

17/624.743

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique



## Mémoire de Master

Présenté à l'Université du 8 Mai 1945 Guelma

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département de: Génie Civil & Hydraulique

Spécialité: Génie Civil

Option: Conception et calcul des constructions (3C)

Présenté par: - Lakhlef Houssam

- Saidia M<sup>ed</sup> Amine

---

**Thème: ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE SUR LE BHP**

---

Sous la direction de: Dr. BENMARCE ABDELAZIZ

Juin 2012



# Remerciements



*Nous tenons, d'abord à remercier en premier lieu et avant tout, notre **DIEU** le tout puissant qui nous a donné la force et la patience pour effectuer le présent travail.*

*Nous remercions nos très chers parents pour leurs soutiens et leurs patiences.*

*Nous souhaitons également exprimer notre gratitude aux personnes qui nous ont aidé à effectuer ce travail et notamment notre encadreur: **Dr. BENMARCE ABDELAZIZ** pour son suivi et ses conseils durant l'évolution de ce travail ainsi qu'à tout les enseignants et personnel administratif du département de génie civil de l'université du 8 mai 1945 Guelma.*

*Nous tenons aussi à remercier tous les étudiants de la promotion 2012 de master 3C en particulier ainsi que tous les autres camarades du département génie civil.*

*Et tous ceux qui nous ont aidés de près ou de loin.*



# Dédicace

*A mes très chers parents qui ont toujours été là pour moi, et qui m'ont donné un magnifique modèle de labeur et de persévérance. J'espère qu'ils trouveront dans ce travail toute ma reconnaissance et tout mon amour.*

*A tous les enseignants du département du génie civil et a monsieur l'encadreur Dr. Benmarce Abdelaziz en particulier.*

*A mes chers frères et sœurs.*

*A mes oncles, tantes, cousins et cousines.*

*A mes meilleurs amis.*

*A toute la promotion de génie civil 2<sup>ème</sup> année master.*

*Je dédie ce travail.*

## *Sommaire*

*Résumé*

*Abstract*

*ملخص*

*Liste des figures*

*Liste des images*

*Liste des tableaux*

### **Chapitre I**

## **I Introduction générale**

<b>I Introduction générale.....</b>	<b>01</b>
-------------------------------------	-----------

### **Chapitre II**

## **II Constituants et méthodes de formulation des BHP**

<b>II.1 Généralités.....</b>	<b>05</b>
<b>II.1.1 Historique.....</b>	<b>05</b>
<b>II.1.2 Définition.....</b>	<b>06</b>
<b>II.1.3 Différentes classes de BHP.....</b>	<b>07</b>
<b>II.1.4 Domaines d'emploi du BHP.....</b>	<b>08</b>
<b>II.2 Les constituants du BHP.....</b>	<b>12</b>
<b>II.2.1 Les Ciments.....</b>	<b>12</b>

## Chapitre III

### III Caractérisations et mise en œuvre des BHP

<b>III.1 Caractérisation du BHP à l'état frais</b> .....	32
<b>III.1.1 Contrôle de la maniabilité des BHP</b> .....	34
<b>III.1.2 Ségrégation</b> .....	34
<b>III.1.3 Contrôle de la température</b> .....	35
<b>III.1.4 principaux essais de caractérisation et de contrôle de BHP</b> .....	36
<b>III.2 Caractérisation du BHP à l'état durci</b> .....	36
<b>III.2.1 Résistance mécanique</b> .....	37
<i>III.2.1.1 Comportement en compression</i> .....	37
<i>III.2.1.2 Comportement en traction</i> .....	39
<i>III.2.1.3 Le retrait</i> .....	40
<i>III.2.1.4 Le fluage</i> .....	41
<i>III.2.1.5 Le module d'élasticité</i> .....	41
<b>III.2.2 Propriétés physico-chimique</b> .....	41
<i>III.2.2.1 Résistance aux agents agressifs</i> ... ..	41
<i>III.2.2.2 Migration des ions chlorure</i> .....	41
<i>III.2.2.3 Tenue aux attaques gel/dégel</i> .....	42

<b>II.2.2 L'eau de gâchage</b> .....	12
<b>II.2.3 Les granulats</b> .....	12
<b>II.2.4 Les ajouts minéraux</b> .....	14
<i>II.2.4.1 Les fumées de silice</i> .....	14
<i>II.2.4.2 Les cendres volantes</i> .....	16
<i>II.2.4.3 Le laitier</i> .....	18
<b>II.2.5 Les adjuvants</b> .....	20
<i>II.2.5.1 Classification</i> .....	20
<i>II.2.5.2 Les Superplastifiants</i> .....	21
<b>II.2.6 Les Fibres</b> .....	23
<b>II.3 Méthodes de formulation des BHP</b> .....	23
<b>II.3.1 Méthode de l'Université de Sherbrooke</b> .....	25
<i>II.3.1.1 Rapport eau/liant</i> .....	26
<i>II.3.1.2 Dosage en eau</i> .....	27
<i>II.3.1.3 Dosage en superplastifiant</i> .....	28
<i>II.3.1.4 Dosage en gros granulat</i> .....	28
<i>II.3.1.5 Teneur en air</i> .....	29
<b>II.3.2 Méthode Française (LCPC)</b> .....	29

<i>III.2.2.4 Perméabilité</i> .....	42
<i>III.2.2.5 Tenue au feu</i> .....	43
<i>III.2.2.6 Carbonatation</i> .....	43
<b>III.3 Mise en œuvre</b> .....	43

## Chapitre IV

### IV Comportement au feu du BHP: Eclatement du béton

<b>IV.1 Les risques de feu</b> .....	46
<b>IV.2 Phénomène d'éclatement et d'écaillage du béton</b> .....	47
<b>IV.2.1 Mécanisme du phénomène</b> .....	47
<b>IV.2.2 Moyens de prévention de l'éclatement</b> .....	51
<b>IV.2.3 Influence des fibres polypropylène sur le comportement mécanique à haute température</b> .....	55

## Chapitre V

### V Conclusion générale et perspective

<b>V 1 Conclusion générale</b> .....	57
<b>V.2 Perspective</b> .....	58

## ***Résumé***

Les bétons à haute performance permettent d'optimiser les structures, de réaliser des ouvrages soumis à des contraintes élevées ou subissant un environnement sévère du fait de leur porosité extrêmement réduite, plus résistants aux agents agressifs, et, de façon générale, présentent une durabilité accrue. Le présent travail est une étude bibliographique sur les bétons à hautes performances (BHP). Cette étude s'articule autour de la formulation, les caractéristiques mécaniques, la mise en œuvre, le domaine d'utilisation ainsi que le comportement du BHP vis-à-vis du feu. Les BHP sont souvent utilisés pour des éléments de structure sollicités en compression ou des ouvrages précontraints pour lesquels la connaissance du comportement différé est de la plus haute importance. Un BHP est caractérisé par une très forte résistance à la compression, supérieure à 50 MPa à 28 jours, et des propriétés exceptionnelles à l'état frais (notamment en termes de viscosité), à court ou à long terme. La majorité des auteurs travaillant dans le domaine du BHP, confirme que les BHP sont des matériaux très durable, ont une grande résistance mais se comportent mal par rapport au feu. Une des meilleures solutions dans ce cas est l'ajout des fibres de polypropylènes.

**Mots clés:** Bétons à Hautes Performances, Formulations, Performances Mécaniques, Propriétés rhéologiques, Performances thermiques.



