

Chapitre IV. Les Bétons à Hautes Performances (BHP)

1. Introduction :

Les Bétons à Hautes Performances (BHP), sont des matériaux à très haute compacité et haute résistance. Elle est de l'ordre 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). Hautes performances signifient aussi facilité de mise en œuvre et souplesse d'adaptation aux contraintes d'exécution des ouvrages. Les BHP ont une porosité extrêmement réduite, plus résistants aux agents agressifs et, de façon générale, présentent une durabilité accrue.

2. Définition 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 structure très dense, une faible porosité et une très bonne résistance à la pénétration d'agents agressifs.

3. Les constituants du BHP

Les constituants du BHP font l'objet des principales spécifications suivantes.

- **Ciments**: conformes à la norme NF EN 197-1 de types CEM I ou CEM II ou CEM III et de classes de résistance conseillées 42,5 ou 52,5 (N ou R).
- **Granulats** : conformes à la norme NF EN 12620 « Granulats pour bétons » et à la norme XP P 18-545 (article 10: « granulats pour bétons hydrauliques »).

- **Additions** : conformes aux diverses normes en vigueur – cendres, laitiers de haut fourneau, fillers calcaires, filler siliceux, éventuellement ultrafines (fumées de silice).
- **Adjuvants** : plastifiants réducteur d'eau et superplastifiants haut réducteur d'eau conformes à la norme NF EN 934-2.

La fumée de silice : La fumée de silice est un produit minéral amorphe obtenu essentiellement lors de la fabrication du silicium et de ses alliages. Le silicium est obtenu par réduction du quartz en présence de carbone à 2 000 °C dans des fours à arc électrique. Les fumées contiennent du monoxyde gazeux (SiO) qui s'oxyde et se condense en particules vitrifiées amorphes extrêmement fines. Ces particules sont lisses et sphériques (100 000 billes de fumées recouvrent entièrement un grain de ciment). Leur couleur est le plus souvent gris clair.

4. Formulation des BHP

La recherche des hautes performances passe par la réduction de la porosité du béton durci, c'est-à-dire de son pourcentage de vides. En effet, les dimensions et les volumes des pores capillaires sont les principaux paramètres qui régissent les résistances mécaniques du béton et les propriétés de transfert déterminantes pour la durabilité. L'optimisation de la formulation d'un BHP consiste à diminuer la porosité de la matrice cimentaire et à optimiser le squelette granulaire. La formulation d'un BHP suit les trois principales étapes suivantes :

1. Détermination d'une formule théorique prévisionnelle :

- sélection des constituants en fonction de l'expérience locale ;
- détermination des proportions des constituants ;
- optimisation du squelette granulaire.

2. Optimisation du mélange en laboratoire:

- validation de la compatibilité ciment /adjuvant ;
- ajustement de la quantité de la pâte et de l'adjuvant;
- vérification du comportement rhéologique du béton frais ;
- analyse de la sensibilité de la formule aux variations des dosages des divers constituants ;
- analyse de la sensibilité de la formule aux conditions climatiques possibles lors de la mise en œuvre (température).

3. Validation de la formule sur chantier :

- vérification du comportement rhéologique du béton frais ;
- vérification des éventuelles spécifications complémentaires telle que la pompabilité ;
- vérification des caractéristiques du béton

Exemples de Formulation d'un BHP: COLLECTION TECHNIQUE CIM-BÉTON [1]

BHP sans additions		BHP avec addition : à base de la fumée de silice	
Ciment CEM I 52,5 (Kg/m ³)	450	Ciment CEM I 52,5 (Kg/m ³)	420
Gravillon 6/20 (Kg/m ³)	1027	Fumée de silice (Kg/m ³)	35
Sable 1 (0/4) (Kg/m ³)	648	Gravillon (6/10) Kg/m ³)	250
Sable 2 (0/1) (Kg/m ³)	105	Gravillon (10/14) (Kg/m ³)	730
Eau (L/m ³)	160	Sable 1 (0/4) (Kg/m ³)	660
Superplastifiant (Kg/m ³)	11,25	Sable 2 (0/1) (Kg/m ³)	140
Adjuvant retardateur (Kg/m ³)	4,5	Eau (L/m ³)	152
		Superplastifiant (%)	1,73

