

## Chapitre 2    Bétons à hautes performances (BHP)

1) Introduction : L'étude d'une composition de béton consiste à rechercher conjointement deux qualités essentielles : résistance et ouvrabilité, or ces 2 qualités sont étroitement liées l'une à l'autre mais elles varient en sens inverse. Ce problème ne peut être réglé que par des solutions de compromis.

2) Définition : Les BHP sont des formulations à faible rapport E/C qui font intervenir des adjuvants ayant pour fonction principale la réduction des besoins en eau.

$$\text{BHP} : 50 \leq f_{c28} \leq 80 \text{ MPa} ; 0,35 \leq E/C \leq 0,40$$

$$\text{BTHP} : 80 \leq f_{c28} \leq 150 \text{ MPa} ; 0,2 \leq E/C \leq 0,35$$

### 3) principales propriétés

3.1 Sur béton frais : une maniabilité accrue

3.2 Sur béton durci :

- Une augmentation des caractéristiques mécaniques (compression, traction, module d'élasticité) Tant aux jeunes âges qu'à long terme.
- Une plus grande imperméabilité à l'air et à l'eau, due à une compacité plus élevée.

- Une plus grande résistance aux agents agressifs d'où une meilleure durabilité
  - Une plus grande résistance à l'abrasion
  - Une meilleure tenue aux cycles de gel / dégel
  - Une faible perméabilité aux gazs et aux liquides
- Ces caractéristiques sont dues à la porosité très réduite de ces bétons.

#### 4/ Constituants du béton auto plaçant (BHP)

4.1 E/C :  $0,35 < E/C < 0,40$  → pour les BHP  
 $0,20 < E/C < 0,35$  → pour les BTHP

#### 4.2 les adjuvants

La quantité d'eau à introduire dans la formulation d'un béton peut être réduite (sans perturber l'ouvrabilité du béton) par l'utilisation d'adjuvants spécifiques, notamment des superplastifiants.

#### 4.3 la fumée de silice

L'ajout de la fumée de silice à la formulation d'un béton permet d'atteindre des résistances très élevées. l'optimum se situe entre 7 et 15% de la masse du ciment.

la fumée de silice est un sous-produit de la fabrication industrielle du ferro-silicium, contient de 85 à 98% de  $\text{SiO}_2$  en masse, des oxydes métalliques et des alcalis complétant la composition. récupéré dans les fumées émises par les fours électriques de fabrication des produits cette "fumée de silice" se présente sous la forme d'une poudre plus ou moins grisâtre et extrêmement fine dont les grains sont environ 100 fois plus petits que ceux du ciment, leur diamètre moyen étant d'environ  $0,1 \mu\text{m}$ . Cette silice ultra-fine a une double action

- physique (rôle de filler)
- chimique (rôle pozzolanique).

### 5) Rôle de la fumée de silice

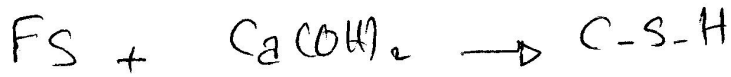
#### 5.1 - rôle physique de filler (effet granulaire)

La fumée de silice se présente sous forme de microsphères de silice. lorsqu'elles sont bien dispersées, vont s'empiler dans les espaces interstitiels restés vides entre les grains de ciment de diamètre 100 fois plus grand (Taille de  $30$  à  $100 \mu\text{m}$ ). Ceci améliore les propriétés rhéologiques du mélange frais (matériau plus fluide, pratiquement pas de ségrégation ni de ressuage) et permet ensuite l'obtention d'une pâte plus dense et de très forte compacité.



## 5.2 - rôle chimique (activité pouzzolanique)

des fumées de silice réagissent avec  $\text{Ca(OH)}_2$  libérée au cours de l'hydratation du ciment pour former des C-S-H selon la réaction pouzzolanique suivante :



la réaction pouzzolanique avec la fumée de silice débute quelques jours (3 jours) après le commencement des réactions d'hydratation du ciment.