## ***Abstract***

High-performance concretes allow to optimize the structures, to realize works subjected to high constraints or undergoing a severe environment because of their extremely reduced porosity, more resistant to the aggressive agents, and, in a general way, present a greater durability. The present work is a bibliographical study on high-performance concretes (HPC). The present study articulates around the formulation, the mechanical characteristics, the implementation, and the domain of use as well as the behavior of the HPC when subjected to fire. The HPC is often used for structural elements subjected to high compressive strength or prestressed works for which the knowledge of the deferred behavior is of the highest importance. A HPC is characterized by a very strong compressive strength, more than 50 MPa in 28 days, and exceptional properties in the fresh state (particularly in terms of viscosity), in short or long-term. The majority of the authors confirm that the HPC is very sustainable material, have a high resistance but behaves badly with regard to the fire. One of the best solutions in this case is the addition of the fibers of polypropylenes.

**Key words:** High-performance concretes, Formulations, Mechanical Performance, Propriétés Rheological properties, Thermal Performances

## *Liste des images*

<b>Image II.1</b> Gratte-ciel construits au cours des années soixante et soixante-dix dans la région de Chicago .....	05
<b>Image II.2</b> Exemples d'applications du BHP.....	10
<b>Image II.3</b> Particules sphériques des cendres volantes.....	18
<b>Image II.4</b> Plérosphère contenant des particules céosphériques dans une cendre Volante.....	18
<b>Image II.5</b> Particules de cendres volantes de forme angulaire .....	18

## *Liste des tableaux*

<b>Tableau II.1</b> Les différentes classes de BHP.....	07
<b>Tableau II.2</b> Les gratte-ciel les plus hauts dans le monde.....	11
<b>Tableau II.3</b> Composition chimique type de certaines cendres volantes.....	17
<b>Tableau II.4</b> Composition chimique type de laitier de haut fourneau.....	19
<b>Tableau II.5</b> Caractéristiques physiques des fibres de polypropylène [Kalifa, et al. 2002]...23	
<b>Tableau III.1</b> Résistance à la compression d'un BHP à 7 et 28 jours.....	37

# Chapitre I

## Introduction générale

# Chapitre II

Constituants et  
méthodes de  
formulation des BHP

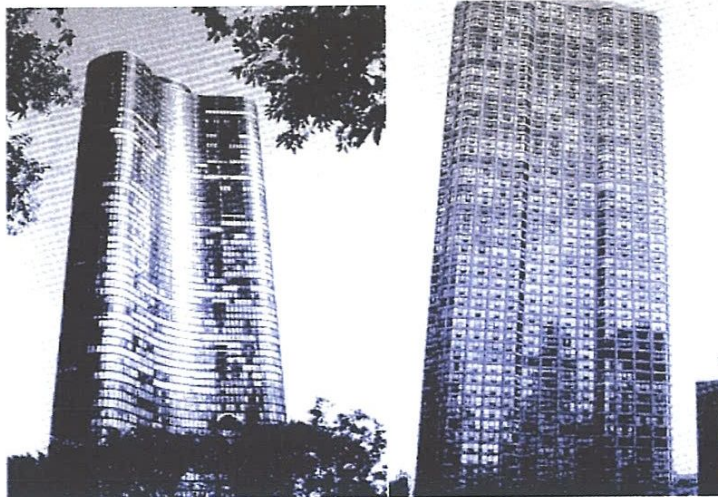
## II Constituants et méthodes de formulation des BHP

### II.1 Généralités

#### II.1.1 Historique

C'est au début des années 1960 dans la région de Chicago (Etats unis d'Amérique), que le béton à haute résistance a commencé à être utilisé en quantités importantes dans les grandes structures (même si la résistance des premiers bétons à haute performance qu'ils utilisaient semble tout à fait modeste par rapport aux normes actuelles).

Dans ces années, il était impossible de fabriquer du béton avec une résistance à la compression au-delà de 60 MPa environ parce que les réducteurs d'eau qui étaient disponibles à l'époque n'étaient pas capables de réduire le rapport eau/liant. A la fin des années 1960, les superplastifiants ont été utilisés dans le béton.



*Lake Point Tower 1965 (53 MPa)    River Plaza 1976 (77 MPa)*

**Image II.1** Gratte-ciel construits au cours des années soixante et soixante-dix dans la région de Chicago.

A la fin des années 1970, la fumée de silice a commencé à être utilisée comme complément à base de ciment dans le béton en Scandinavie, et au début des années 80 en Amérique du nord, à cette époque la résistance était de l'ordre de 100 à 150 MPa.

Plusieurs pays ont lancé de grands programmes de recherche sur le béton à haute résistance dans les années 1980.

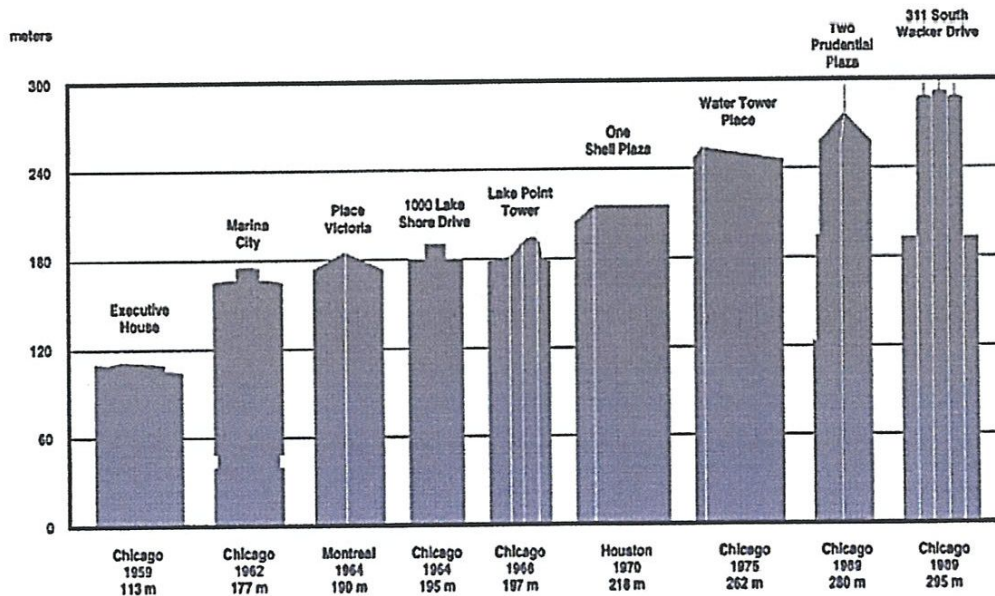


Figure II.1 Développement de la hauteur des gratte-ciel aux USA [1].

## II.1.2 Définition

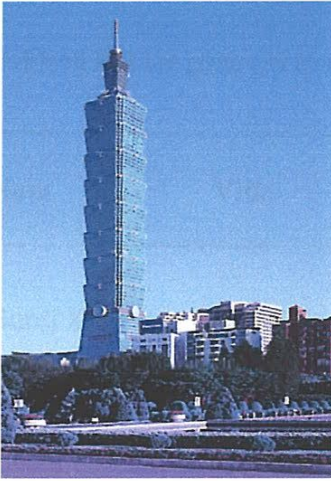
Le béton à haute performance est défini par l'Institut Américain du Béton comme étant le béton qui répond à des combinaisons spéciales de performance, et l'uniformité des exigences qui ne peuvent toujours pas être réalisées en utilisant systématiquement des constituants classiques et normaux de mélange, de mise en place, et de durcissement. Cette définition n'est pas définitive mais elle est différente selon les pays et aussi les auteurs [2].

davantage de possibilités pour la conception et l'aménagement des espaces de vie et de bureau.

