

5.6 Les bétons hautes performances – BHP

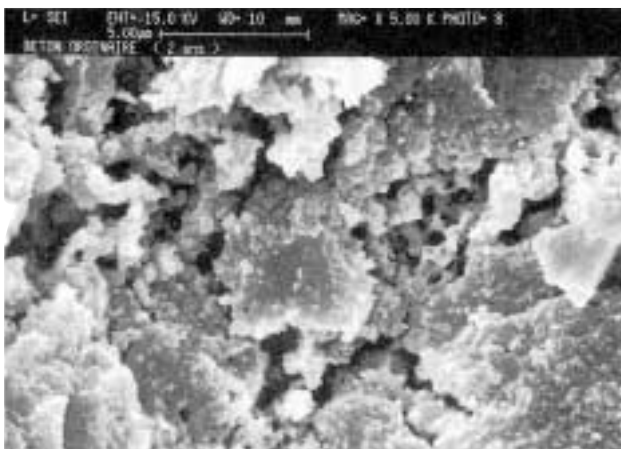
Les bétons de hautes performances (BHP)

Les bétons de hautes performances (« BHP ») ont d'abord été appelés « bétons de hautes résistances », car c'est cette caractéristique facilement mesurable qui a fait des progrès spectaculaires. Elle est passée de 30 à 35 MPa il y a quelques années, à plus de 100 MPa pour les bétons à très hautes performances (« BTHP »), voire plus de 200 pour des bétons de laboratoire.

Les gains de résistance ne sont pas les seuls avantages de ces bétons qui tirent leurs propriétés d'une forte réduction de leur porosité.

Ils sont également plus résistants aux agents agressifs, aux phénomènes de gel-dégel et, de façon générale, présentent une durabilité accrue. Les bétons HP permettent de réaliser des structures soumises à des contraintes élevées ou des ouvrages subissant un environnement sévère (climat, agressions marines, effets du gel).

Ils apportent aussi des résistances précoces élevées au béton, ce qui permet d'accélérer les cadences de fabrication en usine ou sur chantier.



■ Composition

La recherche des hautes performances passe par la réduction de la porosité du béton, c'est-à-dire de son pourcentage de vides, ainsi que le prévoit la théorie de Féret. Celle-ci établit une proportionnalité entre la résistance et l'inverse du carré du volume d'air et d'eau libre.

La limitation de la porosité implique essentiellement deux conditions :

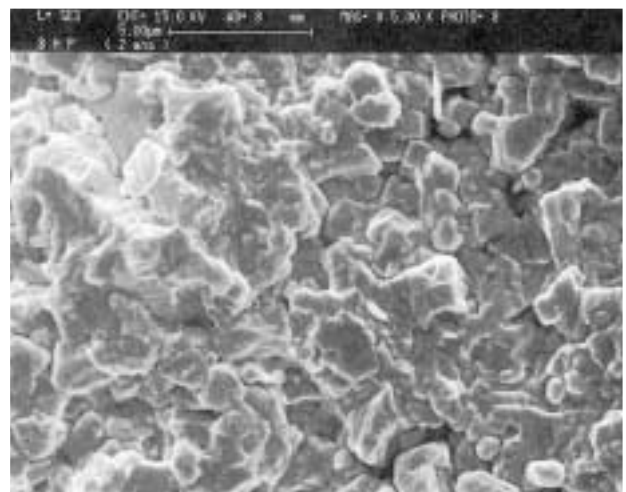
- une très faible teneur en eau ;
- une granulométrie comportant des éléments fins en quantité suffisante pour remplir les espaces entre les plus gros granulats.

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 mobilisé par l'hydratation du ciment). Les rapports E/C utilisés 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, ce qui augmente leur réactivité, facteur de résistance à court terme.

L'utilisation de particules ultrafines pour compléter la granulométrie du béton n'est vraiment nécessaire que pour les bétons THP. On peut réaliser des bétons HP avec des ciments usuels de type CEM I 52,5 et une granulométrie bien étudiée, le recours à des particules de moins d'un micron de diamètre ne s'imposant que dans l'élaboration des bétons les plus performants.

Les ultrafines les plus utilisées dans ce cas sont les fumées de silice (teneur en $\text{SiO}_2 > 90\%$), sous-produits de l'industrie du ferrosilicium, conditionnées pour les rendre utilisables (généralement par densification ou suspension dans l'eau).



Vues de béton ordinaire et de BHP au microscope électronique (grossissement 5 000).

Les fumées de silice ont une action sur la granulométrie du mélange, mais présentent également une réactivité avec la chaux libre, liée à leur caractère pouzzolanique.

