

ÉCOLE
FRANÇAISE
DU
BÉTON

Sous la direction d'Yves MALIER

LES BÉTONS À HAUTES PERFORMANCES

Caractérisation, durabilité, applications



Presses de l'école nationale des
Ponts et chaussées

L'amélioration des caractéristiques des matériaux permet d'envisager, dans la construction, des transformations beaucoup plus radicales que celles résultant des progrès, pourtant considérables, que vont faire, dans l'avenir, les méthodes de calcul.

Albert CAQUOT

Membre de l'Institut

(Conférence d'introduction prononcée
à l'École Nationale des Ponts et Chaussées, en 1952)

AVANT-PROPOS

Créé dans la dynamique de la réflexion du Conseil d'orientation de la recherche en génie civil et parce qu'il a très tôt rassemblé *trente partenaires de l'Industrie et de la Recherche* hautement *compétents*, particulièrement *responsables* et légitimement *ambitieux*, le Projet national «Voies nouvelles du matériau béton» a, depuis son origine en 1986, affiché clairement quatre ambitions.

1. L'ambition de décloisonner certains processus conduisant à l'innovation en croisant, dans une même politique scientifique, *recherche finalisée, expérimentation sur ouvrages réels et amélioration de la réglementation*.

2. Celle de traiter nos nouveaux matériaux, simultanément sous *l'aspect microscopique*, sous *l'aspect macroscopique* et sous *l'aspect de leur emploi dans les ouvrages*, en faisant en sorte que chacun d'entre nous, au-delà de sa spécialisation sur l'un de ces trois domaines, s'implique, participe et, finalement, contribue à orienter les travaux dans les deux autres aspects qu'il croyait pourtant ne pas être les siens.

3. Celle de réaliser, entre les partenaires, une enrichissante *mise au pot commun d'une large part de leurs politiques de recherche, de leurs études et de leurs résultats*.

4. Celle de diffuser, dans le délai normal respectant les intérêts de chacun, la plus grande partie des *résultats de nos travaux vers l'ensemble des acteurs de la Profession* (maîtres d'ouvrages, architectes, entreprises, contrôleurs, chercheurs, professeurs, etc).

Cet ouvrage collectif, véritable bilan du Projet national, est rédigé par les représentants parmi les plus compétents des trente partenaires de ce Projet et par des experts canadiens et suisses avec lesquels nous travaillons régulièrement.

Cet ouvrage est la preuve qu'il existe désormais, dans le champ scientifique relatif aux BHP, un langage commun, une habitude de dialogue, une reconnaissance mutuelle ... bref les conditions d'une culture commune entre les ingénieurs et les chercheurs.

Il n'est point besoin de boule de cristal pour dire que nous n'avons pas fini de mesurer les résultats d'un tel état d'esprit, y compris sur l'économie et sur la qualité de nos constructions.

Je tiens à remercier chaleureusement tous ceux qui, depuis six ans, ont adhéré avec enthousiasme à ce qui paraissait à tant d'autres une plaisante utopie sans perspectives concrètes.

Mes remerciements vont aussi, plus particulièrement, vers ceux de nos partenaires et vers ceux de nos correspondants scientifiques étrangers qui ont contribué à la réalisation de cet ouvrage en français sur les bétons à hautes performances. Ils vont aussi vers Lysiane ALASLUQUETAS et Queensly HARADUN sans qui, assurément, ce travail n'aurait jamais pu être conduit.

Je ne terminerai bien sûr pas sans dire combien le président Jean CHAPON et le CORGEC d'une part, les ministères chargés de la Recherche et de l'Équipement d'autre part, ont fait pour créer des conditions morales et financières favorables à la réalisation de notre pari.

Yves MALIER

Professeur à l'École Nationale des Ponts et Chaussées
Directeur de l'École Normale Supérieure de Cachan

L'utilisation du BHP dans une approche « système » de la construction

Y. MALIER

1 LES VOIES D'OBTENTION DES HAUTES PERFORMANCES

Smeaton (1756), Vicat (1818), Apsdin (1825) furent parmi les inventeurs des bétons modernes. Monier et Lambot (1848), Coignet (1852), Hennebique (1880) réalisèrent, avec ce matériau les premières constructions en béton armé.

Puis, durant un siècle, le béton resta un mélange de granulats, de ciment et d'eau. Ce dernier constituant jouait deux rôles essentiels : assurer l'hydratation du ciment et participer activement à l'ouvrabilité du béton frais en lui donnant une rhéologie satisfaisante.

Cette dernière décennie, de nombreux travaux scientifiques ont montré les effets néfastes, pour la *résistance* et la *durabilité*, des excès de l'eau non hydratée pourtant nécessaire à l'obtention de la rhéologie utile lors de la mise en œuvre. Dans la perspective d'améliorer les propriétés constructives du béton, il était donc nécessaire d'explorer les voies visant à *réduire ce dosage en eau*.