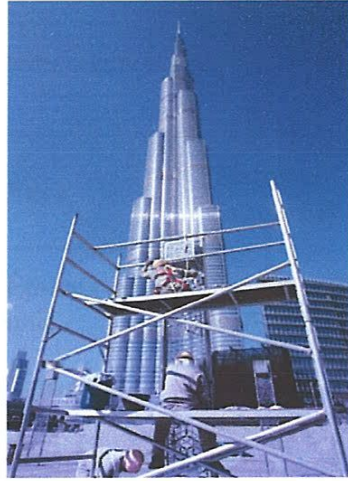
Dans l'industrie du préfabriqué, l'utilisation du BHP offre aussi de nouvelles possibilités (voir également infra). Citons notamment la possibilité de produire des cellules préfabriquées complètes, grâce notamment à l'économie de poids réalisée. Il ne paraît dès lors pas exclu qu'un bâtiment puisse évoluer dans le temps, par le biais de l'échange de cellules préfabriquées compatibles. Une chambre à coucher pourra par exemple devenir un salon, une salle de bain, une cuisine,...

Un autre avantage du BHP par rapport au béton conventionnel est l'aspect visuel des surfaces de béton, tant coulées sur place que préfabriquées. L'apparition de petites bulles d'air à la surface est souvent très limitée. La surface présente généralement une bonne texture, notamment grâce à la haute teneur en fines du béton. En outre, le BHP n'est guère soumis à la ségrégation, de sorte que la formation de nids de gravier est la plupart du temps évitée. La présence de fumées de silice permet d'obtenir parfois des teintes plus sombres. Tout dépend cependant des dimensions des fines particules, plus encore que de leur teneur. De beaux résultats peuvent également être obtenus grâce à l'utilisation de types de coffrage spécifiques (du bois non traité par exemple). Historiquement, le BHP a avant tout été conçu pour des applications très particulières, comme les buildings. Il a été à maintes reprises mis en œuvre aux Etats-Unis pour la réalisation de gratte-ciel, avec des bétons présentant des résistances de 120 à 130 MPa. Cependant, comme indiqué ci-dessus, le BHP peut également être une solution alternative pour les constructions réalisées habituellement en béton conventionnel. Le recours judicieux au BHP exige de toute évidence une collaboration très étroite entre le propriétaire, l'architecte, l'ingénieur, l'entrepreneur, la centrale à béton et le laboratoire de recherche. Quelques études de cas sont commentées ci-après [8].

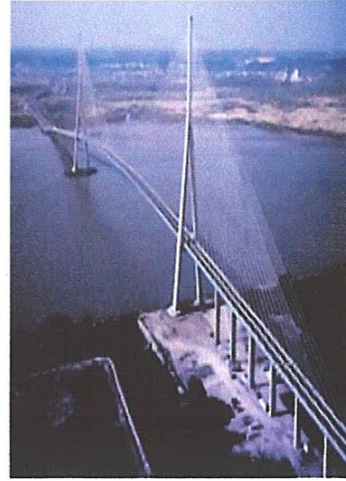




*Taipei 101 en forme de pagode  
Style oriental*



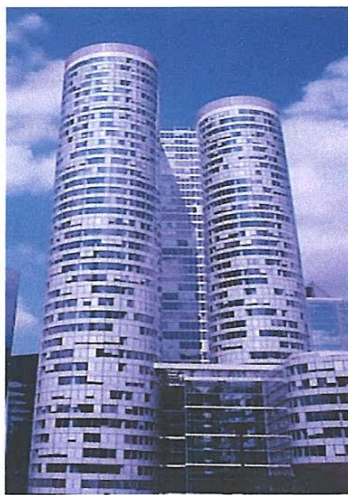
*Burj Khalifa  
(Émirats arabes unis)*



*Pont de Normandie  
(France)*



*Tours Jumelles (Malaisie)*



*Cœur Défense (France)*



*Pont de Normandie (France)*

**Image II.2** Exemples d'applications du BHP [9].

## II.2 Les constituants du BHP

### II.2.1 Les Ciments

Les ciments utilisés pour les BHP sont en général des ciments dits à hautes performances (CPA-CEM I 52.5) dont la résistance à 28 jours sur éprouvettes de mortier normal (4x4x16cm) est en général supérieur à 60 MPa.

Cependant certains ciments CFA 55 (CPA-CEM I 42,5) permettent d'atteindre des hautes résistances. Notons qu'on trouve actuellement sur le marché des CPJ, contenant des fumées de silice, dont l'application principale concerne les BHP. Les hautes résistances sont la plupart du temps obtenues grâce à une finesse de mouture élevée [4].

### II.2.2 L'eau de gâchage

Une des plus grandes difficultés rencontrées lorsque l'on calcule la composition d'un BHP et de déterminer la quantité d'eau. En effet, la maniabilité d'un BHP est contrôlée par plusieurs facteurs: la quantité initiale d'eau, la « réactivité du ciment », la quantité de superplastifiant et son degré de compatibilité avec ce ciment particulier.

La meilleure façon de trouver le bon rapport entre la quantité d'eau et la quantité de superplastifiant est d'utiliser un plan d'expérience [3].

### II.2.3 Les granulats

Les granulats utilisés pour les bétons à hautes performances ne sont pas a priori différents des granulats pour béton ordinaire, du moins dans les applications génie civil. Lorsque l'on cherche des résistances élevées, c'est à dire au-dessus de 80 MPa environ, il est

préférable de vérifier par des essais que les granulats permettent d'atteindre les performances souhaitées. Cependant le BHP ne se limite plus à des applications en génie civil, et ses caractéristiques lui permettent d'être utilisé dans des domaines divers. Un exemple est donné dans où on propose une application pour des bâtis de machines-outils. Dans ce cas des granulats très particuliers comme des billes métalliques ont été proposées, dans le but d'améliorer la rigidité du matériau.

En ce qui concerne l'influence du module des granulats sur la résistance des BHP, l'étude conclue au fait de préférer, pour accroître la résistance, des granulats ayant des modules proches de celui de la pâte. Cette condition a pour effet de minimiser les gradients de contrainte dans le matériau et ainsi d'améliorer la résistance du béton. Le granulat idéal aurait en fait une résistance élevée ( $>100$  MPa), un faible module (compris entre 20 et 40 MPa), et offrirait une très bonne adhérence à la matrice.

La taille maximale des granulats peut également avoir une influence sur la résistance des BHP, particulièrement pour des granulats roulés pour les quels la diminution du diamètre équivalent du granulat vers 10 mm environ, toute choses étant égal par ailleurs, conduit à une augmentation de la résistance. L'argument avancé dans est l'influence sur la résistance, d'un paramètre liée à la distance entre gros grains, et appelé épaisseur maximale de pâte (EMP). Cette distance augmente avec la taille maximale du granulat et on observe pour les granulats roulés, une diminution de la résistance avec l'augmentation de l'EMP. Avec des granulats concassés cette influence reste faible et il est alors préconisé d'utiliser des granulats de taille maximale compatible avec les conditions de mise en œuvre (20/25 mm), conformément à ce qui est couramment admis.