Les formulations actuelles de béton HP comportent le plus souvent en moyenne 400 à 500 kg de ciment, environ 700 kg de sable et 1 000 à 1 100 kg de gravillons. L'emploi d'un superplastifiant dosé entre 1 et 2 % du poids de ciment permet de réduire la teneur en eau de gâchage à une valeur comprise entre 140 litres et 160 litres.

■ Propriétés

- Le béton frais présente une bonne ouvrabilité liée aux superplastifiants entrant dans sa composition.

Les BHP sont des bétons fluides avec un E/C très bas (0,30 à 0,35). Les valeurs d'affaissement au cône sont supérieures à 15 cm dans la plupart des cas.

- Pour le béton durci, la propriété fondamentale sur laquelle on a déjà insisté et dont découlent la plupart des autres, est sa faible porosité. Un béton courant présente une porosité de 10 à 12 % ; pour un béton HP, elle est inférieure à 5 %.

- La durabilité est améliorée du fait de l'abaissement de la porosité et de la perméabilité. On constate, en particulier, une amélioration de la résistance aux agressions chimiques, qui se traduit par un comportement favorable en milieu marin ou en présence d'eaux agressives. La progression de la carbonatation en profondeur est réduite, ce qui assure une meilleure protection des armatures.

Les bétons HP présentent généralement une résistance au gel améliorée.

- L'ensemble des résistances mécaniques (compression, traction) est augmenté, alors que les déformations sous charges instantanées et surtout sous charges permanentes sont diminuées.

■ Caractéristiques

La résistance à la compression

C'est une caractéristique souvent utilisée pour classer les bétons HP. C'est ainsi que les spécialistes distinguent :

Classe	Résistance caractéristique à la compression ($f_{c,j}$) à 28 jours MPa
Bétons ordinaires.....	20 à 50
Bétons à hautes performances (HP).....	60 à 100
Bétons à très hautes performances (THP)	100 à 150
Bétons exceptionnels.....	> à 150

* $f_{c,28}$: la résistance caractéristique définie par les règles BAEL.

Les gains de résistance se manifestent dès le jeune âge ; un béton à 60 MPa à 28 jours peut dépasser 15 MPa à 24 heures et 40 MPa à 7 jours. En l'absence de caractéristique particulière, on adopte comme contrainte de calcul ($f_{c,28}$) la valeur déduite de la formule retenue pour les bétons usuels par les règles BAEL :

$$f_{c,28} = 0,85 \frac{f_{ck}}{j_b}$$

f_b , coefficient de sécurité généralement pris égal à 1,5, sera probablement réduit dans l'avenir dans la

mesure où les bétons de hautes performances font l'objet d'un niveau de qualité supérieur à la moyenne. La contrainte de traction de calcul (f_{tj}) se déduit de la contrainte de compression (f_{cj}), selon la formule réglementaire habituelle :

$$f_{tj} = 0,6 + 0,06 f_{cj} \text{ (MPa)}$$

A titre d'exemple, pour un béton présentant une résistance caractéristique de 80 MPa, la contrainte en compression de calcul est de 45,3 MPa, la contrainte en traction de calcul est de 3,32 MPa.

Le module de déformation

De même que pour les bétons usuels, le module de déformation, instantané au jour j , peut être déduit de la résistance caractéristique selon la formule retenue par les règles BAEL :

$$E_{ij} = 11\,000 \sqrt[3]{f_{c,j}}$$

Le fluage

Il est très inférieur à celui des bétons usuels.

Le coefficient de fluage

$$\frac{\text{déformation différée}}{\text{déformation instantanée}}$$

de l'ordre de 2 pour les bétons usuels, est compris entre 1 et 1,5 pour un béton à 60 MPa.

■ Applications

- La résistance au jeune âge du béton autorise des décoffrages rapides, ainsi que des mises en précontrainte accélérées.

Les applications sont nombreuses en préfabrication (poutres, planchers), et sur chantier (voussoirs de ponts, poteaux).



- Les hautes résistances en service permettent la réalisation des structures de bâtiments et d'ouvrages (bâtiments de grande hauteur, ponts, enceintes nucléaires, structures réticulées) conciliant contraintes élevées et diminution des sections.
- La durabilité et la résistance aux agents agressifs sont déterminantes pour les ouvrages à la mer, les structures offshore, les ouvrages exposés au gel.
- Il faut également mentionner l'emploi de bétons HP en relation avec leur bonne ouvrabilité. C'est le cas des bétons utilisés dans les bâtiments de grande hauteur et qui sont pompés, ou dans la réalisation de poutres avec un ferrailage laissant peu de place au passage du béton.