## 6) Formulation des BHP

pour la formulation des BHP. De Larraud et Puch ont procédé à des essais sur coulis, en mesurant leur consistance à l'aide du cône de Marsh.

Une optimisation directe conduirait à plusieurs centaines de gâchées de béton, or c'est dans la pâte que réside les composants spécifiques des BHP, d'où l'idée de procéder à des essais sur coulis, le essai sur béton venant simplement en vérification des précédents, le squelette quant à lui n'a pas de raison de changer de nature ni de proportions par rapport à celui d'un béton ordinaire. Quant au volume de pâte, il est intéressant de le fixer lui aussi, car on peut travailler sur une gamme de coulis de même fluidité, ces coulis "reinjectés"

4 (chap: 2)



## Chapitre 3      Les Bétons autoplaçants (BAP)

1) Introduction : beaucoup de structures actuelles se caractérisent par la complexité de leur architecture (formes variables et courbures multiples), ainsi que par une forte concentration en armatures, ce qui rend souvent difficile l'utilisation des bétons de plasticité conventionnelle.

2) Définition : Le béton autoplaçant (BAP) est un béton capable de se mettre en place dans les coffrages les plus complexes et très encombrés uniquement sous l'effet de la pesanteur.

Ces bétons peuvent être mis en place sans vibration, seulement sous l'effet de la gravité, ils conduisent ainsi à une importante économie de main-d'œuvre, un faible ressuage.

On parle de béton (BAN) pour les dalles et toutes les parois horizontales et de béton (BAV) pour les murs et toutes les parois verticales.

Les BAP ont été développés dans les années 80 au Japon leur objectif était d'augmenter la cadence de travail en réduisant l'effectif du personnel sur chantier

et le temps de mise en oeuvre.

Le BAP améliore également l'environnement du travail en réduisant les nuisances sonores et en éliminant les problèmes de santé liés à l'utilisation du matériel de vibrations tel que la maladie « des mains blanches » et la surdité. Le Bap est donc appelé « la révolution tranquille dans la construction en béton ».

### 3) Constituants du béton autoplaçant (BAP)

Les bétons autoplaçants se distinguent des bétons traditionnels par la présence, d'une part, de fortes teneurs en additions minérales et, d'autre part, d'agents colloïdaux.

- 3.1. Additions minérales : - l'utilisation des additions minérales (fumées de silice, laitiers, cendres volantes, calcaires, ... etc.), qui sont moins réactives à court terme que le ciment, ce qui permet d'avoir un temps prolongé d'ouvrabilité.
- la combinaison de plusieurs matériaux cimentaires ayant des granularités différentes permet également d'améliorer, de façon générale, la granulométrie du mélange de béton, ce qui favorise à la fois une grande fluidité, une bonne stabilité du béton et une bonne déformabilité du béton à l'état frais.

3.2 Agents colloïdaux : l'incorporation d'agents colloïdaux dans les bétons autoplaçants augmente de façon significative leur stabilité (en fixant l'eau dans le mélange) ce qui diminue le phénomène de ressuage et donne une plus grande cohésion au béton. Bien que l'agent colloïdal augmente de façon importante la résistance du béton frais à la ségrégation et au ressuage, il accroît toute fois la demande en eau du mélange, d'où la nécessité, souvent, de l'utiliser en présence de superplastifiant. Ces produits sont à la base de longues molécules polymériques (polysaccharides) ou de dérivées celluloseuses. Ils se présentent généralement sous forme de poudre.

3.3 Le ciment : le ciment générale utilise pour la confection d'un BAP est le CPA - CEM I 42,5 ou bien le CPJCEM II/A 42,5.