La fumée de silice est un produit dont l'effet granulaire et l'activité pouzzolanique sont en général très importants. Les dosages dépendent de la caractéristique principale que l'on cherche à améliorer. Ainsi un faible dosage, de l'ordre de 5%, peut accroître de manière significative la stabilité d'un coulis vis-à-vis de la ségrégation ou la pompabilité d'un béton. L'utilisation de la fumée de silice dans le mélange avec un superplastifiant est connue pour améliorer la résistance mécanique et la durabilité des bétons à hautes performances. Les mécanismes d'action de la fumée de silice dans le béton reposent sur des effets de nature physique et chimique. Ainsi la granulométrie des particules de fumée de silice, de dimension moyenne cent fois plus faible que celle du ciment, contribue à densifier la pâte par un effet physique de type filler qui conduit à un empilement plus compact des grains solides. Par ailleurs, la réaction chimique pouzzolanique de consommation de l'hydroxyde de calcium par la silice amorphe démarre rapidement. Elle conduit à modifier la microstructure des produits d'hydratation en réduisant la dimension des pores de la pâte hydratée. Cependant, certaines divergences subsistent parmi les chercheurs sur la nature et la localisation de l'effet bénéfique apporté par cet ajout. Certains d'entre eux considèrent que la fumée de silice améliore directement la résistance de la liaison granulat/matrice de ciment.

Les résistances en compression augmentent lors de substitution du sable de dune finement broyé traduisant ainsi l'amélioration de la compacité des pâtes du ciment par double effet: filler et pouzzolanique.

La technologie des adjuvants a fait beaucoup de progrès lorsque toute l'efficacité des propriétés dispersantes des polynaphthalène et sulfonates a commencé à être utilisée, non seulement pour augmenter la fluidité du béton, mais aussi pour diminuer le rapport

eau/ciment. Grâce à l'utilisation de ces polymères synthétiques, il devient facile d'augmenter la résistance à la compression jusqu'à 100 MPa sans aucun effet négatif sur la rhéologie du béton.

Le dosage optimal vis-à-vis de la résistance est atteint lorsque toute la portlandite est consommée. Ce dosage se situe aux alentours de 20-25% de la masse de ciment. Les dosages les plus utilisés se situent aux alentours de 10%, pour des bétons de résistance caractéristique de l'ordre de 70-80 MPa [4].

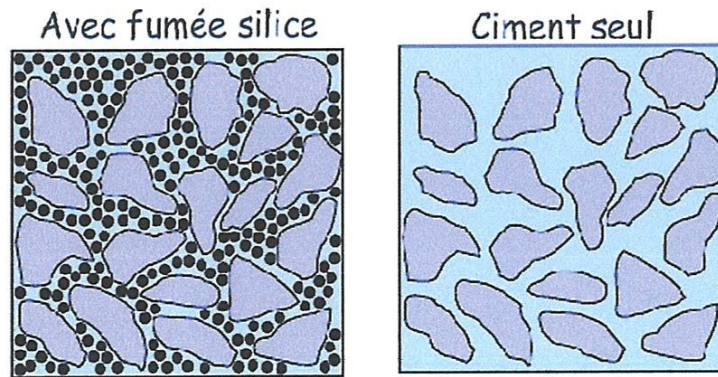


Figure II.2 Effet de la fumée de silice [5].

#### II.2.4.2 Les cendres volantes

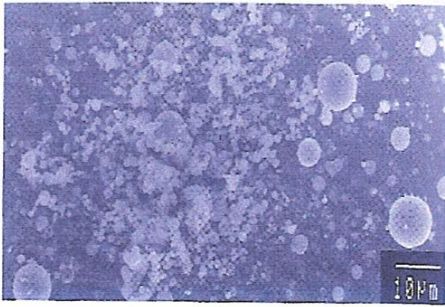
Les cendres volantes sont des particules très fines récupérées par les systèmes de dépoussiérage des centrales thermiques, les cendres volantes peuvent avoir différentes compositions chimiques et différentes composition de phase parce que celle-ci sont roulées exclusivement au types d'impuretés qui sont contenues dans le charbon que l'on brûle dans la centrale thermique. Des charbons provenant de la même source et utilisés dans la même centrale thermique produisent des cendres volantes très semblables. Cependant, comme on

peut le voir dans le tableau II.3, la composition chimique de cendre volante qui conviennent de différents usines peut varier beaucoup.

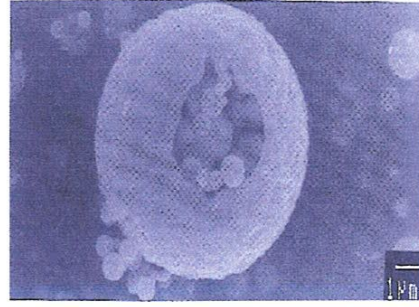
**Tableau II.3** Composition chimique type de certaines cendres volantes.

	Classe F	Classe F	Classe F	Sulfo-calcique	Sulfo-calcique
SiO <sub>2</sub>	59.4	47.4	36.2	24.0	13.5
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	22.4	21.3	17.4	18.5	5.5
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	8.9	6.2	6.4	17.0	3.5
CaO	2.6	16.6	26.5	24.0	59
MgO	1.3	4.7	6.6	1.0	1.8
Na <sub>2</sub> O équiv	2.2	0.4	2.2	0.8	-
SO <sub>3</sub>	2.4	1.5	2.8	8.0	15.1
Pert au feu	2.0	1.5	0.6	-	-
SiO <sub>2</sub> +Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	90.7	74.9	60	59.5	22.5
Chaux libre	-	-	-	-	28.0

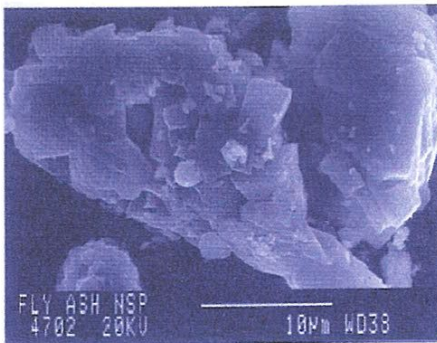
Les particules de cendres volantes peuvent avoir des formes très différentes les unes des autres. Elles peuvent avoir une forme sphérique Image II.3, avec une distribution granulométrique semblable à celle de ciments portland, elles peuvent contenir des sphères creuses Image II.4, et même dans certains cas, elles peuvent contenir seulement des particules angulaires Image II.5.



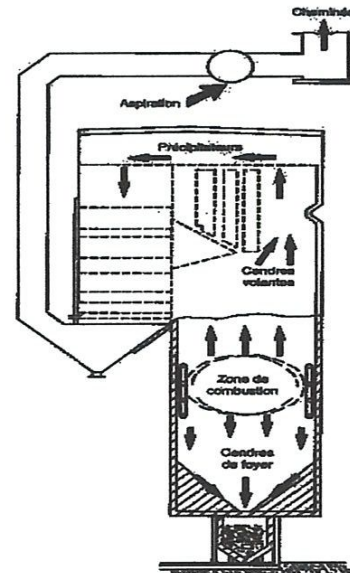
**Image II.3** Particules sphériques des cendres volantes.