5. Propriétés physico-chimiques et mécaniques des BHP

Les diverses propriétés des BHP découlent de leur faible porosité, gage de durabilité

Résistances mécaniques : Les BHP présentent des résistances en compression importantes aux jeunes âges, compte tenu de la rapidité de la cinétique de montée en résistance, et très élevées à long terme (avec une montée en résistance se poursuivant au-delà de 28 jours). Un BHP de 60 MPa à 28 jours peut offrir des résistances mécaniques de 15 MPa à 24 heures, voire davantage, et 40 MPa à 7 jours. Le gain est aussi important en termes de résistance en traction ou au cisaillement.

Module d'élasticité : Le module d'élasticité des BHP est supérieur à celui des bétons traditionnels.

Retrait : Le retrait total du BHP est globalement identique à celui d'un béton traditionnel mais avec une cinétique différente (il se produit plus tôt et se développe principalement pendant les premiers jours après le coulage). Le retrait de dessiccation à l'état durci est plus faible compte tenu du faible dosage en eau. Le retrait endogène (ou d'autodessiccation),

compte tenu de la finesse de la microstructure et de la forte réduction du rapport E/C, est d'un coefficient plus élevé (150 à 250 x 10⁻⁶) pour un BHP que pour un béton traditionnel (60 x 10⁻⁶). Le retrait d'autodessiccation est d'autant plus précoce et élevé que le rapport E/C est faible.

Autres propriétés des BHP :

Fluage : Les BHP présentent un fluage (déformation différée sous chargement permanent) plus faible que les bétons traditionnels.

Imperméabilité : Leur faible porosité capillaire confère aux BHP une très faible perméabilité

Résistance aux agents agressifs : La faible perméabilité des BHP leur confère une bonne résistance à la pénétration et au transfert dans la masse du béton des agents agressifs en phase gazeuse ou liquide (eaux de mer, eaux sulfatées, solutions acides, dioxyde de carbone, etc.).

Migration des ions chlorure : La résistance des BHP à la migration des ions chlorures est supérieure à celle des bétons courants, grâce à sa microstructure plus dense.

Tenue aux attaques gel/dégel : Les BHP, correctement formulés, résistent aux cycles gel/dégel grâce à leur forte compacité et à leur résistance mécanique élevée.

Carbonatation : De nombreuses études ont démontré que la durabilité des BHP vis-à-vis de la carbonatation est très nettement supérieure à celle d'un béton traditionnel

6. Principaux domaines d'applications et principales

- Ponts routiers
- Tunnels et Travaux Souterrains
- Préfabrication
- Ouvrage en site maritime

[1] COLLECTION TECHNIQUE CIM-BÉTON, « Les bétons : formulation, fabrication et mise en œuvre » chapitre 3 ; Tome II., Ecole Française du Béton, pp : 96-109

Le site web du centre d'information : <http://www.infociments.fr/betons/composition>

Exemples de Formulation d'un BHP

Faite au laboratoire de matériaux en génie civil.

BHP sans additions		BHP avec addition : à base de la fumée de silice	
Ciment CEM I 52,5 (Kg/m ³)	450	Ciment CEM I 52,5 (Kg/m ³)	420
Gravillon 6/20 (Kg/m ³)	1027	Fumée de silice (Kg/m ³)	35
Sable 1 (0/4) (Kg/m ³)	648	Gravillon (6/10) Kg/m ³)	250
Sable 2 (0/1) (Kg/m ³)	105	Gravillon (10/14) (Kg/m ³)	730
Eau (L/m ³)	160	Sable 1 (0/4) (Kg/m ³)	660
Superplastifiant (Kg/m ³)	11,25	Sable 2 (0/1) (Kg/m ³)	140
Adjuvant retardateur (Kg/m ³)	4,5	Eau (L/m ³)	152
		Superplastifiant (%)	1,73

- Détermination de la Résistance en compression et de traction par flexion a 28 jours.