Réalité des bétons HP

■ Les ouvrages d'art

Le pont sur l'Elorn

Le pont sur l'Elorn, qui relie Quimper à Brest, comporte une travée centrale de 400 m pour une longueur totale de 800 m. C'est un record mondial pour un pont haubané à nappe centrale. Les 104 haubans répartis en quatre nappes mesurent de 37 à 240 m et sont ancrés à deux pylônes de 115 m de hauteur réalisés en B 60.



Le pont de Joigny

Le pont de Joigny est un pont expérimental en béton de hautes performances, s'intégrant au projet national « Voies nouvelles du matériau béton ».

Pour la première fois en France, les performances du béton HP ont été prises en compte dans le dimensionnement du pont sur la base d'un béton de 60 MPa de résistance à la compression à 28 jours, sans fumées de silice.

L'ouvrage comporte trois travées (34 m, 46 m, 34 m) et est à deux nervures de 2,20 m de hauteur, avec précontrainte longitudinale totalement extérieure.

Cette technique de précontrainte permet d'alléger la structure (nervures à volume diminué aussi grâce à la résistance du béton) et rend possible le remplacement ultérieur de l'ensemble de précontrainte, intéressant pour un ouvrage auquel le matériau apporte une grande longévité.

Les 1 060 m³ de béton du tablier ont été coulés en continu, pendant vingt-quatre heures seulement, en plein mois de décembre.

Le béton HP étant de texture très fermée, il en résulte un aspect de surface très lisse, glacé, presque vitrifié.

L'esthétique y gagne, la durabilité aussi.



Le pont de Normandie

Avec sa travée centrale de 856 m (nouveau record pour les ponts à haubans) et ses pylônes de 214 m de hauteur en BHP, le pont de Normandie est un ouvrage d'art exceptionnel.

Du fait de sa particularité, il fait appel, pour sa mise en œuvre, à des bétons spécialement conçus pour chacune de ses parties :

- le béton de hautes performances (BHP 60 MPa), utilisé pour les voussoirs des rampes d'accès, permet le décoffrage rapide, la mise en tension accélérée des câbles de précontrainte et le poussage de la travée au rythme d'une longueur de voussoir tous les deux jours. Ceci grâce à la conjugaison du superplastifiant et d'un fort dosage en ciment,



- le béton de hautes performances est encore mis en œuvre pour réaliser les deux pylônes. Il s'agit du même béton que celui décrit précédemment. En effet, il rend possible le déplacement des coffrages autogrimpants dans des délais minimums pour des températures pouvant descendre à 5 °C.

Le pont de l'île de Ré

Les délais imposés à l'entreprise pour cet ouvrage de près de 3 000 m de long (construit en moins de 16 mois) ont été déterminants dans le choix du béton HP.

Alors que le cahier des charges ne prévoyait qu'un béton B40 pour les voussoirs, les cadences d'exécution de ces 798 pièces imposaient un démoulage à 15 heures, donc une résistance minimale de 12 MPa. Le béton réalisé qui présentait une résistance à 15 heures de plus de 20 MPa, atteint à 28 jours plus de 60 MPa. L'emploi des fumées de silice en association avec un superplastifiant a également nettement amélioré la maniabilité du béton.



Les viaducs de Sylans



Le tablier de ces ouvrages, de conception originale, comporte quatre âmes inclinées triangulées par des X précontraints.

Ces X sont réalisés séparément avant d'être mis en place dans une cellule où sont coulés les hourdis avec lesquels ils constituent l'ensemble d'un voussoir.

Pour respecter les cadences de production et permettre une mise en tension précoce, un BHP à 65 MPa a été utilisé.

La qualité du béton est également la garantie de la durabilité de ces ouvrages soumis à des conditions hivernales rigoureuses.

■ Le bâtiment

La Grande Arche

Le béton utilisé pour couler la partie supérieure de la Grande Arche de La Défense présente des résistances supérieures à 65 MPa et un slump de 22 à 25 cm, le béton utilisé a apporté à la fois la résistance exceptionnelle souhaitée et l'ouvrabilité rendue indispensable par un pompage sur une hauteur de plus de 100 m.



La Pacific Tower

La Pacific Tower à La Défense a été l'occasion d'une nouvelle avancée des BHP dans le domaine du bâtiment.

Pour la première fois en France, la structure verticale d'une tour a été réalisée avec un béton hautes performances de classe B 60, mis en œuvre industriellement sur le chantier.