**Image II.4** Plérosphère contenant des particules cénosphériques dans une cendre volante.



**Image II.5** Particules de cendres volantes de forme angulaire.



**Figure II.3** Représentation schématique de la formulation des cendres volantes [3].

### II.2.4.3 Le laitier

Le laitier de haute fourneau, ou le laitier broyé comme il vaudrait peut-être mieux l'appeler, est un coproduit de la fabrication de la fonte dans les hautes fourneaux figure II.3. Toutes les impuretés contenues dans le minerai de fer et dans le coke que l'on utilise pour réduire l'oxyde de fer se trouve dans le laitier de hauts fourneaux. comme ces impuretés

pourraient avoir un point de fusion très élevé si l'on n'ajustait pas leur composition chimique, on ajoute des agents fondants dans la charge du haut fourneau pour obtenir une composition chimique globale des impuretés qui reste dans un zone particulièrement bien définie du diagramme  $\text{SiO}_2\text{-CaO-Al}_2\text{O}_3$ , zone où la température de fusion de ces trois oxydes est parmi les plus basses. Ainsi du point de vue chimique, les laitiers ont une composition relativement constante à laquelle le métallurgiste porte une certaine attention puisque tout écart par rapport à cette composition chimique optimale se traduit par une augmentation des coûts énergétiques assez importants et donc à des coûts de production plus élevés pour la fabrication de la fonte

tableau II.4.

**Tableau II.4** Composition chimique type de laitier de haut fourneau.

	Laitier français	Laitier nord-américain
$\text{SiO}_2$	29 à 36	33 à 42
$\text{Al}_2\text{O}_3$	13 à 19	10 à 16
$\text{CaO}$	40 à 43	36 à 45
$\text{Fe}_2\text{O}_3$	<4%	0.3 à 20
$\text{MgO}$	<6%	3 à 12
S	< 1.5%	—

Les aspects critiques qu'il faut vérifier quand on veut utiliser un laitier sont son état vitreux puisque ses propriétés hydrauliques sont reliées à cette caractéristique essentielle. Si la température du laitier liquide n'est pas trop élevée dans le haut fourneau, certains cristaux ont déjà pu se former dans la phase liquide et, après sa trempe, ce laitier sera un peu moins réactif qu'un laitier plus chaud qui lui est plus vitreux. Des grains de laitier bien trempés ont une couleur beige ou gris pâles tandis que les laitiers plutôt froids ont une couleur beaucoup plus sombre qui peut varier de gris foncé au brun foncé [3].



## II.2.5 Les adjuvants

Ce sont en général des superplastifiants (appelés aussi fluidifiants), éventuellement associés à des retardateurs. Trois grandes catégories coexistent: les naphthalènes sulfonates, les résines mélamines, et plus récemment les poly-carboxylates.

Ces résines de synthèses, qui sont adoptées entre 1 et 3% de la masse de ciment, ont pour effet de défloculer les particules fines (grains de ciment) et ultrafines (fumées de silice). Lors du choix de l'adjuvant, on évitera les produits trop concentrés (à 40% d'extraits secs) qui deviennent visqueux en hiver, et difficiles à disperser dans les malaxeurs. Les superplastifiants présentent fréquemment un effet retardateur de prise ils ont une durée d'action limitée et peuvent donner lieu, dans certain cas, à un raidissement prématuré du matériau frais; ce phénomène, appelé incompatibilité ciment/adjuvant, pourrait l'expliquer par une perte d'efficacité du gypse chargé de contrôler l'hydratation des aluminates tricalciques. Le raidissement peut être aussi imputable à la nature des éléments fins de certains granulats. Donc, il est fortement recommandé de réaliser une étude préalable de compatibilité ciment/adjuvant afin de prévenir ces inconvénients [3].

### II.2.5.1 Classification

On peut classer les adjuvants selon leur fonction dans les catégories suivantes:

- Les superplastifiants.
- Les retardateurs.
- Les accélérateurs.
- Les hydrofuges.

On peut également citer d'autres adjuvants tels que:

### II.2.6 Les Fibres

Les fibres utilisées sont des fibres polypropylène fibrillées, type « Fibermesh ». Les fibres ont une longueur de 19 mm et une section rectangulaire de  $50 \times 150 \mu\text{m}^2$ . Ces fibres livrées sous forme d'amas qui se dispersent au cours du malaxage. Les propriétés des fibres sont présentes dans le tableau II.5.

**Tableau II.5** Caractéristiques physiques des fibres de polypropylène [Kalifa, et al. 2002].

Propriété	Valeur
Densité à l'état solide [g/cm <sup>3</sup> ]	0.93
Densité à l'état fondu [g/cm <sup>3</sup> ]	0.85
Epaisseur [ $\mu\text{m}$ ]	50
Largeur [ $\mu\text{m}$ ]	150
Longueur [mm]	19
Température de fusion [°C]	171
Température de vaporisation [°C]	341
Température d'inflammation [°C]	460
Conductivité thermique [W/m <sup>°K</sup> ]	0.15

### II.3 Méthodes de formulation des BHP

L'objectif de toutes les méthodes de formulation des bétons est de déterminer la combinaison de matériaux à utiliser pour produire le béton qui aura les propriétés désirées et que sera le plus économique possible. Il a toujours été très difficile de développer une méthode théorique universelle permettant de formuler un béton avec n'importe quelle combinaison de ciment portland, d'ajout cimentaire, de granulats et d'adjuvant. Même si tous les matériaux de base doivent satisfaire à des critères d'acceptation plus ou moins sévères, on peut obtenir un béton ayant les propriétés visées à l'état frais et à l'état durci de différentes façons en utilisant les mêmes matériaux. Cette situation loin de constituer un désavantage,

# Chapitre III

Caractérisations et  
mise en œuvre des  
BHP

## III Caractérisations et mise en œuvre des BHP

### III.1 Caractérisation du BHP à l'état frais

Il est important de contrôler les propriétés d'un BHP frais pour deux raisons: un BHP doit pouvoir être mis en place aussi facilement qu'un béton usuel et un BHP qui a des propriétés à l'état frais bien contrôlées et constantes aura très probablement des propriétés tout aussi contrôlées et constants à l'état durci. Certes, ce second point est aussi valable pour les bétons usuels, mais, comme la marge de manœuvre est beaucoup plus faible lorsque l'on fabrique un BHP à l'état frais. Les propriétés d'un BHP à l'état frais doivent être contrôlées à la fois à la centrale à béton juste après le malaxage et sur le chantier juste avant la mise en place du béton. A la centrale à béton, on peut contrôler la masse volumique, l'affaissement, la teneur en air et la température tandis qu'au chantier on peut se contenter de contrôler seulement l'affaissement et la teneur en air s'il y a lieu.

Le contrôle des propriétés du béton frais à la centrale permet d'éviter un certain nombre de problèmes de livraison et de mise en place du béton. La rhéologie des BHP qui ont de faibles rapports eau/liant est très sensible à tout changement de la qualité des matériaux, de la formulation du béton et de la température de livraison. Les principaux problèmes auxquels on peut avoir à faire face sont:

- Une chute dramatique de l'affaissement.
- Un retard de prise et de durcissement qui retarde les grains du murissement.
- Une ségrégation inacceptable dans les BHP qui ont un affaissement très élevé.

## III.2 Caractérisation du BHP à l'état durci

### III.2.1 Résistance mécanique

Il serait faux de penser que les propriétés mécaniques des BHP sont simplement celles d'un béton plus résistant, il serait tout aussi faux de considérer qu'elles peuvent être déduites en extrapolant simplement celle des bétons usuels comme il serait tout à fait faux de considérer qu'il y'a aucun relation entre le BHP et celles des bétons usuels.

