

3.2 Les Bétons à Hautes Performances – 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).

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.)

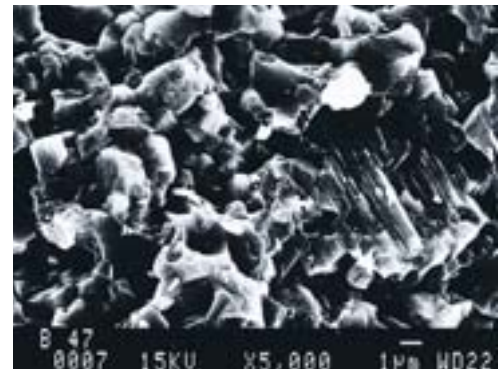
Hautes performances signifient aussi facilité de mise en œuvre et souplesse d'adaptation aux contraintes d'exécution des ouvrages. En effet, les BHP offrent aussi des résistances exceptionnelles à l'état frais (rhéologie, pompabilité, etc.) et des performances aux jeunes âges, ce qui permet par exemple 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. 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.

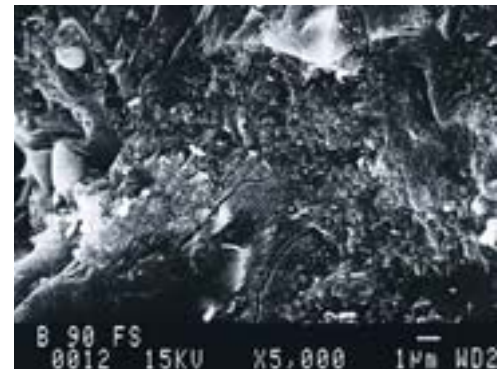


Cette optimisation de leurs performances est due, en particulier, aux récentes évolutions technologiques des adjuvants qui permettent des formulations avec une forte réduction du dosage en eau tout en conservant une maniabilité adéquate et à l'utilisation complémentaire éventuelle d'ultrafines qui complètent 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 en France, 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.



Béton courant



BHP

Le BHP présente, à l'échelle microscopique, une structure plus fermée qu'un béton courant (grossissement x 5 000).

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.).

3.2.1 - 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 microtexture très dense et une faible porosité et sont donc très résistants à la pénétration d'agents agressifs.

Nota

La norme NF EN 206-1 bétons (spécifications, performances, production et conformité) définit les bétons à haute résistance : « béton appartenant à une classe de résistance à la compression supérieure à C50/60, s'agissant de béton de masse volumique normale ou de béton lourd, et supérieure à LC 50/55, s'agissant de béton léger ».

3.2.2 - Formulation, constituants et essais

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.



LES ÉTAPES DE LA FORMULATION

La formulation d'un BHP suit les trois principales étapes suivantes :

> **Détermination d'une formule théorique prévisionnelle :**

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

> **Optimisation du mélange en laboratoire :**

- validation de la compatibilité ciment / adjuvant ;
- ajustement de la quantité de pâte et de l'adjuvantation ;
- 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).

> **Validation de la formule en centrale :**

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

Nota

Des outils spécifiques de contrôle ont été développés pour faciliter la formulation des BHP : méthode des coulis AFREM, méthode MBE (Mortier de Béton Équivalent), Rhéomètre, logiciel BETONLAB.



L'OPTIMISATION DE LA FORMULATION D'UN BHP

Deux voies sont généralement associées pour optimiser la formulation d'un BHP.

> Défloculation des grains de ciments et réduction de la teneur en eau

L'emploi des superplastifiants permet une réduction de la teneur en eau du mélange à consistance égale (entraînant la suppression d'un volume important d'eau non mobilisée par l'hydratation du ciment). Les rapports E/C sont de l'ordre de 0,35 au lieu de 0,45 à 0,50 pour un béton usuel (soit une réduction de la teneur en eau de plus de 30 %).

