

CHAPITRE IV

MATERIAUX DE

CONSTRUCTION

Chapitre IV : Matériaux de construction

IV-1-Amélioration des procédés de préfabrication BHP, BTHP, BUHP

IV-1-1-Les Bétons à Hautes Performances (BHP)

IV-1-1-1-Caractéristiques, définition et utilisation des BHP

IV-1-1-2-Caractéristiques des BHP

IV-1-2-Les Bétons à Très Hautes Performances (BTHP)

IV-1-3-Les Bétons Fibrés à Ultra-hautes Performances (BFUP)

IV-1-3-1-Définition

IV-1-3-2-La différence entre les BFUP et les BHP

IV-1-3-3-Les usages

IV-1-3-4-Méthodes d'application

IV-2- Béton à bas-PH

IV-3-Coulis d'injection

Chapitre IV : Matériaux de construction

IV-1-Amélioration des procédés de préfabrication BHP, BTHP, BUHP : IV-1-

1-Les Bétons à Hautes Performances (BHP)

IV-1-1-1-Caractéristiques, définition et utilisation des BHP

Les Bétons à Hautes Performances (BHP) ont d'abord été utilisés pour leur haute résistance. Cette caractéristique facilement mesurable a fait des progrès spectaculaires à partir des années quatre-vingt. Elle est passée de 30/35 MPa à plus de 100 MPa pour les bétons à très hautes performances, voire plus (150 à 200 MPa pour des bétons fibrés à ultra hautes performances, BFUP) [86].



Fig.IV.1. Des ouvrages en BHP

Les gains de résistance ne sont pas les seuls avantages de ces bétons qui tirent leurs propriétés de leur microstructure très dense, d'une forte réduction de leur porosité et d'un réseau capillaire non connecté.

Ces bétons sont, en fait, des matériaux à très haute compacité. Les BHP sont également, du fait de leur porosité extrêmement réduite, plus résistants aux agents agressifs et, de façon générale, présentent une durabilité accrue. Ils permettent d'optimiser les structures, de réaliser des ouvrages soumis à des contraintes élevées ou subissant un environnement sévère (climat, agressions marines, effets du gel, attaques acides, etc.).

Hautes performances signifient aussi facilité de mise en œuvre et souplesse d'adaptation aux contraintes d'exécution des ouvrages. En effet, les BHP offrent aussi des propriétés exceptionnelles à l'état frais (rhéologie, pompabilité, etc.) et des performances aux jeunes âges, ce qui permet par exemple d'accélérer les cadences de fabrication en usine ou sur chantier ou de pomper le matériau sur de longues distances. Ils confèrent une pérennité architecturale aux ouvrages et augmentent considérablement leur durabilité en réduisant corrélativement les frais de maintenance et d'entretien [87].

Les clefs de ces performances sont:

- la réduction de la quantité d'eau opérée par l'ajout de superplastifiants;
- l'optimisation de la répartition granulométrique des composants.

Cette optimisation de leurs performances est due, en particulier, aux récentes évolutions technologiques des adjuvants qui permettent des formulations avec une forte réduction du dosage en eau tout en conservant une maniabilité adéquate et à l'utilisation complémentaire éventuelle d'ultrafines qui complètent les vides du squelette granulaire entre les grains de ciment et améliorent la compacité.

Les BHP ont été d'abord employés pour la réalisation de structures exceptionnelles. Les ouvrages d'art ont constitué, historiquement, un domaine d'application privilégié des BHP. Ils ont ensuite, pour les ouvrages exceptionnels, fait leurs preuves sur de nombreuses réalisations. Ils sont utilisés depuis de nombreuses années en préfabrication.



Fig.IV.2. Autres exemples d'ouvrages en BHP

Grâce à une approche volontariste de la part de l'ensemble des acteurs de la construction, leurs utilisations se banalisent depuis plusieurs années en valorisant toutes leurs propriétés physico-chimiques sur des ouvrages courants de toute sorte. Leur intérêt économique a été clairement mis en lumière lors de réalisation de nombreux ouvrages.

Les BHP ont rapidement démontré qu'ils permettaient d'offrir un potentiel de progrès extraordinaire pour la construction de bâtiments et de structures de génie civil. Ils sont désormais valorisés par d'autres performances que la simple résistance mécanique, telles que la rhéologie à l'état frais, la durabilité à long terme et l'esthétisme des structures. Ce concept de valorisation des performances du béton autre que la résistance mécanique est à la base du développement de tous les bétons modernes (BAP, BFUP, etc.) [86].