Grâce à ce choix technologique, les sections des éléments porteurs ont pu être substantiellement diminuées et permettre à la fois un gain de surface utile, ainsi que des économies d'acier et du temps de décoffrage. Par ailleurs, le choix du BHP a été fait dans le but de réaliser un ouvrage qui résiste mieux aux agressions climatiques et atmosphériques polluées. Un plan qualité imposait une sélection rigoureuse des granulats en une seule trémie, ainsi qu'une vérification régulière, tous les 150 m³, de la résistance fixée à 72 MPa à 28 jours, du BHP prélevé à la sortie de la centrale.

Les Tours Cœur-Défense

Ce projet, conçu par le cabinet Jean-Paul Viguier est constitué de deux tours fines décalées, de trente-neuf niveaux, arrondies à leurs extrémités et de trois bâtiments bas qui donnent de l'ampleur à la façade sur l'esplanade. L'ensemble représente 220 000 m² de bureaux. Le noyau central de chaque tour et les poteaux de 1,10 m de diamètre ont été réalisés en béton HP de type B 80.



La Tour PB6

Cette tour est un immeuble à usage de bureaux de quarante étages soit 147 m de hauteur au-dessus du niveau d'accès situé sur le parvis de la Défense, trois niveaux de parking en sous sol, un niveau technique et, deux niveaux d'infrastructures de 3,40 m.

L'emprise en plan de la tour est constituée de deux ellipses de 74,84 x 31,18 m.

Les efforts sont repris d'une part par un noyau central de 31 x 14,10 m et, d'autre part, par seize

poteaux de façade et deux poteaux intérieurs.

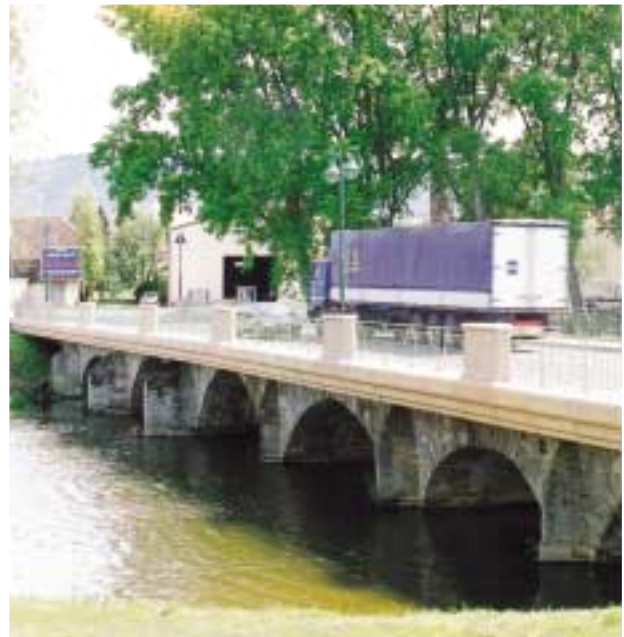
L'usage d'un béton BHP de type B 80 a permis de limiter le diamètre des poteaux les plus chargés à 1,30 m.

Maîtrise d'ouvrage : PB 6 développement – assistant maîtrise d'œuvre : Hines France – Maîtrise d'œuvre : Pei-Cobb-Freed & Partners – architectes : Saubot ; Rouit et associés – Entreprise générale : BATEG-VINCI

■ Les ouvrages de génie civil courants...

Le recours au BHP pour les ouvrages de génie civil courants n'est pas encore très fréquent. Pourtant certains maîtres d'ouvrage sont convaincus de leur intérêt technique et économique. Des DDE se sont résolument engagées dans cette voie depuis plusieurs années pour les réalisations d'ouvrages comme les ponts de Saint-Andoche à Autun, de décharge de l'Arroux ou de la rocade Est de Bourges. Ces ouvrages ont été réalisés en B 60 sans fumées de silice, avec des agrégats locaux et dans des conditions de mise en œuvre traditionnelles, ne requérant aucun équipement spécifique.

L'emploi des BHP dans le génie civil courant s'inscrit dans une démarche qualité nécessairement partagée par l'ensemble des partenaires et contribue à faire progresser la connaissance du matériau béton ainsi que sa mise en œuvre.



Pont de Saint-Andoche.



Pont de décharge de l'Arroux.

■ ... et la *préfabrication*

L'emploi du BHP commence à se développer dans la réalisation d'éléments fabriqués en usine.

Parmi les plus usuels, on peut citer les poutrelles précontraintes pour plancher qui grâce au BHP ont vu leur section diminuée de 30 %, ainsi que les dalles alvéolées, pour planchers également, qui pour une épaisseur n'excédant pas 25 cm permettent des portées de l'ordre de 15 mètres.



Dalle alvéolée.