

## BILAN D'EVALUATION DU PROJET PNR Développement durable

### 1. DOMICILIATION DU PROJET

*Organisme de domiciliation*

Laboratoire de Génie Civil et d'Hydraulique (LGCH)

*Organisme pilote*

CNERIB

### 2. IDENTIFICATION DU PROJET

Intitulé du projet:	<b>Comportement à haute température des bétons à hautes performances</b>
Intitulé du domaine	<b>Habitat, construction et urbanisme</b>
Intitulé de l'axe	<b>Incendie</b>
Intitulé du thème	<b>Risques technologiques</b>

### 3. Identification de l'Equipe de recherche

Chef de projet		
Nom et prénom	Grade	Etablissement de rattachement
<b>BENMARCE ABDELAZIZ</b>	<b>MC"A"</b>	<b>Université du 8 Mai 1945, Guelma.</b>

Equipe de recherche			
Nom et prénom	Grade	Etablissement de rattachement	Observation
<b>Boudjahem Hocine</b>	<b>M-A "A"</b>	<b>Université du 8 Mai 1945, Guelma.</b>	
<b>Bendjaiche Robila</b>	<b>M-A "A"</b>	<b>Université du 8 Mai 1945, Guelma.</b>	
<b>Bouaoud Mohamed</b>	<b>Magistère</b>	<b>Fonctionnaire CGS/Constantine</b>	

## 4- Synthèse des activités de recherche

<p><b>- Rappel des objectifs du projet</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Une compréhension du comportement du béton à hautes performances vis-à-vis du feu, ce qui permettra un approfondissement et élargissement des connaissances scientifiques et techniques sur le plan national dans ce domaine;</li> <li>➤ Une mise au point de modèles théoriques et/ou de logiciels de simulation</li> <li>✓ Objectifs Techniques/Technologiques :             <ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Une familiarisation des différents acteurs (utilisateurs et/ou fabricants de ce nouveau matériau) avec ces nouvelles technologies, ce qui permettra une mise en œuvre des moyens techniques et humains (équipement et formation du personnel concerné), pour produire le BHP.</li> <li>➤ La mise en place d'une méthodologie de production des Bétons à Hautes Performances, en grande quantité</li> <li>➤ Résolution du problème de l'écaillage des Bétons à Hautes Performances, quand ils sont soumis au feu</li> </ul> </li> </ul> <p>L'élaboration d'une rédaction d'avis techniques afin de constituer un noyau d'expertise dans ce domaine.</p>
<p><b>- Impact et résultats attendus du projet</b></p> <p><b>Retombées scientifiques:</b> Ce projet de recherche apportera des solutions concrètes,</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Dans la compréhension du comportement du béton à hautes performances vis-à-vis du feu</li> <li>✓ Dans la mise au point de modèles théoriques et/ou de logiciels de simulation</li> <li>✓ Dans l'approfondissement et l'élargissement des connaissances scientifiques et techniques sur le plan national (Algérie) ;</li> <li>✓ La publication d'articles dans des revues nationales et internationales.</li> </ul> <p><b>Technique/Technologique:</b> Ce projet apportera des solutions concrètes:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Contribution à la mise en œuvre des moyens nécessaires pour produire le BHP, tel que : la formation et/ou le perfectionnement du personnel concerné</li> <li>✓ Proposition d'une méthodologie afin d'obtenir des résistances en compression très élevées,</li> <li>✓ Diffusion des connaissances,...etc.</li> </ul>

Tâches prévues dans le projet (se référer à la fiche de présentation validée lors de l'acceptation du projet)	Tâches effectivement réalisées
1) Etude Bibliographique	Semestre 1
2) Réalisation des essais	Semestre 2
3) Modélisation	Semestre 3
4) Rédaction d'avis Technique	Semestre 4

<p><b>Résultats obtenus et impacts des résultats du projet sur le secteur socio économique</b></p> <p>Ce projet contribuera à:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Une familiarisation avec les nouveaux matériaux tels que le Béton à Hautes Performances,</li> <li>✓ Mettre en place une méthodologie de production des Bétons à Hautes Performances, en grande quantité,</li> <li>✓ Résoudre le problème de l'écaillage des Bétons à Hautes Performances, quand il est soumis</li> </ul>
--

- au feu
- ✓ Elaborer une rédaction d'avis techniques afin de constituer un noyau d'expertise dans ce domaine. Ce projet a permis ainsi, aux différents secteurs tels que : bâtiments, travaux publics,...., de bénéficier de ces résultats.

## 5. Implication effective des membres du projet

Cette rubrique doit être obligatoirement renseignée pour toute l'équipe de recherche prévue dans le projet. Il est suggéré un tableau par membre)

<b>Tâches accomplies</b>	
<b>Benmarce Abdelaziz</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Optimisation des paramètres utilisés dans la composition du BHP</li> <li>• Dépouillement, analyse des résultats et rédaction d'un avis technique</li> </ul>
<b>Boudjahem Hocine</b>	<b>Simulation numérique (non-achevée)</b>
<b>Bendjaiche Robila</b>	<b>Formulation de quelques BHP à base de matériaux locaux</b>
<b>Saadi Imen</b>	<b>Réalisation des essais mécaniques</b>
<b>Bouaoud Mohamed</b>	<b>Essais non destructifs</b>
<b>Tâches non accomplies (avis motivé du chef de projet)</b>	
La partie « simulation numérique n'a pas été réalisée faute de temps.	
<b>Observations éventuelles du chef de projet</b>	
Le chef d'établissement ne nous a pas autoriser a participer à la conférence Internationale sur les avancées dans les technologies du ciment et du béton qui s'est tenue à Johansbourg le 28 – 30 Janvier 2013. Malgré, nous avons déposés le dossier pour l'achat du billet 3 mois à l'avance mais en vain, prétextant une fois que le billet était trop cher et une autre fois qu'il a oublié alors que deux de mes collègues (de l'université de Béchar et de l'USTHB) ont participer à cette conférence .	

## 6. Apport du partenaire socio économique

<b>Apport prévu (préciser l'apport initialement arrêté avec le partenaire socio économique)</b>	<b>Apport concrétisé (préciser l'apport effectif du partenaire socioéconomique)</b>
Réalisation des essais non destructifs	Comme ce partenaire a réalisé des essais non destructif durant sa thèse de magistère et a obtenue des bons résultats, alors il a été judicieux d'utiliser l'expérience de ce celui-ci afin de réduire
<b>Observation sur l'apport du partenaire socio économique</b>	

## 7. Travaux de valorisation (donner le nombre et joindre des justificatifs par rubrique)

1. Brevets
2. Prototypes
3. logiciels
4. Ouvrages et documents scientifiques et techniques
5. Publications internationales : (01)
6. Publications nationales : (01)
7. Communications internationales :(08)
8. Communications nationales : (01)
9. Encadrement : (09 Masters , 01 Magistère, et 02 Doctorants)
10. Organisations de rencontres scientifiques : (01)
11. Autres réalisations.

### Publication internationale

1. Benmarce A., Boudjehem H. & Bendjhaiche R." Durability of Self-compacting concrete", Advances in Innovative Materials and Applications, Advanced Materials Research, Vol. 324, 2011. Trans Tech Publications, Switzerland pp 340-343, [www.scientific.net/AMR.324.340.ISBN-13:978-3-03785-229-3](http://www.scientific.net/AMR.324.340.ISBN-13:978-3-03785-229-3) (<http://www.ttp.net/978-3-03785-229-3/8.html>); Indexing: Indexed by Elsevier: SCOPUS [www.scopus.com](http://www.scopus.com) and Ei Compendex (CPX) [www.ei.org/](http://www.ei.org/). Cambridge Scientific Abstracts (CSA) [www.csa.com](http://www.csa.com), Chemical Abstracts (CA) [www.cas.org](http://www.cas.org), Google and Google Scholar [google.com](http://google.com), ISI (ISTP, CPCI, Web of Science) [www.isinet.com](http://www.isinet.com), Institution of Electrical Engineers (IEE) [www.iee.org](http://www.iee.org), etc.

### Publication nationale

1. A. Benmarce & M. Bouaoud "Risque et vulnérabilité sismique de la ville de Constantine" Revue "science & technologie"; Acceptée (2013) [revue.umc.edu.dz](http://revue.umc.edu.dz)

### Communications Internationales

1. A. Benmarce, H. Boudjehem & R. Bendjaiche "Comportement des poteaux en BHP à hautes températures" 1<sup>er</sup> Congrès international sur le génie civil et le développement durable, 17-19 Oct. 2011, Tébessa, Algérie
2. Benmarce A., Boudjehem H. and Bendjaiche R., Saadi I. & Bouaoud M. "Silica fume and super plasticizer effect on producing high strength concrete" 10<sup>th</sup> International Congress on Advances in Civil Engineering (ACE 2012) Ankara, 17-19 October, 2012 Turkey.
3. Saadi I. & Benmarce A. "Influences des additions minérales sur les caractéristiques physico-chimiques des bétons à haute performance" Colloque international, Maintenance et conservation du patrimoine bâti 23 Juin. 2012, Tlemcen, Algérie.
4. Benmarce A. & Saadi I. "Contribution à la compréhension du phénomène d'écaillage des bétons à hautes performances" 1er Congrès International de Génie Civil et d'Hydraulique, 10 - 11 Déc. 2012, Guelma, Algérie.
5. Benzaid M., Boukour S. & Benmarce A. "Contribution à l'étude du comportement à hautes température des bétons autoplaçants" 1er Congrès International de Génie Civil et d'Hydraulique, 10 - 11 Déc. 2012, Guelma, Algérie.

6. **A. Benmarce**, M. Benzaid, M. Bouaoud, H. Boudjahem & R. Bendjaiche "Durability of Self-compacting concrete" International Conference on Advances in Cement and Concrete Technology in Africa 2013, 28 - 30 January 2013. Johannesburg, South Africa.
7. M.S Dimia, M. Guenfoud, **A. Benmarce** & M. Baghdadi "Structural behavior of concrete load bearing walls under natural fire " 1<sup>er</sup> Séminaire International de Génie Civil SIGCB'2013, 06-07 March, 2013 Université de Béchar, Algérie.
8. **Benmarce A.**, Boudjehem H. and Bendjaiche R., Saadi I. & Bouaoud M. "Silica fume and super plasticizer effect on producing high strength concrete" International Congress on Materials & Structural stability Morocco, 27-30 Nov. 2013 (Accepted). [www.fsr.ac.ma/cmss/](http://www.fsr.ac.ma/cmss/)

### **Communication/Séminaire National**

1. A. Benmarce, M. Benzaid & I. Saadi "Durability performance of Self-compacting concrete incorporating local quarry waste fines, crushed brick fines and silica fume" Séminaire national sur les matériaux locaux dans la construction, Université Kasdi Merbah, 20-21 Fev. 2013, Ouargla, Algérie

### **Encadrement :**

- **Masters :**

#### **Sous la direction de Dr. A. Benmarce**

- 1 Hemaizia Aziz et Makhoulf Ammar " Etude bibliographique sur le BAP et le BHP" Soutenue Juin 2011, *Université du 8 Mai 1945, Guelma.*
- 2 Saidia M<sup>ed</sup> Amine & Lakhlef Houssef "Etude bibliographique sur le BHP", soutenue Juin 2012, *Université du 8 Mai 1945, Guelma.*
- 3 Mouadna Loubna & Dahmane Meriem "Les bétons autoplaçants" Soutenue Juin 2012, *Université du 8 Mai 1945, Guelma.*
- 4 Sellaoui Nezha et Meguellatni Meryem "Risque et vulnérabilité sismique d'un bâtiment stratégique de la ville de Guelma" Soutenue Juin 2011, *Université du 8 Mai 1945, Guelma.*

#### **Sous la direction de Mme. R. Bendjaiche**

- 5 Azizi Hakima, Chiheb Amira & Toualbia Nadjiba "Pathologie des batiments (Cas de l'université de Guelma), Soutenue Juin 2013, *Université du 8 Mai 1945, Guelma*
6. Badre Oqbi & Soualmia F "Propriétés physiques des BHP" Soutenue Juin 2012, *Université du 8 Mai 1945, Guelma*
7. Badre Oqbi & Soualmia F "Propriétés physiques des BHP" Soutenue Juin 2012, *Université du 8 Mai 1945, Guelma*

#### **Sous la direction de Mme. H. Boudjehem**

8. Ferkous Yaakoub " Etude bibliographique sur le comportement des BHP à haute température " Soutenue Juin 2012, *Université du 8 Mai 1945, Guelma*
9. Remache Sabiha & Louiza Hakima " Etude d'un bloc administratif (R+1) avec une étude

d'optimisation thermique " Soutenue Juin 2013, *Université du 8 Mai 1945, Guelma*

- **Magistères :**

- 1 Hadri Samia " Le passage d'un béton à haute performance à un béton autoplaçant, Etat de l'art" 2012, Université du 8 Mai 1945, Guelma.

- **Doctorants :**

1. Saadi Imene " Contribution à l'étude du comportement à haute température des BHP " Université de Annaba (Date de soutenance probable Dec. 2014).
2. Benzaid Mehdi "Contribution à l'étude du comportement à haute température des BAP " Université du 8 Mai 1945, Guelma (Date de soutenance probable Dec. 2014).

**Organisations de rencontres scientifiques**

Membre du comité scientifique et du comité d'organisation du 1er Congrès International de Génie Civil et d'Hydraulique, 10 - 11 Déc. 2012, Guelma, Algérie

## 8. Bilan financier du projet

CHAPITRES	Somme allouée	Consommation
CHAPITRE I Remboursement de frais	200.000,00	78.421,00
CHAPITRE II MATERIEL ET MOBILIER	650.000,00	511.525,00
CHAPITRE III FOURNITURES	200.000,00	157.543,00
CHAPITRE IV CHARGES ANNEXES	0,00	0,00
CHAPITRE V PARC AUTOMOBILE	0,00	0,00
CHAPITRE VI FRAIS DE VALORISATION ET DE DEVELOPPEMENT TECHNOLOGIQUE	0,00	0,00
CHAPITRE VII RETRIBUTION DES ACTIVITES DES CHERCHEURS	0,00	0,00
<b>Total</b>	<b>1.050.000,00</b>	<b>747.489,00</b>

-Taux de consommation : 72%

-Contraintes rencontrés : Non disponibilité des matériaux de construction ainsi que quelques adjuvants au début du projet.

## 9. Observations et suggestions éventuelles du chef du projet

C'est dommage que le recteur s'est opposé à l'achat d'un billet d'avion durant le début de la deuxième année du projet afin que le chef du projet présente les derniers résultats de ces travaux dans une conférence internationale qui s'est tenue à Johannesburg le 28 Janvier 2013.

## 10. Les résultats du projet se prêtent-ils à une valorisation socio économique ?

OUI

Si oui, comment ?

Ce projet a permis en quelques mots :

- ✓ Une familiarisation avec les nouveaux matériaux tels que le Béton à Hautes Performances,
- ✓ Mettre en place une méthodologie de production des Bétons à Hautes Performances, en grande quantité,
- ✓ Résoudre le problème de l'écaillage des Bétons à Hautes Performances, quand il est soumis au feu
- ✓ Elaborer une rédaction d'avis techniques afin de constituer un noyau d'expertise dans ce domaine. Ce projet a permis a nos étudiants, Masters/Magistères ainsi, aux différents secteurs tels que : bâtiments, travaux publics, etc....,de bénéficier de ces résultats et de cette expérience pour entamer d'autres projets de recherche.

**Fait à Guelma , le 17/09/2013**

**Signature du chef de projet**

A handwritten signature in black ink, appearing to be the initials 'CDV'.