IV-1-1-2-Caractéristiques des BHP

Les Bétons à Hautes Performances (BHP) se caractérisent par:

- une résistance à la compression à 28 jours supérieure à 50 MPa sur cylindre;
- un rapport Eau efficace/liant équivalent inférieur à 0,4. Ils présentent une microtexture très dense et une faible porosité et sont donc très résistants à la pénétration d'agents agressifs.

IV-1-2-Les Bétons à Très Hautes Performances (BTHP)

L'utilisation de particules ultrafines de moins d'un micron de largeur contribue à réduire encore plus la porosité, mais est essentiellement utilisée pour les bétons à très hautes performances (BTHP) [88].

- Les particules ultrafines utilisées sont la plupart du temps des fumées de silice, contenant plus de 90% d'oxyde de silicium, sous-produit de l'industrie du ferrosilicium.
- Ces fumées de silice ont une double action. Outre le fait de réduire les vides, elles jouent aussi un rôle de catalyseur avec la chaux vive, lié à leur caractère pouzzolanique.

IV-1-3-Les Bétons Fibrés à Ultra-hautes Performances (BFUP)

IV-1-3-1-Définition

Les bétons fibrés à ultra-hautes performances (BFUP) sont des matériaux à matrice cimentaire, renforcés par des fibres et offrant des résistances en compression comprises entre 150 et 250MPa [89].



Fig.IV.3. Les bétons fibrés à ultra haute performance

Avant tout, il faut savoir qu'on appelle « fibre » comme on a déjà vu (chapitre III. Nouveaux matériaux. Bétons fibrés) un matériau d'une longueur allant de 5 à 60 mm. Il existe plusieurs natures de fibres : métalliques, organiques et céramiques. En fonction de leur nature, ces fibres ont des caractéristiques différentes et ne réagissent pas de la même façon. De ce fait, leur impact sur le béton peut varier.

Le principal avantage que présente le béton fibré métalliquement par rapport au béton ordinaire est le remplacement total ou partiel de ferraille dans la composition. Le but premier dans l'utilisation de ces fibres est donc de remplacer les armatures traditionnelles, ce qui facilite l'application du béton. Pas de découpe ni de manipulation de ferraille à prévoir. De plus, elles ont aussi la capacité d'offrir au béton certaines propriétés telles qu'une résistance au feu augmentée ou une diminution des risques de fissuration.



Fig.IV.4. Béton fibré métalliquement

Les fibres organiques, quant à elles, améliorent le comportement du béton au jeune âge. Le treillis anti-fissuration devient inutile, le béton est plus homogène et les retraits de dessiccation pendant la phase de prise sont limités.

Les fibres sont intégrées dans le béton afin de l'améliorer. Mais il est bon de savoir que ces fibres lui confèrent également d'autres caractéristiques qu'on ne retrouve pas chez les autres bétons.



Fig.IV.5. Réalisation en BFUP

Le tableau suivant montre les principales caractéristiques des différentes familles de fibres.

Tableau.IV.1. Les familles des fibres avec leurs caractéristiques

Les familles de fibres		
Familles de fibres	Matériaux	Caractéristiques
Fibres métalliques	Acier, Fonte, Inox	Bonne résistance à la flexion, à la traction et à la rupture. Réduction de la dimension des fissures.
Fibres organiques	Acrylique, Aramide, Carbone, Kevlar, Polyamide Polypropylène/Polyéthylène, Polypropylène	Réduction de la fissuration au jeune âge (retraits plastiques). Fibres souples, ce qui améliore leur ouvrabilité. Peu résistantes aux températures élevées (140-170°C maximum).
Fibres minérales	Basalte, Mica, Verre, Wollastonite	Excellente tenue au feu (800°C maximum). Bonne isolation thermique. Permet la fabrication de parois très minces.

(Voir aussi les familles des fibres et leurs caractéristiques ainsi que le domaine d'application de chaque famille, Chapitre III. Nouveaux matériaux. Les bétons fibrés).



Fig. IV.6. Première application des BFUP sous formes de poutres dans les corps d'échange des aéroréfrigérants

Leurs formulations font appel à des adjuvants superplastifiants, des ultrafines et des compositions granulaires spécifiques, ainsi qu'à des fibres.

