérieures à sa résistance entraînant l'apparition de fissures de retrait. Ce phénomène naturel doit être anticipé afin d'éviter une fissuration anarchique qui nuirait à la pérennité de l'ouvrage. Comme toute plateforme, la surface doit être parfaitement étanche pour empêcher toute venue d'eau dans le corps de chaussée. Ainsi, en amont de la réalisation, un plan de calepinage des joints est à réaliser respectant les critères suivants :

- La plus grande dimension de la dalle doit être inférieure à 25 fois l'épaisseur,
- Le second côté de la dalle ne peut être inférieur à la moitié de la dimension précédente.



LES JOINTS

Pour réaliser les joints, un premier sciage est réalisé environ 6h après le bétonnage sur le 1/3 de l'épaisseur. Ce délai est variable suivant les conditions météorologiques et la nature du ciment utilisé. Cette opération doit être confiée à des professionnels pour éviter tout désordre.

Environ trois semaines après, le sciage initial est élargi sur une profondeur de 3 cm et une largeur de 1 cm.

Cette réservation est garnie à l'aide d'un produit bitumineux afin d'assurer l'étanchéité de la chaussée.

LES GOUJONS

La mise en place de goujons au droit des joints permet d'assurer la continuité des déplacements et d'éviter le battement des dalles. Suivant l'épaisseur de béton, le diamètre et l'espacement de ces goujons sont déterminés à l'aide du tableau 1.

Les goujons peuvent être soit mis en place automatiquement dans le béton

2- Chaussée béton au passage d'une charge.

3- Quai n°1 Port de Dégrad des Cannes.

4- Parkings Aéroport Roissy Charles de Gaulle.

2- Concrete pavement passed over by a load.

3- Pier No. 1, Dégrad des Cannes Port.

4- Roissy Charles de Gaulle airport car parks.

frais soit forés et scellés pour les joints de construction ou posés à l'avancement sur des paniers métalliques pour les joints transversaux de retrait.

STRUCTURES EN BÉTON ARMÉ CONTINU

Pour améliorer la continuité, les joints peuvent être remplacés par la mise en place de barres HA longitudinalement. Ces armatures n'ont aucun rôle structural. Elles sont placées à la fibre neutre de la section de béton et reprennent les efforts de retrait. Elles empêchent ainsi la création de fissure. Ce type de structure est appelée Béton Armé Continu (BAC).

Le ratio d'acier est calculé à l'aide de la formule suivante :

Section acier = 0,67 % x Section de béton.

Ce rapport correspond à celui entre la résistance en traction du béton (3.3 MPa) et celle de l'acier (500 MPa). Il est important de bien maîtriser la résistance du béton car l'obtention de valeurs trop supérieures à celles préconisées initialement pourrait conduire à un sous-dimensionnement des aciers.

LE BÉTON

La composition du béton destiné à la réalisation de chaussée doit avant tout permettre d'obtenir les résistances requises et ensuite d'assurer une mise en œuvre satisfaisante.

Un ordre de grandeur des dosages courants en ciment est de 330 kg/m³ pour les bétons des couches de roulement et 200 kg/m³ pour les bétons de couches de fondation. Suivant la classe d'environnement définie par la norme EN 206-1, le dosage minimum peut s'élever à 350 kg/m³ pour les classes XF4 correspondant à un climat froid où le matériau est soumis aux sels de déverglaçage.

Les granulats utilisés peuvent être des calcaires durs que l'on trouve couramment en France. La granulométrie



TABLEAU 1 : DIMENSIONS DES GOUJONS

Épaisseur de la dalle (en cm)	Dimensions des goujons (cm)		
	Diamètre	Longueur	Espacement
13 à 15	2	40	30
16 à 20	2,5	45	30
21 à 28	3	45	30
29 à 40	4	50	40
41 à 50	4,5	55	45

TABLEAU 2 : CLASSIFICATION DES BÉTONS SUIVANT LEUR RÉSISTANCE

Classe de résistance	Résistance en traction par fendage à 28 jours
Classe 6	3.3 MPa
Classe 5	2.7 MPa
Classe 4	2.4 MPa
Classe 3	2.0 MPa
Classe 2	1.7 MPa
Classe 1	1.3 MPa

TABLEAU 3 : FORMULES DE BÉTON DE FONDATION ET DE REVÊTEMENT

Matériaux	C25/S2.0	C32/S2.7
Sable 0/4 Naturel SDC1	945 Kg	880 Kg
Granulat 10/20 SCC	650 Kg	675 Kg
Granulat 6/10 SCC	350 Kg	345 Kg
CEM I 42.5 N CE PM CP2	330 Kg	390 Kg
Eau Totale	160 l	160 l
Eau efficace	153 l	153 l
Eeff/C	0.46	0.40
CHRYSOPlast Omega I 44	0,35%	0,35%
CHRYSOAir D	0,2%	0,2%

TABLEAU 4 : AIRES FEDEX - PHASE III : LES CARACTÉRISTIQUES GÉOMÉTRIQUES DU PROJET

	Parking avion	Aire de stockage
Superficie	35 500 m ²	5 500 m ²
Épaisseur de béton de classe 6	37 cm	25 cm
Largeur de coulage	5 m	5 m

est adaptée en fonction de l'épaisseur de mise en œuvre. Généralement, le béton présente une granulométrie de 0/20 mm. Cependant, pour des épaisseurs de l'ordre de 10 à 12 cm, la granulométrie sera voisine de 0/14 mm et a contrario pour des structures de 40 cm, il sera mise en œuvre une granulométrie 0/40. Afin d'optimiser le dosage en ciment, la quantité d'eau incorporée doit être

parfaitement maîtrisée et le rapport E/C = < 0,45. La plasticité du béton sera adaptée en fonction du type de mise en œuvre. L'utilisation de machine à coffrage glissant permet l'emploi de béton ferme (affaissement au cône de l'ordre de 4 à 5 cm), tandis qu'une mise en œuvre manuelle demandera une plasticité voisine de 8 cm. Une quantité d'eau trop importante fait considérablement chuter les perfor-

mances. L'emploi d'un plastifiant réducteur d'eau optimise ce dosage tout en assurant une maniabilité satisfaisante. Enfin, pour lutter contre les méfaits du gel, un entraîneur d'air doit être incorporé. Son rôle est de créer à l'intérieur un réseau de bulles d'air jouant le rôle de vase d'expansion. La teneur en air du béton doit être comprise entre 3% et 6%.

LES APPLICATIONS INFRASTRUCTURES PORTUAIRES : LE PORT DE DÉGRAD DES CANNES À GUYANE (GUYANE) - (figure 3)

Bien que le département de la Guyane se situe sur le continent sud-américain, la densité de la forêt Amazonienne lui donne un caractère insulaire. Le premier point d'entrée reste la côte atlantique. Les principaux échanges avec l'extérieur s'opèrent donc par voie maritime et l'activité économique est rythmée par l'arrivée des nombreux porte-conteneurs.

Le port de Dégrad des Canes se situe sur la commune de Remire Montjoly au droit de l'estuaire du fleuve Mahury. Pour s'adapter aux navires toujours plus longs, le port se devait de se doter d'infrastructures modernes. La CCI de Guyane a donc entrepris la rénovation et l'extension du quai n°1 en 2010. Les chariots élévateurs, sur ce type d'infrastructure, manutentionnent des conteneurs pouvant atteindre 45 t. Ils évoluent sur un périmètre réduit et à des vitesses très lentes.

Par ailleurs, le climat tropical se caractérise par des pluies abondantes et des températures élevées.

Les conteneurs sont, quant à eux, entreposés sur trois, voire quatre niveaux engendrant des charges de poinçonnement, au sol, particulièrement élevées. Dès lors, le matériau béton trouve, dans cette situation particulièrement très agressive, un domaine de prédilection.

Les travaux d'extension consistent en la réalisation de trois files de pieux couronnées par des poutres longitudinales sur lesquelles viennent reposer des caissons en béton présentant une forme de demi-lune. Un premier remplissage en béton armé entre chaque caisson permet de créer la base de la plateforme.

Le revêtement en béton est composé de deux épaisseurs. Sur la zone d'extension, la couche de béton de fondation de classe 3 présente une épaisseur de 21 cm et la couche de béton de revêtement de classe 5 une épaisseur de 39 cm.

Au droit de la zone de rénovation, le béton de fondation a été mis en œuvre sur 38 cm et le béton de revêtement sur 39 cm.

Le béton était produit par deux centrales locales assurant un rendement de 40 m³/h et transporté jusqu'au lieu d'application par des camions benne d'une capacité de 6 ou 8 m³.

L'intégralité du chantier a été réalisée mécaniquement. Une machine à coffrage glissant a été transférée depuis la métropole pour assurer la mise en œuvre. La plateforme a été calepinée en bandes de 5 m de large et 130 m de longueur. L'atelier était équipé d'un système de guidage par théodolite assurant une précision en x, y, z de +/- 5 mm.

AÉROPORTS

Aéroport ROISSY CHARLES DE GAULLE (figure 4) :

La plateforme aéroportuaire de Roissy Charles de Gaulle est un des lieux en France où les surfaces revêtues de béton sont les plus importantes.

Par ailleurs, la croissance de la fréquentation nécessite une adaptation constante au trafic et la réalisation de nouveaux projets.

Les structures rigides sont réservées aux parkings des avions et aux voies d'accès aux pistes. Au droit de ces zones, les aéronefs sont soit à l'arrêt ou à faible vitesse. Ces deux configurations sont celles qui apportent le plus de sollicitations au revêtement.

→ Aires FEDEX - phase III

En plus des zones d'aérogare connues du grand public, de nombreuses activités économiques sont également localisées sur la plate-forme, notamment l'entreprise FEDEX qui y a basé son centre européen. Ainsi, les avions sont chargés de colis durant la journée et s'envolent dans le monde entier le soir venu.

Après la réalisation en 2006 et 2008 de deux aires, Aéroport de Paris a lancé en 2010 une troisième phase de parkings réalisés en 2011.

Cette nouvelle extension est capable d'accueillir 3 appareils simultanément (voir le tableau 4 pour les caractéristiques géométriques de ce projet).

→ Aires de dégivrage - Seuil 27

Suite à la saison hivernale 2010-2011, il a été décidé d'augmenter la capacité de l'aéroport en matière de dégivrage des avions. Le béton est parfaitement adapté pour résister aux contraintes thermiques et aux agressions chimiques. Pour ce faire, il a fallu réaliser deux aires supplémentaires. ▶



5

© EIFFAGE

Ces zones sont constituées d'une partie centrale en béton sur laquelle l'avion vient se positionner et de part de d'autre de cette place, des zones d'évolution des dégivreuses en structure souple.

Les 30 000 m³ de béton nécessaire à la réalisation de ces deux projets ont été fabriqués par une centrale mobile installée sur le site et d'une capacité de production de 100 m³/h.

L'ensemble des bétons a été transporté en camion benne. Ce moyen de transport est adapté pour les distances réduites et permet une vidange rapide du chargement.

LES GIRATOIRES (figures 5 et 6)

Les giratoires en béton armé continu de Bassens (33) :

Dans le cadre de l'aménagement de la zone industrialo-portuaire de Bassens aval (33), trois giratoires ont été réalisés en structure BAC/GB (Béton Armé Continu/Grave Bitume). Le maître d'ouvrage est la Communauté Urbaine de Bordeaux. Cette technique également utilisée en section droite a été retenue car celle-ci est apparue comme étant la mieux adaptée aux contraintes d'exploitation de la zone industrielle. En effet, cette zone est circulée en permanence par un trafic poids lourds très élevé et d'importants intérêts économiques rendent vital le bon fonctionnement des voies de circulation. La solution en BAC pour la réfection des diverses voies de cette zone assure un niveau de service optimal et réduit ainsi au minimum la gestion et les procédures d'entretien. Par ailleurs, l'utilisation de grave bitume en fondation a facilité le maintien de la circulation et les accès aux usines pendant les travaux.

→ Structure de chaussée

La structure utilisée sur les 3 giratoires est de 22 cm de BAC sur 15 cm de

GB3 ainsi que sur les voies d'accès et de sortie de ces derniers, pour tenir compte, d'une part des sollicitations particulières sur les anneaux et leurs abords en service et d'autre part de la nécessité de maintenir la circulation en phase chantier. Cette structure correspond à un trafic TC6 30 soit 750 poids-lourds par jour pendant 30 ans avec 4% de croissance annuelle.

→ Réalisation des travaux

Le béton de classe 5 a été formulé avec des granulats de roches massives et fabriqué par une centrale de béton prêt à l'emploi (BPE). Compte tenu de l'encombrement du chantier et des cadences de coulage, le béton a été livré en toupies.

