

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
République Algérienne Démocratique et Populaire  
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Mohamed khider –Biskra  
Faculté des Sciences et de la Technologie  
Département de Génie civil et d'Hydraulique  
Référence : ...../2020



جامعة محمد خيضر بسكرة  
كلية العلوم و التكنولوجيا  
قسم الهندسة المدنية و الري  
المرجع...../2020

## Mémoire de Master

Filière : GENIE CIVIL

Spécialité : MATERIAUX EN GENIE CIVIL

Thème

**Influence des granulats de brique réfractaire  
(gros et fine granulats) sur le comportement à  
haute température des bétons**

Nom et Prénom de l'étudiant :

**BENZETTA Hicham**

Encadreur :

**Dr. HACHEMI Samya**

**KHATTAB Mohammed Nahedh**

Année universitaire : 2019 – 2020

## REMERCIEMENTS

Je voudrais dans un premier temps remercier, mon encadreuse de mémoire **HACHEMI Samya**, docteur à l'université de Biskra, pour sa patience, sa disponibilité et surtout ses judicieux conseils, qui ont contribué à alimenter ma réflexion.

Je tiens à remercier monsieur **KHATTAB Mohamed Nahedh** doctorant à l'université de Biskra pour son précieux conseils et aide de ce mémoire.

Je remercie vivement les membres du jury de soutenance de cette mémoire:

- Monsieur **MEZGHICHE Bouzidi**, Docteur à l'Université de Biskra, pour avoir présidé le jury au milieu de ses multiples tâches.
- Monsieur **BENAICHIE Elhaj**, Docteur à l'Université de Biskra, d'avoir accepté d'examiner mon travail et de faire partie de ce jury.

Je tiens à remercier monsieur le chef de département, **Dr.ABD ESSLEM Issam** pour son aide et ses encouragements.

Je remercie mes enseignants du département de génie civil et d'hydraulique pour leurs conseils, leur soutien et leur aide.

J'exprime ma gratitude à mes défunts **PARENTS** pour leur immense amour, leurs émotions sans fin et leur soutien indéfectible.

Un remerciement particulier à mon ami proche **HAMLAOUI Ammar** pour sa fidélité et son soutien qui me donne le courage pour finaliser cette étude.

Je remercie enfin tous ceux qui, d'une manière ou d'une autre, ont contribué à la réussite de ce travail.

## RESUME

Sous l'action de l'haute température, les éléments en béton peuvent subir des chutes de performances mécaniques, thermiques et physiques. Dans ce travail nous avons étudié l'influence des granulats de brique réfractaire (gros et fin granulats) sur le comportement à haute température des bétons.

Pour cela, nous avons étudiées deux types de béton: béton de granulats ordinaires (béton de référence) et béton confectionnés avec 20% de granulats de brique réfractaire. Pour chaque type de béton, trois rapports E/C sont utilisés : 0.38, 0.47 et 0.59. Les bétons sont soumis à des cycles de chauffage-refroidissement jusqu'à 150°C, 250°C, 400°C, 600°C et 800°C.

Les résultats obtenus montrent que les bétons réalisés par les granulats de brique réfractaire présentent une amélioration des propriétés physiques et mécaniques à hautes températures.

**Mots-Clés** : Béton, Température, Propriétés physiques, Propriétés mécaniques, brique réfractaire.

## ABSTRACT

Under the action of high temperature, concrete elements can suffer drops in mechanical, thermal and physical performance.

In this work we studied the influence of refractory brick aggregates (coarse and fine aggregates) on the high temperature behavior of concrete.

For that, we studied two types of concrete: concrete of ordinary aggregates (reference concrete) and concrete made with 20% of refractory brick aggregates. For each type of concrete, three W/C ratios are used: 0.38, 0.47 and 0.59. Concretes are subjected to heating-cooling cycles up to 150 °C, 250 °C, 400 °C, 600 °C and 800 °C.

The results obtained show that the concretes produced by refractory brick aggregates exhibit an improvement in mechanical behavior at high temperatures.

**Keywords:** Concrete, Temperature, Physical properties, Mechanical properties, refractory bricks.

## ملخص

تحت تأثير درجات الحرارة العالية، يمكن أن تتعرض العناصر الخرسانية لانخفاض في الأداء الميكانيكي والحراري والفيزيائي درسنا في هذا العمل تأثير ركام الطوب الحراري (الركام الخشن والناعم) على سلوك الخرسانة تحت تأثير درجات الحرارة العالية.

لذلك قمنا بدراسة نوعين من الخرسانة: الخرسانة من الركام العادي (خرسانة مرجعية) والخرسانة المصنوعة من 20% من ركام الطوب الحراري. لكل نوع من الخرسانة، استخدمت ثلاث نسب من ماء/اسمنت: 0.38 و 0.47 و 0.59. تخضع الخرسانة لدورات تبريد وتسخين تصل إلى غاية 150 درجة مئوية و 250 درجة مئوية و 400 درجة مئوية و 600 درجة مئوية و 800 درجة مئوية.

أظهرت النتائج المتحصل عليها أن الخرسانة التي تنتجها حجارة الطوب الحراري تظهر تحسنا في السلوك الميكانيكي و الفيزيائي في درجات الحرارة العالية.

**الكلمات المفتاحية** خرسانة، حرارة، الخصائص الفيزيائية، الخصائص الميكانيكية، من ركام الطوب الحراري.

## Table des Matières

RESUME

ABSTRACT

ملخص

<b>Table des Matières</b>	<b>i</b>
<b>Liste des figures</b>	<b>v</b>
<b>Liste des tableau</b>	<b>viii</b>
<b>Liste des Notations</b>	<b>ix</b>