Les superplastifiants s'opposent à la floculation des grains de ciment en suspension dans l'eau, ce qui augmente leur réactivité, facteur de résistance à court terme. Ils permettent une réduction sensible de l'eau de gâchage (une partie de l'eau n'est plus piégée dans les floccs de ciment) tout en garantissant une ouvrabilité satisfaisante, une amélioration de la fluidité et une diminution très importante de la porosité du béton à l'état durci.

> Optimisation du squelette et de l'empilement granulaire

Chaque classe granulaire est adaptée afin d'obtenir un mélange à très haute compacité (les éléments fins remplissant les espaces entre les plus gros granulats). Des mélanges optimaux de grains (s'appuyant généralement sur quatre niveaux de taille de grain) permettent d'obtenir la porosité minimum du squelette granulaire.

Les performances des BHP peuvent encore être augmentées par l'optimisation du mélange granulaire grâce à l'ajout de particules ultrafines, le plus souvent à caractère pouzzolanique. Elles ont une action sur la granulométrie du mélange, en comblant les microvides intergranulaires et en densifiant l'interface pâte de ciment-granulat. Elles augmentent la compacité du mélange et améliorent sa rhéologie à l'état frais. Les ultrafines les plus utilisées sont les fumées de silice. Elles présentent également une réactivité avec la chaux libre, liée à leur caractère pouzzolanique ce qui accroît les résistances mécaniques.

Cette optimisation du squelette granulaire permet aussi de réduire la teneur en eau.



LES FUMÉES 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.

QUELQUES EXEMPLES DE FORMULATION POUR 1 m³ DE BHP

> PONT DE JOIGNY sans fumée de silice

CEM I 52,5	450 kg
Granulat 6/20	1 027 kg
Sable 0/4	648 kg
Sablon	105 kg
Eau	160 l
Superplastifiant	11,25 kg
Retardateur	4,50 kg

> VIADUC DU CROZET avec fumée de silice

CEM I 52,5 PMES	385 kg
Gravillon 5/12	363 kg
Gravier 12/20	694 kg
Sable 0/5	785 kg
Fumée de silice	31 kg
Eau	140 l
Superplastifiant	1,2 %

> PONT DE JONCHE avec fumée de silice

CEM I 52,5	420 kg
Fumée de silice	35 kg
Gravillon 6/10	250 kg
Gravillon 10/14	730 kg
Sable 0/4	660 kg
Sablon 0/1	140 kg
Eau	152 l
Superplastifiant	1,73 %

> PONT RAIL TGV MÉDITERRANÉE sans fumée de silice

CEM I 52,5 R CP2	425 kg
Gravillon 12,5/20	655 kg
Gravillon 4/12,5	500 kg
Sable 0/4	760 kg
Eau	140 l
Superplastifiant	1,4 %

3.2.3 - Spécifications sur les constituants

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 volantes silico-alumineuses, 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.

3.2.4 - Avancées récentes

Les recherches menées, cette dernière décennie, en particulier dans le cadre du PROJET NATIONAL BHP 2000 ont permis :

- la validation, la confirmation et l'appréciation de la durabilité des BHP (mise au point d'essai de mesure de la porosité, de la profondeur de carbonatation, de la pénétration des chlorures, etc.);
- la mise au point de nouveaux constituants adaptés aux BHP (fumées de silice, adjuvants de nouvelle génération, etc.);
- l'évolution dans la méthodologie et la maîtrise des formulations des BHP.

Les résultats de ces recherches se sont concrétisés par :

- la reconnaissance officielle des BHP dans les règles de calcul BAEL et BPEL (ces règles couvrent

l'usage des BHP jusqu'à des résistances atteignant 80 MPa) puis actuellement dans les normes européennes de dimensionnement (les EUROCODES); ces nouvelles règles permettent de prendre en compte les propriétés mécaniques des BHP dans la conception et le calcul des structures ;

- la prise en compte des BHP dans le Fascicule 65 A ;
- la mise à disposition et la généralisation des BHP dans le réseau des centrales BPE ;
- la réalisation très courante, dans les usines de préfabrication, de produits préfabriqués en béton (en BHP armé ou précontraint).