La mise en œuvre a été manuelle avec une poutre vibrante et à l'aide de coffrage constitué de fines plaques métalliques permettant d'obtenir la courbure de l'anneau du giratoire coulé en 2 bandes de 4 m de large. Afin d'éviter les épaufures des bords de dalle, soumis à la circulation, une attention particulière a été portée à la vibration du béton le long des coffrages et des dalles déjà coulées, y compris autour

5 & 6- Giratoire de Bassens (33).

5 & 6- Bassens roundabout.

des coffrages de réservation pour les émergences.

Le béton frais est strié transversalement au balai afin de garantir la rugosité du béton. Compte tenu des efforts tangentiels importants générés par le trafic à la surface du béton surtout au jeune âge, il est important de rechercher une rugosité élevée en visant des profondeurs de macro-texture (PMT) de l'ordre 2 mm. En effet, sur le béton strié et soumis à la circulation des poids lourds 7 à 14 jours après son coulage, on note une évolution de la texture (PMT) par écrêtement des pics de laitance apparus lors du passage du balai. Après séchage du béton, les joints de construction longitudinaux et d'arrêt transversaux ont été élargis et garnis. Avant le garnissage, ils doivent

être convenablement chanfreinés afin d'éviter les épaufures au droit des joints circulés (joints de construction longitudinaux à l'axe de l'anneau et transversaux sur l'anneau et aux sorties et entrées du giratoire).

Giratoire en béton de la cimenterie Lafarge de Saint-Pierre la Cour (53) :

Le chantier s'inscrit dans un programme d'aménagement de la plus grosse cimenterie française du groupe Lafarge. Le giratoire ainsi que la voie d'accès à l'usine ont été réalisés en béton pour supporter un trafic poids lourds important. En effet chaque jour, pas moins de 400 poids lourds et une centaine d'autres véhicules circulent sur ce site, ce qui justifie le choix d'une structure rigide.

Après la réalisation des terrassements et de la couche de forme, une double chaussée en béton de ciment avec la technique des dalles goujonnées a été réalisée ; raccordant le giratoire en béton existant à l'extérieur de l'usine au nouveau giratoire desservant les différents axes internes de la cimenterie ; ces derniers étant eux-mêmes réalisés en béton.

Sur le giratoire, le béton a été mis en œuvre sur une épaisseur de 22 cm par une règle vibrante de 8,50 m de largeur ; tandis que pour les voies d'accès, une machine à coffrage glissant en largeur de 4,50 m a été utilisée.

LES TRANSPORTS EN COMMUN EN SITE PROPRE (TCSP)

La liaison TCSP Melun Sénart - Corbeil :

Ce projet de grande ampleur réalisé sous l'autorité du Syndicat des Transports d'Île-de-France (STIF) est financé à hauteur de 82 millions d'euros par la région Île-de-France, les départements de Seine-et-Marne, de l'Essonne et l'État, ce qui couvre les coûts d'investissement des dix premiers kilomètres de la liaison.



6

© EIFFAGE

Le TZen, bus à haut niveau de service (BHNS) au design résolument moderne, circule sur 14,7 km dont 9,6 km en site propre, sur une voie de circulation qui lui est dédiée, séparé des flux automobiles et bénéficiant de la priorité aux feux. Il est facilement accessible à tous, grâce à ses larges portes automatiques et à sa mini-palette qui, à niveau avec les quais, se déploie à chaque arrêt. Le TZen relie la gare RER D de Lieusaint/Moissy à celle de Corbeil-Essonnes en moins de trente-cinq minutes et dessert 14 stations réparties tout au long de son parcours. Les interconnexions avec les réseaux de bus existants sont renforcées, favorisant ainsi les possibilités de correspondance. Cette liaison structurante préfigure un réseau plus ambitieux visant à améliorer les déplacements sud-franciliens, plus particulièrement les relations transversales en grande couronne. L'insertion architecturale du projet se caractérise par un travail important sur la couleur, la matière et le traitement de surface de la voie en béton clair hydro-sablé, voie réservée au TZen, dans l'objectif de dissocier cette infrastructure de l'image classique d'une voirie en enrobé noir et de la rapprocher de celle des circulations pour modes doux. Les travaux sont aussi l'occasion de métamorphoser l'environnement urbain et paysager dans lequel le TZen s'insère (figure 1). Le projet architectural se caractérise par le choix de matériaux (granit, bordures colorées, esthétique du mobilier, ...)



© EUROVIA

7- TCSP T Zen Melun Sénart Corbeil.

8- Tunnel du Perthus : Centrale à béton.

7- T-Zen Melun Sénart Corbeil reserved right-of-way public transport system.

8- The Perthus Tunnel: concrete mixing plant.

utilisés pour le traitement des stations de bus, par la requalification des carrefours traversés et la volonté de différencier la voirie dédiée au TCSP des voiries existantes (voirie en enrobés et

trottoirs en béton gris), ceci grâce à un contraste de couleur et de matériaux. Le béton de chaussée de la voie du TCSP est ocre du fait de l'ajout d'un colorant jaune dans le béton de roulement, il est contrasté par l'incorporation de granulats sombres (carrière de Voutré) mis en évidence par un décapage de surface.

La voie en béton a été dimensionnée pour un trafic bus de 600 bus/jour, et se caractérise par une structure de 22 cm de béton armé continu (BAC) sur 15 cm de béton de fondation reposant sur une plateforme limon traitée chaux-ciment, pour les sections courantes. Les zones de traversée des voiries existantes par la voie du TCSP, ainsi que les stations du TZen ont été traitées en béton de chaussée goujonné, mis en œuvre manuellement à la règle vibrante et coffrage fixe (figure 7).

Dans les sections courantes en BAC, les bétons de fondation et de roulement ont été réalisés à la slip-form, ainsi que le caniveau central.

Le béton de roulement a été dénudé par hydro-décapage et sablage, permettant d'améliorer la rugosité du béton (PMT \geq 0,6 mm en moyenne) et de différencier les zones de roulement du caniveau central non décapé. Les joints de chaussée sont ensuite étanchés avec un mastic de couleur beige (Mexphalte CP3J de Shell). Le chantier a démarré en septembre 2009 avec une mise en service le 4 juillet 2011.

TUNNEL FERROVIAIRE - LE TUNNEL DU PERTHUS

Les techniques de mise en œuvre de chaussée en béton peuvent également être utilisées pour des applications plus spécifiques comme la réalisation de radier en béton ou de quais latéraux dans des tunnels ferroviaires.

C'est en février 2006 qu'a été étudiée la faisabilité de la réalisation du radier sous voie et des quais latéraux par la technique du coffrage glissant. La maîtrise de cette technique à l'extérieur, ou en tunnel routier, n'est plus à démontrer. En revanche, l'utilisation de cette méthode dans un tunnel ferroviaire se révélait plus délicate en raison de l'étroitesse du tube. De plus, cet ouvrage était le premier en Europe à pouvoir accueillir des trains à grande vitesse et du trafic de marchandise. ▷



© EIFFAGE



Cette particularité nécessite alors la réalisation de réseaux et d'ouvrages d'assainissement spécifiques qui seront détaillés plus loin. Le profil en travers du tracé devait, également, respecter des dévers présentant une pente de 7,67%. Enfin, en raison des variations de position du tunnel pouvant aller jusqu'à plus ou moins 25 cm, les quais latéraux ont des largeurs variables. Après définition du cahier des charges, la compatibilité de la technique du coffrage glissant a été étudiée pour cet environnement particulier.

Les travaux et les techniques présentés ci-après sont le fruit de 14 mois d'étude, 8 mois de préparation de chantier et 6 mois de réalisation.

→ La géométrie du tunnel

Le tunnel du Perthus est constitué de deux tubes de 8 400 m chacun et de 9,20 m de diamètre. Ces deux ouvrages sont reliés par une quarantaine de galerie de communication transversales appelées « rameaux ».

Le radier sous voie a une épaisseur moyenne, en section courante, de 60 cm et une largeur de 5,40 m, pour un volume total de béton de 44 500 m³.

L'évacuation des produits dangereux susceptibles de provenir des fuites des wagons de marchandise est assurée par un caniveau à fente, qui se déverse dans un collecteur central constitué de tuyaux en PEHD de 300 ou 400 mm de diamètre. Afin d'éviter la propagation du feu à l'ensemble du réseau en

cas d'incendie, un siphon a été réalisé tous les 50 m. Cette canalisation a été enrobée dans le radier.

Deux quais latéraux ont été conçus afin d'assurer la mise en place de l'ensemble des câbles électriques. Le quai opposé aux « rameaux de communication entre les deux tubes », appelé quai bas, était composé de quatre fourreaux de diamètre 160 mm et d'un tuyau de drainage de diamètre 250 mm. Il présentait une hauteur de 45 cm et une largeur variable comprise entre 1 m et 1,50 m. Par opposition, le quai haut destiné également à l'évacuation des passagers était formé d'un double U, et devait enrober sur toute sa longueur un tube incendie. Le volume de béton pour le caniveau à fente et les quais s'est élevé à 25 000 m³.

→ Le radier

Tout au long de l'étude de ce projet, le fil conducteur des différentes réflexions a été d'adapter la maîtrise qu'Eiffage Travaux Publics possède dans le cadre de la réalisation des chantiers aéroportuaires au milieu souterrain.

Le béton utilisé était un béton maigre dosé à 220 kg/m³ de CEM II 42.5 et de granulométrie 0/20. La plasticité retenue se situait entre 3 et 5 cm d'affaissement au cône. Il a été fabriqué par une centrale discontinue d'une capacité de production de 80 m³/h (figure 8). Pour le transporter à l'intérieur du tunnel toute une cinématique d'approvisionnement a été conçue.

Il a été décidé d'utiliser des camions

9- Tunnel du Perthus : bétonnage du radier.

9- The Perthus Tunnel: invert concreting.

benne pouvant recevoir 6 m³ de béton. Une fois à l'intérieur du tunnel, la largeur circulaire ne permettait pas de faire croiser les flux de camions entrants et sortants. Deux passerelles de croisement ont alors été fabriquées. D'une hauteur de 1,50 m environ, elles ont permis de gagner en largeur afin d'assurer le croisement des véhicules. Chacune d'un poids de 55 t et d'une longueur de 50 m, pouvait recevoir trois camions pleins et trois camions vides. Pour les déplacer au fur et à mesure de l'avancement des travaux, elles étaient tractées par un camion benne. Une fois cette étape franchie, les camions devaient faire demi-tour, vidanger le béton qui devait être répandu devant la machine à coffrage glissant. Pour assurer l'ensemble de cette dernière phase, une plateforme munie d'un plateau de retournement, d'une trémie de 6 m³ et d'un tapis balayant une largeur de 4 m environ a été fabriquée. Cette machine était autonome dans ses déplacements. Pour mettre en œuvre le béton, une machine à coffrage glissant GOMACO

Commander III - XY à 4 chenilles, comportant une table de 4,20 m de large et équipée d'un système d'inclinaison des chenilles pour pouvoir s'inscrire dans la courbure du tunnel a été employée (figure 9).

La machine à coffrage glissant était contrôlée automatiquement en positionnement par l'ordinateur de bord G22 associé au système de guidage en 3D de LEICA. Cet équipement a permis de s'affranchir de la gestion du fil de référence qui aurait constitué un obstacle supplémentaire.

Le moule fonctionnait avec le système de contrôle de vibration automatisé "Auto-Vib" assurant, en fonction des vitesses d'avancement et de la plasticité du béton, un serrage optimum de ce dernier.

L'ensemble de cet atelier a permis de mettre en œuvre 850 m³ en moyenne par 24h.

→ Les quais latéraux

Les ouvrages latéraux comportaient plusieurs profils qui ont tous été réalisés par des machines à coffrage glissant (figure 10).

Le béton employé était dosé à 330 kg/m³ de CEM II 42.5 et de granulométrie 0/20. Selon l'ouvrage exécuté, sa plasticité pouvait varier entre 2 et 5 cm d'affaissement au cône. Il était fabriqué par une centrale PATAUD discontinue disposant d'un malaxeur de 2 m³. Le volume moyen mis en œuvre était de l'ordre de 24 m³/h par machine. Pour respecter les délais, deux ateliers



10

© EIFFAGE

d'application ont été mis en place. En raison de l'étroitesse du tunnel, ce sont deux COMMANDER III équipées de trois chenilles qui ont été choisies, les moules étant positionnés sous la machine de façon que l'atelier d'application ne dépasse pas une largeur de 2,50 m.

Chaque machine était équipée d'une chenille avant étroite pour permettre les passages des différents réseaux.