# Sommaire

<b>CHAPITRE I : SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE</b> .....	11
Références bibliographiques.....	13
<b>CHAPITRE II : PARTIE THÉORIQUE</b> .....	14
2.1 Avantages des BHP .....	18
2.2 Inconvénients des BHP.....	19
Références bibliographiques.....	20
<b>CHAPITRE III : PARTIE EXPÉRIMENTALE</b> .....	21
3.1 <b>Composition des BHP</b> .....	21
3.1.1 Introduction .....	21
3.2 <b>Microstructure des BHP</b> .....	23
3.2.1 Introduction.....	23
3.2.2 Pâte-ciment à haute performance.....	23
3.2.3 Interface pâte –ciment-granulat.....	23
3.3 <b>Rapport eau-ciment</b> .....	24
3.4 <b>Granulats</b> .....	25
3.4.1 Granulats à base de calcaire.....	26
3.4.2 Granulats à base de silice.....	26
3.5 <b>Adjuvants</b> .....	27
3.5.1 Réducteurs d'eau.....	27
3.5.2 Fumée de silice.....	28
3.5.3 Dosage en fluidifiant.....	28
3.6 <b>Cure</b> .....	29
3.7 <b>Production des BHP</b> .....	29
3.8 <b>Conclusion</b> .....	30
Références bibliographiques.....	30

<b>CHAPITRE IV</b>	<b>COMPORTEMENT DU BHP AU FEU</b> .....	33
4.1	<b>Introduction</b> .....	33
4.1.2	Les BHP vis-à-vis du feu.....	33
4.1.2.1	Différents tests de résistance au feu.....	34
4.1.2.2	Courbe normalisée d'évolution de la température.....	34
4.1.2.3	Interprétation des tests réalisés dans un four.....	34
4.1.2.4	Pâte de ciment sous l'effet des températures élevées.....	36
4.1.3	Propriétés mécaniques du béton à haute température.....	37
4.1.3.1	Résistance à la compression des BHP.....	37
4.1.3.2	Effet de la température élevée sur la résistance à la compression.....	38
4.1.3.3	Comportement en compression en conditions transitoires.....	41
4.1.3.4	Module d'élasticité des BHP.....	42
4.1.3.5	Fluage des BHP.....	42
4.1.3.5.1	L'effet double de la température sur le fluage des BHP.....	43
4.1.4	Propriétés thermiques.....	46
4.1.4.1	Introduction .....	46
4.1.4.2	Densité et conductivité thermique.....	47
4.1.4.3	Déformation thermique.....	47
4.2	<b>Comportement structural</b> .....	48
4.2.1	Résistance au feu des BHP.....	48
4.2.2	Facteurs influant sur le comportement au feu des BHP.....	49
4.2.3	Résistance du béton .....	49
4.2.3.1	Teneur en humidité.....	50
4.2.3.2	Masse volumique du béton.....	50
4.2.3.3	Intensité du feu.....	50
4.2.3.4	Dimensions des échantillons.....	51
4.2.3.5	Armatures transversales.....	51
4.2.3.6	Importance de la charge.....	51
4.2.3.7	Type des granulats.....	52

4.2.5	Conclusions sur le comportement du béton.....	53
4.2.6	Conclusion.....	53
	<b>Références bibliographiques.....</b>	<b>53</b>

<b><u>CHAPITRE VI</u></b>	<b><i>: PARTIE EXPERIMENTALE.....</i></b>	<b>58</b>
5.1	<b>Caractérisation des matériaux.....</b>	<b>58</b>
5.2	<b>Malaxage.....</b>	<b>58</b>
5.3	<b>Compactage.....</b>	<b>59</b>
5.4	<b>Gâchée.....</b>	<b>60</b>
5.5	<b>Courbe d'échauffement .....</b>	<b>60</b>
	Références bibliographiques.....	60

<b><u>CHAPITRE VI</u></b>	<b><i>: RESULTATS ET CONCLUSIONS.....</i></b>	<b>62</b>
6.1	<b>Introduction.....</b>	<b>62</b>
6.2	<b>Module de Young .....</b>	<b>65</b>
6.3	<b>Observations visuelles.....</b>	<b>66</b>
6.4	<b>Conclusions et quelques règles à suivre pour améliorer la tenue des BHP au feu.....</b>	<b>66</b>

# RAPPORT DETAILLE DU PROJET

## CHAPITRE I : *SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE*

Les propriétés thermiques du béton sont très complexes, non seulement du fait que le béton est un matériau composite, avec des composants ayant des propriétés thermiques différentes, mais aussi leurs propriétés dépendent de la teneur en humidité et de la porosité. Très peu de données sur les propriétés thermiques des BHP, sont disponibles, quoiqu'elles se situent dans la gamme du béton ordinaire. Les présents résultats dans la littérature sont très variés, parfois contradictoires et confus, notamment ceux traitant l'évolution des propriétés mécaniques au cours de l'échauffement (phénomène de l'écaillage).

La plupart des études récentes montrent que le BHP devient plus friable quand il est sous feu, par rapport au béton ordinaire. Les facteurs qui affectent le type et la sévérité de l'éclatement du béton, peuvent être en rapport avec le matériau dont la teneur en humidité, l'âge du béton, le type de granulats et la structure interne ainsi que les propriétés du béton. D'autres avec la structure, le niveau ainsi que le type de chargement ainsi que le régime d'échauffement. La nécessité d'étudier l'influence de ces facteurs sur la performance des BHP durant un feu est devenue imposante. De plus, l'Eurocode 2, Part 1.2, qui n'est applicable qu'au béton ordinaire, indique, qu'en augmentant la contrainte de compression dans un poteau peu augmenter le risque d'écaillage du béton. Ceci est confirmé par les quelques travaux de recherches expérimentaux et théoriques récents (Benmarce et Guenfoud<sup>1</sup>).

En effet, durant un feu, le poteau est bloqué par la structure environnante contre l'expansion thermique générant ainsi des forces additionnelles dans le poteau. Comme conséquence, en plus des forces de compression axiales dont il est soumis, viennent s'ajouter ces forces additionnelles pouvant atteindre un niveau dangereux, provoquant l'éclatement du béton, mettant à nue l'armature du poteau et par conséquent entraînent une réduction importante de sa résistance. Selon certains auteurs, les forces générées dans le poteau, sont bénéfiques pour les performances de la structure vis-à-vis du feu, du fait qu'elles permettent une redistribution des efforts aux structures avoisinantes. Selon d'autres auteurs, l'imposition de restriction augmente la possibilité de l'éclatement du béton, mais ce n'est l'objectif de ce travail de recherche.

Dans la majorité des cas, l'éclatement des éléments préalablement chargés, même à des taux de chargement relativement faibles ou moyens est plus important que les éléments non chargés. La charge ajoute aux contraintes dues à la pression interstitielle produite par la vapeur. Par ailleurs, plus la charge est grande, moins est la tenue au feu est bonne, car la perte de résistance qui accompagne la montée en température est plus grande dans le cas des BHP que celui des bétons ordinaires.

En général, une augmentation rapide de la température conduit à, l'écaillage de l'élément, parfois explosif et à des résistances plus faibles. C'est le cas typique des feux d'hydrocarbures qui constituent les régimes d'échauffements élevés (ou vitesses d'échauffements élevées).

Ce travail de recherche, il est question de travaux expérimentaux, qui sont la continuité

des travaux réalisés à l'université d'Ulster, en Irlande du nord, et qui essaient de répondre à quelques points qui se posent actuellement dans ce domaine de recherche. Dans ce programme, l'étude de 25 échantillons a été faite afin d'obtenir une meilleure formulation des BHP ou plutôt une formulation optimale, du point de vue de la résistance à la compression (très haute résistance) et du point de vue rhéologique.

Dans ce qui suit, il est question d'une caractérisation des BHP, avec en revue les travaux réalisés sur l'évolution des propriétés physiques et mécaniques des bétons soumis à des températures élevées. Quelques avantages et inconvénients sont sommairement traités. Ensuite, la composition d'un BHP est étudiée, l'évolution de la résistance en compression et module d'élasticité sont présentés en fonction des différents paramètres influençant ces comportements. L'influence des conditions de réalisation des essais et de fabrication des bétons atteignant les 100 MPa est largement discutée, suivi d'une partie expérimentale, enfin dans ce rapport, dont une partie est consacrée à l'influence des quantités d'eau et de fumée de silice dans la composition des BHP, afin d'obtenir une meilleure résistance en compression et une meilleure résistance au feu. Des conseils pratiques sont donnés afin de produire ou de reproduire un BHP dont la résistance en compression pouvant atteindre les 100 MPa. Cette partie expérimentale, a fait l'objet d'une publication internationale.

Quand à l'étude des BHP vis-à-vis du feu, elle s'articule, sur le comportement du matériau vis-à-vis du feu. Enfin, on terminera ce rapport par une conclusion et une perspective.

### **References bibliographiques**

1. Benmarce A. & Guenfoud M., "*Experimental Behaviour of High Strength Concrete Columns in Fire*" Magazine of Concrete Research, Vol. 57, No.5, June, p.283-287

## **CHAPITRE II : PARTIE THEORIQUE**

L'utilisation croissante du béton à haute résistance dans le bâtiment et autres ouvrages suscite des interrogations concernant sa tenue au feu, en particulier en raison du danger de l'éclatement (ou de l'écaillage). Sa plus grande résistance à la compression permet de réaliser des poteaux de dimensions réduites, ce qui diminue l'encombrement. Une des raisons de l'utilisation des BHP dans le bâtiment est le fait que les poteaux constituent la partie la plus importante d'une structure qui va supporter les charges de compression. D'où la nécessité de prendre les dispositions nécessaires contre le feu. Par contre il n'y a pas de règlements donnant des indications sur la résistance au feu, d'un poteau en BHP. En plus, de récents résultats sur le feu, montrent que Les différences de propriétés à haute température entre le BHP et le béton ordinaire, ne sont pas bien définies<sup>1,2</sup>.

Le calcul de la résistance au feu d'un élément structural a pour but de s'assurer que les dimensions de la section sont suffisantes pour garder le transfert de chaleur à travers cet élément dans des limites acceptables et un enrobage moyen du béton suffisant pour garder la température dans l'acier en dessous des valeurs critiques. Quand le BHP est exposé au feu, il peut être à l'origine d'un comportement fragile c'est-à-dire un écaillage ou bien un détachement brutal (parfois explosif) d'écaillures de quelques millimètres à quelques centimètres d'épaisseur<sup>3</sup>. Les armatures sont mises à nue et l'intégrité de la structure est menacée.

Parmi les facteurs qui ont été identifiés comme influant sur l'éclatement du BHP quand il est soumis au feu, certains dépendent des propriétés des matériaux, telle que la porosité, la résistance à la traction, l'élongation thermique, la vapeur contenue dans le béton ou bien les propriétés thermiques. D'autres facteurs, quoique directement influencés par les propriétés des matériaux, dépendent de la structure elle-même, dont la distribution des contraintes qui, elles mêmes dépendent de la charge ainsi que du système d'appui et la présence des armatures (voir tableau 2.1).

**Tableau 2.1 Facteurs influant sur l'éclatement.**

<b>Facteurs tenant compte des propriétés du matériau</b>	Résistance à la compression
	Taux d'humidité/Cure
	Perméabilité
	Porosité
	Détails Granulats
	Rapport Eau / Ciment
<b>Facteurs d'échauffement</b>	Régime d'échauffement
	Nature de l'échauffement
	Température Maximum
<b>Conditions de support</b>	Chargement

	Blocage
<b>Géométrie de l'élément</b>	Type d'élément
	Dimensions de l'élément
<b>Facteurs tenant compte de l'environnement</b>	Conditions de cure
	Conditions de séchage
<b>Autres Facteurs</b>	Age, Fissuration

Un programme expérimental<sup>4</sup> récent a montré que les recommandations de l'Euro code 2 ne sont pas satisfaisantes, même quand elles sont appliquées au béton ordinaire. L'Euro code 2 suggère qu'il ne peut y avoir d'éclatement du béton quand il est soumis au feu, alors que des tests prouvent le contraire. Durant les dernières années, un nombre important d'études a été faites pour comprendre le comportement du béton à hautes performances vis-à-vis du feu, néanmoins, le problème réside dans la résistance de ce matériau notamment son comportement friable. On note à ce propos, un manque d'information sur sa résistance à la compression, ainsi qu'une formulation unique du critère de rupture.

Le béton, matériau de base le plus traditionnel du génie civil, ne pouvait pas échapper, malgré un temps de retard, au formidable mouvement d'évolution technologique et scientifique de ces dernières années. Au cours des années 70, des bétons présentant des résistances supérieures à 100 N/mm<sup>2</sup> ont été utilisés pour la première fois. Le béton à haute résistance (BHR) ou béton à haute performance (BHP), qui a une grande durabilité et assure un niveau élevé de performance structurale, par rapport au béton à résistance normale (BRN) utilisé traditionnellement. Auparavant employé pour les ponts, les constructions en mer et les infrastructures, il est de plus en plus utilisé dans les immeubles de grandes hauteurs, en particulier pour les poteaux.

Un béton classique, pour être coulé, demande une quantité d'eau, supérieure à celle nécessaire à l'hydratation du ciment seulement. Lors de la prise du ciment, cette eau est chassée du béton, lors de son élévation de température puisque les réactions d'hydratation sont exothermiques. Les vides créés par le départ de l'eau, diminuent la résistance du béton. Les BHP utilisent moins d'eau, lors de leur mise en œuvre. L'emploi de produit organique défloculant (condensés de formaldéhyde et mélamine sulfonate ou condensés de formaldéhyde et naphthalène sulfonate), ajoutés au béton frais, jouent le rôle de plastifiants. Cette défloculation permet aux grains de ciment en suspension dans l'eau de retrouver leur granularité originelle (entre 5 et 50 µm pour l'essentiel). Cette voie conduit à une réduction sensible de la quantité d'eau nécessaire, puisque une forte part de celle-ci n'est plus, comme dans le cas du béton traditionnel, piégée dans les floccs de grains de ciment et donc peut être utile à la maniabilité.

Des ajouts de fumée de silice, de fillers calcaires, etc., chimiquement réactifs, qui ont également un effet rhéologique, permettent de fixer, en partie, la chaux libérée par l'hydratation du ciment, en donnant des silicates de calcium qui sont également prise par hydratation. Ces adjuvants peuvent représenter de 2 à 4 % de la masse de ciment.

Donc les deux voies possibles d'obtention des BHP consistaient à réduire la floculation des grains de ciment, en utilisant des superplastifiants tel que le formaldéhyde et mélamine sulfonate, ainsi que le formaldéhyde et naphthalène sulfonate, soit par l'ajout de mélange

granulaire, tel que les fumées de silice, les fillers calcaires etc. Notons que la première solution citée plus haut, peut être utilisée seule et permet des gains de propriétés constructives, d'ouvrabilité et de durabilité intéressantes. L'essentiel de ces propriétés sont cités dans ce qui suit :

- ✚ Du point de vue résistance, certains laboratoires <sup>5</sup> ont mis au point des BHP, dont la résistance à la compression peut atteindre, sans cure thermique, 200 MPa. Globalement, l'augmentation de la résistance est obtenue par la réduction de la porosité du mélange. Cette baisse de la porosité est obtenue grâce à l'emploi conjoint de fumée de silice, qui, notamment par la taille de ses grains, comble les vides entre les grains de ciment, et d'adjuvants superplastifiants qui déflocculent les grains et améliorent le processus d'hydratation.
- ✚ Au niveau de la maniabilité, il existe actuellement des bétons fluides qui peuvent être mis en œuvre sans vibration

Le béton devient de plus en plus technique et la gamme de ses formulations s'adapte à la diversité des ouvrages. La révolution des bétons tient à l'utilisation d'adjuvants organiques et minéraux. Ils accélèrent ou retardent sa prise, facilitent sa mise en œuvre, le fluidifient selon les besoins, réduisent la finition, améliorent sa planéité.

### 2.1 Avantages des BHP

- ❑ Les **BHP** se caractérisent par la faible porosité de leur matrice.
- ❑ Résistance élevée à la compression, ouvrabilité, durabilité, résistance au jeune âge sont les principales propriétés des **BHP**.
- ❑ Le **BHP** est moins perméable que le béton conventionnel, d'où sa plus grande résistance au sel dans l'eau de mer, aux cycles de gel dégel et aux dommages y afférents moyennant l'ajout des produits chimiques.
- ❑ Une résistance accrue permettra d'utiliser des membres plus minces et plus petits et d'avoir des travées plus longues, ce qui devrait réduire le coût de construction des ouvrages.
- ❑ La durée de vie globale de l'ouvrage est prolongée.
- ❑ La période qui s'écoule avant que des travaux d'entretien soient nécessaires est beaucoup plus longue que pour le béton conventionnel; les travaux de réparation perturbent donc moins le public et les coûts d'entretien sont moins élevés.

Le Béton à Haute Performance se comporte différemment par rapport au béton ordinaire.

- ❑ Une réponse linéaire,
- ❑ Moins de fissuration,
- ❑ Un module d'élasticité plus élevée,
- ❑ Une résistance de traction plus élevée
- ❑ Moins de fluage et une ductilité réduite sont juste quelques propriétés des BHP<sup>6</sup>

### 2.2 Inconvénients des BHP

Durant les dernières années, beaucoup d'effort de compréhension a été fait pour connaître le **BHP**, néanmoins le problème réside dans la résistance de ce matériau :

- ❑ Le comportement friable des BHP sous feu,
- ❑ L'effet de l'élancement des poteaux en **BHP**
- ❑ Les recommandations des présents codes de constructions sur le BHP restent une issue controversée.

Quelques problèmes, du point de vue conception tel que :

- ❑ Une formulation unique du critère de rupture n'a pas été établie

- Le manque d'information sur la résistance à la compression des BHP

### Références bibliographiques

1. International Association of Fire Safety Science Symposium, Worcester, MA., June 2002, pp. 1013-1024
2. Doughill, J. W., "*The relevance of the established method of structural fire testing to reinforced concrete*", Applied Materials Research, 5, N°4. Oct. 1996, p.235
3. Diederichs U., Jumpanen, U.M. and Schneider, U., "*High temperature properties and spalling behaviour of high strength concrete*". Proceedings of Fourth Weimar Workshop on High Performance Concrete, HAB Weimar, Germany, 1995, pp. 219-235.
4. Aldea C. M., Franssen J. M., & Dotreppe J. C. "*Fire test on normal and high strength reinforced concrete columns*" Proceedings International workshop on fire performance of high strength concrete, NIST, Gaithersburg, MD, Fev. 1997, pp.109-124.
5. Kodur, V.K.R. and McGrath, R., "*Performance of high strength concrete columns under severe fire conditions*". Proceedings Third International Conference on Concrete under Severe Conditions, Vancouver, BC, Canada, 2001, pp. 254-268.
6. Anderson F.D., "*72-Story high rises with 83MPa Fly Ash concrete. A case history*". 3<sup>rd</sup> International Conference on Fly Ash, Silica Fume, Slag ad Natural Pouzzolans in concrete, ACI SP 114-29, 1989, Trondheim.

## **CHAPITRE III : PARTIE EXPERIMENTALE**

### **3.1 Composition des BHP**

#### **3.1.1 Introduction**

Certaines études<sup>1, 2, 3</sup> ont montrées que pour augmenter la résistance en compression d'un béton il suffisait de:

- ✚ Diminuer autant que possible le rapport E/C du béton; pour y arriver, on diminue la quantité d'eau de gâchage en utilisant de fortes doses de fluidifiant;
- ✚ Sélectionner en un lieu donné le couple liant/fluidifiant le plus efficace, tant du point de vue rhéologique (perte d'affaissement) que du point de vue résistance mécanique;
- ✚ Utiliser les granulats suffisamment résistants et adhérents pour retarder le plus possible l'apparition de fissures catastrophiques, au sens de la mécanique de la rupture, lorsque le béton est soumis à des efforts croissants.