Le dosage est de 300 à 350  $\text{Kg/m}^3$  en complétant la masse d'addition de siltre entre 120 et 200  $\text{Kg/m}^3$

3.4 Les granulats : la confection d'un bon béton autoplaçant utilise généralement des granulats roulés de rivières et un rapport de fines plus important, en assurant les conditions suivantes :



- rapport granulats / sable exprimé en masse est de 1 dans un

bap, du fait que les frottements entre les granulats limitent l'étalement et l'aptitude au remplissage des bétons, la quantité de granulats est donc limitée.

-  $10 \text{ mm} < D_{\text{max}} < 20 \text{ mm}$

le risque de blocage dans un milieu portement ferrailé augmente lorsque le  $D_{\text{max}}$  augmente.

$D_{\text{max}}$  : diamètre du plus gros granulats utilisé ds un BAP.

3.5 l'eau :  $E/C < 0,50$

la fluidité souhaitée sera obtenue par l'utilisation de superplastifiant.

4 Caractérisation d'un BAP à l'état frais : pour valider une formule de Bap, 3 essais à vérifier :

- La mobilité en milieu non confiné (essai d'étalement)
- La mobilité en milieu confiné (essai de la boîte en L ou essai des anneaux japonais)
- La stabilité (résistance à la ségrégation et au ressuage)

## 4.1 Mobilité en milieu non confiné

Essai d'étalement : il permet de mesurer la consistance d'un béton. Cet essai s'effectue comme un essai d'affaissement au cône d'Abrams.

Cependant l'affaissement étant toujours  $>$  à 25 cm, on mesure le diamètre moyen (moyenne sur 2 diamètres orthogonaux) de la galette de béton obtenue au bout d'une minute. ainsi que le temps nécessaire à l'obtention du diamètre d'une galette de 50 cm de diamètre.

	Etalement (cm)
SF <sub>1</sub>	55 - 65
SF <sub>2</sub>	65 - 75
SF <sub>3</sub>	75 - 85

SF<sub>1</sub> : Non ou faiblement armé ( dalle de maison )  
bétonnage à la pompe par injection aux sections  
suffisamment petites ( pieux et certains fondations  
profondes )

SF<sub>2</sub> : Voiles, poteaux, etc...

SF<sub>3</sub> :  $\Delta_{max} = 16$  cm, utilisée pour les applications  
verticales dans les structures avec un ferrailage  
dense.

Rq : une valeur de 60 à 75 cm est en général visée pour obtenir  
un B20.

5. (chap: 3)

## 4.2 Mobilité en milieu confiné :

### Essai des anneaux japonais

on utilise à nouveau le cône d'Abrams mais renversé, il permet de caractériser la mobilité du béton en milieu confiné et de vérifier que la mise en place du béton ne sera pas contrariée par des phénomènes de blocage inacceptables. le cône est placé sur une plaque plane, entourée par un anneau de 300 mm de diamètre, équipé de 16 barres HA de diamètre 16 mm. une fois le cône rempli, on soulève ; ce qui laisse écouler le béton à travers les barres. on mesure le diamètre de la galette obtenue.

## 4.3 Stabilité

### Essai de stabilité au Tamis

Cet essai complète les essais permettant d'apprécier la mobilité, en milieu confiné ou non, en caractérisant la stabilité. il consiste à évaluer le % en masse de laitance d'un échantillon de béton ( $4,8 \pm 0,2 \text{ kg}$ ) passant à travers d'un tamis de 5 mm.

0%  $\leq$  laitance  $\leq$  15%  $\rightarrow$  stabilité satisfaisante

15%  $\leq$  laitance  $\leq$  30%  $\rightarrow$  stabilité critique

laitance  $>$  30%  $\rightarrow$  stabilité très mauvaise



Essai de ressuage : des particules solides qui sont plus denses que l'eau sédimentent, l'eau est ainsi chassée vers le haut.

le ressuage max est de  $0,5 \text{ ml/cm}^2$ .

la capacité de ressuage peut être mesurée par l'essai de l'aéromètre modifié.