**INTRODUCTION GENERALE.....2**

### **CHAPITRE I : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE**

**I.1 INTRODUCTION.....5**

**I.2 GENERALITE SUR LA MICROSTRUCTURE DU BETON DURCI.....5**

I.2.1 Pâte de ciment.....5

I.2.2 Eau dans la microstructure du béton.....7

I.2.3 structure poreuse du béton.....8

I.2.4 interface pâte – granulats.....9

**I.3 GENERALITES SUR LES GRANULATS.....11**

I.3.1 Classification des granulats.....11

**I.4 COMPORTEMENT MECANIQUE DU BETON A TEMPERAYURE AMBIANTE  
.....12**

I.4.1 Comportement en compression .....13

I.4.2 Comportement en traction .....14

**I.5 EVOLUTION DU BCOMPORTEMENT DU BETON AVEC LA TEMPERATURE  
.....14**

I.5.1 Evolution de la pâte de ciment .....15

I.5.2 Evolution des granulats .....17

I.5.3 Dégradation de l’interface pâte-granulats .....18

I.5.4 Evolutions des propriétés physiques .....19

I.5.4.1 Evolutions de la porosité .....19

I.5.4.2 Perte de masse .....22

I.5.4.3 Evolutions de la perméabilité.....	23
<b>I.6 Evolution des propriétés mécaniques du béton avec la température .....</b>	<b>25</b>
I.6.1 Résistance en compression à hautes températures.....	25
I.6.2 Résistance en traction à hautes températures .....	31
I.6.3 Module d'élasticité.....	33
<b>I.7 Conclusion .....</b>	<b>35</b>
<b>CHAPITRE II : MATERIAUX TESTES ET PROGRAMME EXPERIMENTAL</b>	
<b>II.1 INTRODUCTION .....</b>	<b>37</b>
<b>II.2 LES MATERIAUX.....</b>	<b>37</b>
<b>II.2.1Caractérisation des constituants utilisés .....</b>	<b>37</b>
II.2.1.1Ciment .....	37
II.2.1.2 Sable .....	38
II.2.1.3 Granulats.....	38
II.2.1.4 L'eau.....	41
II.2.1.5 Adjuvant .....	41
II.2.2 Courbe granulométriques .....	42
II.2.3 Absorption des granulats de la brique réfractaire.....	42
<b>II.3. FORMULATION DES BETONS D'ETUDES .....</b>	<b>43</b>
<b>II.4 FABRICATION ET CONDITIONNEMENT DES EPROUVETTES .....</b>	<b>46</b>
II.4.1 Fabrication et conditionnement des éprouvettes .....	46
II.4.2Conservation des éprouvettes.....	47
<b>II.5 ESSAIS EXPERIMENTAUX .....</b>	<b>48</b>
<b>II.6 ESSAI DE CHAUFFAGE .....</b>	<b>49</b>
II.6.1 Dispositif de chauffage .....	50
II.6.3 Disposition dans le four .....	51
<b>II.7 ESSAIS MACROSTRUCTURAUX .....</b>	<b>52</b>
<b>II.7.1 Mesure des propriétés mécaniques .....</b>	<b>52</b>
II.7.1.1 Essai de compression .....	52
II.7.1.2 Essai de vitesse de propagation d'ondes ultrasonores.....	54
<b>II.7.2 Mesure des propriétés physiques .....</b>	<b>55</b>
II.7.2.1 Perte de masse .....	55
II.7.2.2 Porosité accessible à l'eau .....	55
<b>II.8. Conclusion.....</b>	<b>56</b>

<b>CHAPITRE III : PRESENTATION ET ANALYSE DES RESULTATS</b>	
<b>III.1 INTRODUCTION.....</b>	<b>58</b>
<b>III.2 L’EFFET DE L’HAUTE TEMPERATURE SUR LES PROPRIETES PHYSIQUES ET MECANIQUE DU BETON CONFECTIONNES AVEC DES GRANULATS NATURELS.....</b>	<b>58</b>
III.2.1 Perte de masse.....	58
III.2.2 Porosité accessible à l’eau.....	60
III.2.3 Résistance en compression.....	61
III.2.4 Vitesse des ondes soniques.....	63
<b>III.3 L’EFFET DE L’HAUTE TEMPERATURE SUR LES PROPRIETES PHYSIQUES ET MECANQUES DU BETON CONFECTIONNES AVEC 20% DES GRANULATS DE BRIQUE REFRACTAIRE.....</b>	<b>64</b>
III.3.1 Perte de masse.....	64
III.3.2 Porosité à l’eau.....	66
III.3.2 Résistance en compression.....	67
III.3.4 Vitesse des ondes sonique.....	68
<b>III.4 ANALYSE COMPARATIVE DES PROPRIETES PHYSIQUES ET MECANQUES DES DIFFERNTS BETONS.....</b>	<b>68</b>
III.4.1 Perte de masse.....	69
III.4.2 Porosité à l’eau.....	70
III.4.3 Résistance en compression.....	71
III.3.4 Vitesse des ondes soniques.....	74
<b>III.5 Conclusion.....</b>	<b>75</b>
<b>CONCLUSION GENERALE.....</b>	<b>77</b>
<b>Références</b>	

## Liste des figures

### CHAPITRE I : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

I.1. Image en microscopie électronique à balayage de C-S-H poussant à la surface de grains d'alite. ....	6
I. 2. (a) structure cristalline de la portlandite ;(b) image en microscopie électronique à balayage de cristaux de portlandite.....	7
I. 3. (a) structure cristalline de l'étringite ; (b) image en microscopie électronique A balayage de cristaux d'étringite .....	7
I. 4. Echelle de la taille des solides et des pores dans la hydraté .....	9
I. 5. Exemple de microstructure d'un mortier .....	10
I. 6. Influence de la nature des granulats sur l'adhérence entre les granulats et la matrice cimentaire. ....	10
I. 7. (a) granulats roulés ; (b) granulats concassés .....	11
I. 8. Courbe contrainte-déformation en compression simple.....	13
I. 9. Comportement du béton en traction simple.....	14
I. 10. Courbes d'analyse thermo gravimétrique thermique et d'analyse thermique différentielle d'une pâte de ciment à différentes température .....	16
I.11. Evolution de la quantité des phases de la pâte de ciment portland au cours de l'échauffement valeurs obtenues par la technique de diffraction de neutrons .....	17
I. 12. Perte de masse de deux types de granulats (calcaire et siliceux) .....	18
I. 13. Observation macroscopique des fissures dans deux éprouvette de BHP avec granulats Silico-calcaires sont principalement localisées a l'interface pâte-granulats.....	19
I. 14. Evolution de la porosité à l'eau des bétons, bétons à hautes performances, et bétons autoplaçants en fonction de la température .....	20
I. 15. Evolution de la porosité des bétons en fonction de la température de chauffage valeur de la porosité résiduelle. ....	21
I. 16. Evolutions de la porosité des bétons en fonction de la température de chauffage valeur de la porosité résiduelle relative.....	21
I. 17. Evolution de la perte de masse des bétons en fonction de la température .....	22
I. 18. Evolution de la perte de masse en fonction de la température pour différentes compositions de bétons .....	23
I. 19. Evolution de la perméabilité des bétons BO et BHP en fonction de la température. ....	24

<b>I. 20.</b> Evolution des perméabilités apparentes et intrinsèques d'un mortier.....	25
<b>I. 21.</b> Evolution de résistance en compression du béton avec la température .....	26
<b>I. 22.</b> Résistance résiduelle à la compression[a] des OC, [b] des HSC, relative de bétons .....	27
<b>I. 23.</b> Résistance résiduelle en compression des BHPL et BHPFS en fonction de la température de chauffage .....	30
<b>I. 24.</b> Evolution de la résistance relative en compression des bétons avec des fibres de polypropylène, et des fibres métalliques.....	31
<b>I. 25.</b> Résultats des essai de résistance en traction relative. ....	32
<b>I. 26.</b> Evolution de la résistance résiduelle en traction avec la température.....	33
<b>I. 27.</b> Evolution du module d'élasticité relatif pour les bétons M30C, M75C, M75SC]. ....	34
<b>I. 28.</b> Evolution des modules d'élasticité résiduels et des modules d'élasticité résiduels relatifs à différentes températures .....	35
<b>CHAPITRE II : MATERIAUX TESTES ET PROGRAMME EXPERIMENTAL</b>	
<b>II. 1.</b> Diffractogramme des granulats brique réfractaires .....	40
<b>II. 2.</b> Image en microscopie électronique à balayage des granulats brique réfractaire. ....	40
<b>II. 3.</b> Différents granulats utilisés, GC : granulats calcaires, GBR : granulats brique réfractaire, SS : sable siliceux, SBR : sable brique réfractaire. ....	41
<b>II. 4.</b> Courbes granulométriques de granulats naturels (graviers, gravillon et sable) et des granulats de brique réfractaire (gros et fin granulats). ....	42
<b>II. 5.</b> Evolution de l'absorption d'eau du GBR. ....	43
<b>II. 6.</b> Organigramme simple de la méthode DREUX-GORISSE pour formuler les BO.....	44
<b>II.7.</b> Photo de la bétonnière utilisée.....	47
<b>II. 8.</b> Conservation des moules par un film plastique.....	47
<b>II. 9.</b> Conservation des éprouvettes immergées dan l'eau. ....	48
<b>II. 10.</b> Organigramme simple expliquent le programme expérimental. ....	48
<b>II. 11.</b> Cycles de chauffage-refroidissement (vitesse de chauffage 3°C/min) .....	50
<b>II. 12.</b> Dispositifs de chauffage.....	51
<b>II. 13.</b> Disposition des éprouvettes dans le four.....	51
<b>II. 14.</b> Eprouvette mise en place sur la presse hydraulique. ....	53
<b>II. 15.</b> Ultrason de PUNDIT. ....	54
<b>II. 16.</b> Dispositif de la mesure de la porosité du béton.....	56