Les BFUP offrent des propriétés et des performances exceptionnelles :

- une très grande ouvrabilité,
- de hautes résistances à court terme (des résistances mécaniques au jeune âge très élevées),
- des résistances caractéristiques à la compression à 28 jours très élevées comprises

(pour les BFUP structuraux) entre 150 et 250 MPa,

- des hautes résistances en traction,
- une ductilité importante,
- un retrait de dessiccation et un fluage très faible,
- une compacité très importante et une faible perméabilité,
- une grande résistance à l'abrasion et aux chocs,
- une ductilité (déformabilité sous charge sans rupture fragile) importante.
- une ténacité (résistance à la micro-fissuration) élevée.
- une dureté de surface très importante.
- une durabilité exceptionnelle (ce qui permet de les utiliser dans des environnements très agressifs),
- des aspects de parements particulièrement esthétiques et une texture de parement très fine.

Ils permettent une optimisation des frais de maintenance et d'entretien des ouvrages et de nouvelles perspectives constructives.



Fig.IV.7. Ouvrages en BFUP avec de nouvelles perspectives constructives

IV-1-3-2-La différence entre les BFUP et les BHP

L'évolution des BFUP par rapport aux Bétons à Hautes Performances (BHP) se caractérise par :

- leurs très grandes résistances en compression, mais aussi en traction,
- leur composition spécifique et leur fort dosage en ciment (700 à 1000 kg/m³) et en adjuvants,
- leur squelette granulaire spécifique (4 à 5 échelles de grains) et l'optimisation de leur empilement granulaire,
- l'utilisation de granulats de faibles dimensions et faisant l'objet d'une sélection

particulière,

- une teneur en eau beaucoup plus faible,
- la présence de fibres (à un taux élevé).

Les BFUP peuvent notamment être associés à de la précontrainte par pré-tension ou par post tension, plus rarement à des armatures passives.

Les diverses formulations des BFUP permettent de leur conférer des propriétés complémentaires adaptées aux exigences spécifiques des projets. [89].

Ils se caractérisent par une microstructure extrêmement fermée gage de performances mécaniques et de durabilité.

Les résistances élevées du matériau et l'absence d'armatures passives facilitent la réalisation de structures légères et élancées et l'élaboration de formes complexes (coques, voiles minces,...).

Les BFUP se caractérisent par une durabilité exceptionnelle qui résulte de leur très faible porosité : microstructure très dense, faible perméabilité et réseau capillaire non connecté qui s'oppose à la pénétration et au transfert des agents agressifs en phase liquide ou gazeuse. Cette caractéristique se traduit en particulier par :

- une résistance importante à la migration des agents agressifs (ions chlore, sulfates, chlorures marins, acides...) ;
- un faible risque de corrosion des armatures (la progression du front de carbonatation est extrêmement lente) ;
- une forte résistance au cycle gel/dégel et aux sels de déverglaçage ;
- une faible perméabilité (à l'eau, à l'air, au gaz), ce qui constitue une barrière d'étanchéité vis-à-vis des agents agressifs extérieurs (humidité, dioxyde de carbone...).

Les BFUP s'imposent donc pour les ouvrages situés dans des environnements agressifs. Ils permettent une réduction très sensible des frais de maintenance et d'entretien des ouvrages.

IV-1-3-3-Les usages

Le type de fibre sera donc choisi en fonction de la performance recherchée.

On retrouve le béton fibré dans de nombreuses applications similaires au béton ordinaire :

- Dalles
- Fondations
- Planchers
- Voiles
- Enduits

IV-1-3-4-Méthodes d'application :

Le béton fibré ultra performant peut être appliqué de différentes façons :

- Il peut être préfabriqué : voussoirs, poutres.
- Il peut être projeté : renforcement de murs, construction.
- Il peut être coulé en place à partir d'une benne ou d'un camion-toupie : fondations, planchers, dalles.
- Il peut être utilisé comme du mortier : enduit, scellement.



Fig.IV.8. BFUP projeté

IV-2-Béton à bas-PH

Le stockage en formation géologique profonde est l'une des solutions envisagées pour la gestion des déchets radioactifs. Les déchets sont conditionnés dans des colis puis placés dans des ouvrages en béton situés dans une couche géologique stable (argilite). Ce concept de gestion repose sur l'hypothèse que les barrières considérées (colis, alvéoles et milieu géologique) permettent le confinement des déchets sur une durée suffisante afin d'assurer leur décroissance radioactive. Un des principaux défis de ce mode de gestion concerne les interfaces ouvrages en béton/argile (argilite et bentonite). Sous l'effet des conditions chimiques très alcalines imposées par le béton, l'argile pourrait se dégrader et perdre une partie de ses propriétés.