Nota

L'additif au fascicule 65 A « Exécution des ouvrages de Génie Civil en béton armé ou en béton précontraint » précise, chapitre 2, des recommandations sur le choix des composants, sur les techniques de fabrication et de mise en œuvre des BHP.

3.2.5 - 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.

Nota

Les règles BAEL définissent la résistance caractéristique à la traction, à partir de la résistance à la compression, par les formules suivantes :

$$f_{tj} = 0,6 + 0,06 f_{cj} \quad \text{si } f_{cj} < 60 \text{ MPa}$$
$$f_{tj} = 0,275 f_{cj}^{2/3} \quad \text{si } 60 \leq f_{cj} \leq 80 \text{ MPa}$$

■ Module d'élasticité

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

Nota

Les règles BAEL fournissent une expression qui permet d'évaluer la valeur du module E_i , en fonction de la résistance à la compression par la formule :

$$E_{ij} = 11\,000 f_{cj}^{1/3}$$

■ 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).

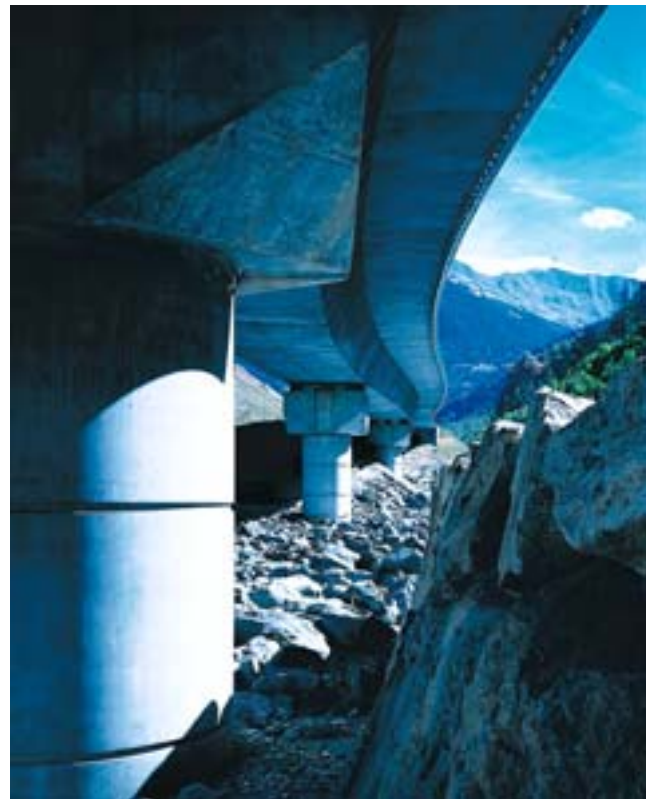
Le retrait de dessiccation à l'état durci est plus faible compte tenu du faible dosage en eau. Le retrait endogène (ou d'autodessiccation), compte tenu de la finesse de la microstructure et de la forte réduction du rapport E/C, est d'un coefficient plus élevé (150 à 250 x 10⁻⁶) pour un BHP que pour un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

Nota

Les BHP sont susceptibles de dessiccation précoce à l'état frais. **Il est donc indispensable de mettre en œuvre immédiatement après le bétonnage une cure adaptée et soignée.**

■ Fluage

Les BHP présentent un fluage (déformation différée sous chargement permanent) plus faible que les bétons traditionnels (surtout avec des formulations à base de fumées de silice). La cinétique de fluage propre est très rapide (le fluage est accéléré et se manifeste dès les jeunes âges du béton) et se stabilise plus vite. Le fluage de dessiccation est très faible. Le fluage est d'autant plus faible que la résistance en compression est plus élevée.