**CHAPITRE III : PRESENTATION ET ANALYSE DES RESULTATS**

<b>III. 1.</b> Evolution de la perte de masse en fonction de la température pour les bétons BGN, BGN2 et BGN3.....	59
<b>III. 2.</b> Evolution de porosité à l'eau des bétons de granulats naturels en fonction de la température. ....	60
<b>III. 3.</b> Evolution de la résistance résiduelle et relative en compression des bétons de granulats ordinaire en fonction de la température. ....	61
<b>III. 4.</b> Effet de la température sur la vitesse des ondes soniques des bétons de granulats ordinaires. ....	63
<b>III. 5.</b> Evolution de la perte de masse en fonction de la température pour les bétons BGR1, BGR2 et BGR3. ....	65
<b>III. 6.</b> Evolution de la porosité à l'eau des bétons de granulats de brique réfractaire en fonction de la température. ....	66
<b>III. 7.</b> Evolution de résistance résiduelle et relative en compression des bétons de granulats de brique réfractaire en fonction de la température. ....	67
<b>III. 8.</b> Effet de la température sur la vitesse des ondes soniques des bétons de granulats de brique réfractaire.....	68
<b>III. 9.</b> Evolution de la perte de masse de bétons en fonction de la température. ....	69
<b>III. 10.</b> Evolution de la porosité à l'eau des différents types de bétons. ....	70
<b>III. 11.</b> Evolution de la résistance en compression avec la température. ....	72
<b>III. 12.</b> Effet de la température sur la vitesse des ondes soniques. ....	74

## Liste des tableau

### CHAPITRE I : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

#### CHAPITRE II : MATERIAUX TESTES ET PROGRAMME EXPERIMENTAL

<b>II. 1.</b> Composition chimique du ciment.....	37
<b>II. 2.</b> Principales caractéristique physiques et mécaniques du ciment. ....	38
<b>II. 3.</b> Principales propriétés physiques du sable siliceux. ....	38
<b>II.4.</b> Principales caractéristiques de granulats 5/15 et 15/25 .....	38
<b>II. 5.</b> Principales caractéristiques physique de granulats de brique réfractaires 5/15, 15/25 et 0/5.....	39
<b>II. 6.</b> Principales composition chimique de granulats brique réfractaires .....	39
<b>II. 7.</b> Caractéristique de l’adjuvant.....	41
<b>II. 8.</b> La composition des bétons ordinaire sans granulats BR pour 1m3.....	45
<b>II. 9.</b> La composition des bétons avec les granulats de brique réfractaire BR pour 1m3.....	45
<b>II. 10.</b> Les différents cycles de chauffage-refroidissement appliqués aux différents types de béton. ....	50
<b>II. 11.</b> Résistance en compression des différents bétons. ....	53

#### CHAPITRE III : PRESENTATION ET ANALYSE DES RESULTATS

<b>III. 1.</b> Classification de la qualité du béton selon la vitesse des ondes soniques .....	64
--	----

## Liste des Notations

<b>CSH</b>	Silicate de Calcium Hydraté
<b>Ca(OH<sub>2</sub>)</b>	Portlandite
<b>CaO</b>	Chaux
<b>E/C</b>	Eau / Ciment
<b>ITZ</b>	Interfacial transition zone
<b>ATD</b>	Analyses thermiques différentielles
<b>ATG</b>	analyses thermogravimétrique
<b>MAB</b>	Microscope Électronique à Balayage
<b>ESRF</b>	European Synchrotron Radiation Facility
<b>BAP</b>	bétons autoplaçants
<b>BHP</b>	Béton Haute Performance
<b>BGN1, BGN2 et BGN3</b>	Béton de Granulats Ordinaires (granulats calcaires et sable siliceux)
<b>BGR1,BGR2 et BGR3</b>	Béton confectionné avec granulats de Brique Réfractaire (80% granulats naturels et 20% granulats de brique réfractaire )
<b>F<sub>C</sub></b>	La contrainte de rupture
<b>F<sub>max</sub></b>	La charge à la rupture en compression
<b>S</b>	La surface de la section transversale de l'éprouvette
<b>dm</b>	Perte de masse
<b>m<sub>i</sub></b>	Masse initiale
<b>m<sub>t</sub></b>	Masse après chauffage
<b>P</b>	La porosité à l'eau
<b>M<sub>sec</sub></b>	La masse de l'échantillon à l'état sec
<b>M</b>	La masse de l'échantillon saturé immergé
<b>M<sub>sat</sub></b>	La masse de l'échantillon saturé d'eau
<b>V</b>	La vitesse des ondes soniques
<b>t</b>	Le temps de propagation

# **INTRODUCTION GENERALE**

### INTRODUCTION GENERALE

Le béton est le matériau de construction le plus largement répandu dans le monde, dû à sa facilité de mise en œuvre et à son coût relativement bas. Il est également devenu le matériel de choix pour la construction des structures exposées aux extrêmes conditions.

Les bétons sont des matériaux sensibles vis-à-vis les sollicitations thermiques. L'élévation de la température a de nombreuses conséquences, Parmi ces conséquences nous pouvons citer le retrait de dessiccation, la dilation thermique, le fluage et les transformations minéralogiques.

Plusieurs travaux de recherche ont montré que le comportement à hautes températures du béton varie selon sa composition et ses propriétés initiales. Une des solutions pour améliorer les propriétés mécaniques et physique l'incorporation des granulats de brique réfractaire (gros et fins).

Le travail de mémoire présenté dans ce manuscrit a deux objectifs le premier est d'améliorer la compréhension du comportement des bétons ordinaire exposés à de hautes températures.

Le deuxième objectif de cette étude consiste, dans un premier lieu, à étudier l'effet des hautes températures sur les propriétés physiques et mécanique du différent béton utilisé (bétons avec de granulats naturels et bétons avec des granulats de brique réfractaire). En second lieu, il consiste à comparer les comportements des différents bétons. Deux groupes ont été formulés. Le premier groupe de béton est formulé avec des granulats calcaires et du sable siliceux (dits granulats naturels), le deuxième groupe de béton est formulé avec 80% de granulats naturels et 20% de granulats de brique réfractaire.

Le manuscrit est composé de trois chapitres. Le premier chapitre présente une étude bibliographique détaillant un rappel de la microstructure du béton, des différentes formes d'eau présentes dans le béton, de l'interface pâte-granulats ainsi que les principales propriétés mécaniques du béton à température ambiante. Ensuite, les évolutions des propriétés physiques, thermiques et mécaniques des bétons exposés à des températures élevées sont présentées.

Le deuxième chapitre est consacré à la caractérisation des matériaux, aux compositions des bétons étudiés, la présentation du programme expérimental et la méthode de fabrication et de conservation des éprouvettes, ainsi que les différents essais de caractérisation des propriétés physiques et mécaniques, avant et après sollicitation thermique.

Le troisième chapitre débute par les résultats et interprétation des différents essais effectués sur les bétons avec des granulats naturels et les bétons de 20% des granulats de brique réfractaire pour les différents rapports E/C. La dernière partie de ce chapitre est consacré à

une étude comparative entre les deux groupes de bétons. Ce complément d'études a pour but d'observer l'influence des granulats de brique réfractaire sur le comportement du béton à haute température.

Le mémoire se termine par des conclusions générales.