Les exigences auxquelles doit satisfaire le béton à haute performance par rapport au béton ordinaire sont sensiblement plus élevées par rapport à la qualité des composants du béton et du coffrage, la nature et la fréquence de contrôle du béton frais ainsi que la formation du personnel<sup>4</sup>. Les BHP se distingue par rapport au béton ordinaire par:

#### ✚ **Sa microstructure**

Des études réalisées par Malier<sup>5</sup>, ont établi les liaisons entre l'amélioration des performances du béton d'une part, et la densification de la matrice et de l'interface pâte de ciment-granulats d'autre part. Ainsi l'observation de la microstructure a montré que:

- ✓ Dans des BHP de 65 MPa, réalisé sans fumée de silice, la porosité capillaire est réduite par rapport à celle du béton ordinaire. La texture des hydrates reste cependant la même et l'interface pâte de ciment-granulats est encore poreuse et cristallisée;
- ✓ Dans des BHP de 105 MPa, avec des fumées de silice, la matrice est parfaitement homogène, d'apparence amorphe. Les particules de fumées de silice, uniformément réparties entre les grains de ciment sont des sites de nucléation des hydrates. La porosité capillaire est réduite et discontinue, contrairement à celle des autres bétons qui est interconnectée. Les particules de fumées de silice jouant un rôle de filler et de pouzzolane, densifient l'interface pâte de ciment-granulats. La rupture est alors transgranulaire, alors qu'elle est intergranulaire dans les autres bétons. De plus, la fumée de silice adsorbe l'excès des molécules d'eau qui migrent plus vers les granulats. L'absence de ressuage élimine l'auréole de transition.

#### ✚ **Sa mise en oeuvre**

La suppression du seuil de cisaillement dans la pâte de ciment à l'état frais par ajout de superplastifiants conduit à un béton s'écoulant aisément, bien qu'ayant un aspect visqueux et collant. La mise en place, le pompage sont des opérations particulièrement facilitées.

#### ✚ **Son comportement mécanique**

Au-delà du gain de résistance à la compression, notons tout l'intérêt de l'accroissement de la résistance à la traction et au cisaillement dans tous les problèmes valorisant ces propriétés (résistance des poutres à l'effort tranchant, mur de refend, problème de charges locales et de poinçonnement...).

#### ✚ **Sa durabilité**

Le béton, matériau poreux, est caractérisé par la répartition de la taille des cavités et leur connectivité, par les discontinuités de micro-texture comme les joints de grain et par la cristallinité des hydrates. A cette porosité est associée une perméabilité qui favorise les transports de fluide susceptibles de créer expansion, fissuration et corrosion des armatures.

Les BHP résiste mieux aux attaques chimiques que les bétons traditionnels. La résistance aux cycles gel-dégel, montre le bon comportement des BHP qui ont un réseau de pores tellement fin que la glace ne se forme pas durant le gel, même si le béton est saturé en eau.

## **3.2 Microstructure des BHP**

### **3.2.1. Introduction**

Un béton de ciment Portland est un matériau hétérogène et poreux. La matrice qui agglomère les grains de sable et les granulats est constituée de différents hydrates dont les plus nombreux sont les silicates hydratés C-S-H qui peuvent être fibreux et  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  qui cristallise en plaquettes hexagonales massives et superposées. La porosité totale d'une pâte de ciment portland est de 25 à 30% en volume pour un E/C = 0.5. Ce volume poreux comprend deux familles de cavités :

- a) les pores de la structure du C-S-H, leur taille est de quelques nanomètres,
- b) les pores capillaires entre les hydrates, les bulles d'air, les fissures ; leur taille varie de quelques 100 nm à quelques mm.

La faiblesse des performances mécaniques du béton a été attribuée à la porosité capillaire et à l'excès d'eau nécessaire à la maniabilité du béton frais. Une amélioration a été atteinte par divers procédés réduisant la porosité (imprégnation, compression) et le rapport E/C (adjuvants).

### **3.2.2. Pâte de ciment à hautes performances**

Obstruer les pores capillaires ou extraire l'excès d'eau par serrage ou réduire le rapport E/C par des fluidifiants sont des procédés qui densifient la pâte de ciment qui apparaît alors plus homogène et plus amorphe que la pâte de ciment conventionnelle.

### **3.2.3. Interface pâte de ciment-granulat**

Dans le cas des bétons ordinaires, l'interface pâte de ciment-granulat est mieux cristallisée, plus poreuse et moins résistante que la matrice, en raison d'un excès d'eau. Les caractéristiques de la liaison pâte de ciment-granulats comprennent la surface de fracture, la fissuration, la composition et la texture des hydrates.

## **3.3 Rapport eau-ciment**

L'eau est un des ingrédients essentiels du béton, avec le ciment. L'eau de gâchage remplit deux fonctions : une fonction physique qui confère au béton des propriétés rhéologiques d'un liquide et une fonction chimique qui contribue au développement de la réaction dite d'hydratation. Les particules de ciment qui présentent de très nombreuses charges électriques superficielles non saturées ont une forte tendance à flocculer lorsqu'elles sont mises en contact avec un liquide aussi polaire que l'eau. La réaction d'hydratation se manifeste aussitôt que le ciment est mis en contact avec l'eau. Ceci est due au fait que certains composés du ciment, le  $\text{C}_3\text{A}$  en particulier, sont très réactifs et que les ciments Portland actuels présentent de très fines particules de l'ordre de quelques micromètres qui sont très réactives. Les principaux facteurs qui affectent la porosité de la pâte de ciment

hydraté sont le rapport de l'eau disponible au volume de la phase de silicates qui peut s'hydrater et la quantité d'air piégée durant le malaxage.

En tenant compte du rôle prédominant du rapport eau/ciment sur la pâte de ciment hydraté, en 1972, certains chercheurs<sup>5</sup> ont pu battre des records de résistance en utilisant une technique de consolidation à très haute pression (350 MPa) et une température de mûrissement très élevée (250°C pendant 2 heures), ont fabriqués des pâtes de ciment qui avaient un rapport eau/ciment aussi faible que 0.093 et une résistance à la compression de 470 MPa à 28 jours.

En conclusion, la résistance d'une pâte de ciment hydraté peut être améliorée en considérant de façon plus détaillée les remarques suivantes :

- Porosité: un grand nombre de gros pores ou de vides de diamètre supérieur à 50nm, concentrés en un endroit donné, peuvent diminuer considérablement la résistance d'un matériau;
- La taille des granulats: en général, la résistance d'une phase cristalline augmente lorsque la taille des grains diminue;
- Hétérogénéité: avec des matériaux multiphasiques, les hétérogénéités microstructurales sont une source de perte de résistance.

Pour pouvoir améliorer la résistance de la pâte de ciment hydraté, il est absolument nécessaire d'appliquer ces trois principes à sa microstructure<sup>6,7</sup>.

Dans le processus de fabrication du béton à haute résistance, il est indispensable de réduire le rapport Eau/Ciment. Ce rapport varie de 0.4 à 0.7 pour le béton ordinaire alors que ce rapport varie entre 0.2 à 0.38 pour le béton à haute résistance<sup>8</sup>. De tel rapport réduit, fait que le mélange soit sec, dur et très difficile à malaxer. Pour augmenter son ouvrabilité, un super fluidifiant est ajouté dans la gâchée. Ce super fluidifiant facilite le processus de malaxage, de compactage ainsi que sa mise en œuvre dans les coffrages.

### **3.4 Granulats**

L'autre paramètre crucial dans le mélange de béton à hautes résistances est le rapport des gros granulats sur les granulats fins. Très peu a été fait afin d'optimiser les caractéristiques des granulats fins des BHP. Selon une étude récente<sup>7</sup>, l'utilisation des granulats fins est très recommandée du fait de sa faible demande d'eau et de ces effets sur la stabilité du béton frais. Il est recommandé aussi d'utiliser du sable de rivière comme composant des BHP, puisque les constituants des BHP sont très riches en particules fines. Pour produire le béton à hautes résistances il est conseillé d'utiliser un rapport de gros granulats sur granulats fins de 2/1. La grosseur des granulats dans le béton influe d'une manière significative sur la résistance en compression. D'autres facteurs tels que la forme et la taille des granulats peuvent effectivement affecter la résistance du béton. Les bétons légers sont fabriqués avec des granulats légers tel que la cendre volante, le clinker, et la perlite. La particularité de ces granulats légers, ils sont moins denses. Les bétons fabriqués avec ces granulats donnent toujours une résistance assez élevée, et de bonnes qualités d'isolation comparées avec ceux ayant des granulats denses.

#### **3.4.1 Granulats à base de calcaire**

Le béton fabriqué avec des granulats à base de calcaire est considéré comme un béton ayant des qualités désirables du fait qu'ils ne désintègrent pas lorsqu'il est soumis à un feu, comparativement avec ceux à base de silice, qui se comportent moins bien vis-à-vis du feu.

### 3.4.2 Granulats à base de silice

Les granulats à base de silice sont connus pour leur expansion durant un feu, ce qui entraîne une désintégration de ceux-ci. D'autres types de granulats peuvent être utilisés tel que le granite. Il est recommandé d'utiliser dans le mélange, des granulats ayant une surface sèche; ce qui va garantir un meilleur contrôle de l'eau du gâchage.

## 3.5 Adjuvants

Les bétons à haute performance utilisent moins d'eau lors de leur mise en œuvre. Des adjuvants (naphtalènes sulfonates ou dérivés mélaminés), ajoutés au béton frais, jouent le rôle de plastifiants. Ces adjuvants peuvent représenter de 2 à 4% de la masse de ciment. Les adjuvants comprennent les réducteurs d'eau, les super plastifiants et les entraîneurs d'air. Différents adjuvants influencent l'ouvrabilité, l'adhérence, l'étanchéité à l'humidité, l'imperméabilité, le coulage, la formation de gaz et la facilité de pompage du béton. En effet ces adjuvants ont un effet rhéologique, permettant de fixer, en partie, la chaux libérée par l'hydratation du ciment, en donnant des silicates de calcium qui font également prise par hydratation. Ces adjuvants, ont un très fort pouvoir défloculation des grains de ciment et des ultra fines. Ils limitent le bullage et améliorent le parement des bétons. Les superplastifiants réducteurs d'eau, sont des polymères de synthèse qui se présentent sous forme de liquide, ajoutées en même temps que l'eau de gâchage. Il existe trois types de super fluidifiant liquide: à base de Lignosulfonate, Mélanine sulfonates et Naphtalène formaldéhyde, qui peuvent être à base de calcium ou bien de sodium. Il a été démontré que les superplastifiants à base de sodium donnaient une bonne ouvrabilité, sans effets secondaires.

### 3.5.1 Réducteurs d'eau

Pour essayer de lutter contre cette tendance qu'ont les grains de ciment à flocculer et pour diminuer la quantité d'eau de gâchage qu'il faut ajouter, on utilise des molécules organiques, bien connues pour leurs propriétés dispersantes, connues sous le nom de réducteur d'eau. Celles-ci sont constituées de produit à base d'un déchet des usines de pâtes et papiers: les lignosulfonates. Ces produits avaient l'avantage d'être très bon marché et ne nécessitent pratiquement aucun traitement additionnel pour être utilisés avec succès dans le béton.

### 3.5.2 Fumée de silice

L'augmentation de la résistance est obtenue par la réduction de la porosité du mélange. Cette baisse de la porosité est obtenue grâce à l'emploi conjoint de fumée de silice, qui, notamment par la taille de ses grains, comble les vides entre les grains de ciment, et d'adjuvants super plastifiants qui déflocculent les grains et améliorent le processus d'hydratation. On obtient ainsi une multiplication par trois ou quatre de la résistance en compression par rapport à un béton ordinaire, une meilleure maniabilité du matériau et une forte diminution de sa perméabilité. Le surcoût est plutôt faible et sa mise en œuvre relativement facile. L'utilisation des fines devrait donc progresser notamment dans les bâtiments de grande hauteur et les ouvrages d'art. La fumée de silice qui est un sous-produit de la production du silice ou d'alliages de silice, peut être sous forme de poudre ou bien de pâte. La fumée de silice peut remplacer le ciment, il suffit d'une part de fumée de silice pour remplacer quatre parts de ciment tout en maintenant la quantité d'eau constante. La fumée de silice peut être utilisée dans différents dosages entre 1% et 20% du poids du ciment.

### 3.5.3 Dosage en fluidifiant

La dose du super fluidifiant utilisée dans le mélange est limitée de 1 à 2.5% (du poids du ciment) pour optimiser l'augmentation de l'ouvrabilité tout en maintenant la résistance du béton. Etant donné que, dans les bétons à hautes performances, il est très important de contrôler de façon très précise le rapport E/C. Il est absolument impératif de savoir corriger la quantité d'eau de gâchage pour tenir compte de la quantité d'eau apportée par la solution de fluidifiant.

En conclusion, l'utilisation des fumées de silice et des ajouts cimentaires, lorsqu'ils sont disponibles à un prix compétitif, est bénéfique lorsqu'on fabrique des BHP parce que l'on peut ainsi réduire les coûts de fabrication.

### 3.6 Cure

La cure a une grande influence sur les propriétés finales du béton. Le béton soumis à 7 jours de cure à l'humidité atteint 75 % et 100 % de sa résistance nominale après 7 jours et 180 jours respectivement. Par comparaison, le béton soumis à 3 jours de cure n'atteint que 80 % de sa résistance nominale et le béton qui n'est soumis à aucune cure n'atteint que 55 % de sa résistance nominale. Pour maintenir l'humidité, on couvre le béton d'une pellicule plastique ou on applique des produits de cure par vaporisation. On retient ainsi l'eau dans le béton en empêchant l'évaporation. Sur les surfaces planes, on peut ajouter de l'eau par arrosage ou recouvrir le béton d'une nappe d'eau, de films imperméables, de sable mouillé ou de jute ou de paille imbibée d'eau. Dans le cas du béton coffré, le fait de garder les coffrages en place aide à maintenir l'humidité dans le béton. Pour obtenir une cure adéquate, il faut aussi surveiller la température. La température idéale est de 15°C, le maximum étant de 32°C et le minimum, de 4°C. Par temps chaud, on utilise de l'eau fraîche pour garder le béton frais. Par temps froid, on empêche le béton de perdre sa chaleur en utilisant des matériaux isolants ou des coffrages ou des abris chauffés. L'hydratation du ciment génère de la chaleur qui sera utile si elle est conservée dans le béton par un isolant.

### 3.7 Production des BHP

Le problème principal dans la production était la qualité du matériau juste avant le coulage. Des tests ont été effectués pour déterminer les propriétés du béton frais dépendant du temps, à savoir la maniabilité<sup>12</sup>. Les BHP ont été produits dans plusieurs usines conventionnelles<sup>13</sup>, avec les matériaux locaux, l'application des principes simples telle que la défloculation des grains de ciment ainsi que l'ajout cimentaire, permet, sans majorer le prix de base du béton de façon sensible, d'obtenir des bétons à hautes performances qualifiés, en terme de résistance caractéristiques à la compression par des deux valeurs comprises entre 60 et 80 MPa. Une approche plus fine, un choix plus strict des constituants de base, une acceptation d'un accroissement du prix plus sensible, une obligation absolue d'utiliser les deux voies précédemment citées peuvent conduire déjà, dans les conditions d'un processus industriel, à l'obtention de résistances comprises entre 90 et 140 MPa. Enfin, une approche de nature différente faisant l'objet à des constituants très sélectionnés (ciment et granulats de qualités exceptionnelles, adjonction de polymères...) à de nouveaux types de fonctionnement (confinement...) peut permettre d'atteindre des résistances mécaniques de plusieurs centaines de mégapascals et ouvrir ainsi le champ à de nouvelles applications de ces bétons hyper-performants.

### 3.8 Conclusion

Les BHP sont des bétons qui ont une très faible porosité qui s'obtient en utilisant moins d'eau de gâchage par rapport aux bétons ordinaires, de telle sorte que, la partie liante du béton les particules de ciment et d'ajouts cimentaires sont très rapprochées les unes aux

autres. Au fur et à mesure que la porosité de la pâte de ciment décroît, la résistance du béton augmente tant et aussi longtemps que les granulats, particulièrement les plus gros, sont suffisamment résistants. Ainsi, la sélection et la composition des ingrédients d'un BHP sont beaucoup plus critiques que dans le cas des bétons ordinaires.

### Références Bibliographiques

1. Aitcin P. -C. "*Du giga pascal au nanomètre*", Séminaire ATIL-ENPC sur les bétons à hautes performances, Paris, 1988, 32p.
2. Aitcin P. -C. "*Les fluidifiants : des réducteurs d'eau pas comme les autres*", Séminaire ATIL-ENPC sur les bétons à hautes performances, Paris, 1988, 15p.
3. Aitcin P. -C. "*Comment mesurer la résistance en compression des bétons à hautes performances*", Cours intensif sur les bétons à hautes performances, Université de Sherbrooke, 1988, 15p.
4. Faris A. A., Abid A.Tair, O'Connor D., Benmarce A. and Nadjai A., "*Useful and practical hints on the process of producing High-Strength Concrete*" Practice Periodical on Structural Design and Construction, Vol. 6, No. 4, 2001; p.150-153.
5. Malier Y. "*Les bétons à hautes performances, Caractérisation, durabilité, applications*", Presses de l'école nationale des Ponts et Chaussées 1992.
6. Regourd M. "*Microstructure of high strength cement paste systems*", Materials Research Society, édité par J.F. Brown, vol. 42, invited paper, p.3-17.
7. Nielson L. F. "*Strength development in hardened cement paste: examination of some empirical equations*". Materials and structure, 26, juin 1993, 255-260.
8. de Larrard F. "*Concrete mixture proportioning*" - A Scientific Approach, Modern Concrete technology Series No. 9 (édité par S. Mindess et A. Bentur), E & FN spon, Londres, mars 1999,421.
9. Bache H. H., "*Densified cement/ Ultra fine particle-based materials*", présenté à la 2<sup>ème</sup> Conférence internationale sur les superplastifiants dans le béton, 11-12 Juin 1981, Ottawa, Canada, publié par Aalborg Cement, Aalborg, B.P 163, DK-9100 Aalborg, Danemark, 12p.
10. Aitcin, P.-C. "*Condensed silica fume*", Editions de l'Université de Sherbrooke, Québec, Canada, ISBN2-7622-0016-4, 1983, 52p
11. [www.gov.on.ca/omfra/french/engineer/facts](http://www.gov.on.ca/omfra/french/engineer/facts)
12. Hu C., et de Larrard F. "*The rheology of fresh high performance concrete*". Cement and Concrete Research, 26, fev. 1996, 283-294.
13. Levy C. et Le Boulicaut, J.-P. "*Le BHP livré par réseau de centrales de BPE : une réalité, dans les bétons à hautes performances*"- Caractérisation, Durabilité, Applications, édité par Y. Malier, Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, ISBN 2-85978-187-0, p95-114.