Nota

Dans les règles BAEL, le coefficient de fluage à prendre en compte est fonction de la présence de fumées de silice. Il est égal à :

- 0,8 pour les BHP avec fumée de silice ;
 - 1,5 pour les BHP sans fumée de silice.
- Ce coefficient de fluage est égal à 2 pour les bétons traditionnels.

Dans les structures précontraintes, l'utilisation de BHP permet de réduire les pertes de précontrainte associées aux déformations différées du béton. Ce faible fluage permet d'augmenter l'efficacité de la précontrainte et de faciliter le contrôle géométrique des ouvrages.

L'utilisation de BHP avec fumée de silice conduit donc à des réductions de déformations différées et des redistributions d'efforts plus faibles.

■ 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.).

Nota

Cette résistance des BHP aux agressions chimiques est valorisée, en particulier, dans les ouvrages d'assainissement et les ouvrages situés dans les milieux agricoles ou industriels.

■ Migration des ions chlorure

Le Projet national BHP 2000 a clairement démontré que la résistance des BHP à la migration des ions chlorures est largement supérieure à celle des bétons courants, grâce à sa microstructure plus dense. C'est un des points forts du BHP vis-à-vis du risque de corrosion des armatures.

■ 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. Ce bon comportement des BHP aux cycles gel/dégel a été mis en évidence dans le cadre du projet national BHP 2000.

Le guide LCPC « Recommandations pour la durabilité des bétons durcis au gel » spécifie, chapitre 3.2, les principales recommandations spécifiques à l'élaboration des BHP et explicite la démarche à suivre pour formuler des BHP résistant au gel sévère et à l'écaillage et satisfaire la durabilité aux cycles gel-dégel en présence ou non de sels de déverglaçage.

La faible perméabilité des BHP et le faible rapport E/C favorisent une résistance plus importante aux risques d'écaillage en présence de sels de déverglaçage.

Il est possible de formuler des BHP qui résistent bien aux cycles gel/dégel et à l'écaillage sans ajouts d'entraîneur d'air. Lorsque le béton doit résister à un gel sévère (forte saturation d'eau), l'utilisation d'un entraîneur d'air est généralement nécessaire si le E/C est supérieur à 0,32.

Nota

La tenue du béton durci aux effets du gel/dégel est validée par trois essais de performance :

– essai de gel dans l'eau – dégel dans l'air (norme NF P 18-425 pour les environnements de gel sévère et des bétons à saturation modérée ;

– essai de gel dans l'eau – dégel dans l'eau (norme NF P 18-424) pour les environnements de gel sévère et des bétons à saturation en eau élevée ;

– essai d'écaillage des surfaces de béton durci exposées au gel en présence de sels de déverglaçage (norme NF P 18-420).

Les deux premiers essais permettent de justifier la résistance au gel interne, le troisième, la résistance à la dégradation de surface (écaillage).

Les recommandations du LCPC concernent les bétons de résistances caractéristiques à 28 jours supérieures ou égales à 50 MPa formulés avec ou sans entraîneur d'air. Ces recommandations distinguent deux classes de BHP en fonction du rapport E/C :

– classe 1 $E/C \geq 0,32$;

– classe 2 $E/C < 0,32$;

et deux types de formulations :

– béton formulé sans entraîneur d'air ;

– béton formulé avec entraîneur d'air.

■ Tenue au feu

L'analyse du comportement au feu du BHP a fait l'objet d'un important programme de recherche dans le cadre du Projet National BHP 2000, visant à modéliser, en particulier, l'écaillage et les évolutions des performances mécaniques à très hautes températures et étudier les solutions techniques permettant de réduire les risques d'éclatement.