#### III.2.1.1 Comportement en compression

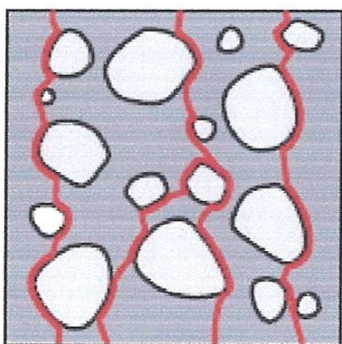
Les BHP présentent des résistances en compression importantes aux jeunes âges, compte tenu de la rapidité de la cinétique de montée en résistance, et très élevées à long terme (avec une montée en résistance se poursuivant au-delà de 28 jours). Un BHP de 60 MPa à 28 jours peut offrir des résistances mécaniques de 15 MPa à 24 heures, voire d'avantage, et 40 MPa à 7 jours. Le gain est aussi important en termes de résistance en traction ou au cisaillement [11].

**Tableau III.1:** Résistance à la compression d'un BHP à 7 et 28 jours.

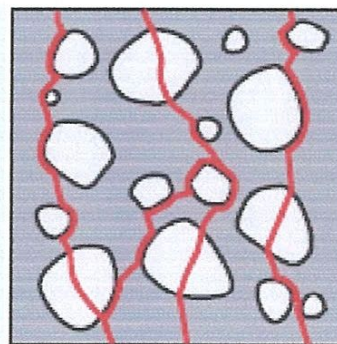
<i>Parametres</i>	<i>Quantité</i>
<i>Eau(L/m<sup>3</sup>)</i>	185
<i>Ciment(kg/m<sup>3</sup>)</i>	832
<i>Sable(kg/m<sup>3</sup>)</i>	412
<i>Granulats5/12 (kg/m<sup>3</sup>)</i>	877
<i>Fumée de Silice (kg/m<sup>3</sup>)</i>	92
<i>Super plastifiant(kg/m<sup>3</sup>)</i>	40
<i>E/C</i>	0.22
<i>E/Liant (cement-F.silice)</i>	0.2
<i>Résistance à la compression, 7 Jours (N/mm<sup>2</sup>)</i>	61
<i>Résistance à la compression, 28 Jours (N/mm<sup>2</sup>)</i>	69

Lorsqu'un béton doté d'une résistance normale est comprimé, les fissures d'adhérence entre la matrice de mortier et le granulat se propageront autour des granulats. A un niveau proche de la résistance à la compression, ces fissures d'adhérence se propageront à toute la matrice de mortier, entraînant l'apparition de fissures dans le mortier. En définitive, le béton cèdera sous l'effet de tout un réseau de fissures ininterrompues dans le mortier, alors que les granulats ne subiront aucun dommage figure III.2.

Le béton à hautes performances se caractérise par une meilleure adhérence entre les granulats et la matrice de ciment. En outre, la résistance de la matrice sera pratiquement égale à la résistance des granulats. Dès lors, l'apparition et le développement de fissures d'adhérence ou de microfissures seront retardés. A l'approche de la rupture, les fissures seront désormais généralement propagées au travers des granulats figure III.3 [8].



**Figure III.2** BO: Fissures d'adhérence et fissures dans le mortier.



**Figure III.3** BHP: Les granulats sont également fissurés.

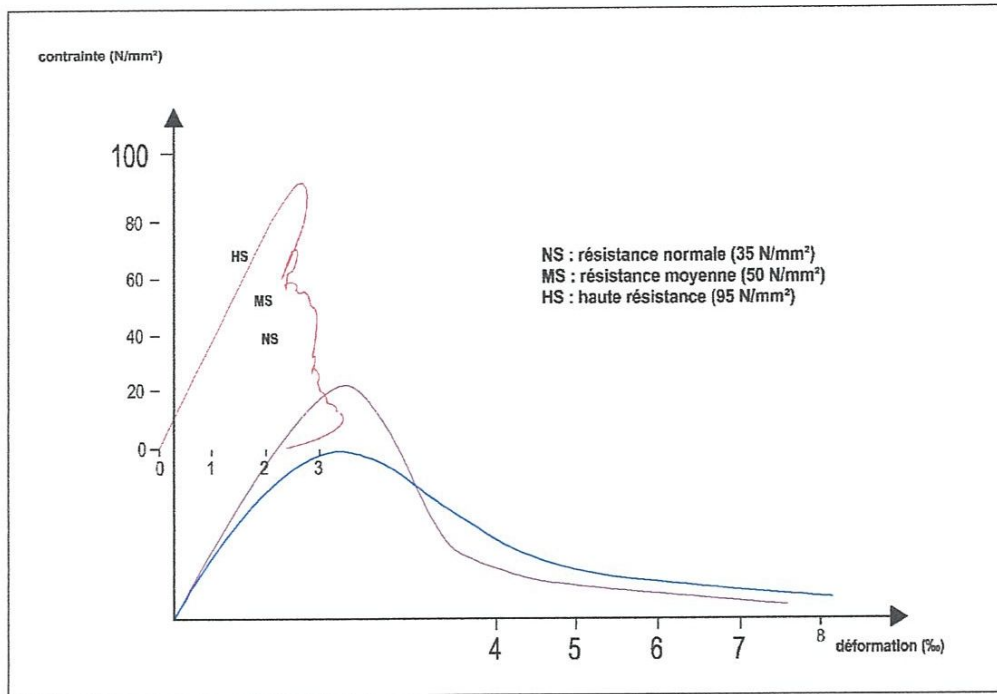


Figure III.4 Diagramme contraintes-déformation.

### III.2.1.2 Comportement en traction

Généralement, la résistance à la traction du béton est liée à la résistance à la compression. En ce qui concerne le béton conventionnel, différentes formules sont appliquées. Dans la norme EN 1992-1-1:2004, une formule différente est proposée pour le béton à haute résistance par rapport au béton conventionnel.

Un élément essentiel est cependant le caractère fragile du béton à hautes performances, Dès que la résistance est atteinte, la portance tendra très rapidement vers la valeur zéro [11].

### *III.2.2.5 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  $\text{kg/m}^3$ ) pour réduire de façon efficace le risque d'écaillage des BHP (les fibres en fondant, vers  $170^\circ\text{C}$ , constituent un réseau connecté de canaux rendant le matériau beaucoup plus perméable, ce qui permet l'évacuation de la vapeur) [12].

### *III.2.2.6 Carbonatation*

Le BHP offrent une bien meilleure résistance à la carbonatation est très nettement supérieure à celle d'un béton traditionnel en raison de leurs très grande compacité et de leur microstructure. 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 [11].

## **III.3 Mise en œuvre**

Les BHP sont habituellement mis en place par pompage en utilisant des grues, des godets ou des convoyeurs. Chaque méthode de mise en place a ses avantages et ses



inconvenients, et ce sont finalement les conditions de chantier qui dictent le choix final de mise en œuvre.

La mise en place des bétons usuels se fait de plus en plus par pompage et cela s'applique aussi au BHP, la granulométrie des granulats est un paramètre très important, particulièrement celle du sable, pour obtenir un béton résistants bien aux fortes pressions de pompage, l'addition d'une faible quantité de fumée de silice, 1 à 3% de la masse de ciment, permet d'améliorer la pompabilité du BHP.

Dans la mise en œuvre du béton à haute performance la vibration élimine les bulles d'air. La finition d'un BHP est faite avec une règle vibrante, les quelques défauts qui demeurent à la surface d'un BHP peuvent être éliminés avec une truelle de magnésium ou une truelle à long manche [3].