## **CHAPITRE IV : COMPORTEMENT DU BHP AU FEU**

### **4.1 Introduction**

Le comportement des structures en BHP soumis au feu peut, en général, peut être divisé en deux : une partie comportement du matériau et une partie comportement structural. La résistance au feu des BHP, sur le plan comportement du matériau se caractérise par l'irréversibilité de la chute de la résistance (en compression  $f_c$ ) et de la rigidité élastique (module d'élasticité). Le béton est un matériau dont le comportement est contrôlé par celui des granulats et par celui de la matrice pâte-ciment. Normalement, le granulat quand il est chauffé se dilate. Par contre, à l'intérieur de la matrice, deux influences opposées sont en action. La dilatation thermique est réduite ou bien soustraite par le retrait dû à l'échappement de l'eau. Donc la déformation nette de la pâte de ciment chauffée peut être en expansion ou bien en contraction, cela dépend du régime et de la durée de l'échauffement. Les différences dans les déformations thermiques libres des granulats et de la matrice créent des contraintes internes dans le béton qui influencent directement sur la capacité portante de l'élément et provoque à petite échelle des fissures, résultant en une perte de résistance et de rigidité.

#### 4.1.2 Les BHP vis-à-vis du feu

La différence entre les BHP et le béton ordinaire, du point de vue comportement, se résume en deux points essentiels <sup>8</sup>, à savoir:

- ✚ La diminution relative de la résistance à des températures de 100°C à 400°C
- ✚ L'éclatement explosif des spécimens en BHP à ces températures intermédiaires.

En terme de perte de résistance, des études <sup>8,9</sup>, ont montrées que pour des températures intermédiaire entre 100°C et 400°C, les BHP peuvent perdre jusqu'à 40 % de sa résistance à température environnante, une réduction de 20 à 30 % plus que le béton ordinaire dans les mêmes conditions. En terme d'éclatement explosif, qui fait référence à une soudaine et violente rupture des couches superficielles du béton chauffé, il a été observé dans des tests de laboratoire <sup>10</sup> que les BHP sont susceptible au feu par rapport au béton ordinaire, même si le régime d'échauffement est moins de 5 °C/min qui est un peu moins d'un feu réel. Par contre ce phénomène reste toujours incompris.

##### 4.1.2.1 Différents tests de résistance au feu

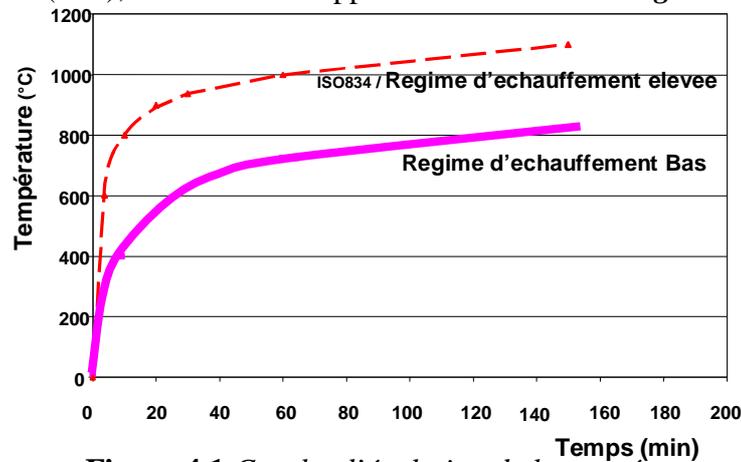
La résistance au feu d'un élément de construction est déterminée en conduisant des tests, en accord avec le BS 476 Pt 20 (Euro Code 2.Pt12). La procédure implique l'exposition de l'élément de construction ou l'ensemble du prototype, à un feu qui reproduit fidèlement les conditions idéales suivant la courbe standard de température-temps. L'élément à tester doit avoir les dimensions de l'élément et autres propriétés standard.

Les tests de résistance au feu sont utilisés dans le but de <sup>5</sup>:

- Atteindre la classification standard dans le but d'être ou ne pas être acceptée par les institutions de normalisations.
- Essayer de mieux comprendre le comportement des matériaux testés.
- Etablir des paramètres afin de prédire le comportement d'autres types d'assemblages ne pouvant pas être appropriés pour certains tests et fournir des données pour une estimation analytiques de la résistance au feu.

#### 4.1.2.2 Courbe normalisée d'évolution de la température

Deux courbes d'évolution de la température ont été dans tout travail expérimental, à savoir la courbe ISO834 (ou BS476, selon la British Standard) en régime élevé (H.H) et la courbe régime bas (L.H), connue sous l'appellation : "**Low cooking**"



**Figure 4.1** Courbe d'évolution de la température

Quand un élément est soumis à un test vis-à-vis du feu, il doit être soumis à une température définie par l'expression :

$$\Theta_f = 345 \ln(8t + 1) + \Theta_a \quad (4.1)$$

Avec  $\Theta_f$  : Température du four (°C)

$\Theta_a$  : Température ambiante à  $t = 0$  min (°C)

$t$  : Temps en minutes du début du test

Cette courbe d'évolution de la température à l'intérieur du four est connue, selon les normes Anglaises, la courbe d'évolution de la température, sous la référence BS 476 (figure 4.1).

#### 4.1.2.3 Interprétation des tests réalisés dans un four

L'équation 4.1 permet de calculer la durée durant laquelle le spécimen, en conformité avec les règlements, doit résister au feu, n'est pas nécessairement la même durée que celle de la réalité. Par exemple, une heure de résistance au feu ne veut pas dire que le spécimen va résister à un feu réel durant une heure, mais en vérité il va résister à un feu dont sa sévérité correspond à une heure de test dans un four. En plus, la question se pose sur la continuité de la structure et le blocage thermique, dans un feu réel. Il n'y a pas de continuité de l'échauffement dans la totalité du spécimen dans le four durant le test et que la structure est capable de transférer la chaleur à des parties éloignées de la source, produisant ainsi un évier de chaleur, et que celle-ci sera édiflée de manière aléatoire, comme la température de la flamme et la consommation d'énergie.

Des tests à grande échelle <sup>12</sup>, ont montrés que dans le cas d'un feu, la température varie énormément. Un feu initialement moins important, peut varier rapidement, à un feu très important pouvant aller jusqu'à plusieurs heures. Il faut noter que, dans bon nombre de cas, le taux d'échauffement dans un feu réel est plus élevé que celui des courbes standard

#### 4.1.2.4 Pâte de ciment sous l'effet des températures élevées

L'échauffement de la pâte de ciment durci provoque la déshydratation par absorption et par décomposition des hydrates. Ceci peut causer un retrait et donc un changement de la

densité du béton, et modifie les forces liants les minuscules particules de cristaux composant la pâte de ciment. Dans ce cas le séchage affecte les dimensions, la rigidité ainsi que la résistance de la pâte durcie. Une petite augmentation de la température, entraîne une augmentation de la résistance, puisque l'eau s'évapore et la structure de la pâte, en séchant, devient plus compacte. Par contre, l'exposition de celle-ci à de températures élevées, entraîne une décomposition et une perte de résistance, aux environ de 300° C. Les changements chimiques qui se produisent dans la pâte de ciment lors d'une exposition au feu ne sont pas bien connus à part celui de la couleur.

#### 4.1.3 Propriétés mécaniques du béton à haute température

##### 4.1.3.1 Résistance à la compression des BHP

Evidemment, la résistance à la compression des BHP est plus élevée que celle du béton ordinaire et qu'il n'est pas aussi facile qu'on le pense de la mesurer correctement lorsqu'elle dépasse 60 MPa. Comme dans le cas des bétons ordinaires, la résistance à la compression des BHP augmente quand le rapport eau/liant diminue, mais, à l'inverse des bétons ordinaires, cette loi du rapport eau/liant reste valable jusqu'au moment où la résistance à l'écrasement du gros granulat entraîne la rupture des BHP. Quand les gros granulats ne sont plus suffisamment résistants par rapport à la résistance de la pâte de ciment hydraté, la résistance à la compression des BHP n'augmente plus de façon significative au fur et à mesure que l'on diminue le rapport eau/liant. La seule façon alors d'augmenter cette résistance est donc d'utiliser un type de granulat plus résistant. Même lorsque le gros granulat est suffisamment fort pour ne pas être le facteur principal qui limite la résistance à la compression d'un BHP, il peut être encore très difficile de dégager une relation générale entre le rapport entre eau/liant et la résistance à la compression qui peut être atteinte puisque d'autres facteurs que le rapport eau/liant influencent la résistance à la compression comme le montre le tableau 4.1. Une étude réalisée par Faris et al <sup>14</sup>, a permis de conclure que le rapport eau/liant, grosseur des granulats, la présence ou pas de fumée de silice, tous ces paramètres influent les uns sur les autres.

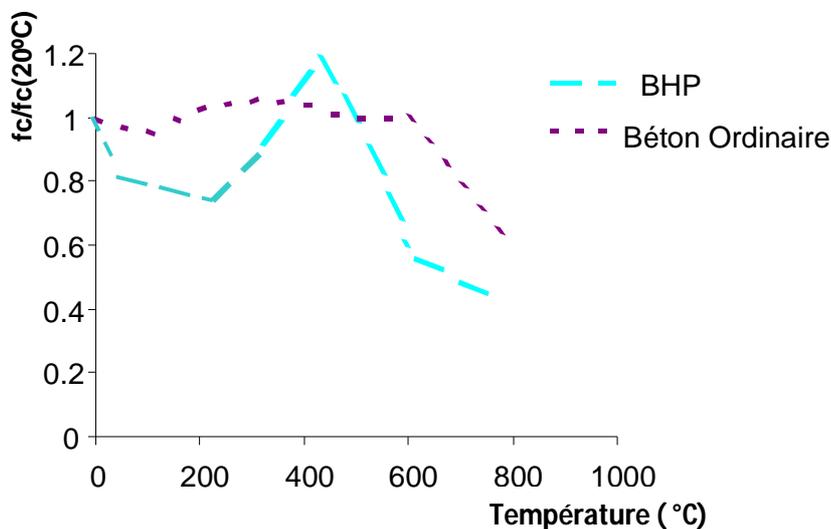
**Tableau 4.1** Résistance à la compression des BHP en fonction du rapport eau/liant

<b>E/L</b>	<b>Variation de la résistance en compression</b>
0,40-0,34	50 à 75 MPa
0,35-0,30	75 à 100 MPa
0,30-0,25	100 à 125 MPa
0,25-0,20	Plus de 125 MPa

##### 4.1.3.2 Effet de la température élevée sur la résistance à la compression

Les BHP sont employés principalement dans les structures ayant de très grandes charges de compression, d'où l'étude d'un des aspects les plus importants de n'importe quelle analyse, l'effet des températures élevées sur la résistance à la compression. Différentes méthodes sont utilisées pour tester les spécimens sous le feu. Parmi les plus importantes, la méthode dite "Stressed method" qui implique un pré chargement d'un échantillon jusqu'à 20-40 % de sa capacité avant de le mettre à température jusqu'à la rupture. L'autre méthode dite " Unstressed Residual method" qui consiste à chauffer

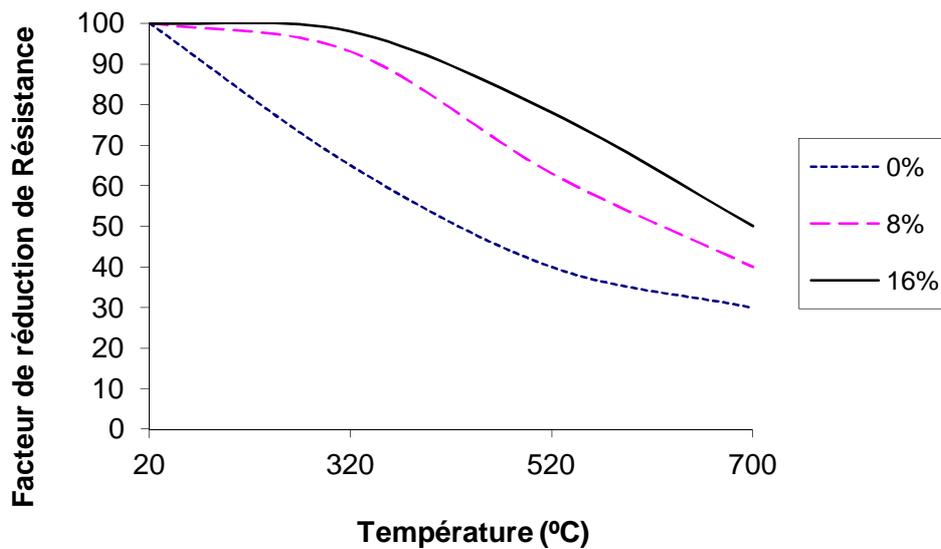
l'échantillon à la température désirée ensuite après refroidissement, tester jusqu'au point de rupture. Selon certains chercheurs<sup>15</sup> durant un test, la résistance est inférieure dans le cas de la méthode unstressed que celle de la méthode "stressed" et si le béton est chargé pendant qu'il est chauffé il en résulte une perte de résistance relativement faible<sup>8</sup>. Phan et al<sup>16</sup>, suggère que la méthode dite "stressed" est adéquate, lors des tests de performance de poteau en béton sous le feu.



**Figure 4.2** Comparaison des résistances du béton ordinaire et les BHP

Une comparaison entre les résultats des contraintes et la courbe de calcul fournit par le Comité Européen du Béton<sup>17</sup> et l'Euro code 2 est montrée sur la figure 4.2. Le béton en général, peut perdre approximativement 25% de sa résistance à la compression quand il est soumis à une température qui avoisine les 300 °C et 75% quand il est exposé à une température de 600 °C. Le module d'élasticité est réduit dans les mêmes proportions<sup>16</sup>. La relation contrainte-déformation du béton est modifiée quand il est exposé au feu.

Un béton classique, pour être coulé, demande une quantité d'eau supérieure à l'eau nécessaire à la seule hydratation du ciment. Lors de la prise du ciment, cette eau est chassée du béton lors de son élévation de température (les réactions d'hydratation sont exothermiques). Les vides créés par le départ de l'eau diminuent la résistance du béton. Williamson et Rashed<sup>18</sup> ont investis les effets du volume de la fumée de silice sur la perte de résistance à la compression du béton avec la température (Figure 4.3). A partir de cette figure on peut voir que l'ajout de fumée de silice a un effet sur la perte de la résistance à la compression à haute température.



**Figure 4.3** Résistance d'un béton avec différents volumes de fumée de silice en fonction de la température

La résistance à la compression sous feu se fait en trois phases principales<sup>18</sup>.

- Une perte initiale de résistance (100-300°C)
- Une augmentation de la résistance à la compression (300-400°C)
- Une diminution graduelle la résistance à la compression (400-700°C)

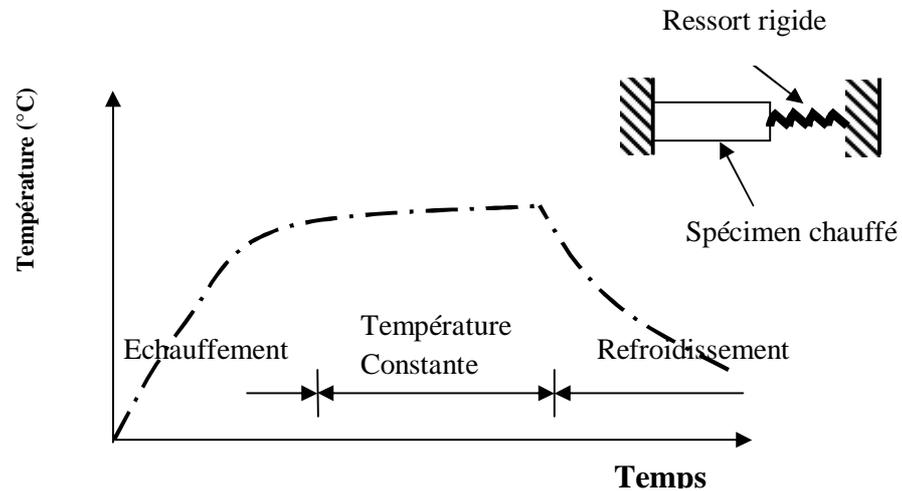
La perte initiale de la résistance est due au fait que le béton à haute performance a une grande densité donc moins de pores, ce qui retarde l'expulsion de l'eau absorbée, entraînant donc la perte initiale de résistance. L'augmentation de la résistance à la compression, suivi d'une expulsion de l'eau absorbée a été attribuée à une rigidité totale de la pâte de ciment due à l'absence d'humidité. Au dessus de la température 400°C, la déshydratation de la pâte de ciment provoque le retrait couplé avec l'expansion de granulats, provoquant un écaillage graduel des liants, réduisant ainsi progressivement la résistance du béton.