Cette aventure a mobilisé plus de 200 personnes pour réussir ce véritable challenge. Ce chantier a également démontré la grande adaptabilité de la solution du coffrage glissant au milieu souterrain. De plus, l'emploi de cette technique a permis un gain de temps considérable par rapport aux mises en œuvre traditionnelles.

10- Tunnel du Perthus : bétonnage du quai.

10- The Perthus Tunnel: platform concreting.

La réalisation du Tunnel du Perthus laisse entrevoir pour les années à venir des perspectives importantes dans le milieu ferroviaire.

CONCLUSION

Les exemples présentés ci-dessus montrent les possibilités d'utilisation des structures en béton.

Elles sont parfaitement adaptées à des ouvrages où les structures sont très sollicitées : plateformes aéroportuaires ou portuaires, transports en commun en site propre (TSCP)... et aux tunnels ferroviaires où elles permettent la maîtrise des délais.

Avec la croissance des échanges et de la mobilité, la demande pour ce type d'ouvrages va rester forte et ceci pour au moins deux raisons :

→ Le faible entretien des chaussées en béton permet de minimiser les diverses interventions pour maintenir à niveau les ouvrages. On remarque depuis quelques années chez les maîtres d'ouvrage la part prépondérante des exploitants au détriment des services travaux qui doivent programmer leurs chantiers dans des créneaux

horaires et des délais de plus en plus courts. L'impact sur le fonctionnement des installations doit être minimisé pour optimiser les recettes.

→ Lorsqu'est intégré dans le bilan environnemental, l'entretien et le recyclage à 100 % des corps de chaussée, l'impact écologique de ces projets en est fortement diminué.

Enfin, la raréfaction de la ressource en pétrole entraîne une hausse constante du prix du bitume. Ainsi, l'écart du coût de construction entre les structures souples et rigides tend à se réduire progressivement. Ceci devrait permettre de favoriser la réalisation de chaussée en béton. Tous ces éléments font du béton un matériau d'avenir pour les chaussées et les plates-formes fortement sollicitées. □

ABSTRACT

WHY CONCRETE SURFACINGS?

F. GRATSSOLLE, EIFFAGE TP / SPECBEA - C. CHEVALIER, AGILIS / SPECBEA - O. GOYAT, SIGNATURE / SPECBEA - H. KABRE, CMR EXEDRA / SPECBEA

A concrete pavement, due to its high rigidity, distributes loads and limits stresses on the subgrade. It is suitable for heavy loads, channelled loads and severe loading. Following a reminder regarding the design of concrete pavements, several applications are described: port works, airports, roundabouts, and reserved right-of-way public transport systems. An interesting case is described: the Perthus rail tunnel where the use of sliding formwork made it possible to achieve shorter deadlines. The structural qualities of pavement concrete, its resistance to attacks and its durability make it an ideal material for major transport infrastructure projects. □

¿POR QUÉ REVESTIMIENTOS DE HORMIGÓN?

F. GRATSSOLLE, EIFFAGE TP / SPECBEA - C. CHEVALIER, AGILIS / SPECBEA - O. GOYAT, SIGNATURE / SPECBEA - H. KABRE, CMR EXEDRA / SPECBEA

Una calzada de hormigón, debido a su gran rigidez, distribuye las cargas y limita las sollicitaciones sobre el suelo soporte. Está adaptada a las cargas pesadas, a las cargas canalizadas y a las fuertes sollicitaciones. Después de un recordatorio sobre el diseño de las calzadas de hormigón, se presentan varias aplicaciones: obras portuarias, aeropuertos, rotondas y transportes públicos en emplazamiento propio. Se presenta un caso interesante: el del túnel ferroviario de Perthus, en donde la utilización del encofrado deslizante permitió reducir los plazos. Las cualidades estructurales del hormigón de calzada, su resistencia a las agresiones y su durabilidad lo convierten en un material ideal para las grandes infraestructuras de transporte. □

LES APPLICATIONS SPÉCIALES

AUTEUR : FRANÇOIS CUSSIGH, EXPERT BÉTON, VINCI CONSTRUCTION FRANCE

LES BÉTONS MODERNES OUVRENT DE NOUVELLES POSSIBILITÉS EN TERMES D'APPLICATION : APTITUDE AMÉLIORÉE AU MOULAGE LIÉE À UNE GRANDE FLUIDITÉ (AVEC UNE RÉDUCTION DES NUISANCES SONORES ET DE LA PÉNIBILITÉ DU TRAVAIL), LIBERTÉ ACCRUE DE FORMES STRUCTURELLES GRÂCE À DE HAUTES PERFORMANCE MÉCANIQUES OU ENCORE DURABILITÉ ET IMPACT ENVIRONNEMENTAL OPTIMISÉS. CES BÉTONS, QU'IL S'AGISSE DE BAP, DE BFUP OU DE BHP, SONT ENCORE TROP PEU UTILISÉS EN PRATIQUE DANS LE DOMAINE DU BÉTON COULÉ EN PLACE ET EN PARTICULIER DANS LES OUVRAGES DE GÉNIE CIVIL. DES EXEMPLES DE RÉALISATIONS RÉCENTES PERMETTENT D'ILLUSTRER LEURS NOMBREUX AVANTAGES.



LES BÉTONS ARCHITECTONIQUES GÉNÉRALITÉS

Les bétons modernes présentent une fluidité élevée et une pâte à composition optimisée, comportant un dosage élevé en éléments fins. Ceci leur confère en général une prédisposition naturelle aux applications architectoniques, avec une grande aptitude au moulage.

De plus, leur forte adjuvantation nécessite d'ajuster leur formulation pour obtenir une bonne résistance à la ségrégation (à l'échelle de la pâte et des granulats). Cette dernière est fondamentale pour ce qui concerne l'homogénéité d'aspect des parements en béton brut.

En outre, les BHP et les BFUP permettent de concevoir des structures plus fines et élancées valorisables sur le plan architectural.

1- Pont de Bacalan à Bordeaux.

2- Pylône du Pont de Bacalan à Bordeaux.

3- Poteaux en BFUP du Mucem à Marseille.

1- Bacalan Bridge in Bordeaux.

2- Tower of Bacalan Bridge in Bordeaux.

3- UHPFRC columns of the Mucem in Marseille.

La sélection des constituants, leur contrôle ainsi que le soin apporté à la fabrication et à la mise en œuvre caractérisent tout autant les bétons modernes (BHP, BAP, BFUP) que les bétons architectoniques. Ceci explique pourquoi la plupart des utilisations de BAP coulé en place sur chantier correspondent à des applications architectoniques.

EXEMPLES

Pont de Bacalan à Bordeaux :

Parmi les exemples récents de béton architectonique en ouvrage d'art, on peut citer le cas des pylônes du Pont de Bacalan à Bordeaux (figures 1 et 2). Cet ouvrage est situé dans un site classé par l'UNESCO sur la liste du Patrimoine mondial au titre d'ensemble urbain exceptionnel. Les exigences d'aspect, et plus particulièrement de teinte, por-

tant sur le béton des pylônes sont donc très fortes. L'architecte Thomas Lavigne a souhaité un béton « gris très clair avec de légers reflets blonds ».

La formulation retenue, à base de ciment local gris clair, de métakaolin blanc et de filler calcaire, est un BHP de classe de résistance C50/60 en consistance fluide (avec contrôle de consistance à la table à chocs selon la norme NF EN 12350-5). La fabrication et la mise en œuvre (avec utilisation de la matorométrie pour gérer le décoffrage) ont fait l'objet de procédures spécifiques.

Une concertation préalable entre tous les participants concernés (entreprise de construction, fournisseur de béton prêt à l'emploi, fournisseurs de ciment, filler calcaire, métakaolin, sable et granulats) a permis de bien préciser les engagements de chacun pour obtenir le niveau de qualité requis. De nombreux essais préliminaires ont été réalisés pour définir la composition et vérifier la teinte et son homogénéité à l'aide d'un spectromètre.

On peut souligner au travers de cet exemple que les bétons modernes, à performances améliorées, nécessitent une préparation et une organisation particulière et l'implication coordonnée de toutes les parties.

Pour cette application, le métakaolin n'étant pas encore reconnu comme une addition permettant d'effectuer une substitution au ciment, des essais de durabilité ont été réalisés selon la démarche proposée par les Recommandations professionnelles FNTP, FFB, CERIB, FIB publiées en 2009 intitulées « Méthodologie d'application du concept de performance équivalente ».

Mucem :

On peut citer par ailleurs les possibilités architecturales apportées par les BFUP du point de vue de la forme des éléments, comme illustré par les poteaux du Mucem à Marseille. Ces poteaux « arborescents » (figure 3) ont été préfabriqués et assemblés sur chantier par précontrainte.

Contrairement à un certain nombre d'applications actuelles en BFUP, ils assurent un rôle structurel avec la reprise des efforts liés à la descente de charge et le contreventement des façades (même si la justification vis-à-vis des sollicitations sismiques a conduit à incorporer des renforts spécifiques). Les calculs de dimensionnement ont été réalisés selon les Recommandations provisoires éditées par l'AFGC en 2002. La conception et la réalisation ont été justifiées par procédure Atex. ▶

© XAVIER BOYMOND

1



© RICHARD NOURRY

2



3



© LISA RICCIOTTI



4

© PHOTO ISO

LES BÉTONS AUTO-PLAÇANTS GÉNÉRALITÉS

Les bétons auto-plaçants, qui ont été développés par les Japonais à la fin des années 1980 pour répondre à des problèmes de mise en œuvre sur des ouvrages d'art présentant de fortes densités d'armatures, sont aujourd'hui très peu utilisés en France sur les chantiers de travaux publics. Ils ont pourtant fait la preuve qu'ils pouvaient apporter des solutions techniques de premier choix pour ce type d'ouvrage, comme nous allons le développer au travers des exemples qui suivent.

EXEMPLES

Tunnel de l'Oresund :

La poutre supérieure du joint de clavage du tunnel immergé de l'Oresund (projet reliant Copenhague à Malmoe, voir figure 5) a été bétonnée, en 2000, avec une formulation de BAP déri-

vée de la formulation utilisée pour la construction des segments préfabriqués constitutifs du Tunnel. Après la pose du dernier élément préfabriqué, il fallait bétonner *in situ* le joint de clavage sur une largeur d'1 m correspondant à l'espace laissé pour installer ce dernier élément. Si la poutre inférieure et les âmes ont pu être bétonnées de façon traditionnelle après coffrage et mise à sec, il n'était pas possible de bétonner et vibrer dans de bonnes conditions la poutre supérieure (à moins d'installer une chambre hyperbare pour aménager un accès par le dessus) et l'utilisation de BAP est donc apparue comme une solution innovante et particulièrement adaptée. La formulation correspondante (qui comprend 380 kg/m³ de CEM I, 70 kg/m³ de cendres volantes et 23 kg/m³ de fumée de silice, avec une teneur en eau efficace de 174 kg/m³) a dû être qualifiée, au même titre que la formulation de base, du point de

4- Pont d'Aquitaine à Bordeaux.

5- Tunnel de l'Oresund.

6- Puits du laboratoire souterrain de l'ANDRA.

4- Aquitaine Bridge in Bordeaux.

5- Oresund Tunnel.

6- Shaft of the ANDRA underground laboratory.

vue de la durabilité avec des essais relatifs à la résistance à la pénétration des chlorures. Les résultats obtenus sont supérieurs ou équivalents à ceux obtenus sur la formulation classique en béton vibré. Une maquette a été réalisée pour vérifier la fabrication et les conditions de mise en œuvre (avec simulation d'un arrêt de bétonnage et réalisation de carottages pour vérifier la qualité du remplissage). Au final, le bétonnage a été réalisé par injection en sous-face et l'absence de défaut de remplissage a pu être vérifiée du fait de l'étanchéité du joint ainsi constitué.

Pont d'Aquitaine à Bordeaux :

Lors du remplacement de la suspension du Pont d'Aquitaine à Bordeaux en 2002 (figure 4), il s'agissait de bétonner sur une hauteur d'environ 10 mètres les appuis Freyssinet assurant la liaison entre les nouvelles poutres d'ancrage des câbles de suspension et les piles-culées.



5

© PETER THORNING



6

© VÉRONIQUE PAUL / GRAPHIX IMAGES



7

© ALEX BERAUD

Pour assurer un remplissage parfait dans un espace confiné, la formulation de B60 utilisée pour le bétonnage des poutres arrière a été adaptée en une formule variante auto-plaçante. Le bétonnage s'est effectué depuis le tablier à l'aide de pompe à vis.