Une des solutions envisagées repose sur le développement de **bétons dits « bas-pH »**, dont la réactivité chimique vis-à-vis des argiles est très faible. Ces bétons doivent satisfaire un ensemble d'exigences:

- le pH de leur solution interstitielle ne doit pas excéder 11 pour limiter l'attaque alcaline de l'argile qui provoquerait une altération de ses capacités de confinement,
- les liants qui les constituent doivent posséder un faible dégagement de chaleur lors de l'hydratation, afin de limiter les gradients thermiques qui pourraient se développer dans les structures massives,
- les matériaux frais doivent présenter une ouvrabilité plastique de façon à faciliter leur mise en place,
- une fois durcis, ils doivent développer une résistance mécanique élevée (résistance à la compression supérieure à 70 MPa), facteur de pérennité des ouvrages réalisés,
- enfin, ils doivent être élaborés à partir de constituants industriellement disponibles.

Des études dans ce sens sont menées pour mettre au point et caractériser un béton peu réactif dans un environnement argileux, utilisable dans la construction de structures pour le stockage en profondeur des déchets radioactifs. Des Pouzzolanes (constituants riches en silice) et du laitier sont ajoutés au ciment Portland pour diminuer le PH de la solution interstitielle du matériau à 11. Les liants binaires et ternaires étudiés présentent des concentrations alcalines dans la solution porale très faible (1 à 5mmol/L), ce qui diminue le PH d'au moins une unité par rapport à un témoin de CEM I. Ils ont des échauffements inférieurs à 20°C (en conditions semi-adiabatiques). Les bétons mis en œuvre ont une résistance en compression supérieure à 70MPa après un an de cure, un retrait total courant (de -350 à -500µm/m) et ils présentent une ouvrabilité plastique [90] et [91].

IV-3-Coulis d'injection

La réparation des fissures ou des cavités dans les structures en béton ou en maçonnerie, fait appel aux techniques et produits d'injection.

Réaliser un coulis dans un support consiste à injecter dans une maçonnerie à consolider, sous pression gravitaire, un mélange de liant et d'eau et parfois de sable fin.

Le rôle du coulis d'injection est essentiel lorsqu'il s'agit de protéger des maçonneries qui comportent des fissures ou une désagrégation des mortiers de montage par exemple. Il permet de consolider ces maçonnerie existantes qu'il est souvent difficile de remplacer ou de traiter. [92].

Les Coulis d'injection sont donc utilisés dans les anciens ouvrages. On doit cependant tenir compte d'un certain nombre de particularités liées à la spécificité de ces constructions, à la diversité des désordres constatés et à l'importance des volumes à injecter. Par ailleurs, la réparation des monuments historiques impose aussi l'emploi des matériaux d'injection préservant leur qualité esthétique et dont le comportement à long terme est connu.



Fig.IV.9. Injection du coulis dans le mur

Le **coulis** est un mélange très fluide de ciment et d'eau. Il est utilisé pour renforcer des fondations, réparer des fissures dans des structures ou renforcer une maçonnerie de pierre dont les joints sont endommagés. Par sa proximité physico-chimique avec le mortier ou le béton, il peut être assimilé à ceux-ci.

Le choix du mortier à préparer s'effectue en fonction de la dureté du matériau à traiter. Dans le cas de la restauration du bâti ancien, on utilisera de préférence un mortier de chaux, afin de préserver durablement le mur et les matériaux qui le constituent. La résistance n'est pas le phénomène recherché pour la consolidation des supports et la correction des désordres structurels énoncés.



Fig.IV.10. Restauration du mur extérieur par injection de coulis

En restauration de peinture murale, la technique **d'injection de coulis** a été adaptée pour consolider les enduits peints en les refixant sur la maçonnerie. Il existe différents types de coulis.

Ils peuvent être préparés par le restaurateur à partir de différents liants inorganiques (chaux hydraulique, chaux aérienne, terre crue) en mélange avec des charges fines (Pouzzolane, sable fin, poudre de pierre ponce, silice micronisée, etc.) et parfois avec des liants organiques naturels ou synthétiques. Ou bien, le restaurateur achète des coulis prêts à l'emploi chez des fournisseurs spécialisés. Les coulis sont injectés généralement avec des seringues et des aiguilles [93].