Ces essais ont permis de mettre en évidence l'intérêt de l'introduction de fibres de polypropylène (à des dosages de quelques kg/m^3) pour réduire de façon efficace le risque d'écaillage des BHP (les fibres en fondant, vers 170°C , constituent un réseau connecté de canaux rendant le matériau beaucoup plus perméable, ce qui permet l'évacuation de la vapeur).

■ 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. En effet, le réseau poreux, peu connecté

limite la diffusion du gaz carbonique au sein de la matrice cimentaire. La faible porosité initiale favorise le colmatage des pores lié à la formation des cristaux de calcite. La progression de la carbonatation en profondeur est réduite, ce qui assure une meilleure protection des armatures.

■ Adhérence acier-béton

La grande résistance mécanique du BHP et sa microstructure interne permettent de mobiliser une liaison supérieure entre les armatures en acier et le BHP et donc d'améliorer les qualités d'adhérence, ce qui permet une réduction des longueurs d'ancrage et de scellement.

■ Réduction des flèches et des déformations des structures

Plusieurs propriétés, de nature soit rhéologique, soit mécanique, permettent de réduire les flèches et les déformations dans les structures et les dalles en BHP: résistance à la traction du béton plus grande, module d'élasticité plus élevé, fluage plus faible et adhérence acier-béton supérieure.

■ Propriétés thermiques

Les propriétés thermiques des BHP, telles que conductivité, diffusivité, chaleur spécifique et coefficient de dilatation ne diffèrent pas sensiblement de celles des bétons traditionnels.

3.2.6 - Performances des BHP

■ Des propriétés exceptionnelles à l'état frais

Les BHP présentent une fluidité, une ouvrabilité, une aptitude au pompage et un maintien de la plasticité dans le temps à l'état frais qui apportent de nombreux avantages lors de la mise en œuvre :

- garantie d'un bon remplissage des moules et des coffrages et de l'enrobage parfait des armatures ;
- amélioration de l'écoulement du béton, en particulier dans les zones très ferraillées ;
- réduction du délai d'exécution de l'ouvrage et gain de productivité ;
- exécution de bétonnages complexes dans des conditions d'accès difficiles.

Le BHP présente aussi :

- une bonne stabilité à l'état frais, ce qui garantit l'absence de ségrégation ;
- une faible viscosité qui autorise le pompage sur de longues distances.

■ Des performances élevées aux jeunes âges

Les caractéristiques physico-chimiques et la cinétique spécifique de durcissement des BHP, leur confèrent des résistances mécaniques importantes aux jeunes âges (par exemple, 15 MPa à 12 heures ou 30 MPa à 24 heures), ce qui autorise :

- des décentrement et des décoffrages rapides ;

Ordre de grandeur des principales caractéristiques des BHP

		BHP sans fumée de silice	BHP avec fumée de silice
Résistance en MPa			
Compression sur cylindres	28 jours	60	80-90
	1 jour	25	30
	7 jours	50	75
Résistance en traction en MPa (28 jours)		4,2	5,5
Module d'élasticité (28 jours)		42000	52000
Coefficient de fluage		1,5	0,8
$E_{eff}/Liant_{eq}$		0,38	0,34
Dosage en ciment en kg/m³		400	420
Teneur en fumée de silice (de % de ciment)		–	8

Tableau extrait du guide pratique IREX à l'attention des bureaux d'études pour l'application des règles BAEL aux BHP.



Les réponses des BHP à des contraintes spécifiques

Contraintes	Performances des BHP	Commentaires
Recherche de gain de productivité	Maniabilité	Mise en œuvre plus facile avec des ferrallages denses
	Pompabilité	
	Résistance aux jeunes âges	Accélération de la rotation des coffrages et des mises en tension de la précontrainte
Accroissement de la durabilité	Forte compacité	Matériau particulièrement adapté pour des ouvrages soumis à des conditions climatiques rigoureuses, des agressions chimiques ou à des ambiances marines
	Faible porosité	
Construire des structures plus légères et plus élancées	Performances mécaniques	Une nouvelle liberté de conception pour les architectes et les ingénieurs

- l'optimisation des cycles de coffrage/décoffrage et des séquences de production ;
- des délais avant mise en tension des armatures de précontrainte raccourcis ;
- la fabrication d'éléments préfabriqués, dans certains cas, sans utilisation de traitement thermique.