En conclusion, l'avantage incontestable des bétons ordinaires en tant que matériaux de construction est leur très bonne résistance au feu, rend les structures en béton parmi les plus sécuritaires en cas d'incendie. Le béton est utilisé pour protéger l'acier structural contre le feu. Même si la capacité structurale du béton diminue quand il est exposé à une très haute température, cette diminution n'entraîne pas l'effondrement de la structure. Les BHP ne sont pas des matériaux aussi poreux qu'un béton ordinaire, il ne contient pas d'eau libre et, quand il est sujet à une augmentation rapide de température, il a tendance à écailler. Cependant, les armatures d'acier peuvent diminuer cet écaillage et aider l'élément structural à conserver suffisamment de force résiduelle pour maintenir l'intégrité de la construction.

#### 4.1.3.3 Comportement en compression en conditions transitoires

Les résultats obtenus jusqu'à présent ont été réalisés sur des spécimens maintenus à des températures élevées durant une période de temps avant d'être testés. Il y a peu de résultats concernant le comportement du béton dans des conditions transitoires qui sont en relation avec le feu. Les travaux entrepris par Gustafarro<sup>19</sup>, Fisher<sup>20</sup>, et Purkiss<sup>21</sup>, ont permis de donner une image qualitative des conditions transitoires. L'expansion thermique d'un spécimen non chargé, sans restriction, quand il est chauffé (lentement) et ensuite laissé se

refroidir, est illustrée sur la figure 4.4. Quand la température, est moins de 300°C, la quantité de fissures qui se produit du fait des différences dans les mouvements thermiques de la pâte de ciment et des granulats n'est guère significative. Le mouvement thermique est intermédiaire entre celui des granulats et la pâte. La pâte, une fois sèche, rétrécit. Il n'y a pas de regain de retrait une fois le spécimen froid. Donc il y a un raccourcissement résiduel du béton après un cycle d'échauffement et de refroidissement. Le retrait a été, bien sûr, accéléré par l'échauffement du spécimen.



**Figure 4.4** Spécimen en béton chauffé et bloqué.

A haute température, du fait de l'incompatibilité thermique les contraintes développées sont plus grandes et peuvent causer des fissures. Celles-ci se développent principalement entre les granulats et la pâte de ciment. La structure du béton est donc affaiblie, et la pâte de ciment n'est plus capable de retenir l'expansion des granulats. Le résultat est que l'expansion thermique du béton s'approche de celle des granulats. La fissuration est irréversible, ce qui entraîne de larges expansions résiduelles du fait du refroidissement. Ceci illustre donc la relation complexe entre le séchage, les mouvements thermiques des composants et la fissuration.

#### 4.1.3.4 Module d'élasticité des BHP

Dans le cas du béton à hautes performances la quantité de la pâte peut être plus grande que celle de granulats et donc le lien étant plus faible. Si le granulat est plus fort que la pâte, alors il y a un transfert de contrainte à l'interface entre granulats et la pâte. Le module d'élasticité des BHP dépendra du type de granulat utilisé. La relation qui lie la valeur du module de déformation longitudinale à celle de la résistance à la compression reste valable pour les BHP, quelle que soit la formule retenue du fait de la dispersion des résultats expérimentaux. La formule utilisée pour calculer le module d'élasticité étant comme suit <sup>23</sup>:

$$E = -52 + 41.6 \log(E_a) + 0.2f'_c \text{ (GPa)} \quad (4.2)$$

Ou  $E_a$  : est le module d'élasticité des granulats

$f'_c$  : Résistance à la compression du béton

Le coefficient de Poisson des BHP reste de l'ordre de 0.20 à 0.25

#### 4.1.3.5. Fluage des BHP

Ce phénomène peut être observé, avec la même intensité, en traction, en torsion, etc. Il dépend de plusieurs paramètres tels que la nature du béton, l'âge de mise en charge et, surtout des conditions ambiantes. Dès qu'on décharge un spécimen, on observe une diminution instantanée des déformations, suivie d'une diminution différée appelée recouvrance. Le fluage dépend essentiellement de :

- La charge appliquée : sous des charges modérées, on peut considérer qu'il est proportionnel à la charge appliquée, donc à la déformation instantanée, au delà de 50 % de la charge de rupture, il croit cependant plus vite que la contrainte.
- La nature du béton, de la même manière que la déformation instantanée, sauf pour le béton léger.

Le fluage des BHP est inférieur à celui des bétons ordinaires. Cependant la déformation totale, instantanée, différée, reste du même ordre de grandeur car, si le fluage est moindre, la déformation est plus élevée du fait de la plus grande contrainte appliquée. Le coefficient de fluage  $\Phi$ , rapport de la déformation différée de fluage à la déformation instantanée, décroît fortement. De l'ordre de 2 pour les bétons ordinaires, il est réduit à 1, pour les bétons de 60 MPa et à 0.50 pour les bétons de 100 MPa.

##### 4.1.3.5.1 L'effet double de la température sur le fluage des BHP

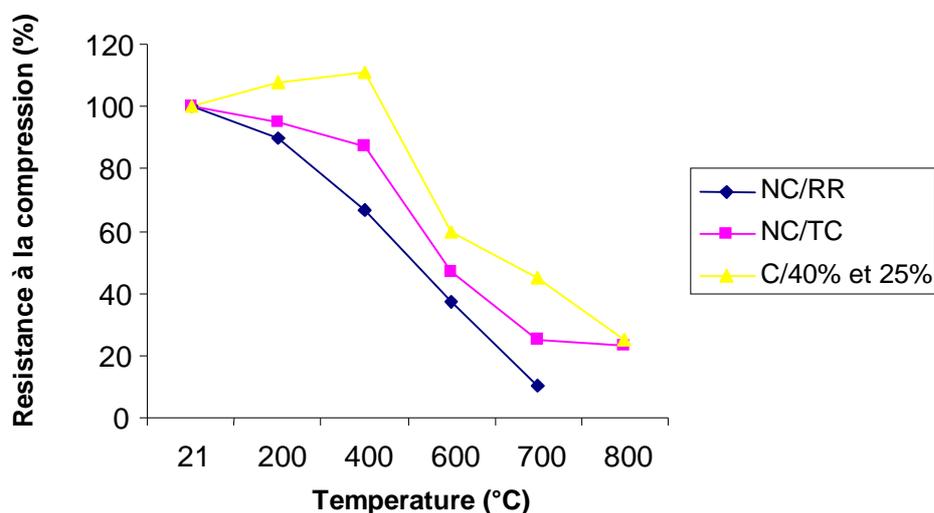
Sous l'effet de la température, l'expansion du béton est gênée par le système de restriction et les contraintes de compression qui sont induites dans le spécimen. Ces contraintes de compression sont réduites parce qu'il y a fluage du béton. Le taux de fluage augmente avec l'augmentation de la température. Il y a donc deux influences opposées tant que la température augmente. Ceux-ci sont des restrictions contre l'expansion thermique, qui tendent à augmenter la magnitude des contraintes de compression induites et le fluage qui permet à son tour, de relaxer ces contraintes. A basse températures, les effets du fluage sur une période de quelques heures ne sont pas très importants, et l'effet de l'expansion thermique prédomine avec l'augmentation des contraintes ainsi que l'augmentation de la température.

A haute température, l'effet du fluage est plus important, et dépend du taux d'échauffement, une étape peut être atteinte durant laquelle le taux de relaxation est plus grand que celui durant laquelle, la contrainte est induite par expansion thermique. Dans ce cas, l'augmentation de la température, aussi modérée soit elle, provoque des contraintes maximales et ensuite décroît encore, avec une augmentation de la température. Ce type de comportement a été étudié par certains laboratoires<sup>19</sup>. Avec le fluage jouant un rôle important dans la détermination de la magnitude de la contrainte induite, bien sûre, la différence entre les résultats obtenus dépendra du taux de l'échauffement. Avec un taux élevé d'échauffement, et avec une légère augmentation de température, l'effet du fluage réduit légèrement les contraintes. Donc les grandes contraintes peuvent être induites dans un membre restreint, si l'échauffement est suffisamment rapide. Il est concevable que ces contraintes puissent atteindre les valeurs maximales d'un matériau (la résistance conventionnelle). Il peut y avoir des situations, quand on augmente la température, poussant ainsi la déformation dans le béton au delà du sommet des contraintes correspondantes causant une instabilité et une rupture catastrophique<sup>29</sup>.

L'effet du fluage durant un échauffement est de rendre le spécimen libre des contraintes un peu moins, qu'il était initialement. C'est pourquoi, il peut y avoir des contraintes réversibles pendant le refroidissement, réduisant la contrainte de compression à

zéro et des contractions supplémentaires du spécimen qui est bloqué par le portique. Les contraintes de traction sont induites pendant le refroidissement, et peuvent provoquer des fissures sérieuses<sup>30</sup>. Jusqu'à présent, le problème de l'expansion thermique ne peut être exprimé seulement en termes de qualité. Il n'y a pas de théories acceptables qui permettent de prédire avec précision le mouvement thermique, et la fissuration du béton, soumis aux températures élevées. La situation est plus complexe quand le béton est chauffé sous chargement ou bien l'élément structural est restreint contre l'expansion thermique.

La figure 4.5 illustre le comportement d'une éprouvette en béton sous charge et chauffé à haute température. Une charge appliquée sur le spécimen modifiera l'influence des contraintes induites dans la pâte de ciment et les granulats par la chaleur ainsi que la fissuration. Les résultats des travaux réalisés par Fischer<sup>20</sup>, confirmés par Abrams<sup>4</sup>, sur les effets des températures élevées sur le module de Young, montrent que la présence d'une charge lors d'un échauffement d'un spécimen initie, la fissuration du béton, du fait de l'incompatibilité thermique. Comme la fissuration devient moins importante, les mouvements thermiques du béton sont influencés par le retrait de la pâte de ciment. Cette tendance vers la contraction s'ajoute à l'effet du retrait. Cette combinaison d'effet fait que, le spécimen se contracte, après une période initiale d'expansion.



NS/RR : Non Comprimée, Résistance Résiduelle après un échauffement et 7 jours après refroidissement à 21°C.  
 NS/TC : Non Comprimée, Testée à chaud  
 S/40% et 25% : Comprimée à 40%, (Partie supérieure du graphe) et 25% (Partie inférieure).

**Figure 4.5.** Effet de la température sur la résistance à la compression des granulats à base de silice.<sup>20</sup>

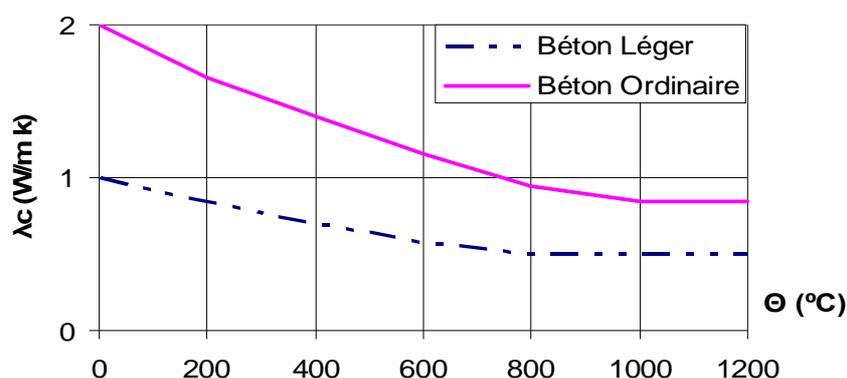
#### 4.1.6 Propriétés thermiques

Il a été bien établi que les propriétés du béton sont modifiées quand il est exposé au feu. Il a été reporté que l'exposition au feu met les éléments structuraux en béton à un gradient thermique élevé et que les couches superficielles chaudes ont tendance à se séparer et à s'éclater de l'intérieur froid de la section. Il a été reporté aussi que la perte de résistance a été observée à des températures élevées et que la perte de résistance est grande plutôt dans le béton saturé que dans le béton sec. En plus, un taux d'humidité élevé contribue à l'éclatement du béton sous le feu. L'éclatement du béton quand il est soumis au feu est moins important quand le taux d'humidité est en équilibre avec l'air. La perte de résistance est importante pour les mortiers dont la quantité de ciment est élevée. La résistance est grande, grâce aux particules les plus fines de fumée de silice qui agissent comme des

éléments de remplissage, augmentant ainsi la densité de la pâte de ciment et diminuant sa porosité. En chauffant, la pâte de ciment durci, perd son eau par séchage et par décomposition des hydrates. Par contre, du fait, de la faible porosité des BHP, ce qui limite le séchage à haute température et résulte en une perte de résistance due à l'humidité retenue dans la pâte. Le type de granulats a aussi une grande influence sur le comportement du béton à haute température. Ceci, est dû principalement au volume des granulats à l'intérieur du béton (entre 60-70% en volume) ainsi que le comportement du matériau. Un béton avec des granulats à base de silice, a une résistance réduite. Les granulats à base de calcaire se comporte mieux vis-à-vis du feu que les granulats à base de silice. Mais du fait de sa très forte résistance à la compression, la silice reste quand même largement utilisée dans le béton. Les propriétés thermiques d'un matériau sont influencées par le transfert du taux d'échauffement. La diffusivité thermique d'un matériau est la mesure principale du transfert de l'échauffement, mais elle est influencée par la densité, la conductivité thermique et la capacité spécifique de la chaleur.

#### 4.1.6.1 Densité et conductivité thermique

La densité des BHP est largement élevée par rapport au béton ordinaire. A haute température, la variation de la densité des BHP est négligeable.



**Figure 4.6.** Conductivité thermique du béton ordinaire et du béton léger.<sup>31</sup>

La figure 4.6 montre la variation de la conductivité thermique en fonction de la température. La conductivité thermique du béton dépend largement de la densité et de l'humidité contenue dans le béton.

#### 4.1.6.2 Déformation thermique

Selon les travaux dirigés par Khoury<sup>27</sup> les déformations thermiques du béton peuvent être divisé en deux composantes distinctes :

- La déformation thermique libre
- La déformation thermique induite par chargement

Les résultats de ces travaux, impliquent que la capacité des différents bétons à dissiper les contraintes est identique. Il en résulte que ces contraintes sont proportionnelles aux déformations thermiques des granulats.

## 4.2 Comportement structurel

### 4.2.1 Résistance au feu des BHP

En considérant le comportement d'une structure vis-à-vis du feu, il est important de reconnaître que la plupart des informations obtenues sur des échantillons, maintenus à haute température, avant d'être chargés, ne sont les mêmes conditions que dans un feu réel. Dans ce travail de recherche, l'écaillage des BHP, constitue une des observations visuelles principales lors des tests effectués sur des poteaux soumis au feu. Ceci peut être expliqué de la manière suivante :

- A l'échelle du matériau, l'écaillage est le résultat de processus thermiques, hydriques et mécaniques couplés. Outre l'existence de contraintes thermiques associées aux gradients de température au sein du béton (ce qui n'est pas propre aux BHP), on observe dans les BHP l'établissement de pressions de vapeur très élevées. Elles trouvent leur origine dans la faible perméabilité de ces bétons qui limite sévèrement les transferts d'eau liquide et vapeur. Il s'agit de l'eau présente dans le réseau poreux mais aussi dans le gel de ciment dont la déshydratation s'effectue en grande partie entre 180°C et 300°C. Ces processus sont contrôlés par des lois de comportement dont les paramètres, fonction de l'état de la microstructure, évoluent avec la température.
- A l'échelle du composant de structure, il faut ajouter l'importance de paramètres macroscopiques tels que la géométrie et la taille de l'élément, la présence d'armatures, la précontrainte.

Le béton à haute performance est plus vulnérable aux températures élevées comparé avec le béton ordinaire. Le rapport de Ali et al.<sup>34</sup>, conclut qu'une augmentation de la résistance du béton peut augmenter la probabilité de l'écaillage du béton et peut donc entraîner une réduction importante de sa résistance. Il y a plusieurs catégories d'écaillages du béton, et parmi les plus répandues, celles à caractère explosif. Ce mode d'endommagement est le plus dangereux et peut résulter en une rupture de la structure. La sévérité de l'endommagement dépend du taux d'humidité. Ceci est due à une augmentation de l'énergie de déformation du béton à de températures élevées, transformant l'humidité en vapeur et la combinaison des contraintes thermiques avec l'augmentation d'humidité causent l'éclatement du béton.

### 4.2.2 Facteurs influant sur le comportement au feu des BHP

Les recherches menées par Ali et al.<sup>34</sup>, Connolly et al.<sup>35</sup>, Sanjayan et al.<sup>36</sup>, Akhtaruzzaman et al.<sup>37</sup>, montrent que la tenue au feu des BHP, en général, et l'écaillage, en particulier, est influencé par les facteurs suivants :

1. La résistance initiale du béton à la compression
2. Sa teneur en humidité
3. Sa masse volumique
4. L'intensité du feu
5. Les dimensions et la forme des échantillons
6. Les armatures transversales
7. Les conditions de chargement
8. Le type des granulats.

Il est nécessaire de considérer ces facteurs en détails, dans ce qui suit :

### 4.2.3 Résistance du béton

Selon une étude réalisée à l'Institut de Recherche dans la Construction Canadien (IRCC) par Kodur<sup>38</sup>, ou il est difficile de définir, une plage de résistance ayant une

résistance supérieure à 55 MPa est plus sujette à s'effriter et il est possible qu'ils résistent moins bien au feu.

#### 4.2.3.1 Teneur en humidité

La teneur en humidité, exprimée en humidité relative, influe sur le degré d'écaillage. Un taux d'humidité relative élevé, provoque un écaillage plus important. Les essais de résistance au feu <sup>36</sup> auxquels ont été soumis des poteaux en BHP à échelle réelle ont montrés qu'il a y un écaillage substantiel lorsque l'humidité relative est supérieure à 80%. Le délai nécessaire pour atteindre un niveau d'humidité relative acceptable (moins de 75%), dans le cas des pièces de charpente en BHP, est plus long que dans celui des éléments de structure en béton ordinaire en raison de la faible perméabilité des BHP. Dans certains cas, par exemple dans les constructions en mer, les niveaux d'humidité relative peuvent rester élevés tout au long de la période de service de l'ouvrage; il faut donc en tenir compte lors de la conception.