Laboratoire souterrain de l'ANDRA :

Pour la réalisation des puits du laboratoire souterrain de l'ANDRA à Bure, les revêtements en béton armé ont été bétonnés avec des formulations de BAP de type B30 et B50. Le volume correspondant est d'environ 10 000 m³. Le choix du BAP a été dicté par les difficultés d'acheminement du béton (déversé en gravitaire sur 500 m de profondeur) et de répartition en tête de coffrage (le faible diamètre des puits - 4 m et 5 m - ne permettait pas de distribuer le béton en plusieurs points de déversement), comme illustré par la figure 6. Des essais préliminaires de déversement gravitaire à 500 mètres

7- Usine de nitrification d'Achères.

8- Tunnel des Monts.

9- Coffrage du voile déflecteur E-EV-LH.

7- Achères nitrification plant.

8- Tunnel des Monts.

9- Formwork of the E-EV-LH shear wall.

de profondeur ont été effectués dans un puits désaffecté pour vérifier l'homogénéité du béton après la chute. Les qualités de cohésion du BAP, en l'occurrence renforcées par incorporation d'un agent de cohésion, ont permis de valider la méthodologie de bétonnage.

Unité de nitrification d'Achères :

Plus récemment (en 2005), les voiles des cellules Biostyr de l'Unité de nitrification de la station d'épuration d'Achères ont été bétonnés avec une formulation de BAP pour laquelle les méthodes de mise en œuvre avaient été adaptées dès la phase de préparation de chantier. Ainsi, la fabrication des 84 cellules a été industrialisée avec pose des poteaux préfabriqués d'extrémité (figure 7), coffrage et bétonnage par injection et pompage sur 8 m de hauteur (épaisseur 50 cm). Environ 25 000 m³ de BAP ont été utilisés.

Tunnel des Monts à Chambéry :

Une application intéressante peut être

soulignée concernant les revêtements coulés en place de tunnel. En 2005 et 2006, les voûtes des tubes Sud et Nord du Tunnel des Monts à Chambéry ont ainsi été bétonnées avec un BAP C45/55, choisi du fait de la faible épaisseur (environ 20 cm) à remplir pour conserver un gabarit acceptable dans le cadre de la réhabilitation du tunnel (la nouvelle voûte est essentiellement une protection d'étanchéité). 25 000 m³ ont été utilisés, permettant en outre une forte réduction des nuisances sonores traditionnellement associées à la vibration externe utilisée pour ce type d'application.

Usine E-EV-LH à La Hague :

Enfin, un chantier en cours de réalisation à La Hague (usine E-EV-LH) exploite pour des bétonnages particulièrement difficiles le potentiel du BAP, comme la réalisation en deuxième phase de voiles déflecteurs (voir coffrage en figure 8 et aspect après décoffrage en figure 9) ou le bétonnage de poutres de couronnement présentant une forte densité d'armatures et d'inserts.

LES BÉTONS À HAUTE DURABILITÉ GÉNÉRALITÉS

Il est devenu habituel pour les grands ouvrages d'art de spécifier des exigences de durabilité de 100 ou 120 ans. La façon dont on répond à ces exigences est devenue de plus en plus précise, la norme EN206 et les Eurocodes intègrent cette spécification en inscrivant la définition de l'agressivité du milieu en contact avec les différentes parties d'ouvrage comme une des missions principales du prescripteur.

Aujourd'hui, la durée d'utilisation de projet est conventionnellement de 50 ans pour les ouvrages de bâtiment et de 100 ans pour les ponts. ▶



8

© DIR CE - P. DUTILLOY



9

© AREVA E-EV-LH

Les normes et règlements prévoient des prescriptions de moyens (composition du béton, enrobage des armatures) pour obtenir la durabilité requise. Il est toutefois possible de concevoir des ouvrages avec une durabilité plus importante en réalisant des études particulières concernant l'agressivité du milieu, la formulation du béton (et sa fabrication et sa mise en œuvre) et la conception du béton armé (enrobage des armatures en particulier). On fait alors appel à des approches performantielles.

EXEMPLES

Pont de Rion-Antirion :

Le pont de Rion-Antirion (figure 10) est un chantier pour lequel la durabilité a été le facteur déterminant dans la mise au point des formulations. La durée de vie exigée par le cahier des charges est de 120 ans. Différents types d'essais ont été menés sur toutes les formules de bétons du projet, pour qualifier leur aptitude à la mise en œuvre, leurs propriétés mécaniques et leur durabilité. Les critères du cahier des charges ont été définis suivant l'exposition des différentes parties d'ouvrage en béton armé. En outre, une campagne d'étude de durabilité sur l'évaluation de la durée de vie de l'ouvrage a été menée. Les résultats de résistance à la pénétration en chlorures obtenus sur des



© AREVA E-EV-LH

blocs en béton à différentes échéances, combinés avec la capacité de fixation des chlorures du liant, ont été utilisés dans un modèle aux éléments finis utilisant une équation générale pour l'évolution du coefficient de diffusion en fonction du temps.

Les résultats obtenus en phase de préparation de chantier ont été confirmés par les essais en cours de construction et ceux réalisés dans le cadre du suivi de durabilité (l'évolution avec le temps de la concentration surfacique en chlorures, du coefficient de diffusion des ions chlore et de la pénétration des chlorures est contrôlée par carottages sur un mur sacrifi-

10- Aspect au décoffrage du voile déflecteur E-EV-LH.

11- Pont de Rion-Antirion.

10- Appearance on formwork removal from the E-EV-LH shear wall.

11- Rion-Antirion Bridge.

ciel placé en zone de marnage - voir figure 11).

Les formulations utilisées dans les zones les plus exposées au milieu marin (zone immergée et zone de marnage) sont des C45/55 qui contiennent du ciment CEM III (à 62% de laitier) produit spécialement pour cette opération par le cimentier local et des granulats concassés calcaires à très faible teneur en silice, avec un rapport eau sur ciment inférieur à 0,40. Le tablier a également été réalisé avec une formule à base de CEM III, de classe de résistance C60/75.

Les pylônes font appel à une formulation de C60/75 dont le liant est composé de 67% de CEM III et 33% de CEM I (mêlés dans le malaxeur à béton) afin de remplir à la fois les exigences de résistance au jeune âge et celles relatives à la durabilité (résistance à la pénétration des chlorures et prévention des risques de réaction sulfatique interne).

La consistance utilisée est en général très fluide (contrôlée à la table à chocs) et certains bétons sont proches de BAP ce qui facilite la mise en œuvre (réduction du nombre de points de déversement en particulier) même si la vibration reste nécessaire. Une formulation de BAP C60/75 a été développée pour le projet et utilisée pour certaines parties d'ouvrage.



© NIKOS DANILIDIS

Conteneurs à déchets radioactifs :

Pour le stockage des déchets radioactifs, des conteneurs en béton sont utilisés et doivent présenter une durabilité très élevée (à la mesure de la période radioactive des produits stockés) de 300 ans et plus. Il est évident que face à de telles exigences de nombreuses études préliminaires sont nécessaires, non seulement pour optimiser la formulation du béton en laboratoire mais aussi pour définir une méthodologie de mise en œuvre apte à reproduire in situ les résultats obtenus en laboratoire.

Des solutions ont été développées sur la base de béton auto-plaçant à haute performance (« BAPHP »), le caractère BHP conférant une forte imperméabilité du matériau garant de la haute durabilité potentielle et le caractère BAP permettant d'assurer la qualité effective du béton après mise en œuvre. Les formulations sont à base de liant ternaire (ciment CEM I 52,5 PM ES additionné d'éléments pouzzolaniques tels que la fumée de silice et les cendres volantes) et de granulats concassés de calcaire dur à très faible teneur en silice. L'incorporation de superplastifiant permet d'obtenir la fluidité requise tout en limitant le rapport eau sur liant à environ 0,40. On peut aussi signaler que le recours à du BFUP paraît particulièrement adapté au cahier des charges de ce type d'application.

LES BÉTONS À FAIBLE IMPACT ENVIRONNEMENTAL GÉNÉRALITÉS

Avec soixante millions de mètres cubes mis en œuvre chaque année en France, soit approximativement un mètre cube par habitant, le béton est le produit manufacturé le plus consommé. Au niveau de la planète, la production de ciment manufacturé représente environ 7 % des gaz à effet de serre, la fabrica-



12- Mur sacrificiel du Pont de Rion-Antirion.

12- Sacrificial wall of the Rion-Antirion Bridge.

tion d'une tonne de ciment générant un peu moins d'une tonne de CO₂. La mise au point de bétons respectueux de l'environnement constitue donc un objectif sociétal majeur. Elle passe par une réduction de la quantité de ciment traditionnel dans la formulation de Bétons Environnementaux (BE). Quelques pistes peuvent être citées comme le développement de nouveaux liants, le recours plus systématique aux ciments composés, l'utilisation d'autres déchets issus de l'activité industrielle en substitution du ciment et le recours à de forts taux de substitution du ciment par une ou plusieurs additions minérales. Toutes ces pistes n'ont pas le même degré de nouveauté. Cependant, compte tenu du contexte actuel, elles méritent d'être plus largement dévelop-

pées et maîtrisées. En effet, force est de constater que certaines solutions, favorables d'un point de vue environnemental, réalisables avec les constituants actuels et parfois même, rentrant dans le cadre réglementaire (cf. EN 206), ne sont mises en œuvre que très marginalement du fait d'inquiétudes liées au manque de recul vis-à-vis des performances de ces matériaux. Les projets Ecobéton (financé par l'ANR) et BEFU (sélectionné par l'ANR et financé par la Région Île de France) ont récemment fourni des résultats rassurants concernant certaines formulations de bétons à faible impact environnemental, permettant à la fois de conserver la durabilité requise et les propriétés d'usage attendues (aptitude à la mise en œuvre, résistance au jeune âge).

EXEMPLES

Tout d'abord, on peut citer le cas des bétons utilisés sur le chantier du musée de la fondation Louis Vuitton à Paris. Sur cette opération, il est demandé à l'entreprise de minimiser l'impact environnemental des bétons. En concertation avec le fournisseur de béton prêt à l'emploi, il a donc été décidé de recourir autant que possible à des formules

intégrant du ciment CEM III (ciment au laitier) et des cendres volantes y compris pour les élévations. Ces formules sont conformes aux limites de composition de la norme et permettent de réduire d'environ 50 % le taux d'émission de CO₂ par rapport à des formulations traditionnelles.

Un autre exemple est donné par le chantier de la Tour Odéon à Monaco avec des compositions à base de liant ternaire incluant du CEM I 52,5 PM, des cendres volantes et du laitier moulu. Certaines de ces formules ne sont pas conformes aux limites de composition de la norme et ont été justifiées par approche performantielle. Ainsi, le béton utilisé pour les barrettes et les parois moulées est dosé à 190 kg/m³ de ciment, additionné de 120 kg/m³ de laitier moulu et 75 kg/m³ de cendres volantes. Cette formulation a été comparée à une formulation de référence dosée à 375 kg/m³ de ciment, sans addition, en particulier du point de vue de la résistance à la pénétration des chlorures. Le coefficient de diffusion des ions chlore, mesuré par essai de migration en régime transitoire, est de 0,35.10⁻¹² m²/s à 90 jours, ce qui correspond à une durabilité potentielle très élevée selon le guide AFGC « CONCEPTION DES BÉTONS POUR UNE DURÉE DE VIE DONNÉE DES OUVRAGES - Maîtrise de la durabilité vis-à-vis de la corrosion des armatures et de l'alcali-réaction » édité en 2004. Pour le béton de référence, ce coefficient vaut 7,9.10⁻¹² m²/s à 90 jours (ce qui correspond à une durabilité potentielle moyenne selon le même guide AFGC). Par ailleurs, le liant ternaire permet d'obtenir un meilleur maintien rhéologique. Cet exemple illustre le fait que l'on peut réduire l'impact environnemental (la réduction a été estimée à 37%) tout en augmentant la durabilité et en restant dans un cadre économique compétitif. □