Il en résulte une simplification et une approche différente de l'organisation des chantiers, une augmentation de la productivité et des gains significatifs sur les délais de construction des ouvrages.

■ Des résistances mécaniques importantes à long terme

Les BHP offrent des performances mécaniques élevées à long terme en compression, traction, flexion et cisaillement. Ces performances se traduisent en particulier par :

- une résistance importante aux agents agressifs ;
- un faible risque de corrosion des armatures ;
- une forte résistance aux cycles de gel/dégel ;

- une faible perméabilité ;
- une meilleure adhérence acier/béton ;
- un fluage inférieur à celui des bétons traditionnels ;
- une augmentation du module d'élasticité ;
- une diminution des sections de béton.

Ces gains de performance se traduisent par un coût d'entretien réduit.

3.2.7 - Association de bétons et d'armatures à hautes performances

Une étude a été menée dans le cadre du PROJET NATIONAL BHP 2000, elle était destinée à valider les potentialités d'association des Bétons à Hautes Performances (BHP) et des armatures à haute limite élastique (AHP). Elle a permis de justifier la possibilité et l'intérêt de dimensionner des ouvrages en associant BHP et AHP.

Exploitation des performances des BHP		
Acteurs	Performances	Objectifs
Architecte	Pérennité architecturale	Création de nouvelles formes et de nouveaux ouvrages
		Qualité et homogénéité des parements
Ingénieur d'études	Résistances mécaniques à long terme	Gain de dimensionnement
		Allègement des ouvrages (tablier et fondations)
		Structures plus élancées
		Augmentation des portées
Ingénieur Méthodes	Rhéologie	Exploitation de la rhéologie aux jeunes âges
	Propriétés à l'état frais	Optimisation des cycles de construction et de l'organisation des chantiers
	Performances aux jeunes âges	Décoffrage et mise en tension rapides
		Pompabilité
		Facilité de mise en œuvre
Optimisation des cadences		
Responsable du chantier	Propriétés à l'état frais	Recherche de productivité
		Réduction des délais d'exécution
	Performances aux jeunes âges	Réduction des coûts de main d'œuvre
Préfabricant	Durabilité Vitesse de durcissement Fluage	Augmentation des cadences de production Réalisation d'éléments plus durables Application de la précontrainte plus tôt Réalisation de produits plus fins, plus élancés, plus légers
Maître d'œuvre Maître d'ouvrage	Durabilité	Augmentation de la durée de service de l'ouvrage
	Réduction de l'entretien et de la maintenance	Réduction du coût global de l'ouvrage
		Économie de maintenance
Usager	Réduction de l'entretien et de la maintenance	Faibles perturbations sur la circulation lors des travaux d'entretien
		Impact environnemental (réduction de matière et économie de ressources naturelles)

L'association de bétons à Hautes performances et d'armatures à hautes performances offre de nombreux atouts :

- réduction des quantités d'armatures (section, diamètre, nombre) ;
- amélioration de l'adhérence acier-béton ;
- réduction des sections de coffrage ;
- amélioration des conditions de bétonnage (fer-raillage simplifié) ;
- gain de main d'œuvre ;
- plus grande durabilité et moindre déformabilité des structures ;

- conception de structures plus élancées et plus légères (la rigidité des structures est augmentée) ;
- augmentation de la résistance à la fissuration et à la ruine.

Les lois de comportement des éléments de structure en BHP armés avec des AHP sont similaires à celles du béton armé classique (adhérence, ouverture des fissures et espacement), les règles de dimensionnement de l'EUROCODE 2 peuvent donc être adaptées aux BA-HP.