# Chapitre I

---

## ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

### I.1 INTRODUCTION

La présent chapitre est consacré à l'analyse bibliographique des travaux de recherches sur le comportement de béton sous haute température, elle sera divisée en trois partie, La première partie portera sur la description détaillée de la pâte de ciment et description des granulats. La deuxième partie sera consacrée pour la description du comportement physique et mécanique du béton à température ambiante. La troisième partie comporte une synthèse bibliographique sur les évolutions des caractéristiques physique et mécaniques de béton avec la température, en termes d'observations et de mesures expérimentales réalisées jusqu'à présent.

### I.2 GENERALITE SUR LA MICROSTRUCTURE DU BETON DURCI

Le béton est un matériau de construction formé par un mélange de granulats et de sable, aggloméré par un liant hydraulique (ciment), éventuellement complété par des adjuvants et des additions.

#### I.2.1 Pâte de ciment

Un béton est un mélange de granulats (sable, graviers et éventuellement cailloux) liés entre eux par une pâte de ciment (ciment + eau). Cette pâte résulte de l'hydratation du liant utilisé avec de l'eau, le ciment Portland anhydre étant le ciment le plus utilisé. Ce dernier est composé de clinker, de gypse et d'ajouts éventuels pour modifier les propriétés du ciment (laitiers, cendres volantes, filler, etc).

Les principaux constituants d'un ciment Portland sont les suivants : [ Dupain et al., 2000]

- Le silicate tricalcique:  $3\text{CaO SiO}_2$ , que l'on écrit  $\text{C}_3\text{S}$  et qui représente 50% à 70% du clinker
- Le silicate bicalcique:  $2\text{CaO SiO}_2$ , que l'on écrit  $\text{C}_2\text{S}$  (10 à 30%).
- L'aluminate tricalcique:  $3\text{CaO Al}_2\text{O}_3$ , que l'on écrit  $\text{C}_3\text{A}$  (2% à 15%)
- L'alumino-ferrite tétracalcique :  $3\text{CaO Al}_2\text{O}_3 \text{Fe}_2\text{O}_3$ , que l'on écrit  $\text{C}_4\text{AF}$ (2% à 15%)

Le clinker, auquel on ajoute (5%)de gypse.

Ces constituants du ciment présentent des réactions hydrauliques, c'est-à-dire qu'ils se transforment en présence d'eau en hydrates qui précipitent et s'organisent en une structure mécaniquement résistante. On appelle hydratation l'ensemble des réactions chimiques qui se produisent entre l'eau et ciment. La prise est un passage entre l'état de suspension à celui du solide.

Les principaux hydrates simples formés sont les suivants:

- **Le silicate de calcium hydraté CSH** : Les CSH constituent la majeure partie de la phase liante de la pâte de ciment. On parle souvent de gel de CSH se référant à des composés

amorphes. Ce sont en fait des composés nanocristallins constitués de particules nanométriques agrégées les unes aux autres. En moyenne, une pâte de ciment durcie contient de 50% à 70% de CSH, ceci est favorable à l'augmentation de la résistance mécanique.

- **La Portlandite  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  ou l'hydroxyde de calcium** : La portlandite est le nom minéralogique de l'hydroxyde de calcium cristallisé. Son nom vient, bien sûr, du fait qu'on la trouve dans le ciment Portland hydraté. C'est la phase la plus soluble de la pâte de ciment hydratée. Elle représente environ 25% à 27% de la pâte de ciment.

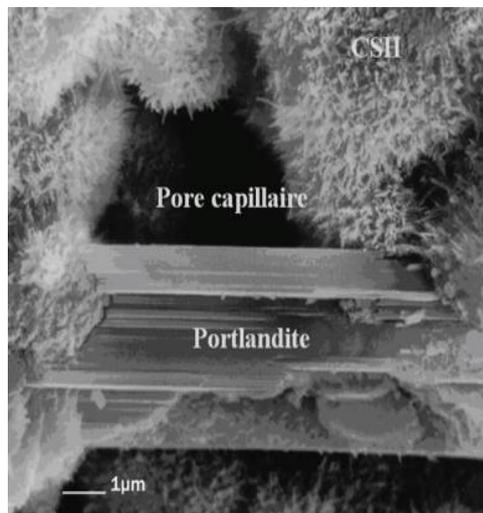
- **D'autres hydrates** : il s'agit des aluminates de calcium hydraté et de l'étringite.

Réaction principale de l'hydratation du ciment peut être présentée de façon simplifiée :

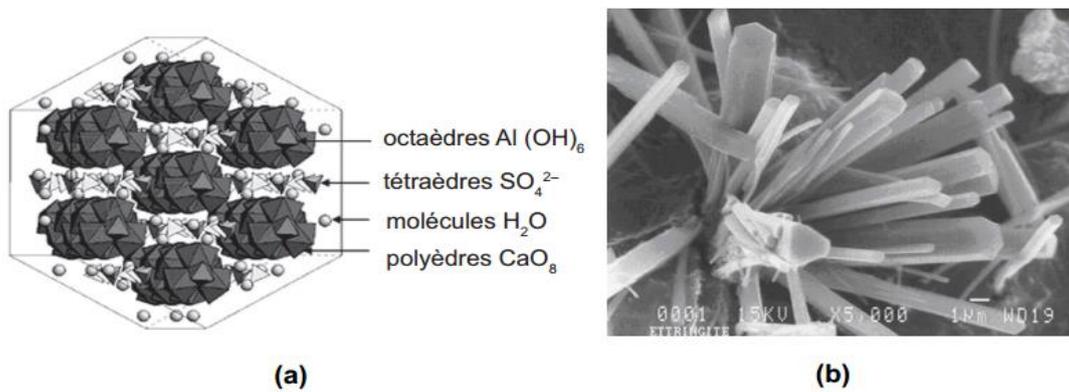
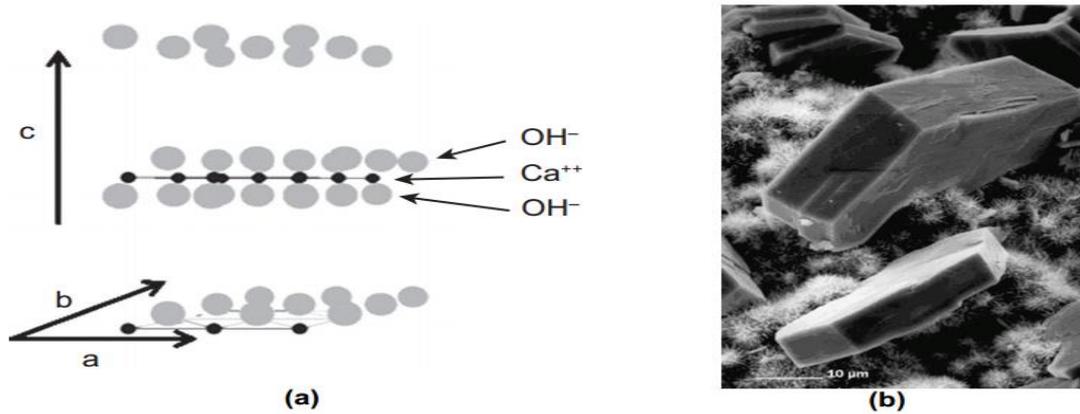
$\text{C}_3\text{S}$  (Silicate tricalcique) +  $\text{H}_2\text{O}$  → CSH (silicate de calcium hydraté) +  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  (portlandite)

$\text{C}_2\text{S}$  (Silicate bicalcique) +  $\text{H}_2\text{O}$  → CSH (silicate de calcium hydraté) +  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  (portlandite)

Pour un ciment donné, les quantités de CSH et de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  formées dépendent essentiellement du rapport E/C et du temps de réaction. Dans le cas des pâtes de ciment à haute performance, la quantité de phase CSH est encore plus importante. Ceci est favorable à l'augmentation de la résistance.