ABSTRACT

SPECIAL APPLICATIONS

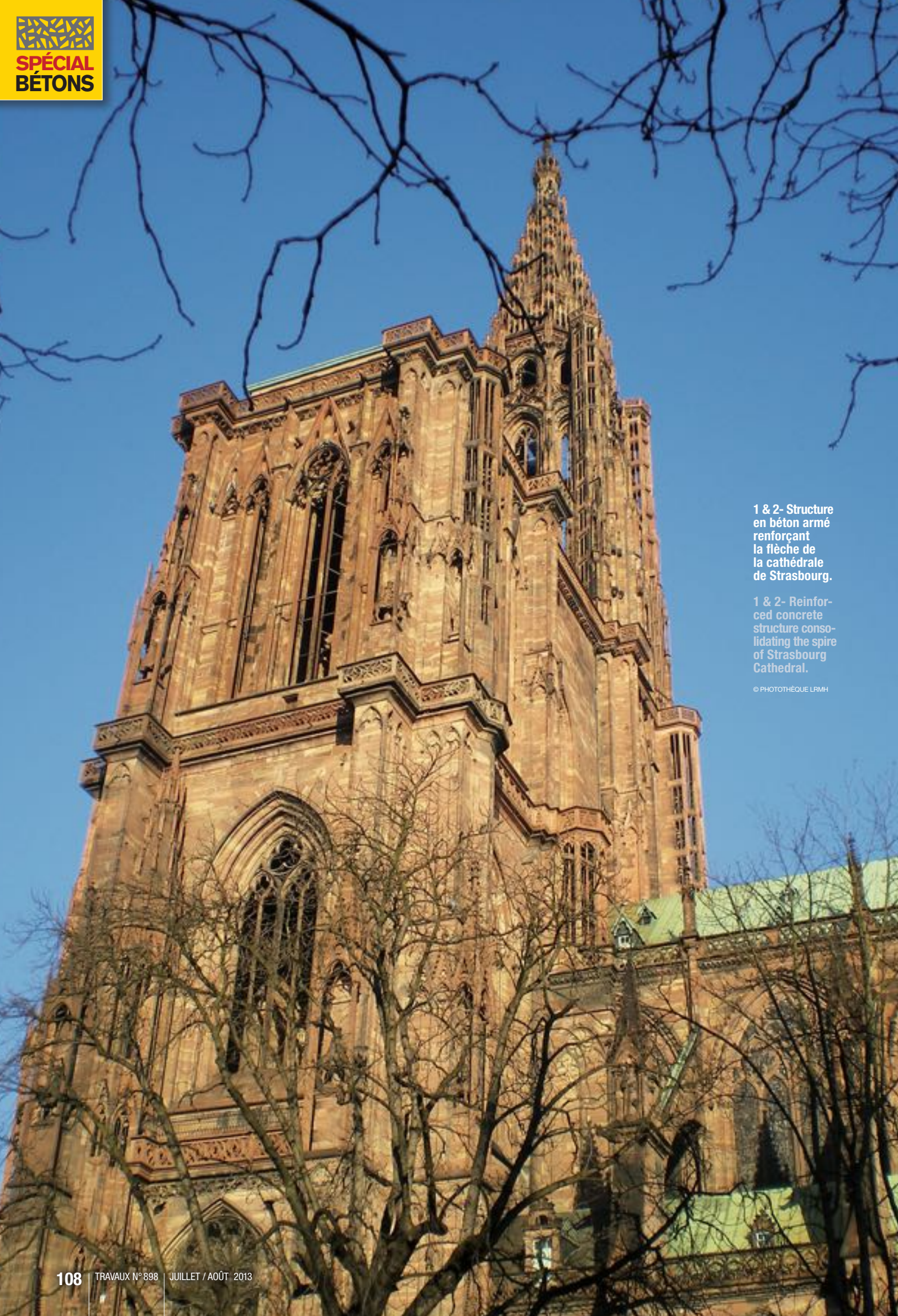
FRANÇOIS CUSSIGH, VINCI

Modern concretes open up new possibilities in terms of applications: improved castability due to great fluidity (with a reduction in sound nuisances and painful working conditions), increased freedom of structural forms thanks to high mechanical performances, or again optimised durability and environmental footprint. These concretes, whether they be self-placing concrete, ultra-high-performance fibre-reinforced concrete or high-performance concrete, are still not sufficiently used in practice in the field of cast-in-situ concrete and in particular in civil engineering structures. Examples of recent projects illustrate their numerous benefits. □

APLICACIONES ESPECIALES

FRANÇOIS CUSSIGH, VINCI

Los hormigones modernos abren nuevas posibilidades en términos de aplicaciones: mejor aptitud para el moldeado unida a una gran fluidez (con una reducción de los ruidos y de la penosidad del trabajo), mayor libertad de formas estructurales gracias a altas prestaciones mecánicas o incluso optimización de la durabilidad y del impacto ambiental. Estos hormigones, ya se trate de hormigón autocompactante, hormigón con fibras de muy alta resistencia u hormigón de alta resistencia, todavía se utilizan muy poco en la práctica en el ámbito del hormigón colado in situ, en particular en las obras de ingeniería civil. Algunos ejemplos de recientes realizaciones permiten ilustrar sus numerosas ventajas. □



1 & 2- Structure en béton armé renforçant la flèche de la cathédrale de Strasbourg.

1 & 2- Reinforced concrete structure consolidating the spire of Strasbourg Cathedral.

© PHOTOTHÈQUE LRMH

BÉTON ET PATRIMOINE

AUTEURS : ÉLISABETH MARIE-VICTOIRE, INGÉNIEUR DE RECHERCHE PÔLE BÉTON, LRMH
BERNARD QUÉNÉE, DIRECTEUR GÉNÉRAL DÉLÉGUÉ, LERM

L'INVENTION DU CIMENT AU XIX^e SIÈCLE, PUIS LE DÉVELOPPEMENT DU BÉTON ARMÉ ONT PERMIS DES PROUESSES TECHNIQUES ET ARCHITECTURALES. DE LA CHARPENTE DE LA CATHÉDRALE DE REIMS AUX « CITÉS RADIEUSES » DU CORBUSIER, LE BÉTON FAIT AUJOURD'HUI PARTIE INTÉGRANTE DU PATRIMOINE. LE RETOUR D'EXPÉRIENCE SUR LE VIEILLISSEMENT DE CES MONUMENTS A PERMIS DE MIEUX COMPRENDRE LES LIMITES D'UTILISATION DU BÉTON ARMÉ ET D'EN AMÉLIORER SA CONCEPTION, SA MISE EN ŒUVRE ET SA RESTAURATION.

NOTION DE « MONUMENT HISTORIQUE »

La création et la structuration du service des monuments historiques sont relativement récentes au regard du patrimoine concerné. C'est en effet à l'initiative de Prosper Mérimée, nommé inspecteur général des monuments historiques en 1834 qu'une commission des monuments historiques est créée en 1837. Les travaux de cette commission conduiront à la mise en place de la procédure de « classement au titre des monuments historiques »,

3 & 4- Charpente en béton armé à la « Philibert de l'Orme » de la cathédrale de Reims.

3 & 4- "Philibert de l'Orme" style reinforced concrete framework of Reims Cathedral.

finalisée par la loi du 31 décembre 1913, sur les monuments historiques. Les premiers classements concernent une période allant de la préhistoire au XVI^e siècle. Puis graduellement dans les années 1930, le champ de la protection s'étend à la renaissance, jusqu'au XVIII^e siècle. Mais ce n'est qu'à partir des années 60, alors qu'André Malraux est ministre de la culture, que l'architecture des XIX^e et XX^e siècle commence à être protégée. À la fin des années 1980 le patrimoine industriel, mais aussi le patrimoine maritime et

fluvial sont intégrés au recensement des monuments historiques et pour finir, un label spécifique « Patrimoine du XX^e » siècle est créé en 1999.

Concernant les monuments historiques, deux niveaux de protection existent :
→ Le classement monument historique, qui selon la loi de 1913 s'adresse aux immeubles « dont la conservation présente, au point de vue de l'histoire ou de l'art, un intérêt public » ;

→ Et l'inscription à l'inventaire supplémentaire des monuments historiques, réservé selon la loi de 1927 ▷





5 & 6- Casa-maures édifée en 1853 à Saint-Martin-le-Vinoux (38).

7 & 8- Église Saint-Jean de Montmartre à Paris (75), construite entre 1894 et 1904 par Anatole de Baudot, inscrite en 1966.

9 & 10- Pont Camille de Hogues à Châtellerault, construit sous la direction de François Hennebique entre 1899 et 1900 sur la Vienne, long de 135 m, et constitué de 3 arches.

5 & 6- Casa-maures built in 1853 at Saint-Martin-le-Vinoux.

7 & 8- Saint-Jean de Montmartre Church in Paris, built between 1894 and 1904 by Anatole de Baudot, classified in 1966.

9 & 10- Camille de Hogues Bridge in Châtellerault, built under the supervision of François Hennebique between 1899 and 1900 over the Vienne River, 135 metres long, consisting of 3 arches.

(modifiant l'article 2 de la loi de 1913), aux immeubles « qui, sans justifier une demande de classement immédiat, présentent un intérêt d'histoire ou d'art suffisant pour en rendre désirable la préservation ». Cette dénomination a d'ailleurs été remplacée en 2005 par le titre d'« inscription au titre des monuments historiques ».

Aujourd'hui 43720 édifices sont protégés, dont 14428 sont classés et 29292 sont inscrits. Parmi ces monuments, seulement 16,9% concernent l'époque contemporaine, et la majorité des édifices en béton protégés n'est pas classée, mais inscrite.

Les motifs de protection au titre des

monuments historiques sont multiples, mais les critères le plus souvent retenus pour l'architecture contemporaine sont :

→ De nouveaux développements dans la construction ;

→ De nouveaux matériaux ;

→ Et de nouvelles technologies.

Le béton armé remplit tous ces critères puisqu'il s'agit d'un matériau créé au milieu du XIX^e siècle, ayant stimulé la créativité technologique qui a conduit à de nombreux brevets déposés dès la fin du XIX^e siècle (systèmes d'armatures, précontrainte...), mais aussi la créativité architecturale à l'origine de formes à la fois complexes et aériennes.

LE BÉTON ET LES MONUMENTS HISTORIQUES

Dans les monuments historiques, le béton a aussi bien été utilisé comme matériau de substitution ou de renforcement structural pour des constructions en pierre ou en brique, que comme matériau de construction à part entière, voire d'ornement.

Le nombre d'édifices concernés, suite à la politique de protection du patrimoine du XX^e siècle menée ces 20 dernières années, est élevé.

Aussi, seuls quelques exemples emblématiques seront présentés dans cet ouvrage.

SUBSTITUTION OU RENFORCEMENT DE STRUCTURE

→ La charpente de la cathédrale de Reims constitue sans doute l'un des plus beaux exemples de substitution. Ainsi, en 1914, la cathédrale a été lourdement endommagée par les bombardements de la première guerre mondiale et la charpente en chêne a été complètement ravagée par un incendie. À partir de 1919, sous la direction de l'architecte Henri Deneux, une nouvelle charpente « à la Philibert de l'Orme », constituée de petits éléments en béton armé, assemblés par des clavettes (figures 3 & 4) est venue remplacer la charpente en chêne.

11, 12a & 12b - Ancien musée des travaux publics, actuel Palais de Iéna à Paris, construit entre 1937 et 1943 par les frères Perret.

13- Blockhaus d'Eperlecques, construit entre 1942 et 1943.

14 & 15- Cité radieuse de Marseille (13), construite entre 1947 et 1952 par Le Corbusier.

16 & 17- Vitraux en béton et verre de l'église Sainte-Odile à Paris (75), créés par François Décorchement en 1935.

11, 12a & 12b - Former public works museum, the current Palais de Iéna in Paris, built between 1937 and 1943 by the Perret brothers.

13- The Bunker of Eperlecques, built between 1942 and 1943.

14 & 15- Cité radieuse building in Marseille, built between 1947 and 1952 by Le Corbusier.

16 & 17- Stained concrete and glass windows of Sainte-Odile Church in Paris, created by François Décorchement in 1935.



© PHOTO THÉO LERMIH

→ En termes de renforcement de structure, le béton a été employé pour des reprises en sous-œuvre, du contre-butement, du recentrement des pressions, ou encore des pinces actives. À la cathédrale de Strasbourg, c'est la flèche arachnéenne en grès qui a été consolidée en 1930 par une structure constituée de ceintures et de poteaux en béton armé, peinte en rose dans le but d'imiter l'aspect du grès (figures 1 & 2).

MONUMENTS HISTORIQUES EN BÉTON

Les édifices en béton classés au titre des monuments historiques sont le reflet de l'évolution du matériau et des

techniques associées. Ainsi les plus anciens datent du XIX^e siècle et sont en béton non armé (figures 5 & 6). Puis les armatures sont apparues, d'abord en surnombre (figures 7 & 8), puis de façon plus organisée selon les brevets de Cottancin ou d'Hennebique (figures 9 & 10), et enfin comme vecteur de précontrainte avec Freyssinet. Mais le béton c'est aussi une matière, avec laquelle les frères Perret (figures 11 & 12) ont joué pour créer des bétons naturellement colorés (beiges à roses), et texturés (moulés, lavés, bouchardés).