Dans le même temps, différents chercheurs se sont attachés à reconstituer une roche massive à partir de l'obtention, lors de la composition du béton, d'un mélange de *très haute compacité*.

Ainsi, très vite, deux voies, de nature physico-chimique différentes, se sont dégagées pour obtenir de hautes performances :

1.1 La défloculation des grains de ciment

Cette défloculation est obtenue par l'emploi de produits organiques (condensés de formaldéhyde et mélamine sulfonate ou condensés de formaldéhyde et naphthalène sulfonate). Elle permet aux grains de ciment en suspension dans l'eau de retrouver leur granularité originelle (entre 5 et 50 mm pour l'essentiel). Cette première voie conduit à une réduction sensible de la quantité d'eau nécessaire puisque une forte part de celle-ci n'est plus, comme dans le béton traditionnel, piégée dans les floccs de grains de ciment et donc peu utile à la maniabilité.

1.2 L'extension du spectre du mélange granulaire

Cette extension est obtenue par utilisation d'éléments ultrafins (fumées de silice, fillers calcaires, etc), chimiquement réactifs, destinés à remplir les microvides de l'empilement de grains en améliorant ainsi la compacité du mélange tout en faisant progresser encore les qualités de sa rhéologie à l'état frais. Corollairement, la quantité d'eau nécessaire à la mise en œuvre du béton peut encore être réduite.

Tableau I

LES DEUX VOIES D'OBTENTION	
RÉDUIRE LA FLOCCULATION DES GRAINS DE CIMENT	ÉTENDRE LE SPECTRE DU MÉLANGE GRANULAIRE
SUPERPLASTIFIANTS :	AJOUTS CIMENTAIRES :
- Formaldéhyde et mélamine sulfonate - Formaldéhyde et naphthalène sulfonate	- Fumées de silice - Fillers calcaires - etc.

Notons que la première voie peut être utilisée seule et conduit déjà à des gains de propriétés constructives, d'ouvrabilité et de durabilité intéressantes. La seconde voie, évidemment, implique le recours simultané à la première, tant il est bien sûr inutile de compléter le spectre du mélange granulaire en direction des éléments très fins si l'on n'a pas, avant tout, réduit la flocculation.

Au plan des réalisations industrielles, il est désormais démontré, par différentes expérimentations, que, en tous lieux avec les matériaux locaux, l'application de ces principes simples permet, sans majorer le prix de base du béton de façon sensible, d'obtenir des bétons à hautes performances qualifiées, en terme de résistance caractéristique à la compression, par des valeurs comprises entre 60 et 80 MPa (pont de Joigny).

Une approche plus fine, un choix plus strict des constituants de base, une acceptation d'un accroissement du prix plus sensible, *une obligation absolue d'utiliser les deux voies précédemment citées* peuvent conduire déjà, dans les conditions d'un processus industriel, à l'obtention de résistances comprises *entre 90 et 140 MPa* (Seattle, 118 MPa) dont le concepteur estimerait avoir besoin pour son projet.

Enfin, *une approche de nature différente* faisant appel à des constituants très sélectionnés (ciments et granulats de qualités exceptionnelles, adjonction de polymères,...), à de nouveaux processus d'élaboration (serrage, auto-clavage,...) et à de nouveaux types de fonctionnement (confinement,...) peut, pour construire des objets pour lesquels le prix de base peut se dégager des valeurs usuelles, permettre d'atteindre des résistances mécaniques de *plusieurs centaines de mégapascals* et ouvrir ainsi le champ à de nouvelles applications de ces bétons hyper-performants, notamment dans l'autres secteurs industriels où leur faible prix relatif sera bien souvent très compétitif avec celui des matériaux plus nobles habituellement choisis.

2 HAUTES PERFORMANCES PLUTÔT QUE HAUTE RÉSISTANCE

Depuis l'origine, le béton traditionnel est caractérisé essentiellement par sa résistance à la rupture en compression. Il doit désormais en être autrement avec les nouveaux bétons car *beaucoup d'autres propriétés se trouvent être améliorées* et peuvent ainsi devenir déterminantes dans le choix des solutions retenues dans les projets.

Analysons brièvement quelques améliorations de connaissances apportées ces dernières années.

2.1 S'agissant de la microstructure

Les études réalisées dans le cadre du Projet national ont établi les liaisons entre l'amélioration des performances du béton d'une part, et la densification de la matrice et de l'interface pâte de ciment-granat d'autre part.