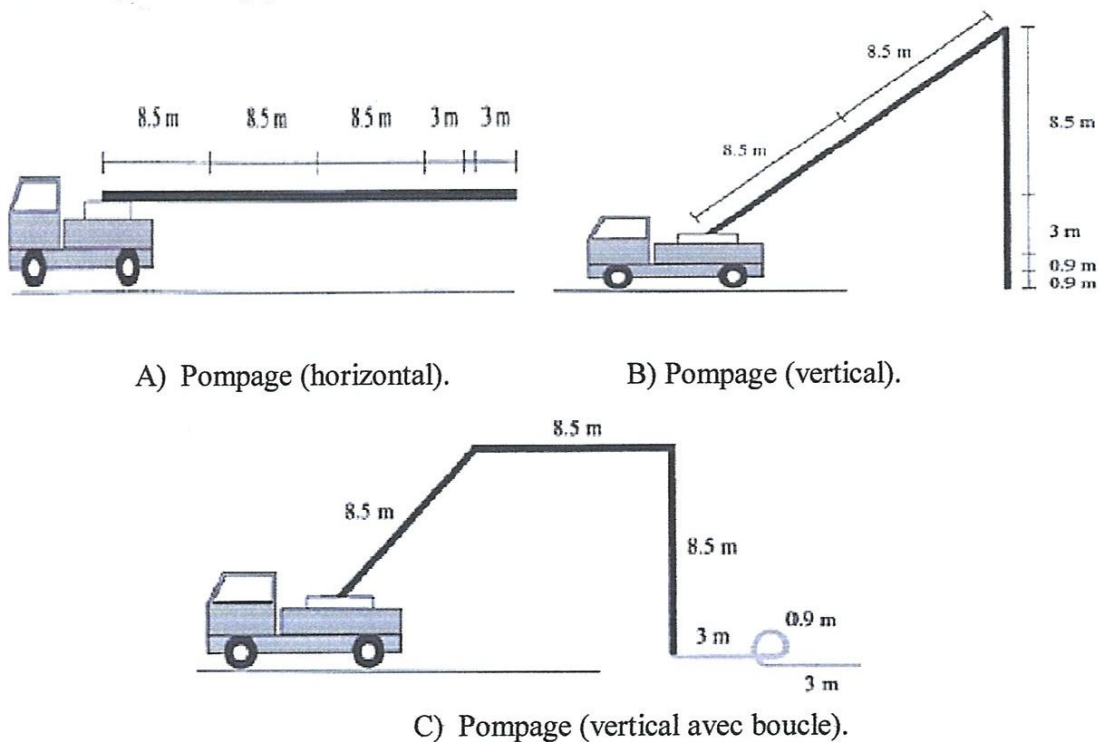


Figure III.5 Pompes [13].

# Chapitre IV

Comportement au feu  
du BHP: Eclatement  
du béton

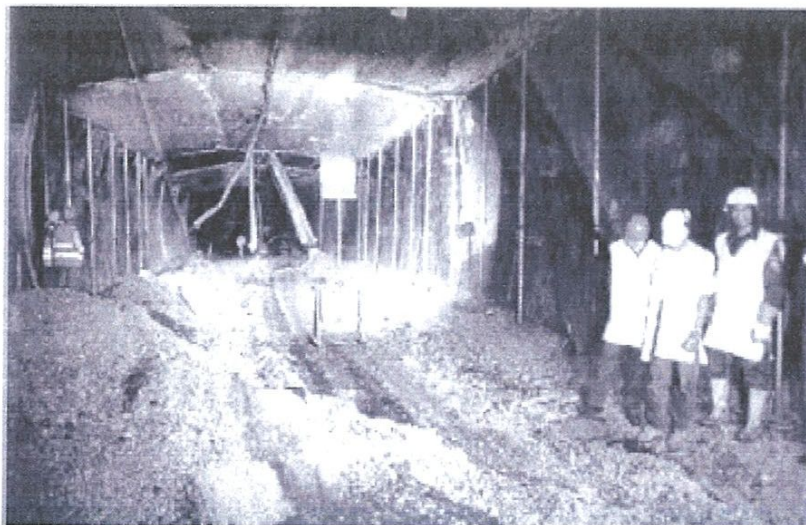
## IV.2 Phénomène d'éclatement et d'écaillage du béton

### IV.2.1 Mécanisme du phénomène

Les premières mentions concernant l'éclatement (angl. spalling) des bétons datent des années soixante. Les observations du comportement des bétons à haute température menées par Harmathy, 1965 [21] [22] ont montré que les matériaux chauffés pouvaient présenter, dans certains cas, un comportement explosif. Deux principales raisons de l'éclatement ont été attribuées:

- Premièrement aux effets du gradient thermique
- Et la formation de pressions de vapeur d'eau dans le matériau (Ang. *waterclog effect*).

Il faut noter que ces observations et la théorie développée par Harmathy, ont été adoptées pour les bétons ordinaires. Ce n'est qu'en 1984 que Hertz [23], en étudiant les propriétés de bétons à haute performance (120 MPa et 170 MPa) soumis aux températures élevées a observé une forte sensibilité de ces bétons à l'éclatement.



**Figure IV.2** Exemple d'écaillage. Après l'incendie dans le tunnel de Tauern (source [23]).

Sur la Figure IV.6, représentant l'analyse thermique différentielle des fibres polypropylène, les pics sur la courbe correspondent au: point de la fusion (171°C), à la température d'évaporation (341°C), et de carbonatation (457°C). Les fibres fondent à 171°C et sont absorbées totalement ou partiellement par le réseau poreux de la matrice cimentaire. A 341°C le polypropylène se vaporise. Rappelons que les éclatements se produisent à des températures comprises entre 190-260°C. L'incorporation des fibres diminue significativement les valeurs des pressions et diminuent la température de l'apparitions des pics de la pression (180-200°C).

La plupart des auteurs s'accordent pour dire qu'en fondant les fibres laissent un chenal permettant à la vapeur d'eau de circuler [28], [29]. Mais les phénomènes en jeu sont encore mal connus. Il a été observé que les bétons avec fibres polypropylène, après l'échauffement jusqu'à 400°C, présentent une densité de fissuration de la matrice plus importante. Les fissures observées sont de taille de 1µm pour un béton avec des fibres et de taille de 10 µm pour le béton non-fibré. On émet deux hypothèses concernant cette fissuration supplémentaire dans les bétons fibrés. La première est que les fibres, en chauffant se dilatent de 10% ce qui peut générer les contraintes locales et un nucléation des fissures. La deuxième est que le lit des fibres favorise la formation locale de fissures et incite le faïençage.

Afin de mieux comprendre le processus thermo-hydrique menant à l'éclatement et fournir des données pour la validation des codes numériques, un dispositif original a été mis au point pour la mesure des champs de température, de pression dans le réseau poreux et de teneur en eau par une équipe du CSTB *Kalifa et al.* [28], [29].