Plus brut, le béton a été employé dans des bâtiments industriels, ou militaires

(figure 13), mais il a également suscité des concepts d'urbanisme (figures 14 & 15).

Enfin, dans les monuments historiques, le béton est aussi un matériau d'ornement, qui a permis de créer des sculptures, mais aussi des vitraux associant verre et béton (figures 16 & 17).

VEILLISSEMENT

Les bétons rencontrés dans les monuments historiques sont pour certains centenaires et ne présentent pour toute altération qu'une érosion de la peau du béton (figures 18 & 19). C'est notamment le cas de tout le patrimoine à base de ciment naturel non armé

datant du XIX^e siècle qu'on retrouve en Isère, en Bourgogne ou encore dans la région de Marseille.

Mais, dans le cas des bétons armés, certains édifices peuvent être affectés par de multiples altérations et notamment des épaufrures liées à la corrosion des armatures (figures 20 à 25).

Les origines de ces dégradations sont nombreuses et sont souvent liées :

→ Soit à l'apprentissage de l'usage d'un nouveau matériau et notamment à des défauts de mise en œuvre, ou à un déficit de performance du béton ;

→ Soit à l'agressivité de l'environnement qui se combine aux facteurs précédents.



18 & 19- Ancienne manufacture de gants, construite en ciment naturel à la fin du XIX^e siècle à Grenoble (38). La qualité de la finition constitue une parfaite imitation d'une maçonnerie de briques.

20 & 21- Soufflerie de l'ONERA, construite en béton armé entre 1932 et 1934 à Meudon la Forêt (92).

22 à 25- Halles du Boulingrin à Reims (51), construites en 1937 par Émile Maigrot et Eugène Freyssinet. La voûte parabolique qui était particulièrement altérée a fait l'objet d'une récente restauration.

18 & 19- Former glove factory, built of natural cement at the end of the 19th century in Grenoble. The quality of the finish constitutes a perfect imitation of brick masonry.

20 & 21- ONERA wind tunnel, built in reinforced concrete between 1932 and 1934 at Meudon la Forêt.

22 to 25- Halles du Boulingrin in Reims, built in 1937 by Émile Maigrot and Eugène Freyssinet. The parabolic arch which was extremely damaged recently underwent restoration.

Ces marques de vieillissement, premières erreurs de la jeunesse et de la méconnaissance de ce matériau nouveau, ont eu pour intérêt d'en révéler à la fois les limites d'emploi et surtout d'en comprendre l'apparition, afin d'en adapter progressivement les règles d'utilisation et de les prévenir.

Dans la plupart des cas, ces effets du vieillissement concernent prioritairement une carbonatation avancée, favorisant

par voie de conséquence, la corrosion des armatures des structures le plus souvent insuffisamment enrobées du fait de la méconnaissance des mécanismes guidant leur passivation (ou protection contre l'apparition de la rouille).

CONCLUSION

Les nombreux d'édifices protégés au titre des monuments historiques illustrent au travers de la diversité de ses

utilisations, ses principales qualités, ainsi que les progrès architecturaux qu'il a permis, le potentiel du béton. En retour, les faiblesses de vieillissement dans ses premières applications sont aussi apparues, finalement corrigées au fil du temps dans la prise en compte des paramètres environnementaux agissant sur sa pérennité, autant pour les études de composition, de formulation comme de mise en œuvre. □

ABSTRACT

CONCRETE AND THE CULTURAL HERITAGE

ELISABETH MARIE-VICTOIRE, LRMH - BERNARD QUÉNÉE, LERM

Since the 1980ies, concrete construction has been intensively protected as historical monuments in France. This heritage gathers example as diverse as fake stone architecture from the XIXth century, post-world-war-II churches or observatory and blockhouse. If some of those monuments travelled down the ages with almost no decay, others suffered right from the introduction of metallic rebars of degradations linked to the development this new material knowhow, combined to environmental aggressions. Feedback from the this heritage weathering lead to a better understanding of the limits of use of reinforced concrete, and to design, implementation and restoration treatments improvements. □

HORMIGÓN Y PATRIMONIO

ELISABETH MARIE-VICTOIRE, LRMH - BERNARD QUÉNÉE, LERM

Desde los años 80, la construcción con hormigón es objeto de una intensiva política de protección a título de los monumentos históricos en Francia. Este patrimonio reúne unos ejemplos tan diversos como la arquitectura en piedra artificial del siglo XIX, las iglesias de la reconstrucción, o algunos observatorios y fortificaciones. Entre estos monumentos, ciertos pudieron atravesar los siglos sin alterarse mientras que otros han sufrido, desde la introducción de las armaduras, de degradaciones relacionadas con los conocimientos de este nuevo material combinados con las agresiones ambientales. La recuperación de experiencia relativa a este patrimonio ha permitido discernir mejor los límites de utilización de hormigón armado, mejorar su diseño, su puesta en obra y su restauración. □



NOTRE TALENT
DÉFIE LE TEMPS

STRRES

Le STRRES est le syndicat national des entrepreneurs spécialistes de travaux de réparation et de renforcement des structures.

Il rassemble 60 entreprises qui exercent, à titre principal ou secondaire, une activité d'entretien, de réparation et de réhabilitation des structures de Génie civil.

Le STRRES est adhérent de la FNTF.

Retrouvez sur www.strres.org :

Les guides



Pour mieux connaître et appliquer les règles de l'art en matière de réparation et de renforcement d'ouvrages, **consultez ou téléchargez gratuitement 12 guides techniques du STRRES.**

Les entreprises



Trouver une entreprise **par domaine d'activité, par région et/ou par identification professionnelle.**

SYNDICAT NATIONAL DES ENTREPRENEURS SPÉCIALISTES DE TRAVAUX
DE RÉPARATION ET RENFORCEMENT DE STRUCTURES
3 rue de Berri 75008 Paris • Tél. : 01 44 13 31 82 • Fax : 01 44 13 32 44 •
strres@strres.org • www.strres.org

ABS • ADS ouvrages d'art • AFGC • AGTP • ARREBA • ATS • AXIMUM • BASF CC France • BAUDIN-CHATEAUNEUF • BEC • BEKAERT France • BERTHOLD SA • BTPS • CHANTIERS MODERNES SUD • COFEX Ile-de-France • COFEX LITTORAL • COFEX REGIONS • COLAS RAIL • CTICM • CROBAM • DEMATHIEU ET BARD • ECM • EGM TNC • EIFFAGE TP/ Département GCN • EIFFEL CONSTRUCTION MÉTALLIQUE • ENTREPRISE BONNET • ETANDEX • ETPO • EUROVIA BÉTON • FAURE SILVA • FAYAT • HOLOM • FREYSSINET France • FREYSSINET International & Cie • GAUTHIER • GTS/Département ELITE • LAFARGE • LETESSIER • MAPEI • MCCF • NOUVETRA • OUEST ACRO SA • PAGEL SAS • PAREXLENKO • PERRIER SAS • POA • RAZEL • RCA • RENOFORS • RESINA • RESIREP • SNC • RICHERT • SAINT GOBAIN WEBER France • SARL ROMOEUFF • SEFI-INTRAFOR • SIKA • SIRCO TRAVAUX SPÉCIAUX • SNCTP • SOFRARES • SOLETANCHE BACHY • SOTEM • SORREBA TECHNOLOGIE • SOTRAIB EAU • SPIE BATIGNOLLES TECHNOLOGIES • STPL • TEMSOL • TSV • VIA PONTIS • VINCI CONSTRUCTION France • VSL France

STRRES



NOTRE TALENT
DÉFIE LE TEMPS

RÉPERTOIRE DES FOURNISSEURS

MATERIEL DE TERRASSEMENT



AMMANN France - ZI Les Petites Haies
51/33, rue de Valenciennes - 54046 Créteil Cedex
Tél. 01 45 17 08 88 - Fax 01 45 17 08 90
Email : info@illiamann-group.com
www.ammann-group.com



BOBCAT/BPV - B.P.3 - 27320 NONANCOURT
Numéro Indigo
0 825 08 43 81



FRANCE
PLUS DE 550 Machines et
700 Équipements en TP, PL,
Levage et Manutention
T : 00 33 1015 23 04 00 68
F : 00 33 1015 23 68 55 80
Mail : sodineg@wanadoo.fr
DEPOTS 02 ET 74

**■ CHARGEUSE
SUR PNEUMATIQUES**

BOBCAT EUROPE
J. Huysmanslaan 59 B
1651 Lot - Belgique
Tél. 00 32 2 371 68 11
Fax 00 32 2 371 69 00

**VOLVO
CONSTRUCTION EQUIPMENT -
EUROPE SAS**
37, avenue Georges Politzer - BP 117
78192 Trappes Cedex
Tél. 01 30 69 28 28
Fax 01 30 69 83 39
www.volvoce.com

■ MINI-PELLE

**VOLVO
CONSTRUCTION EQUIPMENT -
EUROPE SAS**
37, avenue Georges Politzer - BP 117
78192 Trappes Cedex
Tél. 01 30 69 28 28
Fax 01 30 69 83 39
www.volvoce.com

**■ NIVELEUSE
AUTOMOTRICE**

**VOLVO
CONSTRUCTION EQUIPMENT -
EUROPE SAS**
37, avenue Georges Politzer - BP 117
78192 Trappes Cedex
Tél. 01 30 69 28 28
Fax 01 30 69 83 39
www.volvoce.com

**■ PELLE HYDRAULIQUE
SUR CHENILLES**

**VOLVO
CONSTRUCTION EQUIPMENT -
EUROPE SAS**
37, avenue Georges Politzer - BP 117
78192 Trappes Cedex
Tél. 01 30 69 28 28
Fax 01 30 69 83 39
www.volvoce.com

**■ ÉQUIPEMENTS
POUR ENGIN
DE TERRASSEMENT**

ONE - TP.COM
1 Place du 8 Mai 1945
60119 Neuville Bosc
Tél. 01 30 37 06 26
Fax 01 34 40 01 44

**MATERIEL POUR LA PRODUCTION
D'AIR COMPRIME ET TRAVAUX
D'ABATTAGE**

**■ MARTEAU BRISE-ROCHE
HYDRAULIQUE**

**ATLAS COPCO FORAGE
ET DÉMOLITION SA**
ZI du Vert Galant - 2, av. de l'Éguillette
BP 7181 - Saint-Ouen-l'Aumône
95056 Cergy-Pontoise Cedex
Tél. 01 39 09 32 22
Fax 01 39 09 32 49

**■ PELLE HYDRAULIQUE
SUR PNEUMATIQUES**

**VOLVO
CONSTRUCTION EQUIPMENT -
EUROPE SAS**
37, avenue Georges Politzer - BP 117
78192 Trappes Cedex
Tél. 01 30 69 28 28
Fax 01 30 69 83 39
www.volvoce.com

**■ TOMBREAU
AUTOMOTEUR
ARTICULÉ**

**VOLVO
CONSTRUCTION EQUIPMENT -
EUROPE SAS**
37, avenue Georges Politzer - BP 117
78192 Trappes Cedex
Tél. 01 30 69 28 28
Fax 01 30 69 83 39
www.volvoce.com

**■ CHARGEUSE
PELLEUSE
(BACKHOE LOADER)**

**VOLVO
CONSTRUCTION EQUIPMENT -
EUROPE SAS**
37, avenue Georges Politzer - BP 117
78192 Trappes Cedex
Tél. 01 30 69 28 28
Fax 01 30 69 83 39
www.volvoce.com

**MATERIEL DE LEVAGE
ET DE MANUTENTION**



Coffrages et Etaisements
PERI S.A.S.
Z.I. Nord - 34/36, rue des Frères Lumière
77109 Meaux cedex
Tél. : 01 64 35 24 40 - Fax : 01 64 35 24 50
peri.sas@peri.fr
www.peri.fr

**MATERIEL POUR LA CONSTRUCTION
ET L'ENTRETIEN DES ROUTES**



AMMANN France - ZI Les Petites Haies
51/33, rue de Valenciennes - 54046 Créteil Cedex
Tél. 01 45 17 08 88 - Fax 01 45 17 08 90
Email : info@illiamann-group.com
www.ammann-group.com



2, avenue du Général de Gaulle
91170 VIRY CHATILLON
Tél. : 01 69 57 86 00 - Fax : 01 69 96 26 60
www.bomag.com