#### 4.2.3.2 Masse volumique du béton

La masse volumique du béton a été étudiée par l'IRC, en soumettant à des essais de tenue au feu des blocs en BHP ayant une masse volumique normale (comportant du granulats de poids normal) et des blocs légers (comportant du granulats légers). Il a été constaté, que l'écaillage est beaucoup plus marqué lorsqu'on utilise du granulats légers. Cela est surtout dû au fait que ce dernier renferme plus d'humidité libre, ce qui occasionne une pression de vapeur plus forte lors de l'exposition au feu.

#### 4.2.3.3 Intensité du feu

Les BHP s'effritent beaucoup plus lors des incendies caractérisés par des vitesses d'échauffement élevées ou par la grande intensité du feu. A cet égard, les feux d'hydrocarbures constituent une menace sérieuse. Lorsque les BHP sont utilisés dans des ouvrages ou se trouvent des combustibles hydrocarbonés, par exemple dans des constructions de forage en mer où dans des tunnels routiers, il faut tenir compte, lors de la conception, des probabilités d'éclatement du béton.

#### 4.2.3.4 Dimensions des échantillons

L'examen de la documentation révèle que le risque d'écaillage thermique explosif augmente avec la taille de l'échantillon. Cela est dû au fait que les dimensions de celui-ci ont un rapport direct avec le transfert de chaleur et d'humidité au sein de la structure, ainsi qu'avec la capacité des grands ouvrages à stocker plus d'énergie. Il faut donc porter une grande attention à la taille des échantillons lorsqu'on évalue le problème de l'éclatement; les essais de tenue au feu sont souvent effectués sur maquette, ce qui peut donner des résultats trompeurs.

#### 4.2.3.5 Armatures transversales

L'espacement et la configuration des attaches ont tous deux un effet important sur la performance des poteaux en BHP <sup>40</sup>. En rapprochant les attaches (du quart de la distance exigée dans le cas des poteaux en béton ordinaire) et en les repliant à 135 ° vers l'intérieur du noyau du poteau, on améliore la tenue au feu. La mise en place d'attaches transversales accroît aussi sa tenue au feu. Les essais de tenue au feu auxquels ont été soumis des poteaux en BHP, un confinement additionnel étant assuré par le repliement des attaches vers le noyau des poteaux et par l'utilisation d'attaches transversales, ont révélés que l'écaillage est ainsi réduit considérablement et qu'il est possible d'obtenir une résistance au feu plus de 4 heures, même sous charge de service maximale.

#### 4.2.3.6 Importance de la charge

Un élément de structure en BHP qui supporte une charge s'effritera plus qu'une pièce de charpente non mise en charge. La charge ajoutée aux contraintes dues à la pression interstitielle produite par la vapeur. Par ailleurs, plus la charge est grande, moins la tenue au feu est bonne, car la perte de résistance qui accompagne la montée en température est plus grande dans le cas des BHP que celui du béton ordinaire.

#### 4.2.3.7 Type des granulats

Des deux granulats utilisés couramment pour faire du béton, le granulat carbonate (surtout le calcaire) et le granulat siliceux (surtout le quartz), c'est le premier qui assure la meilleure tenue au feu et la plus grande résistance à l'éclatement. Cela est surtout dû au fait que le granulat carbonate a une capacité calorifique (chaleur spécifique) beaucoup plus grande, ce qui contribue à empêcher l'écaillage. Cette plus grande chaleur spécifique est probablement causée par la dissociation de la dolomie dans le béton à granulat carbonate.

#### 4.2.5 Conclusions sur le comportement du béton

Il faut comprendre que ces résultats sont obtenus après achèvement des températures transitoires et sur des spécimens qui ne sont pas chargés, ce qui constitue des conditions différentes de celle d'un feu. Du fait de ces effets de chargement, la résistance du béton chauffé des membrures des poutres ainsi que des poteaux d'une structure chargée, est plus grande, plus que les résultats des tests obtenus en état transitoire. L'effet du chargement sur les déformations durant un feu n'est pas seulement additionné à l'expansion thermique comme il a été supposé dans le cas de l'élasticité linéaire et les théories simples. Un changement dans la charge modifie la potentialité de fissuration, ce qui affecte la rigidité à un niveau de température particulier et donc aide à déterminer la manière par laquelle travaille la pâte du ciment et les granulats.

La plupart des données expérimentales ont été obtenues en utilisant du ciment ordinaire (Ciment Portland) et des granulats denses. Jusqu'à présent, il n'y a aucune théorie généralement acceptable qui peut être utilisée pour prédire le comportement du béton à haute température sous charge ou restreint contre l'expansion thermique. Ce type de comportement, peut être obtenu en considérant les effets de l'expansion thermique, du retrait, du fluage ainsi que celui de la fissuration, agissant tous ensemble<sup>9</sup>.

#### 4.2.6 Conclusions

Les BHP ne sont pas des matériaux aussi poreux qu'un béton ordinaire, il ne contient pas d'eau libre et, quand il est sujet à une augmentation rapide de température, il a tendance à écailler. Cependant, les armatures d'acier peuvent diminuer cet écaillage et aider l'élément structural à conserver suffisamment de force résiduelle pour maintenir l'intégrité de la construction. L'exposition au feu met les éléments structuraux en béton à un gradient thermique élevé et que les couches superficielles chaudes ont tendance à se séparer et à s'éclater de l'intérieur froid de la section. Le béton en général, peut perdre approximativement 25% de sa résistance à la compression quand il est soumis à une température qui avoisine les 300 °C et 75% quand il est exposé à une température de 600 °C. Le module d'élasticité est réduit dans les mêmes proportions.

## Références bibliographiques

1. Hamilton S.B. “A short history of structural fire protection of buildings particularly in England” National Buildings study, special Report No.27, HMSO, Londres, 1958.
2. Malhotra, H. L. “Design of fire resisting structures” Glasgow, Surrey University Press, 1982.
3. BS476 British Standards Definitions for fire Résistance, “Incombustibility and non-flammability of Building Materials and structures” British Standards Institution, London.
4. Abrams, M. S. “Compressive strength of concrete at temperatures to 1600 °F”, paper presented at ACI Symposium on the effect of Temperature on concrete”, Fall Meeting, 1968, (Later published in ACI, SP-25, 1970)
5. Malhotra, H. L. “The effect of temperature on compressive strength of concrete”, Magazine of concrete Research, 8, N°. 23, 1956, p.85.
6. Shneider, U. “Behaviour of concrete under thermal steady state and non-steady state conditions” Fire and Materials, 1976.
7. Furumura, F. “Paper 7004 for the annual Meeting of the Architectural Institute of Japan” 1966, p.686
8. Castillo. C., Durani A.J. “Effect of transient high temperature on high strength concrete” ACI Materials Journal, Jan-Fev, 1990.
9. Harmaty T.Z., “Thermal properties of concrete at elevated temperatures” Journal of Materials, ASTM, Vol.5, No.1 Mar.1970.
10. Sanjayan G. Stocks L.J., “Spalling of High Strength Concrete in fire” ACI Materials Journal, Vol. 90, No.2, Mar-Avr., 1993.
11. O’Connor D.J., Morris B., Silcock G.W.H., “Cardington frame fire test report, Billet flux qualification for LBTF Compartment fire tests” FireSERT, University of Ulster, Report No.BE/4122-D5, Jan.1997.
12. Butcher E. G., and Law, M. “Comparison between furnace tests and experimental fires, Behaviour of structural steel in fire”, Ministry of Technology and F-O-C-F-R-O Symposium No.2, HMSO, Londres.
13. Lea, F. C. “The effect of temperature on some of the properties of materials” Engineering, 110, N°. 2852, 1920, p.293
14. Faris A. A., Abid A.Tair, O’Connor D., Benmarce A. and Nadjai A., “Useful and Practical Hints on the Process of Producing High-Strength Concrete” Practice Periodical on Structural Design and Construction, Vol. 6, No. 4, 2001; p.150-153.
15. Felicetti R., Gambarova P.G., “Effects of high temperature on the residual compressive strength of high strength siliceous concretes” ACI Materials Journal, Juil-Aout.1998.
16. Phan L.T., Carino N.J., “Review of mechanical properties of HSC at elevated temperature” Journal of Materials in Civil Engineering, Fev. 1998.
17. CEB/FIP “Fire Design of concrete structures” Bulletin d’information, No.208, Lausanne, Swiss 1991.
18. Williamson R.B., Rashed A.I., “High strength concrete and mortars in high temperatures environments” Materials Research Society Symposium Proceedings, Vol.42, 1985.
19. Gustaferro, A. H., Carlson, C. C., & Selvaggio, S. L. “A review of studies of the effect of restraint on the fire resistance of prestressed concrete” PCA Labs. Bulletin 206, 1965
20. Fischer, R., “Über das Verhalten von entmortel und Beton bei höheren Temperaturen” Deutscher Ausschuss Für Stahlbeton, Heft 214, Berlin, 1970, p.60
21. Purkiss, J. A., “A study of the behavior of concrete heated to high temperatures under restraint and compressive loading” University of London, PhD thesis, 1972

22. Phileo, R. E. “*Some physical properties of concrete at high temperatures*” Proceedings American Concrete Institute, 54, 1958, p.857
23. “*Fire resistance of concrete structures*” Report of a Joint committee of the Institution of Structural Engineers and the concrete Society, Institution of structural Engineers 1975
24. Lie T. T., Lin T. D., Allen D. E., and Abrahams M. S., “*Fire Resistance of reinforcement Concrete Columns*”, National Research Council of Canada, Ottawa, Fev. 1984, 32pp.
25. Bannister J.L., “*Steel bar reinforcement*” Current Practice sheet, Concrete, 7, No.1, Jan.1973, p37.
26. Eurocode No.4 “*Design of composite steel and concrete structures*” Part 1.2 Structural Fire Design, Commission of the European Committees.
27. Cruz C. R., “*Apparatus for measuring creep of concrete at high temperatures*” Journal PCA Research and Development Labs., 10, No. 3 1968, p.36.
28. Khoury G.A., Grainger B.N., Sullivan P.J.E., “*Strain of concrete during first heating to 600 C under load*” Magazine of Concrete Research, Vol.37, No.133, Dec.1985.
29. England, G. L., & Ross, A. D. “*Reinforced concrete under thermal gradients*”, Magazine of Concrete Research, 14, N° 40, p.9
30. Ruetz, W. “The two different mechanisms of creep in concrete. The structure of concrete and its behavior under load”, Proc. Int. Conf., London, 1965, C & CA, 1968, P.146
31. Ross, A. D., “Shrink less and Creep less concrete”, Civil Engineering and Public Works
32. BS476 British Standards Definitions for fire Résistance, “Incombustibility and non-flammability of Building Materials and structures” British Standards Institution, London.
33. Law M., “A relationship between fire grading and building design and contents”, J-F-R-O Fire Research Note 877, 1971
34. Ali F. A., O’Connor D. & Abu-tair A., “*Explosive spalling of High Strength Concrete in fire*” Magazine of concrete research, 53, No. 3, June 2001; p.197-204.
35. Connolly R.J., Purkiss J.A., Morris W.A., “*The Spalling of Concrete in fires*” First European Symposium on Fire Safety Science, Zurich, 1995.
36. Sanjayan G. & Stocks L.J. “*Spalling of High Strength Silica Fume Concrete in fire*” ACI Materials Journal, V. 90 No.2, 1993; p.170-173.
37. Akhtaruzzaman A. A. & Sullivan P. J. E. “*Explosive Spalling of Concrete exposed to high temperature*” Imperial college of Science and technology, Concrete Structures and Technology, Research report CSTR 70/2, London, 1970, p. 24.
38. Kodur V., “*Performance of High Strength Concrete in fires*” Construction Canada, Vol.1, Jan. 2000
39. Aldea C. M., Franssen J. M., & Dotreppe J. C. “*Fire test on normal and high strength reinforced concrete columns*” Proceedings International workshop on fire performance of high strength concrete, NIST, Gaithersburg, MD, Fev. 1997, 109-124.
40. Ali F. A., Connolly R., & Sullivan P.J.E., “The spalling of High Strength Concrete at elevated temperatures” Journal of Applied Fire Science, Vol.6, N1, 1997.

## **CHAPITRE V : PARTIE EXPERIMENTALE**

Dans cette partie, il est question de travaux expérimentaux, qui sont la continuité des travaux réalisés à l'université d'Ulster, en Irlande du nord, et qui essaient de répondre à quelques points qui se posent actuellement dans ce domaine de recherche. Ceci qui constitue une base de données dans plusieurs domaines de recherche là où il y a peu d'information. Dans ce programme, l'étude sur 25 échantillons a été faite afin d'obtenir une meilleure formulation des BHP ou plutôt une formulation optimale, du point résistance à la compression (très haute résistance) et du point de vue méthodologie

### **5.1 Caractérisation des matériaux**

Cette partie expérimentale a fait l'objet d'une publication internationale <sup>1</sup>, et consiste à mettre en place une méthodologie pour la fabrication des BHP, quelques conseils très pratiques ont été donnés afin de reproduire ces expériences et produire bien sûr, des BHP en chantier et en grandes quantités. Durant les deux dernières décennies l'utilisation des BHP est en continuelle augmentation du fait de la réduction des sections des éléments d'où réduction du poids propre. Ce qui est recherché surtout dans la conception des grattes ciel. En 1996, Shah et Ahmed <sup>2</sup> étaient capables de développer des bétons dont la résistance atteignait les 200 N/mm<sup>2</sup>. Quoique ce dernier fût produit en laboratoire, des bétons avec une résistance de 120 N/mm<sup>2</sup>, ont été utilisés, en Amérique du nord, dans plusieurs bâtiments. Par contre, l'utilisation des BHP est moins fréquente dans plusieurs pays, du fait des conditions spéciales ainsi que l'ajout d'additif lors de la production des BHP. Produire les BHP demande une grande attention dans la préparation, le malaxage, le compactage ainsi que sa mise en place, et le mûrissement que le béton ordinaire. Ils ne ressentent pas et sont donc au retrait plastique. Si les BHP ne sont pas mûris correctement, en quelques heures, ils peuvent développer beaucoup de retrait endogène alors qu'ils n'ont qu'une très faible résistance à la traction. Pour construire des structures en BHP durables, il faut contrôler le retrait plastique et retrait endogène dans les heures qui suivent la mise en place du béton. Par contre, il est très important de laisser se développer un retrait endogène résiduel après quelques jours de mûrissement à l'eau, de façon à former des ménisques à l'intérieur de la pâte de ciment hydraté pour diminuer la perméabilité et l'absorptivité du béton et, par voie de conséquence, la pénétration des agents agressifs.

### **5.2 Malaxage**

L'utilisation du malaxeur est impérative dans le béton à haute résistance. Un malaxeur du type « Poker » de 120 litres est utilisé pour mélanger le béton. Un mélange à sec de ciment, granulats, fumée de silice pendant 2.5 minutes, ensuite la solution de super fluidifiant est ajoutée, le tout malaxé encore pendant 2.5 minutes. Dans le cas de malaxeur peu puissant ou d'une capacité réduite, un autre moyen peut être utilisé en ajoutant en premier, la solution de super fluidifiant, dans le ciment ensuite, on ajoute les granulats au mélange.

### **5.3 Compactage**

Le compactage peut être le problème clef dans la production du béton à haute résistance. Avec une telle ouvrabilité, le compactage demande beaucoup d'attention. Un vibreur à aiguille (poker) peut être utilisé pour compacter le béton à haute résistance ensuite placé dans un moule en acier. Dès le début du test, on a remarqué que la qualité du produit fini (le béton) était très mauvaise et des fissures dans le produit ont commencé à apparaître.

Dans ce cas précis, une autre alternative a été utilisée, un vibreur externe. Finalement, le béton obtenu était de qualité meilleure.

#### 5.4 Gâchée

Quoique le béton à haute résistance, définie comme un béton ayant une résistance supérieure à  $60 \text{ N/mm}^2$ , il était prévisible de produire dans ce travail de recherche un béton de  $90\text{-}110 \text{ N/mm}^2$  à 28 jours. Le super fluidifiant utilisé dans le mélange était du Naphtalène Formaldéhyde (à base de sodium). La fumée de Silice a été ajoutée au mélange.

Le mélange de béton était divisé en deux groupes:

a) **Le premier groupe**, contient 185 litres d'eau dans un mètre cube de béton. Ce groupe a été divisé en deux sous groupes.

- ✚ Le premier groupe 1-A contenait de la fumée de silice avec un dosage de 10% du poids du ciment.
- ✚ Le second groupe 1-B était sans fumée de silice.

#### 5.5 Courbe d'échauffement

Comme il a été mentionné auparavant, Il y a deux courbes normalisées de feu naturel utilisées dans tout ce travail expérimental. La première courbe étant définie comme courbe à régime élevée (ISO834) avec une énergie élevée, des températures élevées de courte durée, afin d'induire des gradients de température élevés, pour permettre l'éclatement du béton. La deuxième est définie comme une courbe à régime bas, produisant des pics de température bas mais de longue durée (ASTM 119-88), suffisamment longue pour permettre d'induire des conceptions de chaleurs qui peuvent construire des pressions de vapeur et aussi créer une expansion thermique produisant des forces de restriction.

#### Références bibliographiques

1. Benmarce A., Boudjehem H. & Bendjhaïche R." *Durability of Self-compacting concrete*", Advances in Innovative Materials and Applications, Advanced Materials Research, Vol. 324, 2011. Trans Tech Publications, Switzerland pp 340-343, [www.scientific.net/AMR.324.340](http://www.scientific.net/AMR.324.340), ISBN-13:978-3-03785-229-3
2. Shah, S.P., and Ahmed, S. H. "*High performance concrete and applications*", Edward Arnold, London, 1996

## **CHAPITRE VI : RESULTATS ET CONCLUSIONS**

### **6.1 Introduction**

La résistance en compression des cubes de 100mm, du premier groupe à 7 et à 28 jours est montrée sur le tableau 6.1. Les résultats de trois mélanges du second groupe 1-B qui était sans fumée de silice sont montrés sur le tableau 6.2. Les tableaux montrent aussi les valeurs du facteur de compactage comme mesure d'ouvrabilité. En examinant les résultats montrés sur les tableaux 6.1 et 6.2, l'ajout de la fumée de silice dans le mélange a augmenté la résistance du béton avec les différentes valeurs du rapport Eau/Ciment, comme le montre clairement le tableau 6.1.