**Figure I.1.** Image en microscopie électronique à balayage de CSH poussant à la surface de grains d'alite [Regoudm et Hornain, 1975].



### I.2.2 Eau dans la microstructure du béton

L'eau est une composante essentielle pour la fabrication du béton. Elle est appelée l'eau de gâchage et joue un double rôle, le rôle chimique (hydratation du ciment) et le rôle physique (ouvrabilité du mélange). Tous les vides de la matrice sont plus ou moins remplis d'eau. Sa présence et surtout son mouvement au cours de la vie d'un ouvrage en béton est souvent responsable de phénomènes tels que le retrait de dessiccation, le gonflement, les fissurations observées lors des cycles de gel – dégel. L'eau se présente sous diverses formes :

**-L'eau libre (ou capillaire) :** C'est dans celle-ci que s'effectuent les écoulements lors de la mise en œuvre du béton. Elle remplit le volume poreux et n'est pas soumise aux forces

d'attraction des surfaces solides. Cette eau est la première à migrer et à s'éliminer en général pour des températures comprises entre 30°C et 120°C.

**-Eau adsorbée** : c'est l'eau adsorbée sur les surfaces solides. Elle peut être adsorbée physiquement ou chimiquement. L'adsorption physique met en jeu des énergies de type Van der Waals de faible intensité. L'adsorption chimique correspond à la formation de liaison chimique entre les atomes de la surface du solide et les molécules de l'adsorbat. L'énergie mise en jeu ici est plus importante et la structure des molécules d'eau est modifiée (dissociation de la liaison covalente O-H).

**-L'Eau chimiquement liée** : Cette eau s'est combinée avec d'autres espèces durant l'hydratation des grains de ciment pour former les nouveaux éléments tels que le silicate de calcium hydraté et la portlandite. C'est une eau entièrement intégrée à la structure solide des hydrates.

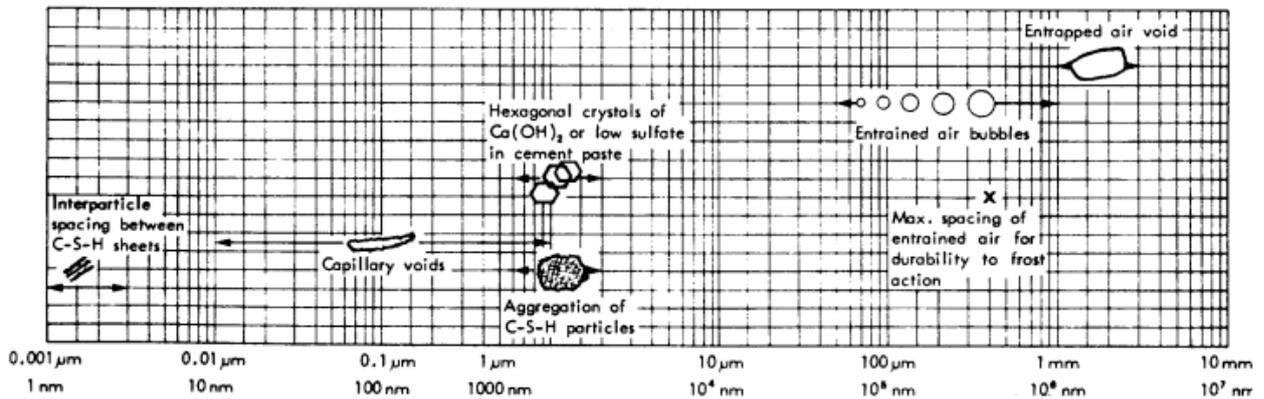
### I.2.3 structure poreuse du béton

La porosité de la pâte de ciment est un paramètre important car elle conditionne toutes les propriétés du béton comme la résistance en compression et les phénomènes de transport et d'interaction avec le milieu extérieur (indicateurs de durabilité) [Baron et Ollivier, 1992]. La porosité du béton est constituée de plusieurs familles de vides dont les dimensions sont comprises entre quelques mm et quelques dizaines d'Armstrong (Å). Les plus petits vides du béton sont donc 1 million de fois plus petites que les plus gros (Figure I.4). Cette porosité varie d'un béton à un autre de façon significative à la fois quantitative (de moins de 10% pour les BTHP à plus de 15% pour les BO) et qualitative (dimensions et répartitions des rayons de pores). La connaissance de la taille des pores est tout aussi essentielle. La structure poreuse du ciment hydraté est constituée de pores capillaires et de pores d'hydrates.

- **Les pores capillaires** : La dimension des pores capillaires étant beaucoup plus grande, ils jouent un rôle prépondérant dans les transferts et la durabilité des bétons. La porosité capillaire diminue avec le rapport E/C et avec le degré d'hydratation. Un autre facteur important est la connectivité des pores capillaires. Pour une porosité capillaire inférieure à 18%, les pores capillaires ne communiquent plus entre eux. Les propriétés mécaniques sont directement reliées à la porosité capillaire.
- **Les pores des hydrates (les pores de la structure du C-S-H)** : Ce type de porosité est intrinsèques aux hydrates et représente 28% du volume total, leur dimension et leur nombre ne dépendent pas du rapport  $E/C$ .

Le réseau poreux du béton est également constitué de :

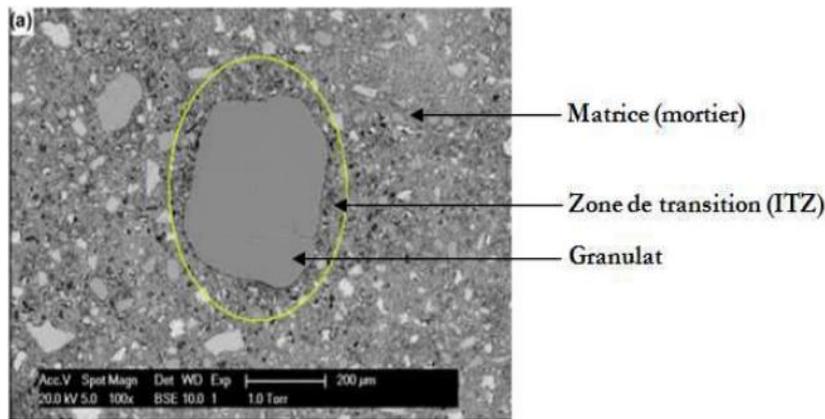
- **Vides d'air** : ces vides constituent le premier squelette des réseaux poreux (diamètre de l'ordre de micromètre), leur présence dans le béton est due au malaxage.
- **Fissures** : de quelques dizaines de micromètres (microfissures) jusqu'aux millimètres (macro-fissures). Ces fissures peuvent avoir des origines très différentes (retraits, sollicitations mécaniques, dilatation, etc.).



### I.2.4 interface pâte – granulats

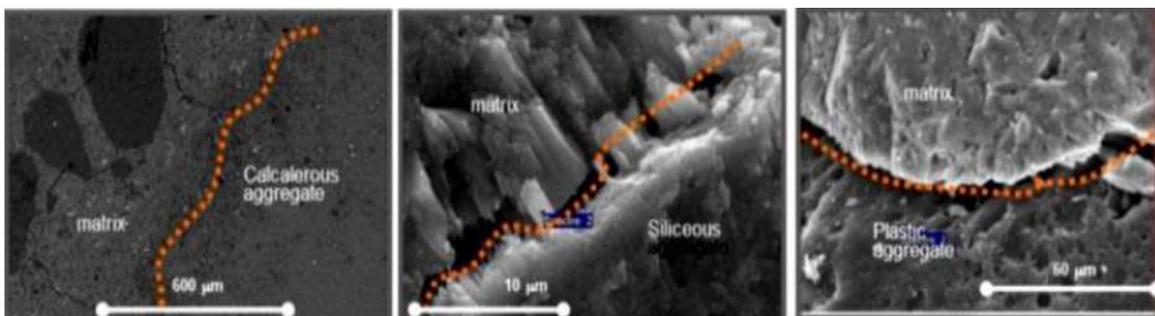
Dans le béton durci, autour des granulats, une zone de pâte de ciment hydraté particulière, appelée «auréole de transition», ou encore zone de transition interfaciale, notée ITZ (Interfacial transition zone) ou interphase.