Ainsi, l'observation de la microstructure a montré que :

- dans un BHP de 65 MPa (pont de Joigny), réalisé sans fumées de silice, la *porosité capillaire* est réduite par rapport à celle du béton ordinaire. La texture des hydrates reste cependant la même et l'interface pâte de ciment-granat est encore poreuse et cristallisée ;
- dans un BTHP de 105 MPa, avec fumée de silice, la matrice est parfaitement *homogène, d'apparence amorphe*. Les particules de fumées de silice, uniformément réparties entre les grains de ciment sont des sites de nucléation des hydrates. La porosité capillaire est réduite et discontinue, contrairement à celle des autres bétons qui est interconnectée. Les particules de fumées de silice jouant le rôle de filler et de pouzzolane, densifient l'interface pâte de ciment-granat. *La rupture est alors transgranulaire*, alors qu'elle est intergranulaire dans les autres bétons. De plus, la fumée de silice adsorbe l'excès des molécules d'eau qui ne migrent plus vers les granulats. *L'absence de ressuage* élimine l'auréole de transition.

2.2 S'agissant de la mise en œuvre

La suppression du seuil de cisaillement dans la pâte de ciment à l'état frais par ajout de superplastifiant conduit à *un béton s'écoulant aisément*, bien qu'ayant un aspect visqueux et collant. La mise en place, le pompage sont des opérations particulièrement facilitées.

Sur un autre plan, et après les résultats des études précises relatives au *fluage des BHP chargés aux jeunes âges*, l'obtention de très hautes résistances dès les premières heures et les premiers jours conduit à une approche profondément différente de l'ordonnancement du chantier. Décoffrage, mise en précontrainte peuvent être effectués très rapidement. Il en découle des économies et des simplifications très importantes.

Dans certains cas spécifiques, il peut être intéressant de *retarder la prise* de plusieurs dizaines d'heures sans dommages du fait de la très forte thixotropie de la pâte évitant, dans le même temps, toute ségrégation (cf. pont de Joigny).

En revanche, l'absence d'eau de ressuage conduit à *une dessiccation de surface précoce et intense* qui rend indispensable la réalisation d'une cure soignée, seul moyen d'éviter les fissurations de surface dues au retrait plastique.

2.3 S'agissant du comportement mécanique

Au-delà du gain de résistance à la compression, notons tout l'intérêt de l'accroissement de *la résistance à la traction et au cisaillement* dans tous les problèmes valorisant ces propriétés (résistance des poutres à l'effort tranchant, mur de refend, problème de charges locales et de poinçonnement,...).

L'accroissement *du module élastique* doit être analysé par le projeteur avec la conservation, voire l'accroissement, de *la tenacité* et avec l'accroissement important des *qualités d'adhérence* entre l'acier et le béton. Il en résulte, sous réserve de quantités d'armatures passives sensiblement égales (c'est-à-dire, en pourcentage volumique, plus importantes), une meilleure résistance à la fissuration et une meilleure ductilité du « composite béton armé » dans les conditions de fonctionnement normal de l'ouvrage.

Enfin, les BHP obtenus par la seconde voie (amélioration du spectre granulaire) sont des bétons dont *le fluage est très sensiblement réduit*.

2.4 S'agissant de la durabilité

Le béton, matériau poreux, est caractérisé par la répartition de la taille des cavités et leur connectivité, par les discontinuités de micro-texture comme les joints de grain et par la cristallinité des hydrates. A cette porosité est associée une perméabilité qui favorise les transports de fluide susceptibles de créer expansion, fissuration et corrosion des armatures.

Les BHP et les BTHP résistent mieux aux attaques chimiques que les bétons traditionnels. Ils sont aussi recommandés dans le cas d'une réaction potentielle entre les alcalis de la solution interstitielle et les granulats réactifs (réaction alcali-silice, par exemple). Le taux le plus courant de fumée de silice est de l'ordre de 10 %. Notons que l'Islande a une expérience de plus de vingt ans

de tels bétons. La carbonatation peut détruire le film de passivation des aciers et le taux de corrosion de l'armature dépend alors de la résistivité électrique du béton. Remarquons que *la carbonatation*, très étudiée à l'occasion de l'expérimentation du pont de Joigny, est négligeable par rapport à celle du béton ordinaire. Remarquons aussi que les BHP à base de fumée de silice présentent aussi un très bon comportement à l'égard de la carbonatation accélérée. Parallèlement aux essais de nos équipes, des travaux norvégiens montrent que la fumée de silice augmente *la résistivité électrique du béton*, limitant ainsi le courant galvanique donc la corrosion de l'acier.