### 5. La formulation d'un B2p

La formulation se fait par tâtonnement. la formule ne peut être optimisée et vérifiée que par des essais effectués la plupart du temps directement sur béton.

1) Définition : des bétons à poudre réactive (BPR) sont apparus en 1995 pour satisfaire aux exigences de résistance tout en conservant une bonne ouvrabilité.

Les BPR sont des micro bétons armés de microarmatures, dans lesquels la taille de tous les constituants est divisée par 100 par rapport à un béton ordinaire. Pour obtenir des performances exceptionnelles, la porosité est réduite à l'extrême. Ils contiennent un sable très fin (max 600µm), de fortes dosages en ciment, de la fumée de silice, du quartz broyé, une teneur en eau très faible et un super-plastifiant. Pour augmenter encore leur performances, certains BPR subissent un traitement thermique au dessus de 90°C.

## 2) Formulation des BPR

- Un ciment à faible teneur en  $C_3A$
- un sable fin : le sable constitue le plus gros granulat du BPR, sa taille moyenne est  $\ll$  à 600µm.
- Une grande quantité de fumée de silice  
L'ajout de la fumée de silice densifie la microstructure du matériau et affine sa porosité.

- Quartz broyé : le quartz est une poudre, issue de broyage d'un sable très riche en silice ( $\text{SiO}_2 > 98\%$ ). Le quartz broyé utilisé pour les BPR a une taille moyenne de 50  $\mu\text{m}$ , il est considéré comme inerte ou faiblement réactif en absence de traitement thermique. Son incorporation dans le béton pourrait être d'un grand intérêt en cas de traitement thermique.

Le quartz et la fumée de silice constituent 25% de la masse de ciment et servent à :

- optimiser l'étendue granululaire du mélange
- augmenter sa compacité.

- des micro fibres : l'ajout des micro fibres dans le béton lors du gâchage permet d'augmenter la ductilité du matériau durci. En effet, lors de la mise en traction du matériau, les efforts seront repris par les fibres et non pas seulement par la matrice solide.

Le BPR est homogène mécaniquement mais très fragile et on introduit des microfibrilles pour améliorer sa ductilité

\* ductilité : c'est la capacité d'un élément de se déformer avant la rupture

- E/c faible
- Un superplastifiant



3 - Effet du traitement thermique : le traitement thermique vise à améliorer la microstructure en activant la réaction pozzolanique. Ceci est attribué à l'hydratation rapide et à l'accélération de la réaction pozzolanique du quartz broyé et de la fumée de silice.

Le quartz broyé réagit alors par réaction pozzolanique au dessus de  $200^{\circ}\text{C}$ , l'espacement des feuillets de C-S-H (porosité manométrique) diminue. On peut aussi presser les BPR traités thermiquement avant et pendant la prise pour augmenter leur compacité.

#### 4 - Qualités exceptionnelles du BPR

- ils ont un caractère autoplasant
- ils permettent parfois des temps d'exécution de chantier plus courts
- leur performances mécaniques autorisent la diminution d'épaisseur et donc du poids des structures.
- leur durabilité très importante permet de ne pas envisager le coût d'entretien.

deux caractéristiques exceptionnelles résultent de l'application de 4 principes fondamentaux

- Amélioration de l'homogénéité par optimisation du mélange granulaire et éventuellement par suppression des gros granulats.
- Amélioration de la compacité par optimisation du mélange granulaire et éventuellement par pressage avant et pendant la prise
- Amélioration de la microstructure par traitement thermique
- Amélioration de la ductilité par ajout des microfibrilles métalliques.

Ces bétons (BPR) présentent des propriétés remarquables de performances mécaniques, mais aussi de durabilité, mais ils restent des matériaux de construction chers et ne sont appliqués que dans un nombre restreint de pays. La première application mondiale est la passerelle de Sherbrooke réalisée en 1997.