**Tableau 6.1. Groupe 1-A Mélange contenant 185 (L/m<sup>3</sup>) d'eau avec de la fumée de silice**

<b>Paramètre</b>	<b>Gâchée 1</b>	<b>Gâchée 2</b>	<b>Gâchée 3</b>
<b>Eau (L/m<sup>3</sup>)</b>	185	185	185
<b>Ciment (kg/m<sup>3</sup>)</b>	832	667	555
<b>Granulat Fin (kg/m<sup>3</sup>)</b>	412	472	480
<b>Gros Granulat (kg/m<sup>3</sup>)</b>	877	1003	1118
<b>Fumée Silice (kg/m<sup>3</sup>)</b>	92	74	61
<b>Super fluidifiant (kg/m<sup>3</sup>)</b>	40	27	15.4
<b>Eau/ Ciment</b>	0.22	0.27	0.33
<b>Eau/ (Ciment+Silice)</b>	0.2	0.25	0.3
<b>Résistance à 7 jours (N/mm<sup>2</sup>)</b>	61	59	57
<b>Résistance à 28jours (N/mm<sup>2</sup>)</b>	69	68.5	75
<b>Facteurs de compactage</b>	0.89	0.89	0.88

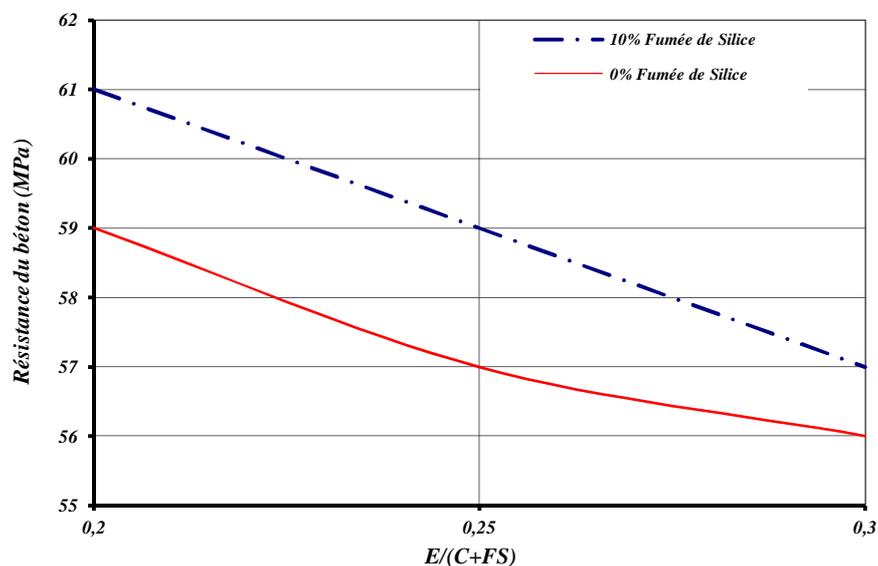
**Tableau 6.2. Groupe 1-B Mélange contenant 185 (L/m<sup>3</sup>) d'eau sans la fumée de silice**

<b>Paramètre</b>	<b>Gâchée 4</b>	<b>Gâchée 5</b>	<b>Gâchée 6</b>
<b>Eau (L/m<sup>3</sup>)</b>	185	185	185
<b>Ciment (kg/m<sup>3</sup>)</b>	924	740	616
<b>Granulats Fins (kg/m<sup>3</sup>)</b>	412	472	480
<b>Gros Granulats (kg/m<sup>3</sup>)</b>	877	1003	1118
<b>Super fluidifiant (kg/m<sup>3</sup>)</b>	40	27	15.4
<b>Eau/Ciment</b>	0.2	0.25	0.3
<b>Résistance à 7 jours (N/mm<sup>2</sup>)</b>	59	57	56
<b>Résistance à 28jours (N/mm<sup>2</sup>)</b>	65	68	69
<b>Facteur de compactage</b>	0.87	0.89	0.89

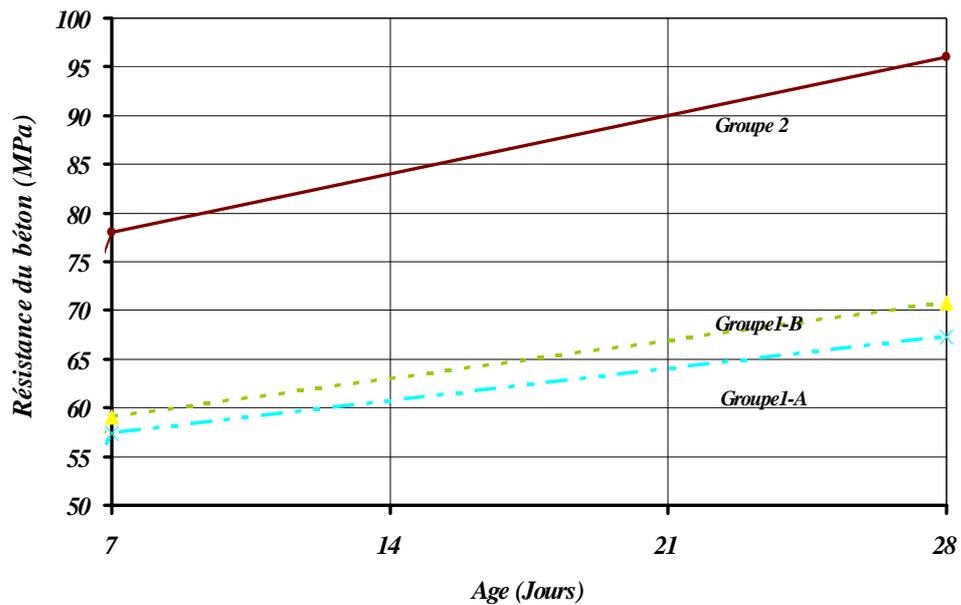
**Le second groupe**, contenait un maximum de 145 litres/ m<sup>3</sup> d'eau. Ces mélanges ont été exécuté afin d'avoir un rapport Eau/Ciment variant de 0.2 à 0.3. Trois cubes ont été testés à l'âge de 7 jours. Trois autres cubes, ont été testés à l'âge de 28 jours. Les résultats des 9 éprouvettes sont montrés sur le tableau 5.3

**Tableau 6.3.** Groupe 2 Mélange contenant moins de 145 (L/m<sup>3</sup>) d'eau

Paramètre	G7	G8	G9	G10	G11	G12	G13	G14	G15
Eau (L/m <sup>3</sup> )	143	136	142	144	144	121	141	125	130
Ciment (kg/m <sup>3</sup> )	565	487	449	469	468	508	402	545	447
Granulats Fins (kg/m <sup>3</sup> )	589	640	598	621	778	649	710	589	672
Gros Granulats (kg/m <sup>3</sup> )	1071	1069	1278	1198	1032	1088	1185	1103	1098
Fumée de Silice (kg/m <sup>3</sup> )	87	—	40	62	92	54	44	52	44
Super fluidifiant (L/m <sup>3</sup> )	20	15	12.5	14	13	18	10	18	15
Eau/Ciment	0.25	0.28	0.316	0.30	0.30	0.24	0.35	0.23	0.29
Eau/ (C+F.S)	0.22	0.28	0.29	0.27	0.27	0.21	0.31	0.21	0.26
Résistance à 7jours (N/mm <sup>2</sup> )	86	80	66.3	64.4	66	88	77	88	86
Résistance à 28jours (N/mm <sup>2</sup> )	94	92.4	85.5	85	90.6	105	98	108	106
Facteur de Compactage	0.88	0.89	0.90	0.88	0.89	0.88	0.90	0.88	0.90



**Figure 6.1.** Effet de la fumée de Silice sur la résistance des BHP à 7j.

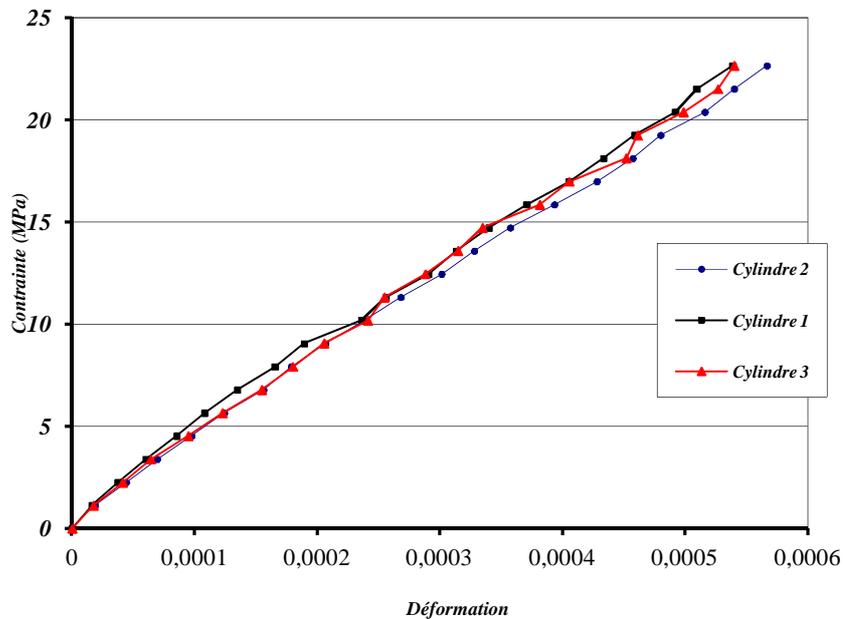


Il faut noter que la résistance du béton entre le 7<sup>ème</sup> jours et le 28<sup>ème</sup> jours a augmentée de 9% à 36%.

Figure 6.2. Résistance à la compression en fonction de l'âge

## 6.2 Module de Young

La gâchée numéro 15 a été testée pour déterminer le module de Young en concordance avec les règles en cours. Trois éprouvettes cylindriques de dimensions 150x300 mm ont été testées à 28 jours. La figure 5.5 montre la courbe contrainte déformation des trois cylindres testés à 25% de leurs résistance à la compression. La valeur moyenne module d'Young à l'âge de 28 jours était égale à 41.6 N/mm<sup>2</sup>.

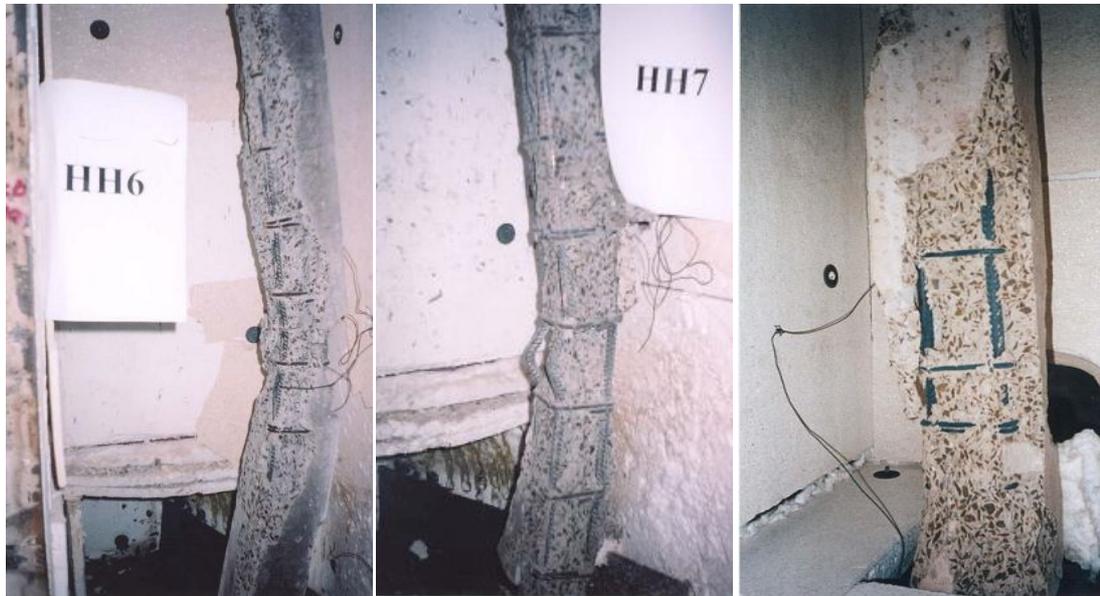


Remarque: Les valeurs présentées ci-dessus sont des valeurs moyennes des tableaux 6.1,6.2.

Figure 6.3. Courbe contrainte déformation

### 6.3 Observations visuelles

Quoique l'éclatement ne soit pas le paramètre principal investi dans ce travail de recherche, mais il constitue un paramètre assez important car il est le résultat d'une perte rapide des couches superficielles du béton durant un feu, les armatures dans ce cas, sont mises à nue. Par conséquent, il met l'intégrité de la structure en danger.



**Figure 6.4** Photos de poteaux en BHP soumis au feu (Benmarce et Guenfoud)

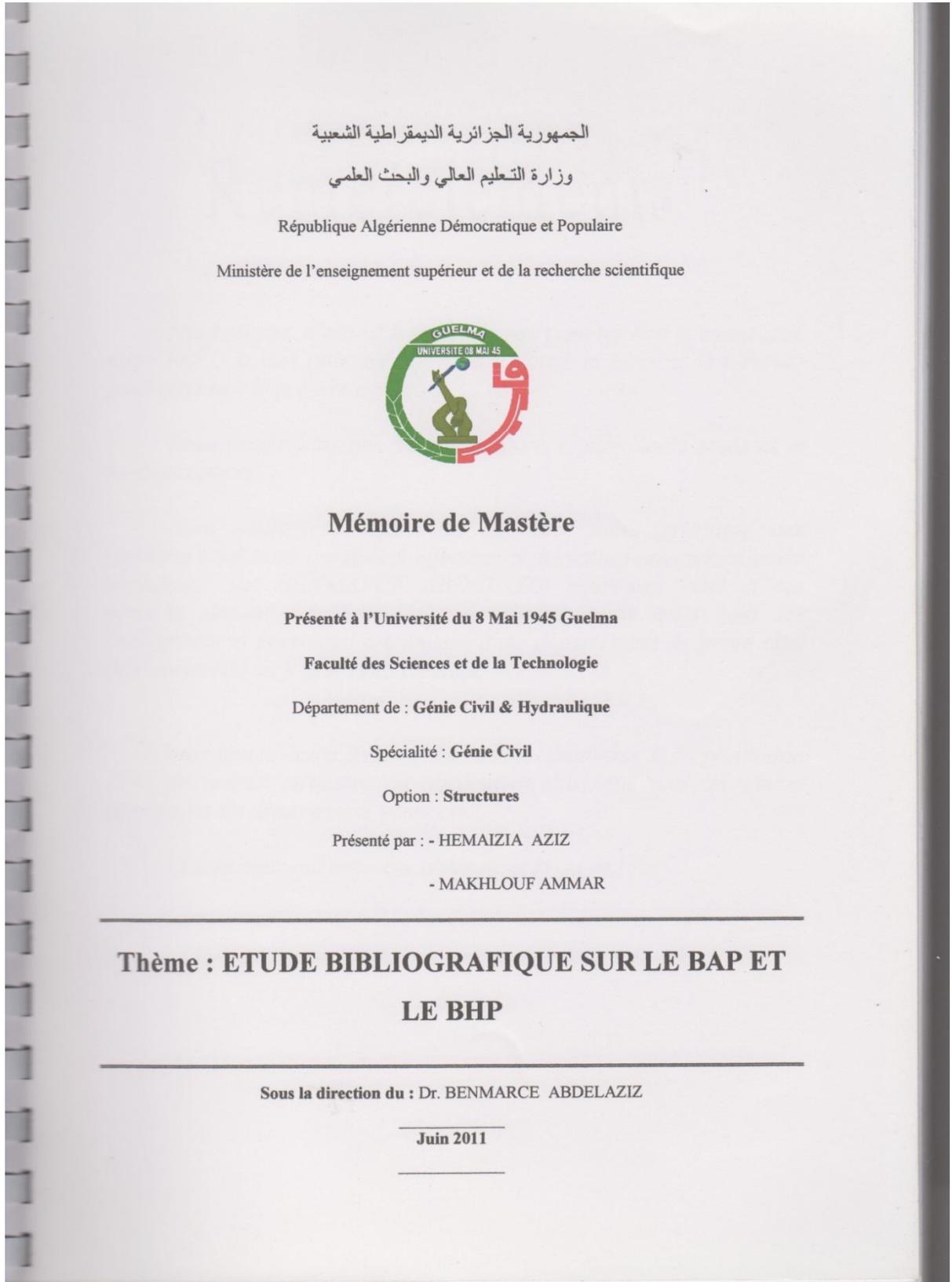
### 6.4 Conclusions et quelques règles à suivre pour améliorer la tenue des BHP au feu

- Le facteur clef dans la production du béton à haute résistance est l'utilisation d'un rapport Eau/Ciment réduit (0.2-0.35). Les bétons à très haute résistance peuvent être obtenus avec moins d'eau ( $\leq 140 \text{ l/m}^3$ ).
- Pour augmenter l'ouvrabilité du mélange il est recommandé d'ajouter un super fluidifiant.
- Le rapport des gros granulats sur granulats fins doit être autour de deux (2).
- Le compactage externe est le moyen le plus efficace.
- En fonction des proportions dans les mélanges, la résistance des BHP varie de 9% à 36% entre le 7<sup>ème</sup> jour et le 28<sup>ème</sup> jour.
- L'ajout de la fumée de silice augmente la résistance à la compression du béton.
- Ces tests confirment que les BHP sont susceptibles à l'éclatement explosif. Dans ce cas les armatures sont mises à nue et l'intégrité de la structure est menacée.
- La plupart des cas testés, l'écaillage était explosif. L'éclatement des BHP, peut être suite à une forte pression de vapeur et/ou bien sous forme de contraintes thermique différentielles entre la pâte de ciment et celui des granulats et/ou la structure même des granulats.
- Le régime d'échauffement bas provoque un gradient thermique moins élevé dans les spécimens par rapport au régime d'échauffement élevé, ce qui est normal. L'hypothèse selon laquelle le risque d'éclatement augmente lorsque le régime d'échauffement est élevé est confirmée dans ce travail de recherche.