### **IV.2.3 Influence des fibres polypropylène sur le comportement mécanique à haute température**

L'ajout des fibres polypropylène en quantité d'environ  $2 \text{ kg/m}^3$  provoque une diminution de la résistance à  $20^\circ\text{C}$  par rapport au matériau sans fibres Breitenbucher, 1998 , Brandt, 2003 . Pour compenser cette décroissance il est conseillé d'augmenter la quantité de ciment de 20-30  $[\text{kg/m}^3]$  [30], notamment pour assurer la maniabilité du mélange. L'étude des propriétés mécaniques des bétons fibrés à haute température a, en échange, fait l'objet de peu de travaux. Le comportement mécanique de bétons fibrés après cuisson puis refroidissement a été étudié par Hoff et al. [30]. Les résistances en compression s'échelonnent de 60 à 85 MPa. Par contre, nous n'avons pas trouvé dans la littérature de résultats issus d'essais réalisés « à chaud » sur BHP de fibres organiques, permettant d'évaluer le comportement mécanique de ces bétons à haute température.

# Chapitre V

Conclusion générale  
et perspectives

## V Conclusion générale et perspectives

### V.1 Conclusion générale

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).

Ces bétons sont, en fait, des matériaux à très haute compacité, 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.).

Haute performance signifie 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.

L'étude des BHP à été considérée dans ce mémoire en donnant une idée générale sur la formulation, la caractérisation, ainsi que du comportement vis-à-vis du feu.

La majorité des références bibliographiques confirment que les BHP sont des matériaux qui sont difficiles à caractériser, car il faut une main-d'œuvre qualifiée, et un respect des protocoles lors des essais, (à l'état frais ou à l'état durci). Tous les auteurs confirment le mauvais comportement des BHP vis -à- vis du feu par rapport au béton ordinaire. L'ajout des fibres polypropylène améliorent leur comportement des BHP vis -à- vis du feu.

## V.2 Perspectives

En perspective, une étude expérimentale ainsi que simulation numérique est à considérer.



## Références bibliographiques

- [1] GHERDAOUI MOUFIDA. « Etude bibliographique sur les nouveaux bétons ». Mémoire de Mastère Spécialité : Génie Civil, Option : Structures " Université du 8 Mai 1945 Guelma, Juin 2010.
- [2] «High performance concrete structural designers guide». <http://knowledge.fhwa.dot.gov/cope/hpcx.nsf/home> 2005.
- [3] P.C.AITCIN. « Bétons haute performance ». Eyrolles, Janvier 2001.
- [4] Robert LE ROY. «Déformations instantanées et différées des béton à hautes performances». Edition l'École Nationale des Ponts et Chaussées.1996.
- [5] Produits de ciment Couillard. «Les superplastifiants ».
- <Http://www.betoncouillard.com>, Internet 2008.
- [6] FICHES TECHNIQUES. «Les bétons : formulation, fabrication et mise en œuvre».G11.
- Edité par : Collection Technique Cimbéton 2006 Tome2.
- [7] STÉPHAN ASSIÉ. «Durabilité des bétons autoplaçants». Thèse de doctorat en génie civil, Spécialité : génie civile Université de Toulouse 29 octobre 2004.
- [8] «LB HAUTES ET TRÈS HAUTES PERFORMANCES».
- [www.lafarge-france.fr/LB-Hautes-et-tres-hautes-performances.pdf](http://www.lafarge-france.fr/LB-Hautes-et-tres-hautes-performances.pdf)
- [9] <http://fr.wikipedia.org/wiki>

- [10] GRAIRIA Saïd. «Contribution à la Formulation des Bétons Autoplaçants à Hautes Résistances». Mémoire de Magister en génie civil, Option: Risques naturels et vulnérabilités des ouvrages. Université de Guelma Novembre 2010.
- [11] «le béton à hautes performances» 2007.
- [www.febelcem.be/fileadmin/user\\_upload/dossiers-ciment-94-08/fr/40fr\\_01.pdf](http://www.febelcem.be/fileadmin/user_upload/dossiers-ciment-94-08/fr/40fr_01.pdf)
- [12] Josserand L. «Ressuage des bétons hydrauliques ».Thèse de doctorat en Structures et Matériau. Ecole Nationale des Ponts et Chaussées 11 October 2002.
- [13] AITCIN P-C. « High-Performance Concrete».Edition: Print 1998.
- [14] GRANITEX.
- [15] FJ. Ulm, O. Coussy, and ZP. Bazant. The "Chunnel" Fire I : Chemoplastic softening in rapidly heated concrete. Journal of engineering mechanism, Vol. 125, N\_3 :272{282, 1999
- [16] G. Mounajed and W. Obeid. Mod\_élisation du comportement thermo-hygro\_mécanique des b\_étons \_a hautes temp\_eratures - rapport interm\_édiaire pour le livre bhp 2000. Divivion MOCAD, CSTB, Technical report, 2001.
- [17] Windsor en Feu. [http ://www.reopen911.info](http://www.reopen911.info).
- [18] Tunnel du Mont Blanc. [http ://www.24heures.ch](http://www.24heures.ch).
- [19] ZP. Bazant. Analysis of pore pressure, thermal stress and fracture in rapidly heated concrete. in, L.T Phan, N.J. Carino, D. Duthiuh and E. Garboczi, Proceedings of the International Workshop on Fire Performance of High-Strength Concrete, NIST: 155{164, 1997.
- [20] Y. Anderberg. Spalling phenomena of hpc. International workshop on \_re perfor-

mance of high strength concrete, NIST Special Publication 919, Fev. 1997.

- [21] A. Noumow\_e, P. Clastres, G. Debicki, and JL. Costaz. High performance concrete for severe thermal conditions : Environment and loading. E & FN Spon ISBN, Vol. 2, 1995.
- [22] M. Kanema. Influence des param\_ètres de formulation et microstructuraux sur le comportement \_a haute température des bétons. In Thèse de doctorat, Université de Cergy-Pontoise. 2007.
- [23] LT. Phan, JR. Lawson, and FL. Davis. Effects of elevated temperature exposure on heating characteristics, spalling and residual properties of high performance concrete. Materials and Structures, Vol. 34 :83{91, 2001.
- [24] C. Castillo and AJ. Durrani. Effect of transient high temperature on high-strength concrete. ACI Materials Journal, pages 47{53, Jan-Feb. 1990.
- [25] C. Meyer-Ottens. On the question of spalling of \_re expose concrete constructions. ACI Materials Journal, 1975.
- [26] VV. Zhukhov. Reasons of explosive spalling of concrete by \_re. Scientific Research Institut for Concrete and Reinforced Concrete - Moscow, Vol. 1 :1{7, 1980.
- [27] KD. Hertz. Limits of spalling of \_re expose concrete. Dep. of Building and Energy Technical - University of Denmark, Nov. 1998.
- [28] B. Persson. Mitigation of \_re spalling of concrete with \_bers. Presentation in Technical committee "Durability of Self-compacting Concrete", Ghent, Belgium, 2005.
- [29] P. Kalifa, G. Chene, and C. Galle. High-température behaviour of hpc with polypropylene \_bers from spalling to microstructure. Cement and concrete research, Vol. 31 :1487{1499, 2001.
- [30] THESE Izabela GAWĘSKA HAGER  
Comportement à haute température des bétons à haute performance évolution des principales propriétés mécanique Soutenue le 5 novembre 2004.

[31] DALILA BENAMARA<sup>1</sup>& BOUZIDI MEZGHICHE<sup>2</sup>. «Vers un béton de hautes performance élaboré de matériaux locaux «BHP»».

1 Centre universitaire de Djelfa, Djelfa, Algérie.

2 Université de Biskra, Biskra, Algérie. Avril 2010.

[32] BENMARCE, A. & GUENFOUD M. "Experimental behaviour of high-strength concrete columns in fire; Magazine of Concrete Research, vol.12; issue 1; p 23-33; 2005.