La zone de transition interfacial revêt une grande importance dans les bétons. Il s'agit de la portion de la pâte de ciment qui se situe autour des granulats. S'étendant sur une épaisseur d'environ  $50 \mu m$ , on y trouve une microstructure particulière, une porosité élevée et des cristaux bien développés en font une zone propice à la naissance des fissures et au transport des agents agressifs. [Nathalie, 2000].



**Figure I. 5.** Exemple de microstructure d'un mortier [Gao et al., 2013.]

La qualité de l'auréole de transition est fortement liée à la nature des granulats. Au contact avec la pâte de ciment, il existe deux types de granulats, granulats naturels. Ces granulats proviennent de roches sédimentaires siliceuses ou calcaires, de roches métamorphiques (quartz) ou de roches éruptives (basalte, granite). Dans le cas de granulats calcaires (réactifs et très poreux), suite aux réactions chimiques qui se produisent au cours du temps et l'augmentation des forces d'adhésion, l'auréole est faiblement poreuse et sa résistance mécanique est élevée. Cependant, les granulats siliceux (peu poreux) forment, avec la pâte de ciment, une interface fortement poreuse et moins résistance que la pâte de ciment.



**Figure I. 6.** Influence de la nature des granulats sur l'adhérence entre les granulats et la matrice cimentaire. (a) Bonne adhérence pour les granulats calcaires. (b) Une faible adhérence pour les granulats siliceux. (c) Aucune adhérence pour les granulats plastiques [kamal. et al., 2014]

La qualité de la zone de transition dépend aussi de la forme des granulats. Les liaisons entre la pâte de ciment et les granulats concassés sont plus rigides qu'avec des granulats roulés [Nyry et al. 2014].

### I.3 GENERALITES SUR LES GRANULATS

On appelle granulats des matériaux pierreux de petites dimensions (un ensemble de grains compris entre 0 et 125 mm), produits par l'érosion ou le broyage mécanique (concassage) des roches. Ce sont des matériaux inertes entrant dans la composition des bétons et mortiers. Ils constituent le squelette du béton et ils représentent, environ 80% du poids total du béton. Ils sont constitués de sables (gros et fin) et de gravier. Cependant, les granulats doivent satisfaire à certaines exigences de qualité pour qu'ils soient utilisés dans le béton. Il y a deux intérêts d'utiliser des granulats dans le béton : le premier économique : Diminution de la quantité de liant (ciment et addition) ; et le deuxième technique : Limitation des variations dimensionnelles dans le béton (les granulats sont plus rigide que la pâte de ciment).

#### I.3.1 Classification des granulats

##### a) les granulats naturels

Les granulats naturels sont utilisés actuellement à hauteur de 70% à 80% en volume dans la composition d'un béton et représentent désormais une ressource non renouvelable dont l'accessibilité diminue. Les formulations actuelles de béton visent à augmenter la part de granulats de roche massive concassés. Ces matériaux, de par leur histoire de fabrication, n'ont pas du tout la même morphologie. La substitution des granulats roulés par des granulats concassés affecte considérablement la mise en œuvre du matériau.



(a)



(b)

**Figure I. 7.** (a) granulats roulés ; (b) granulats concassés

### b) les granulats artificiels

Des granulats artificiels peuvent être employés pour réaliser des bétons à usages spécifiques.

- **Sous-produits industriels, concassés ou non:**

Les plus employés sont le laitier cristallisé concassé et le laitier granulé de haut fourneau obtenus par refroidissement à l'eau.

- **Granulats à hautes caractéristiques :**

Il s'agit de granulats élaborés industriellement pour répondre à certains emplois, notamment granulats très durs pour renforcer la résistance à l'usure de dallages industriels (granulats ferreux) ou granulats réfractaires.

### c) les granulats recyclés

Les granulats recyclés sont les granulats résultant de la transformation des matériaux inorganiques antérieurement utilisés comme la plastique, le verre, le caoutchouc et la brique réfractaire.

- **Les déchets de la brique réfractaire :**

Les déchets de briques sont des matériaux inertes vis-à-vis de l'environnement et de la santé humaine. Ils sont admissibles dans les installations de stockage et proviennent essentiellement des chantiers de bâtiment et de travaux publics ou d'industries de fabrication de matériaux de construction.

Les briques réfractaires se retrouvent de plus en plus souvent dans les dépliés des fournisseurs et des fabricants tant de cheminées que de barbecues et de fours. La brique réfractaire est conçue pour résister à la chaleur. Selon son utilisation, elle sera composée de vermiculite, de ciment fondu et de coulis réfractaire dans différentes proportions. En plus de résister à la chaleur, la brique réfractaire a également la capacité de restituer la chaleur. C'est ce que l'on appelle la convection et c'est un élément majeur du succès de la brique réfractaire [Carlier et al., 2010].

## I.4 COMPORTEMENT MECANIQUE DU BETON A TEMPERAYURE AMBIANTE

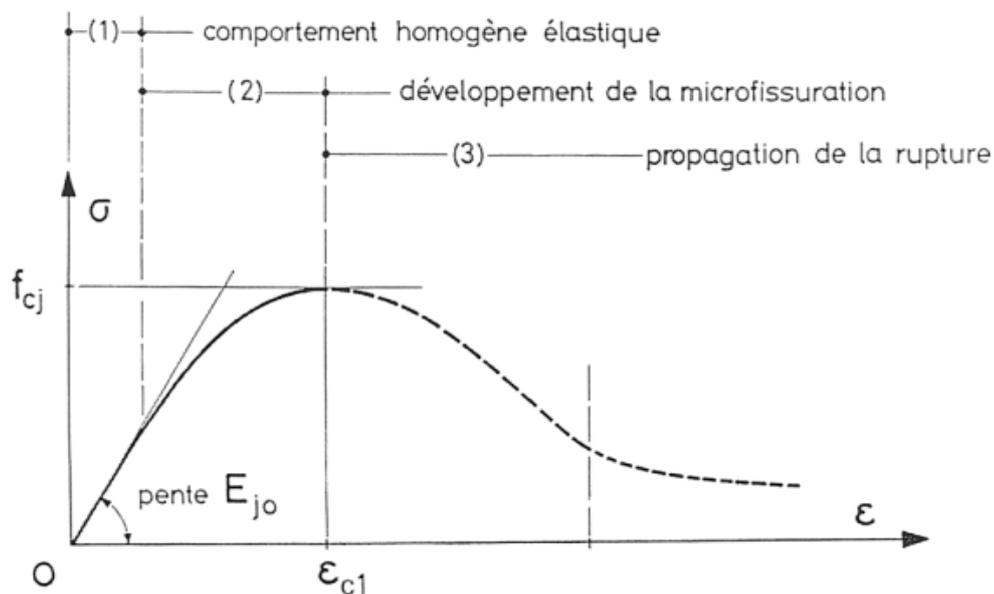
Le béton est un matériau de construction caractérisé, pour la partie mécanique, par une bonne résistance à la compression (propriété importante), et par une faible résistance à la traction. L'objectif de cette partie est d'expliquer le comportement mécanique du béton à température ambiante sous sollicitation de compression et de traction.