WIRTGEN FRANCE
WIRTGEN
Fraiseuses sur roues et sur chenilles
Recycleurs à froid / Stabilisatrices de sol
Machines à coffrage glissant / Mineurs de surface
Outils au carbure. Betek/Sitek
VÖGELE
Finisseurs sur pneus et sur chenilles / Alimentateurs
HAMM
Rouleaux tandem vibrants
Compacteurs à pneus
Compacteurs monocylindre vibrants
KLEEMANN
Installations de concassage mobiles et fixes / cribles
Distributeur exclusif pour la France des épandeurs
de liants pulvérulents
STREUMASTER série SW
WIRTGEN FRANCE
BP 31633 - 7, rue Marc Seguin
95696 Goussainville Cedex
Tél. : 01 30 18 95 95 - Fax : 01 30 18 15 49
E-mail : contact@wirtgen.fr
www.wirtgen.fr

METALLIANCE

ZI de la Saule - BP 111
71304 Montceau Cedex
Tél. 03 85 57 01 34
Fax 03 85 57 88 73

**■ MACHINE POUR
LA STABILISATION
ET LE RECYCLAGE
DE CHAUSSÉES**

RABAUD
Bellevue - 85110 Sainte-Cécile
Tél. : 02 51 48 51 58
Fax 02 51 40 22 97
www.rabaud.com
info@rabaud.com

**MATERIEL TOPOGRAPHIQUE -
LASER - GUIDAGE D'ENGIN**

**■ TRAVAUX
SOUTERRAINS**



**AUSCULTATIONS
Automatiques**
Tél. 01 41 42 06 30
Fax 01 41 42 06 31
www.miretopo.com

**■ LEVÉE
BATHYMÉTRIQUE**



Bureau d'Etude
Bathymétrie - Topographie
Suivi de travaux & Suivi d'Ouvrages
Tél : 06 67 79 05 16 - 06 99 48 45 27
www.bathys.fr - contact@bathys.fr

CE GUIDE RENSEIGNE SUR LES PRODUCTIONS DES FOURNISSEURS DE MATÉRIEL, ÉQUIPEMENT OU SERVICES. SI VOUS DÉSIREZ ÊTRE RÉPERTORIÉS DANS CES RUBRIQUES, ADRESSEZ-VOUS À : EMMANUELLE HAMMAOUI - 9, RUE DE BERRI - 75008 PARIS - TÉL. : +33 (0)1 44 13 31 41 - EMAIL : ehammaoui@fnfp.fr - TARIF : 100 € HT PAR LIGNE ET PAR RUBRIQUE OU 230 € HT LE CM COLONNE POUR UNE ANNÉE DE PARUTION.

MATERIEL DE CONCASSAGE - BROYAGE - CRIBLAGE



metso
Concassage, broyage, criblage, manutention
Matériels et installations fixes et mobiles
Installations de recyclage
Transporteurs et accessoires
Pièces d'usure et de rechange
Produits anti-usure, blindages, capotages
Pompes
(Nordberg-Svedala-Thales-Lindemann)
Metso Minerals (France)
41, rue de la République - 71009 Mâcon Cedex
Tél. : 03 85 39 62 90 - Fax : 03 85 39 63 49
www.metso.com

■ POSTE D'ÉGOUTTAGE DES SABLES AVEC TRAITEMENT DES EAUX DE LAVAGE

SOTRES

Parc Européen des entreprises
BP 80072 - Rue Richard Wagner
63200 RIOM
Tél. 04 73 15 36 00
Fax 04 73 15 36 20

■ INSTALLATIONS MOBILES DE CONCASSAGE-CRIBLAGE

GRAVEL

1 Chemin de Villers à Combault
94420 Le Plessis Trevisse
Tél. 01 45 94 59 53
Fax 01 45 94 59 83

MATERIEL FLOTTANT ET MATERIEL DE PLONGÉE POUR TRAVAUX FLUVIAUX ET MARITIMES

■ PONTON MÉTALLIQUE DÉMONTABLE

LEDUC T.P

1, rue de Folenrue
27202 VERNON cedex
Tél. 02 32 51 74 97
Fax 02 32 51 57 18

MATERIEL DE SONDRAGE, FORAGE, FONDATIONS SPECIALES ET INJECTION



G-OCTOPUS
www.g-octopus.com
Tél. : +33 01 47 32 48 30

■ DÉSABLEUR DE BOUES

SOTRES

Parc Européen des entreprises
BP 80072 - Rue Richard Wagner
63200 RIOM
Tél. 04 73 15 36 00
Fax 04 73 15 36 20

■ SONDEUSE DE RECONNAISSANCE ET FOREUSE EN ROTATION

ATLAS COPCO FORAGE ET DÉMOLITION SA

ZI du Vert Galant
2, av. de l'Eguillette - BP 7181
Saint-Ouen-l'Aumône
95056 Cergy-Pontoise Cedex
Tél. 01 39 09 32 22
Fax 01 39 09 32 49

■ POMPES À BOUES

ATLAS COPCO FORAGE ET DÉMOLITION SA

ZI du Vert Galant
2, av. de l'Eguillette - BP 7181
Saint-Ouen-l'Aumône
95056 Cergy-Pontoise Cedex
Tél. 01 39 09 32 22
Fax 01 39 09 32 49

■ PRESSE D'INJECTION

ATLAS COPCO FORAGE ET DÉMOLITION SA

ZI du Vert Galant
2, av. de l'Eguillette - BP 7181
Saint-Ouen-l'Aumône
95056 Cergy-Pontoise Cedex
Tél. 01 39 09 32 22
Fax 01 39 09 32 49

MATERIEL SPECIAL POUR LA POSE DE CANALISATIONS



MARAIIS SERVICES
Marais Contracting Services
1, rue Pierre et Marie Curie
49430 DURTAL
Tél : 02 41 96 16 99 - Fax : 02 41 96 16 99
Email : info@marais.com - Web : www.marais.com

■ TRANCHEUSE

MARAIIS CONTRACTING SERVICES

1, rue Pierre et Marie Curie
ZA "Les portes d'Anjou" - BP 20
49430 DURTAL
Tél. 02 41 96 16 90
Fax 02 41 96 16 99

MATERIEL POUR TRAVAUX SOUTERRAINS



ATLAS COPCO FORAGE ET DÉMOLITION S.A.S.
Z.I. du Vert Galant - 2, avenue de l'Eguillette
B.P. 7181 - Saint-Ouen-l'Aumône
95056 Cergy-Pontoise cedex
Atlas Copco
Tél. : 33 (0) 1 39 09 32 22
Fax : 33 (0) 1 39 09 32 49
www.atlascopco.fr



Ducrocq
Ingénierie Process
ZA Evaires 40379 MONTREUIL-LEZ-TOURNAI
W : 03 21 99 02 60 - Fax : 03 21 99 48 00
E-mail : ducrocq.industries@wanadoo.fr
Site Internet : www.ducrocq.ingenierie-process.com

METALLIANCE

ZI de la Saule
BP 111
71304 Montceau Cedex
Tél. 03 85 57 01 34
Fax 03 85 57 88 73

■ BERLINE

PATRY SA

24, rue du 8 mai 1945
95340 Persan
Tél. 01 39 37 45 45
Fax 01 39 37 45 44
www.patry.fr

TECHNICRIBLE

Zone industrielle
81150 LAGRAVE
Tél. 05 63 81 41 57
Fax 05 63 81 41 56

■ LOCOTRACTEUR DE MANŒUVRE

PATRY SA

24, rue du 8 mai 1945
95340 Persan
Tél. 01 39 37 45 45
Fax 01 39 37 45 44
www.patry.fr

■ MACHINE D'ATTAQUE PONCTUELLE À FRAISE (RADIALE-TANGENTIELLE)

METALLIANCE

ZI de la Saule
BP 111
71304 Montceau Cedex
Tél. 03 85 57 01 34
Fax 03 85 57 88 73

■ ENGIN DE BOULONNAGE

ATLAS COPCO FORAGE ET DÉMOLITION SA

ZI du Vert Galant
2, av. de l'Eguillette
BP 7181 Saint-Ouen-l'Aumône
95056 Cergy-Pontoise Cedex
Tél. 01 39 09 32 22
Fax 01 39 09 32 49

■ ENGIN DE FORATION

ATLAS COPCO FORAGE ET DÉMOLITION SA

ZI du Vert Galant
2, av. de l'Eguillette
BP 7181 Saint-Ouen-l'Aumône
95056 Cergy-Pontoise Cedex
Tél. 01 39 09 32 22
Fax 01 39 09 32 49

MATERIEL POUR TRAITEMENT DE LA TERRE



Lhoist France
Une société du Groupe Lhoist
105, Rue de Rivoli - 75004 Paris Cedex 04
Tel. : +33 (0)1 52 45 20 00 - Fax. : +33 (0)1 52 45 80 14
www.lhoist.com

BUREAU ETUDES



25 Agences en France | rincentbtp | 8 Agences à l'International
www.rincentbtp.fr
Tél. +33 (1) 60 87 21 25
direction.technique@rincentbtp.fr



CATHIE ASSOCIATES
www.cathie-associates.com
Tél. : +33 1 47 32 48 30

MATERIEL DE PRODUCTION, DE TRANSFORMATION ET DE DISTRIBUTION DE L'ENERGIE

SDMO INDUSTRIE

12 Bis, rue de la Villeneuve BP 241
29272 Brest cedex
Tél. 02 98 41 41 41
Fax 02 98 41 13 10

MATÉRIEL POUR LES TRAVAUX PUBLICS

CHOISISSEZ VOS RUBRIQUES ET SOYEZ PRÉSENT PENDANT 1 AN DANS TOUTS LES NUMÉROS DE TRAVAUX. POUR TOUT CONTACT, APPELEZ :

EMMANUELLE HAMMAOUI - 9, RUE DE BERRI - 75008 PARIS - TÉL. : +33 (0)1 44 13 31 41 - EMAIL : ehammaoui@fnfp.fr

MATÉRIEL D'ALIMENTATION EN EAU ET D'ÉPUISEMENT

- POMPE À DIAPHRAGME
- POMPE BASSE PRESSION POUR EAUX CHARGÉES
- POMPE HAUTE PRESSION, LAVAGE, LANÇAGE
- ALIMENTATION GRANDE HAUTEUR
- POMPE POUR RABATTEMENT DE NAPPE
- POMPE SUBMERSIBLE

MATÉRIEL DE BATTAGE ET D'ARRACHAGE

- MARTEAU
- MOUTON
- VIBRATEUR DE FONÇAGE ET D'ARRACHAGE

MATÉRIEL POUR LA PRODUCTION D'AIR COMPRIMÉ ET TRAVAUX D'ABATTAGE

- CHARIOT DE FORAGE (WAGON DRILL)
- COMPRESSEUR À VIS SUR ROUES - INSONORISÉ
- ELECTRO-COMPRESSEUR, SEMI-FIXE - INSONORISÉ
- MARTEAU BRISE-ROCHE HYDRAULIQUE
- PINCE ET CISAILLE DE DÉMOLITION

MATÉRIEL DE TERRASSEMENT

- CHARGEUSE SUR CHENILLES
- CHARGEUSE SUR PNEUMATIQUES
- CHARGEUSE PELLEUSE (BACKHOE LEADER)
- DÉCAPEUSE AUTOMOTRICE AVEC OU SANS AUTOCHARGEUR (MOTORSCRAPER)
- MINI-PELLE
- MOTO-BASCULEUR
- NIVELEUSE AUTOMOTRICE
- PELLE À CÂBLES SUR CHENILLES
- PELLE HYDRAULIQUE SUR PNEUMATIQUES
- PELLE SPÉCIALE AVANCEMENT AU PAS
- TOMBREAU AUTOMOTEUR À CHÂSSIS RIGIDE
- TOMBREAU AUTOMOTEUR ARTICULÉ
- TRACTEUR INDUSTRIEL ET FORESTIER 4 X 4
- TRACTEUR SUR CHENILLES (BOUTEUR, BULLDOZER)
- TRACTEUR SUR PNEUMATIQUES

MATÉRIEL DE TRANSPORT ROUTIER

- CAMIONNETTE TOUTS CHEMINS 4 X 4 < 3,5 T
- CAMION TOUTS CHEMINS 4 X 4 > 3,5 T
- CAMION TOUTS CHEMINS 6 X 4 - 6 X 6 - 8 X 6
- REMORQUE POUR TRANSPORT D'ENGINS
- SEMI-REMORQUE À BENNE
- SEMI-REMORQUE POUR TRANSPORT D'ENGINS
- VÉHICULE TRACTEUR DE SEMI-REMORQUE 4 X 4
- VÉHICULE TRACTEUR DE SEMI-REMORQUE 6 X 4 - 6 X 6