Les études ont démontré qu'il convient pour optimiser les performances du matériau d'associer des couples adaptés de BHP-AHP (Béton B60 avec armatures Fe E 800, par exemple).

3.2.8 - Atouts des BHP

Les Bétons à Hautes Performances offrent des atouts qui ont été démontrés par des campagnes d'essais en particulier dans le cadre du Projet National BHP 2000, puis validés et confirmés sur de très nombreux chantiers.

3.2.9 - Analyse économique

L'analyse des ouvrages en BHP, selon une approche en coût global, basée sur la valorisation de ses atouts permet de valider son intérêt économique

3.2.10 - Principaux domaines d'applications et principales références

Un nombre croissant d'applications à caractère exceptionnel ou plus modeste ont permis l'exploration progressive des diverses potentialités offertes par les Bétons à Hautes Performances et mis en lumière leurs nombreux atouts.

■ Structures coulées en place

La formulation et la fabrication de bétons dont la résistance caractéristique à 28 jours atteint 60 MPa voire 80 MPa est aujourd'hui de pratique courante en France et n'est plus du domaine expérimental. De nombreux ouvrages ont été exécutés en BHP ces dernières années.

Cette « banalisation » des BHP est rendue possible par la disponibilité du produit au sein du réseau des centrales BPE à peu près partout en France. Ces BHP sont en général formulés avec des granulats

TRADUCTION DES PERFORMANCES MÉCANIQUES DES BHP

- > **Résistances en traction supérieures**, ce qui permet de limiter la précontrainte et d'amincir la section transversale en béton.
- > **Performances en flexion** qui se traduisent par une augmentation de la rigidité en flexion et qui permettent un allongement des portées et offrent des gains importants de poids propre, générant des économies de fondations.
- > **Fluage inférieur** à celui des bétons ordinaires et évolution plus rapide. Il en résulte des redistributions d'efforts plus faibles au cours de la durée du chantier et des premières années de mise en service et des déformations des structures moindres, ce qui autorise la conception de structures plus élancées et permet d'assurer un meilleur contrôle géométrique des ouvrages et une meilleure efficacité de la précontrainte. Les faibles déformations différées permettent de réduire les pertes de précontrainte.
- > **Réduction de l'ouverture de fissures**. L'emploi de BHP permet de réduire l'ouverture des fissures à contraintes égales dans les armatures et donc d'augmenter la résistance à la fissuration et à la ruine des structures.
- > **Meilleure adhérence acier béton**, d'où une réduction sensible des longueurs de recouvrement, de scellement et d'ancrage des armatures et une simplification des dispositions constructives et des schémas de ferrailage.
- > **Augmentation des valeurs de contrainte de tractions admissibles** ce qui permet de réduire les sections d'armatures.
- > **Majoration des contraintes de cisaillement admissibles**. Il en résulte la possibilité de réduire, par exemple, les épaisseurs des âmes des poutres en BHP sans augmentation corrélative des armatures transversales.
- > **Réduction des épaisseurs d'enrobage** compte tenu des faibles porosités et sensibilités aux agents agressifs des BHP.

Analyse économique des BHP		
Atouts	Surcout	Gain
Performances du béton frais	Superplastifiant	Facilité de mise en œuvre Mains-d'œuvre réduite
Performances aux jeunes âges	Types de ciment	Décoffrage rapide
	Cure soignée	Mise en précontrainte accélérée
		Simplification des méthodes de réalisation
Performances mécaniques	Dosage en ciment	Gain de matière (structure et fondation)
Optimisation des structures	—	Délais de réalisation plus courts
		Productivité du chantier
Durabilité	Fumées de silice	Durée de service de l'ouvrage
Réduction des frais d'entretien et de maintenance	Optimisation de la formulation	Frais de maintenance
		Pas de corrosion d'armature
Esthétisme et pérennité architecturale	Granulats spécifiques	Intégration de l'ouvrage dans son environnement

locaux. Les centrales à béton sont équipées des automatismes, des process de fabrication, des procédés de dosages et des procédures de contrôle rigoureuses assurant la reproductibilité des caractéristiques et la maîtrise de la fabrication des BHP.