### I.4.1 Comportement en compression

La résistance à la compression est généralement considérée comme la propriété la plus importante du béton, elle donne une image globale sur la qualité du béton.

Le comportement du béton en compression est traduit principalement par une relation contrainte-déformation, cette relation est présentée schématiquement à la figure I.8. On peut distinguer trois phases de comportement [Reynouard et Pijaudier-Cabot, 2005] :

1. Une phase de comportement analogue à celui d'un matériau homogène et élastique, se traduisant par une relation à peu près linéaire entre la contrainte et la déformation.
2. La phase de développement de la microfissuration qui entraîne une incurvation progressive de la courbe jusqu'à l'atteinte du maximum de contrainte.
3. En imposant des accroissements de déformation et non pas de contrainte, on peut obtenir une courbe décroissante correspondant à la propagation progressive de la « rupture » c'est-à-dire développement des surfaces de fracture et d'une fissuration plus ou moins généralisée.



**Figure I. 8.** Courbe contrainte-déformation en compression simple

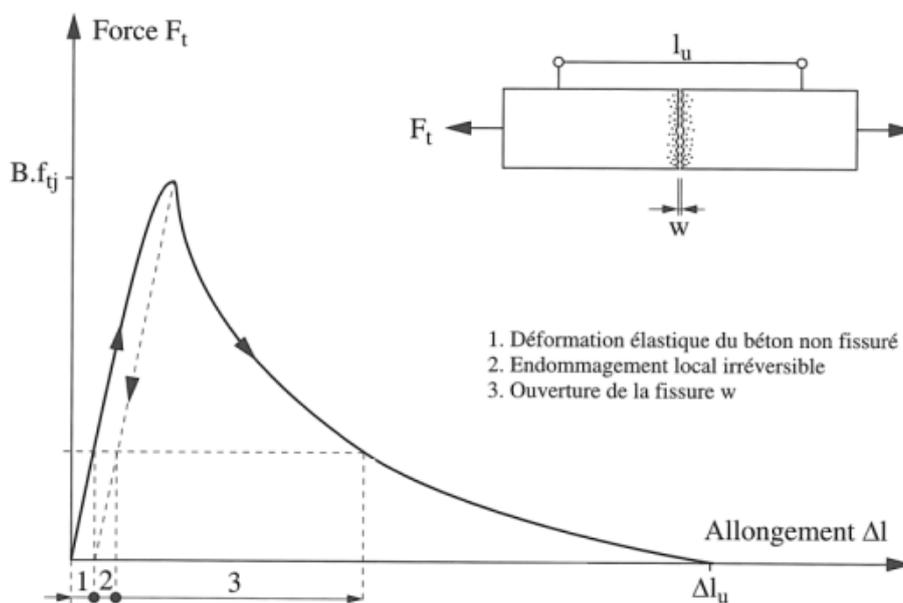
[Reynouard et Pijaudier-cabot, 2005].

### I.4.2 Comportement en traction

La résistance à la traction moins étudié que la compression parce que la résistance à la compression est la propriété la plus utilisée dans le dimensionnement et la conception des ouvrages en béton, et d'autre part, dû à son comportement quasi fragile. La figure I.9 présente la courbe contrainte-déformation pour le béton en traction simple.

Dans la première phase, le comportement est quasi linéaire jusqu'à l'atteinte de la force maximale, cette charge maximale correspond à la formation d'une fissure. Juste avant l'apparition de la fissure visible, il y a un endommagement diffus dans une bande de faible largeur autour de la future fissure, qui explique une petite non-linéarité précédant la charge maximale.

Après l'apparition de la fissure, la force décroît rapidement lorsque l'allongement croît jusqu'à s'annuler [Reynouard et Pijaudier-Cabot, 2005].



**Figure I. 9.** Comportement du béton en traction simple

[Reynouard et pijaudier-cabot, 2005].

### I.5 EVOLUTION DU BCOMPORTEMENT DU BETON AVEC LA TEMPERATURE

En cours de l'échauffement du béton, il existe des nombreuses conséquences négatives sur le matériau béton nous pouvons citer le retrait de dessiccation, la dilation thermique, le fluage et les transformations minéralogiques.

Ces modifications sont respectivement responsables de la fissuration, de l'écaillage et de l'éclatement. Elles mettent en évidence la forte sensibilité des bétons exposés aux hautes températures.

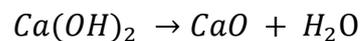
### I.5.1 Evolution de la pâte de ciment

Lorsque le béton est soumis à une augmentation de température, différentes transformations physiques et chimiques. Les principales modifications se passent dans la pâte de ciment (décomposition chimique du gel CSH, perte de l'eau adsorbée, décomposition d'étringite etc).

L'étude des résultats d'analyses thermiques différentielles (ATD) et d'analyses thermogravimétrique (ATG) permet de détecter l'apparition de transformation chimique se produisant au sein du béton porté à des températures élevées, et de suivre leurs progressions. Plusieurs auteurs Campbell et Desai, [Campbell et Desai, 1967], Harmathy [Harmathy,1973], Schneider [Schneider,1982] et Noumowé [Noumowé 1995].

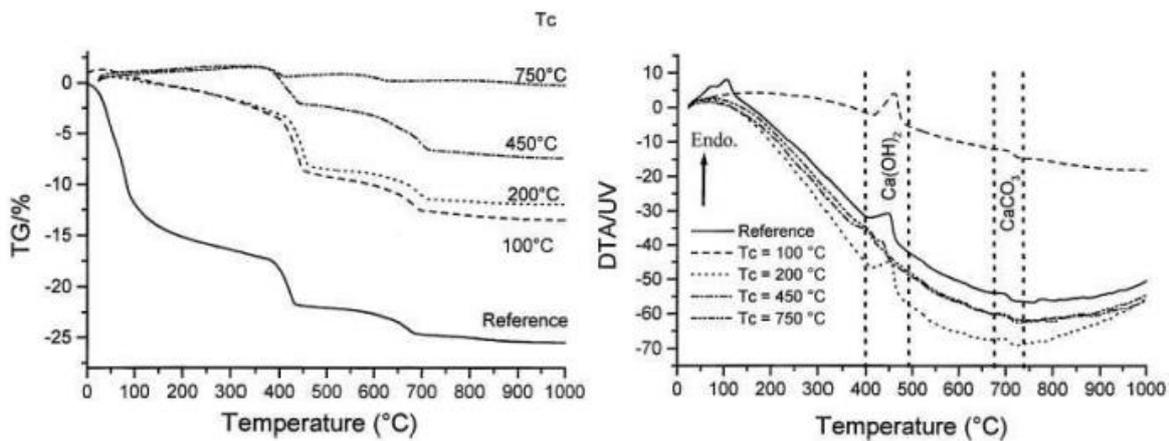
Lors d'une augmentation de la température, les essais ATD permettent de mettre en évidence les réactions suivantes :

- Entre 30 et 105 °C, l'eau libre et une partie de l'eau adsorbée s'échappent du béton L'eau non liée serait complètement éliminée à 120°C [Noumowé 1995].
- On considère que les hydrates commencent à se décomposer à partir de 105 °C bien que la décomposition de certains hydrates ait commencé avant [pasquero, 2004] L'étringite se décompose avant que la température n'atteigne 100°C [Alonso et al., 2003], [ Harmathy, 1973] considère que la décomposition des hydrates débute dès que l'eau évaporable a été évacuée et que la processus s'effectue de façon continue de 105 °C jusqu'à 1000°C.
- Entre 450°C et 550°C, la portlandite se décompose en eau et en chaux libre selon la réaction suivante :