MATÉRIEL DE LEVAGE ET DE MANUTENTION

- ASCENSEUR MIXTE (MATÉRIAUX ET PERSONNEL)
- CHARIOT ÉLÉVATEUR DE CHANTIER À PORTÉE FIXE
- CHARIOT ÉLÉVATEUR DE CHANTIER À PORTÉE VARIABLE

- ÉLÉVATEUR HYDRAULIQUE À NACELLE
- GRUE AUTOMOTRICE SUR PNEUMATIQUES
- GRUE AUXILIAIRE DE VÉHICULE
- GRUE ROUTIÈRE
- GRUE SUR CHENILLES
- GRUE À TOUR (MONTAGE PAR ÉLÉMENTS)
- GRUE À TOUR (DÉPLIAGE AUTOMONTABLE)
- PLATE-FORME ÉLÉVATRICE

MATÉRIEL POUR LA CONSTRUCTION ET L'ENTRETIEN DES ROUTES

- ALIMENTATEUR DE FINISSEUR
- BALAYEUSE PORTÉE OU SEMI-PORTÉE
- BALAYEUSE RAMASSEUSE AUTOMOTRICE
- BALAYEUSE TRACTÉE
- CITERNE MOBILE DE STOCKAGE ET DE CHAUFFAGE DES LIANTS
- COMPACTEUR AUTOMOTEUR À PIEDS DAMEURS
- COMPACTEUR AUTOMOTEUR À PNEUS
- COMPACTEUR AUTOMOTEUR MIXTE
- COMPACTEUR STATIQUE AUTOMOTEUR TANDEM
- COMPACTEUR VIBRANT AUTOMOBILE, MONOCYLINDRE VIBRANT - LISSE ET PIEDS DAMEURS - LIGNE MOTRICE À 2 PNEUS
- COMPACTEUR VIBRANT AUTOMOTEUR TANDEM - 1 ET 2 CYLINDRES VIBRANTS
- COMPACTEUR VIBRANT, GUIDAGE À MAIN ET DUPLEX
- COMPACTEUR VIBRANT TRACTÉ, MONOCYLINDRE, LISSE OU PIEDS DAMEURS
- DÉPOUSSIÉREUR À TISSU FILTRANT
- DÉPOUSSIÉREUR À VOIE HUMIDE
- DOSEUR À PULVÉRULENTS
- ÉPANDEUR LATÉRAL (ÉLARGISSEUR DE ROUTE)
- FINISSEUR
- FRAISEUSE AUTOMOTRICE ET RETRAITEMENT DE CHAUSSÉES
- GRAVILLONNEUR AUTOMOTEUR
- GRAVILLONNEUR PORTÉ
- MACHINE À COULIS BITUMINEUX À FROID
- MACHINE POUR FABRICATION DE BORDURES ET CANIVEAUX
- MALAXEUR CONTINU À FROID
- MALAXEUR DISCONTINU D'ENROBAGE
- MATÉRIEL DE RÉPANDAGE ET GRAVILLONNAGE INTÉGRÉ
- PILONNEUSE
- PLAQUE VIBRANTE
- PULVÉRISATEUR MÉLANGEUR (RETRAIEMENT DE CHAUSSÉE)
- RÉPANDEUR DOSEUR DE PULVÉRULENTS
- RÉPANDEUSE DE LIANTS (ÉQUIPEMENT)
- SABLEUSE-SALEUSE
- SÉCHEUR
- TAMBOUR SÉCHEUR AVEC TAMBOUR ENROBEUR SÉPARÉ
- TAMBOUR SÉCHEUR ENROBEUR À CONTRE COURANT
- TAMBOUR SÉCHEUR ENROBEUR À FLUX PARALLÈLES
- TAMBOUR SÉCHEUR ENROBEUR À ENROBAGE SÉPARÉ DOUBLE TAMBOUR CONCENTRIQUE
- TRÉMIE DE STOCKAGE D'ENROBÉS
- TRÉMIE DE STOCKAGE DE PRODUITS STABILISÉS
- TRÉMIE PRÉDOSEUSE À GRANULATS
- VIBREUSE SURFACEUSE DE BÉTON À COFFRAGE GLISSANT (SLIP FORM PAVER)

MATÉRIEL DE CONCASSAGE - BROYAGE - CRIBLAGE

- ALIMENTATEUR À MOUVEMENT ALTERNATIF
- ALIMENTATEUR À TABLIER MÉTALLIQUE
- ALIMENTATEUR VIBRANT
- BROYEUR À BARRES
- BROYEUR À PERCUSSION À AXE VERTICAL
- BROYEUR À PERCUSSION À MARTEAUX
- CONCASSEUR À MÂCHOIRES
- CONCASSEUR À PERCUSSION À BATTOIRS
- CONCASSEUR À TAMBOUR DE FRAPPE
- CONCASSEUR GIRATOIRE (PRIMAIRE, SECONDAIRE)
- CONCASSEUR GIRATOIRE (SECONDAIRE, TERTIAIRE)
- CONCASSEUR MOBILE SUR CHENILLES
- CRIBLE VIBRANT
- DÉCANTEUR ÉGOUTTEUR À AUBES
- DÉTECTEUR DE MÉTAUX
- LAVEUR DÉBOURBEUR
- MALAXEUR À TAMBOUR
- POSTE D'ÉGOUTTAGE DES SABLES AVEC TRAITEMENT DES EAUX DE LAVAGE
- SÉPARATEUR EXTRACTEUR MAGNÉTIQUE
- TRANSPORTEUR, CRIBLEUR MOBILE À COURROIE (SAUTERELLE-CRIBLEUSE)
- TRANSPORTEUR MOBILE À COURROIE (SAUTERELLE)

MATÉRIEL POUR LA FABRICATION, LE TRANSPORT ET LA MISE EN PLACE DES BÉTONS, MORTIERS ET ENDUITS

- AUTOBÉTONNIÈRE
- BÉTONNIÈRE
- BÉTONNIÈRE PORTÉE (TRUCK MIXER)
- CENTRALE MOBILE ET SEMI-MOBILE
- COFFRAGE (BANCHE)
- DESSACHEUSE AUTOMATIQUE
- DRAGLINE
- ECHAFAUDAGE AUTO-ÉLÉVATEUR
- MACHINE À PROJETER LE BÉTON
- MALAXEUR À AXES HORIZONTAUX
- MALAXEUR À AXE VERTICAL
- POMPE À BÉTON DE CHANTIER
- POMPE À BÉTON SUR PORTEUR
- SIDE-BOOM : VOIR TRACTEUR SUR CHENILLES, POSEUR DE CANALISATIONS
- TAPIS DISTRIBUTEUR DE BÉTON
- TRANSPORTEUR À AIR COMPRIMÉ
- TRÉMIE AGITATRICE À BÉTON SIMPLE
- TRÉMIE AGITATRICE À BÉTON RELEVABLE

MATÉRIEL DE PRODUCTION, DE TRANSFORMATION ET DE DISTRIBUTION DE L'ÉNERGIE

- GROUPE ÉLECTROGÈNE À MOTEUR DIESEL
- POSTE MOBILE DE LIVRAISON TYPE EXTÉRIEUR
- POSTE MOBILE DE TRANSFORMATION TYPE EXTÉRIEUR
- TRANSFORMATEUR TRIPHASÉ POUR CABINE

BARAQUEMENTS

- BARAQUEMENT MÉTALLIQUE DÉMONTABLE
- BARAQUEMENT MOBILE DE CHANTIER

MATÉRIEL FLOTTANT ET MATÉRIEL DE PLONGÉE POUR TRAVAUX FLUVIAUX ET MARITIMES

- CHALAND MÉTALLIQUE AUTOMOTEUR
- DRAGUE À CUILLÈRE (DIPPER-DREDGE)
- DRAGUE À GODETS, STATIONNAIRE
- DRAGUE SUCEUSE PORTEUSE
- DRAGUE SUCEUSE REFOULEUSE STATIONNAIRE AVEC DÉSAGRÉGATEUR
- MOTO-PROPULSEUR AMOVIBLE
- PONTON MÉTALLIQUE DÉMONTABLE
- PONTON DE SERVITUDE
- REMORQUEUR

MATÉRIEL DE SONDAGE, FORAGE, FONDATIONS SPÉCIALES ET INJECTION

- BENNE POUR PAROIS MOULÉES
- DÉSABLEUR POUR BOUES
- FOREUSE TARIÈRE SUR PORTEUR
- FOREUSE TARIÈRE (MONTAGE SUR GRUE)
- FOREUSE TARIÈRE POUR POSE DE POTEAUX
- POMPE À BOUES
- POMPE POUR JET-GROUTING
- PRESSE D'INJECTION
- SONDEUSE DE RECONNAISSANCE ET FOREUSE EN ROTATION

MATÉRIEL SPÉCIAL POUR LA POSE DE CANALISATION

- CINTREUSE HYDRAULIQUE
- CLAMP INTÉRIEUR AVEC AVANCE AUTOMATIQUE
- FONCEUR À PERCUSSION, FUSÉE
- FONDOIR À BRAI
- FORAGE DIRIGÉ (INSTALLATION)
- FOREUSE HORIZONTALE À TARIÈRE
- GROUPE AUTONOME DE SOUDAGE
- MANDRIN DE CINTRAGE
- REMORQUE PORTE-TOURET
- TRACTEUR SUR CHENILLES POSEUR DE CANALISATIONS (PIPETAYER - SIDE-BOOM)
- TRANCHEUSE
- TREUIL À CABESTAN

MATÉRIEL POUR TRAVAUX SOUTERRAINS

- BERLINE
- CHARGEUSE À ACTION CONTINUE, À BRAS DE RAMASSAGE OU GODET
- CHARGEUSE SUR PNEUMATIQUES CHARGE ET ROULE, ARTICULÉE MOTEUR DIESEL
- ENGIN DE BOULONNAGE
- ENGIN DE FORATION
- ERECTEUR DE CINTRE
- FOREUSE ALÈSEUSE
- LOCOTRACTEUR DIESEL
- LOCOTRACTEUR ÉLECTRIQUE
- MACHINE D'ATTAQUE PONCTUELLE À FRAISE (RADIALE-TANGENTIELLE)
- MICROTUNNELIER
- ROBOT DE BÉTONNAGE
- TOMBREAU AUTOMOTEUR POUR TRAVAUX SOUTERRAINS
- TRANSPORTEUR MALAXEUR
- TRÉMIE DE STOCKAGE DE DÉBLAIS
- TUNNELIER
- WAGON AUTOREMPLISSEUR ENCASTRABLE

voire solution **mortiers & bétons**

t-mix
pour construire

Vos chantiers sont exigeants, nous le sommes aussi dans la production et la livraison de nos produits sur vos chantiers, où que vous vous trouviez.

Quels que soient le produit et le lieu du chantier, nous saurons répondre à vos attentes.

MORTIERS PROJÉTÉS
BÉTONS PROJÉTÉS
MORTIERS DE RÉPARATION
COULIS DE SCELLEMENT ET D'INJECTION

Le tout dans un conditionnement toujours adapté : **vrac en silos, BigBags et sacs**



Contactez-nous :

t-mix S.A.S. - 116 Avenue des Arrivaux - 38070 Saint Quentin Fallavier
Tel. +33(0)4 74 95 91 11 - Fax +33(0)4 74 95 36 55 - www.t-mix.fr



Membre du Réseau Congés Entreprises BTP

CAISSE NATIONALE DES ENTREPRENEURS DE TRAVAUX PUBLICS

Au service de la Profession des Travaux Publics

Nos missions :

- assurer le service des congés payés auprès des salariés des Travaux Publics
- procéder au remboursement des indemnités de chômage-intempéries versées par les employeurs de la Profession.

La CNETP regroupe **7 200 entreprises** de Travaux Publics et assure le calcul et le versement de prestations dues à plus de **265 000 salariés**.

Nos coordonnées :

- **Par courrier :**
31 rue le Peletier - 75453 PARIS CEDEX 09
- **Par Internet :** www.cnetp.fr
- **Par fax :** 01.70.38.08.00
- **Par téléphone :**
 - pour les entreprises : 01.70.38.07.70
 - pour les salariés : 01.70.38.07.77
 - **Serveur vocal (24h/24) :** 01.70.38.09.00



CONSTRUIRE
LE MONDE
DE DEMAIN,
c'est l'assurer



INCELA

Le Groupe SMABTP, premier assureur des professionnels du bâtiment et des travaux publics, s'ouvre à tous. Son engagement, son écoute, sa proximité et son accompagnement reflètent depuis toujours la qualité de ses services. Chaque jour, nous partageons notre expertise pour construire demain avec assurance et mieux vous protéger.

www.smabtp.fr



GROUPE
SMABTP
BÂTIR L'AVENIR AVEC ASSURANCE