Le réseau BPE a fait la preuve depuis plusieurs années à l'occasion de nombreux chantiers de sa pleine maîtrise industrielle des BHP et de sa capacité à livrer tous types de chantier.

Nota

Le malaxage doit généralement être prolongé par rapport à celui d'un béton courant. Le BHP requiert un niveau de qualité de fabrication important compte tenu de la sensibilité de son comportement aux variations de proportion des constituants, en particulier du dosage en eau.

■ **Produits préfabriqués en béton**

Le BHP est utilisé dans l'industrie du béton depuis de nombreuses années pour la réalisation de multiples éléments préfabriqués en usine. L'industrie des produits préfabriqués en béton a su, depuis son origine, produire des bétons à hautes performances grâce à ses techniques spécifiques et ses conditions industrielles de production. Elle dispose de moyens et de techniques bien adaptés pour pro-

duire des éléments avec des performances mécaniques et une durabilité encore améliorées en particulier grâce à l'association d'outils et de méthodes de production performants avec les progrès réalisés ces dernières années dans l'optimisation des matériaux tels que les BHP.

Le développement des BHP présente un grand intérêt pour l'industrie du béton. Ces matériaux permettent de proposer des produits nouveaux encore plus performants (allègements et réductions de sections) et d'envisager l'accès à de nouveaux marchés grâce à l'amélioration des performances.

Parmi les plus usuels, on peut citer les poutres et les poutrelles précontraintes pour plancher qui grâce au BHP ont leur section diminuée de 30 %, ainsi que les dalles alvéolées, qui pour une épaisseur n'excédant pas 25 cm permettent des portées de l'ordre de 15 m, ainsi que les tuyaux d'assainissement et les poutres PRAD pour la réalisation d'ouvrages routiers ou ferroviaires et de très nombreux produits précontraints par fils adhérents.

Les BHP permettent de précontraindre les produits à des contraintes plus élevées et donc d'optimiser les sections. Ils permettent aussi, pour la plupart des produits, de diminuer la durée des cycles de fabrication en autorisant des décoffrages rapides et des mises en précontrainte accélérée et de concevoir des éléments plus légers donc plus faciles à mettre en œuvre ou à poids équivalent de portées



plus importantes. La diminution des déformations différées (retrait et fluage) est aussi un avantage déterminant en préfabrication. Ils autorisent la réalisation de produits élancés offrant aux architectes de nouvelles possibilités de création. Les usines de produits préfabriqués en béton utilisent régulièrement pour la fabrication de nombreux produits, des BHP dont la résistance à la compression dépasse 60 MPa et pouvant atteindre jusqu'à 100 MPa.

La réduction des sections, consécutive aux meilleures caractéristiques mécaniques du matériau, permet de diminuer le poids des éléments et par suite les coûts de manutention, de transport et de mise en place.

Sur le plan environnemental, les BHP s'insèrent complètement dans la démarche visant à utiliser encore mieux les ressources en énergie et en matières premières.

3.2.11 - Documents de références

Synthèse des travaux du Projet national BHP 2000 sur les bétons à hautes performances.

Propriétés du BHP valorisées en fonction du type de structures						
Type de Structure	Propriétés valorisées					
	Ouvrabilité	Résistance à court terme	Résistance mécanique	Tenue à l'abrasion	Déformations différées	Durabilité
Ponts routiers, Autoroutiers, Ferroviaires	X	X	X		X	X
Tunnels Travaux Souterrains		X	X			X
Assainissement	X			X		X
Préfabrication	X	X	X		X	X
Bâtiments de hauteur	X	X	X			
Ouvrage en site maritime						X