La résistance aux cycles gel-dégel, très étudiée par notre groupe, montre le bon comportement des BHP et des BHP. Ces derniers ont un réseau de pores tellement fin que la glace ne se forme pas durant le gel, même si le béton est saturé en eau. Ces résultats sont en parfait accord avec ceux des chercheurs canadiens : les BHP et les BHP contenant 5 à 10 % de fumée de silice et un fluidifiant ont un réseau de bulles d'air stable à la vibration et résistent à l'écaillage en présence de sels de deverglaçage.

3 À NOUVEAU MATÉRIAU, NOUVELLES CONCEPTIONS D'OUVRAGES

Il a souvent été d'usage de condamner l'intérêt de l'accroissement de résistance du béton car, dit-on, les sections des ouvrages calculées avec des bétons courants conduisent à des dimensions bien compatibles avec les passages d'armatures, de câbles, d'aiguilles vibrantes, etc.

Des réflexions analogues, visant à utiliser la technologie nouvelle dans des formes de structures traditionnelles valurent, en leur temps, les mêmes difficultés de communications à Freyssinet et Magnel pour le béton précontraint et, plus loin encore, à Hennebique et Coignet pour le béton armé.

En fait, comme lors de ces deux époques exceptionnelles de l'histoire de la construction, une nouvelle approche de la conception doit être résolument faite. Selon nous, pour être efficace, cette approche doit être globale. Elle doit notamment intégrer les données relatives :

- *aux matériaux nouveaux* (emplois de BHP mais aussi, dans certains cas, de BHP fibrés, de BHP à granulats légers, d'armatures à meilleure limite élastique, de câbles plus performants) ;
- *aux technologies* (valorisation de la précontrainte extérieure pour réduire les sections désormais plus résistantes et abaisser le poids propre, développement de la construction mixte pour laquelle les problèmes de connexion sont posés différemment et plus simplement avec le BHP, ré-invention de la construction par composants en sachant lui adjoindre de nouveaux dispositifs de liaisons et d'assemblages de performances égales, utilisation de l'effet du confinement multipliant la résistance de certains éléments,...) ;
- *aux méthodes d'exécution* (valorisation de la grande ouvrabilité de ce béton pour mieux développer les technologies de pompage, utilisation de la résistance à court terme pour une approche économique du coffrage et de l'usage de la préfabrication, utilisation des possibilités de précontrainte partielle à très court terme,...) ;
- *aux effets induits* (ainsi pour prendre deux exemples de nature différente, veillons à la qualité de la cure dès la mise en œuvre du BHP, ou encore, gardons-nous d'oublier la spécificité des problèmes de diffusion de la précontrainte résultant de l'association « BHP - précontrainte extérieure », tant il est

vrai que cette association doit localement conduire, le plus souvent, à des solutions technologiques adaptées (précontrainte transversale, par exemple) ;

- *aux formes architecturales des ouvrages* (renouveau de la construction en arc funiculaire des charges, recherche de l'abaissement des masses par inspiration de la construction métallique d'où des constructions en treillis, développement de structures légères boulonnées, non porosité et, donc, qualité de surface des parements, etc) ;
- *aux conditions spécifiques* (celles-ci pouvant être une ambiance chimiquement agressive, une situation de stricte imperméabilité à l'air, de résistance au frottement et à l'abrasion, de résistance aux chocs) ;
- *aux étapes de la maintenance* (ainsi, la très grande durabilité du BHP autorisera, par exemple, l'intégration, dès la conception, du remplacement futur des câbles de précontrainte dont il ne fait aucun doute que la technologie va beaucoup évoluer dans les deux prochaines décennies. Un tel concept pourra permettre d'aligner, dans un ouvrage, durée de vie du béton et permanence des propriétés des câbles).

En conclusion, dans un projet, le concepteur doit savoir dégager, avant de choisir le béton adapté, toutes les interactions entre ces différentes familles de paramètres rapidement et partiellement évoqués plutôt que de se concentrer exclusivement sur certains d'entre eux.

4 LEÇONS DU PASSÉ RÉCENT ET PROSPECTIVE

L'examen d'une centaine d'ouvrages construits en BHP, dans le monde (Tableau II), montre aujourd'hui *la grande supériorité de l'analyse systémique*. En effet, l'observation de ces ouvrages à travers le *seul critère* de haute résistance à la compression ne justifierait véritablement, c'est à dire économiquement, le choix du BHP que sur vingt cinq à trente pour cent de ces constructions environ.

En d'autres termes, n'oublions jamais que le prix d'un ouvrage intègre, certes, le prix des matériaux de base qui le constituent, mais aussi l'amortissement des matériels que sa construction nécessite et le montant des opérations et adaptations que sa durée de vie réclame.

C'est à la lumière de la somme de ces différents postes qu'apparaît le mieux l'intérêt du Béton à Hautes Performances. Il ne fait plus, aujourd'hui, aucun doute que ce nouveau matériau est promis à un grand avenir.