- Quand aux propriétés mécaniques, une tendance prévisible, peut être avancée est que les éléments présentant des résistances en compressions élevées sont les plus sensibles au phénomène de l'éclatement. Leur structure est plus dense, donc on a des pressions de vapeur plus importantes.
- Une autre conclusion qui peut être avancée, est que la nature de granulats (calcaire ou siliceux, béton léger) a une incidence sur l'éclatement. Ceci est compréhensible, du fait que les granulats calcaires ont un meilleur comportement que les bétons de granulats siliceux. La présence et l'extension de l'éclatement dans les éléments de granulats siliceux sont supérieures. Ceci peut s'expliquer en admettant que les contraintes par dilatation thermique empêchée sont amplifiées ou sont à l'origine de l'éclatement. En effet le coefficient de dilatation thermique d'un granulat calcaire est deux fois moins que celui d'un granulat siliceux. De plus, le coefficient de dilatation thermique apparent d'un béton dépend de la température : pour un béton de granulats calcaires, il diminue fortement à des températures élevées, tandis que celui d'un béton de granulats siliceux ne diminue que légèrement. Il est aussi constaté que l'éclatement est beaucoup plus marqué lorsqu'on utilise des granulats légers. Cela est surtout dû au fait que les granulats légers renferment plus d'humidité libre, ce qui occasionne une pression de vapeur plus forte lors de l'exposition au feu. Pour ce qui est de la teneur en eau et l'humidité relative, il faut prendre plus de précautions pour les structures en zones humides, du fait qu'un taux d'humidité relative plus élevé provoque un écaillage plus important. Le délai nécessaire pour atteindre un niveau d'humidité relative acceptable (moins de 75%), dans le cas des éléments en BHP, est plus long que celui des éléments en béton ordinaire, en raison de la faible perméabilité des BHP.
- Pour diminuer le risque de l'éclatement des BHP quand ils sont soumis au feu, certains auteurs préconisent l'ajout de fibres de polypropylène. Pour expliquer son incidence sur le comportement des BHP, certains chercheurs supposent que la fusion de ces fibres à hautes températures fournit à la phase vapeur un espace volumique suffisant pour diminuer fortement les pressions, et donc le risque de l'éclatement. Il s'avère donc qu'un volume de  $1.75 \text{ kg/m}^3$  constitue un dosage optimal et que les fibres courtes (12.5 mm) sont plus efficaces que les fibres longues.

## **ANNEXE**

### **Encadrements :**



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 Magister

Présenté à l'Université de Guelma  
Faculté des Sciences et de l'Ingénierie

Département de : Génie Civil

Spécialité : Matériaux et structures

Option : Mécanique et durabilité des matériaux

Présenté par : HADRI Samia

---

**Thème : Le passage d'un Béton à Haute Performance à un  
Béton Autoplaçant Haute Performance  
« Etat de L'art »**

---

Sous la direction du : Dr. BENMARCE Abdelaziz

### JURY

<i>Prof : GUENFOUD Mohamed</i>	<i>Président</i>	<i>Université de Guelma</i>
<i>Dr : BENOUIS A/Halim</i>	<i>Examineur</i>	<i>Université de Guelma</i>
<i>Dr : NAFAA Zahreddine</i>	<i>Examineur</i>	<i>Université de Guelma</i>

**Année 2012**

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 de Guelma

Faculté des Sciences et de l'Ingénierie

Département de : Génie Civil & Hydraulique

Spécialité : Génie civil

Option : Conception et Calcul des Constructions (3c)

Par : Dahmane Meriem & Mouadna Loubna

---

**Thème : Les Bétons Autoplaçants (BAP)**

---

Sous la direction de : Dr. BENMARCE ABDELAZIZ

Juin 2012



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

Jun 2012



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique  
Université de 8 Mai 1945 - Guelma -  
Faculté des Sciences et de la Technologie  
Département de Génie Civil et Hydraulique



**Mémoire de fin d'études Master**

**Spécialité : Génie Civil**

**Option : Structures**

**Thème :**

---

---

**Risque et vulnérabilité sismique d'un bâtiment stratégique**  
*de la* **ville de Guelma**

---

---

**Encadré par :**

**Mr Benmarce Abdelaziz**

**Présenté par :**

**Sellaoui Nezha**

**Meguellatni Meryem**

**Juin 2013**

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 Mastère

Présenté à l'Université de Guelma  
Faculté des Sciences et de la Technologie  
Département de : Génie Civil & Hydraulique  
Spécialité : Génie Civil  
Option : Structures

Présenté par : FERKOUS YAAKOUB

---

**Thème : Etude bibliographique sur le comportement des  
BHP à haute température**

---

Sous la direction du : Boudjehem Hocine,

Junin 2012

24/05/2012  
A203

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 Mastère

Présenté à l'Université de Guelma  
Faculté des Sciences et de la Technologie  
Département de : Génie Civil & Hydraulique  
Spécialité : Génie civil  
Option : Structures

Présenté par : **BADRE OQBI & SOUALMIA F**

---

**Thème : PROPRIÉTÉS PHYSIQUES DES BHP**

---

Sous la direction de : **Bendjaiche Robila**

**Juin 2012**

---

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 Mastère

Présenté à l'Université du 8 Mai 1945 Guelma  
Faculté des Sciences et Sciences de l'Ingénierie  
Département de : "Génie Civil"  
Domaine: "Sciences et Technologie"  
Spécialité : "Génie Civil ", " Option : Conception et Calcul des Constructions "

Présenté par

\*REMACHE Sabiha  
\*LOUIZA Halima

---

### ÉTUDE D'UN BLOC ADMINISTRATIF (R+1) AVEC UNE ÉTUDE D'OPTIMISATION THERMIQUE

---

✦ Sous la direction de: Mr. BOUDJEHEM Hocine.

Jun 2013

---

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 Mastère**

Présenté à l'Université de Guelma

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département de : Génie Civil & Hydraulique

Spécialité : Génie civil

Option : Structures

**Thème : Les Pathologies des Bâtiments  
(Cas Université de Guelma)**



Présenté par : Azizi Hakima

Chiheb Amira

Toualbia Nadja

Sous la direction de : *M<sup>me</sup>* Bendjaiche Robila

juin 2013

# Attestations de participation

*Advanced Materials Research Vol. 324 (2011) pp 340-343*  
Online available since 2011/Aug/22 at [www.scientific.net](http://www.scientific.net)  
© (2011) Trans Tech Publications, Switzerland  
doi:10.4028/www.scientific.net/AMR.324.340



## Durability of Self-compacting concrete

By Abdelaziz Benmarce\*<sup>1</sup>, Hocine Boudjehem\*\*<sup>2</sup> and Robila Bendjhaiche\*\*\*<sup>3</sup>

<sup>1,2,3</sup> Laboratoire de Génie Civil et d'Hydraulique (LGCH), Département Génie Civil, Faculté des Sciences et de la Technologie, Guelma University, P.O. Box 401, Guelma, 24000, Algeria

\* Benmarce@hotmail.com, \*\*hboudjehem@yahoo.fr, \*\*\*rbendjaiche@yahoo.fr

**Keyword:** porosity, mechanical properties, physical and chemical characteristics, durability

**Abstract.** Self compacting concrete (SCC) seem to be a very promising materials for construction thanks to their properties in a fresh state. Studying of the influence of the parameters of specific designed mixes to their mechanical, physical and chemical characteristics in a state hardened is an important stage so that it can be useful for new-to-the-field researchers and designers (worldwide) beginning studies and work involving self compacting concrete. The objective of this research is to study the durability of self compacting concrete. The durability of concrete depends very much on the porosity; the latter determines the intensity of interactions with aggressive agents. The pores inside of concrete facilitate the process of damage, which began generally on the surface. We are interested to measure the porosity of concrete on five SCC with different compositions (w/c, additives) and vibrated concrete to highlight the influence of the latter on the porosity, thereafter on the compressive strength and the transfer properties (oxygen permeability, chloride ion diffusion, capillary absorption).

### Introduction

Over the last 2 decades, the use of Self Compacting Concrete (SCC) has been on the increase. The main benefit of using SCC stems from the fact that they do have a high flowability and can be placed into formwork without vibration. SCC have been used in many buildings in developed countries, however, the use of SCC is still very limited in many countries. The limitation of using SCC is related to the special conditions and additives needed for its production. SCC offers several advantages in technical, economical, environmental and human terms. However, there are still some problems with regard to its durability, in terms of physical and chemical properties. The purpose of this research work is to study various durability characteristics of SCC compared with reference samples of Vibrated Concrete (VC) with similar compressive strength, from 20 to 40 N/mm<sup>2</sup>. Permeation, diffusion and absorption are the three main processes which may lead to penetrate aggressive substances into the concrete and alter its mechanical and protective qualities (mainly to the corrosion of reinforcement). On the other hand, three natural fluids that can move according to the above mentioned processes and questioning the durability of concrete are: oxygen, water (containing or not aggressive ions) and carbon dioxide. The durability of concrete therefore depends on its ability to resist penetration of these fluids within the material according to these three possible mechanisms of flow. Although in reality these various transfer mechanisms operate simultaneously but they are examined (in the laboratory) separately in order to show fundamental properties involved. The authors of this paper have started a project on the behavior of SCC and considerable effort was spent on studying and producing SCC. The objective of this paper is to study the durability of self compacting concrete. The present paper reports on the proportions of 6 main trial mixes used.

### Experimental program

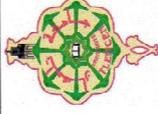
**Design mix proportions.** To achieve our goal, several compositions of SCC and VC mixes were studied. The use of mineral additives (limestone, Silica fume filler and brick waste filler in this research) in the SCC is known to give them a denser microstructure than VC [1]. The size and distribution of pores in the cement matrix are also for the benefit of the SCC, from the permeability point of view to gases (especially permeability to oxygen) [1].

All rights reserved. No part of contents of this paper may be reproduced or transmitted in any form or by any means without the written permission of TTP, [www.ttp.net](http://www.ttp.net). (ID: 41.96.39.35-22/09/11,16:45:51)





جمعية أساتذة جامعة تلمسان للعلوم، الثقافة و الرفي  
**Association des Enseignants de l'Université de Tiemcen**  
**Pour les sciences. La Culture et le Progrès**



### COLLOQUE INTERNATIONAL

MAINTENANCE ET CONSERVATION DU PATRIMOINE BATI

MABAT 2012 Tiemcen le 23 juin 2012

## ATTESTATION

Le président du comité d'organisation atteste que SAADI Imene et BENMARCE Abdelaziz ont participé à ce colloque avec une communication (poster) ayant pour thème :

**Influence des additions minérales sur les caractéristiques physico-mécaniques des bétons à haute performance**

Le Président de l'Association El Habbakia  
TABET HELAL M. A.



Le Président du comité d'organisation  
MAMI E. F.





**10<sup>th</sup> International Congress  
on Advances in Civil Engineering**

17-19 OCTOBER 2012

MEFTU



This is to certify that

**ABDELAZIZ BENMARCE**  
has attended the

10th International Congress on Advances in Civil Engineering  
held on October 17-19, 2012 at Middle East Technical University in Ankara, Turkey.

Tamer Yüzgeç  
President,  
Turkish Chamber of Civil Engineers

Güneş Özcebe  
Chair of the ACE2012  
Local Organizing Committee





# 1<sup>er</sup> Congrès International de Génie Civil et d'Hydraulique

Le 10 et 11 décembre 2012, Guelma, Algérie



## ATTESTATION DE PARTICIPATION

Le président du comité d'organisation du 1<sup>er</sup> Congrès International de Génie Civil et d'Hydraulique,

atteste que : Monsieur BENZAID MEHDI

a présenté une communication par poster intitulée :

### CONTRIBUTION A L'ETUDE DU COMPORTEMENT A HAUTE TEMPERATURE DES BETONS AUTOPLAÇANTS

M. BENZAID, S. BOUKOUR & A. BENMARCE

Laboratoire de Génie Civil et Hydraulique. Université du 8 Mai 1945- Guelma, Algérie

Cette attestation est délivrée pour servir et valoir ce que de droit



Le président  
Dr. NAFA Zahreddine



**ENTEC**  
Engineering Technics





International Conference on Advances  
in Cement and Concrete Technology in Africa **2013**

Date: September 22,  
2012

Dear Abdelaziz,

### **Acceptance of Full Paper**

Venue: Emperor's Palace Convention Centre, Johannesburg

Dates: 28 - 30 January 2013

The review of your paper "Durability of Self-Compacting Concrete" has been completed. Acceptance of the paper has been recommended by the review committee subject to minor amendments. You are please required to address the comments below and send the full paper back to us ([info-spin@bam.de](mailto:info-spin@bam.de)) as soon as possible.

Please also note the following:

1. For further correspondence kindly refer to your Paper ID: DES 63
2. TRANSFER OF COPYRIGHT FORM: To give permission to ACCTA 2013 to publish the material, all authors must execute the transfer of copyright to ACCTA 2013. Please note that by completing and signing the form you are simply giving your permission to ACCTA 2013 to publish the material. This does not affect your intellectual property rights, which remain with the author(s).
3. Please register on-line at the ACCTA website:  
<http://www.accta2013.com/en/registration/index.htm>  
and please note that the Early bird registration deadline has been extended to 31 October.
4. All information relating to hotel, tourism and other matters are also provided at the conference website: [www.accta2013.com](http://www.accta2013.com) and it will be regularly updated.

We will keep you further informed on issues as we look forward to seeing you at the conference.

With best regards,

Herbert C. Uzoegbo  
Organising Committee

Comment of Editorial Board



République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université KASDI Merbah Ouargla

Laboratoire d'Exploitation et Valorisation des Ressources Naturelles en Zones Arides

Séminaire National sur Les Matériaux Locaux Dans La Construction

20 et 21 février 2013



ATTESTATION

Le Président du comité scientifique du Séminaire National Sur Les Matériaux Locaux Dans La Construction 20 & 21 février 2013, atteste que M/M<sup>me</sup> : **Abdelaziz BENMARCE** à présent, à l'université Kasdi Merbah Ouargla une communication intitulée:

«DURABILITY PERFORMANCE OF SELF-COMPACTING CONCRETE INCORPORATING LOCAL QUARRY

WASTE FINES, CRUSHED BRICK FINES AND SILICA FUME»

Co-auteur : **Mehdi BENZAID, Imen SAADI**

Président du comité scientifique

Handwritten signature in Arabic script.





International Congress on Materials & Structural Stability  
Congrès International Matériaux & Stabilité Structurelle  
Rabat, Morocco, 27-30 November 2013  
<http://www.fsr.ac.ma/cmss/>

## Acceptance letter Lettre d'acceptation

Rabat – 25- 09 - 2013

Dear Participant, **A. Benmarce**  
Cher(e)Participant(e),

We are pleased to inform you that the Organizing Committee Of CMSS2013 has accepted your Communication entitled:  
Nous avons le plaisir de vous informer que le comité d'organisation du CMSS2013 a accepté votre Communication intitulée:

**Silica fume and superplasticizer effect on producing high strength concrete**

A. Benmarce<sup>1\*</sup>, H. Boudjahem<sup>2</sup>, R. Bendjehaiche<sup>3</sup>, I. Saadi<sup>4</sup> & M. Bouaoud<sup>5</sup>

<sup>1,2,3</sup> Civil Engineering & Hydraulic Laboratory (LGCH), University May, 8<sup>th</sup>,1945, Guelma, 24000, Algeria

<sup>4</sup>University of Annaba, Annaba, Algeria

<sup>5</sup>CGS Est. Constantine, Algeria

For Poster Presentation  
Pour une présentation Poster

To the International Congress on Materials & Structural Stability.  
Au Congrès International Matériaux & Stabilité Structurelle.

The Poster will be displayed on digital format which is in attached file.  
Le Poster sera affiché en format numérique décrit en fichier ci-joint.

If you have not yet made the payment of your registration, please do so and send us a scanned copy of your transfer, to:  
[congresscmss@fsr.ac.ma](mailto:congresscmss@fsr.ac.ma) before the deadline of October 15, 2013

Si vous n'avez pas encore effectué le paiement de votre inscription, nous vous invitons à le faire et envoyer une copie scannée de votre transfert, à: [congresscmss@fsr.ac.ma](mailto:congresscmss@fsr.ac.ma) avant la date limite du 15 Octobre 2013

If you are in the obligation to pay your registration fees on the day of the congress, please return this letter by checking the box below:  I confirm my participation

Si vous êtes dans l'obligation de payer les frais d'inscription le jour du congrès, retourner cette lettre en cochant la case suivante :  Je confirme ma participation

Feel free to contact us for further information you need.  
N'hésitez pas à nous contacter pour plus d'informations.

Best regards.  
Cordialement.

For the organizing committee  
Pour le comité d'organisation

Pr. Nacer Khachani



ASMATEC, Faculty of science, Av. Ibn Battouta, MB. 1014 Rabat, Morocco. Tel/Fax: 212(0)537775440  
E-mail: [aasmatec@yahoo.fr](mailto:aasmatec@yahoo.fr), <http://asmatec.asso-web.com/>