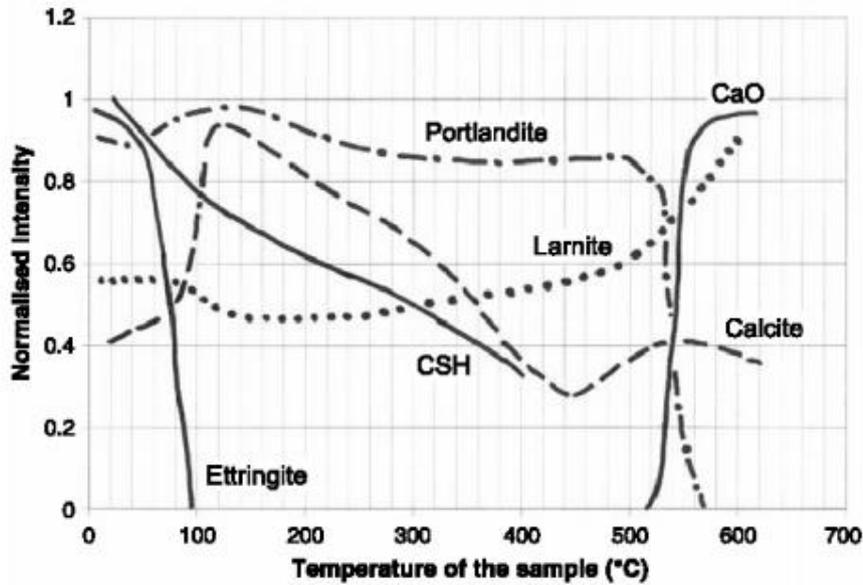
- Entre 600°C et 700°C : se produit la deuxième étape de la déshydratation des CSH qui produit une nouvelle forme de silicates bicalciques [Noumowé, 1995] [schneider, 1982].de plus, les études de Taylor [Taylor, 1964] montrent que les CSH commencent à fissurer 600°C -700°C avec la formation de  $\beta - C_2S$ .on a alors une nouvelle phase d'évacuation de l'eau chimiquement liée.
- A partir de 1300°C s'amorce la fusion de la pâte de ciment.

Dans la phase de refroidissement, une nouvelle formation de la portlandite a été observée, ainsi qu'un processus de réhydratation des silicates qui conduit à la formation de nouveaux gels de C-S-H. [Alonso et Fernandez, 2004]. Pour analyser la principale transformation présente dans la pâte de ciment utilisée, la technique d'analyse thermogravimétrique (ATG). Ces techniques sont utilisées pour les matériaux cimentaires car elle permet d'évaluer, de façon quantitative, les proportions des différentes phases (ettringite, CSH, Portlandite, calcite, etc.) qui y sont présentes, en chauffant un échantillon de matériau et en mesurant l'évolution de sa masse avec la température. Celle-ci diminue en effet notablement lors de la déshydratation (ou déshydroxylation) de l'ettringite, des CSH et de la portlandite  $Ca(OH)_2$  et lors de la décarbonatation de la calcite. La figure I.10 présente les courbes d'analyse thermogravimétrique et d'analyse thermique différentielle réalisées sur une pâte de ciment après différents traitements thermiques. On y observe des zones bien marquées de décomposition de Portlandite et du carbonate de calcium.



**Figure I. 10.** Courbes d'analyse thermo gravimétrique thermique et d'analyse thermique différentielle d'une pâte de ciment à différentes température [Alon, 2004].

L'évolution de la composition de la pâte au cours de l'échauffement a été déterminée grâce à la technique de la diffraction des neutrons à l'ESRF (European Synchrotron Radiation Facility). Le cycle de chauffe appliqué était de  $1^{\circ}C/min$  jusqu'à  $700^{\circ}C$ . La figure I.11 présente les résultats d'essai réalisé sur une pâte de ciment par [Cast, 2004].



**Figure I. 11.** Evolution de la quantité des phases de la pâte de ciment portland au cours de l'échauffement valeurs obtenues par la technique de diffraction de neutrons [Cact, 2004].

Sur cette figure, on peut observer les différentes courbes révèle une disparition complète de l'ettringite avant que le matériau atteigne 100°C. Le début de la déshydratation du gel CSH commence avant 100°C. La Portlandite demeure stable au cours du chauffage, et diminue subitement à 500°C et disparaît complètement au-delà de 560°C. La quantité de  $CaO$  augmente fortement à partir de 500°C et à la suite de la déshydratation de la Portlandite.

### I.5.2 Evolution des granulats

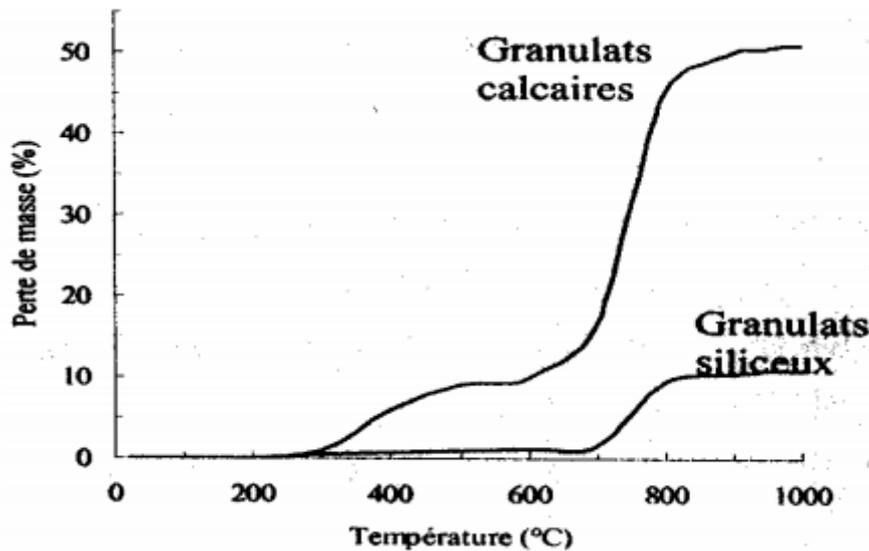
Sous l'effet de la température, les granulats peuvent avoir des comportements différents. Les granulats siliceux entre 120°C et 600°C, l'eau adsorbée est partiellement libérée, ce qui provoque un clivage et une réduction de la résistance des granulats, ce type de granulats présentent des caractéristiques relativement stables vis-à-vis du feu. A partir de 573°C, une transformation du quartz  $\alpha$  en quartz  $\beta$  s'accompagne d'une forte dilatation de 1% à 5% [Laneyrie, 2014]. Cette variation de structure cristalline dans les granulats peut provoquer une instabilité thermique lors du chauffage. Généralement l'éclatement de granulat silex entre 110°C et 450°C [Mindeguia, 2009], [Xing, 2011].

Les granulats calcaires présentent un comportement thermique stable jusqu'à une température de 600°C. Au-delà de cette température, la décarbonatation de la calcite a lieu:



Lors du refroidissement, le  $CaO$  peut réagir avec l'humidité de l'air pour donner de la portlandite  $Ca(OH)_2$ . Cette réaction entraîne un accroissement de fissure et l'endommagement de la structure du béton.

La figure I.12 présente une étude sur l'évolution de la perte de masse de bétons composés de granulats siliceux et calcaires chauffés entre  $200^{\circ}C$  et  $1000^{\circ}C$ . Il constate que les bétons à base de granulat calcaires conduisent à une perte de masse plus marquée que ceux à base de granulats siliceux.

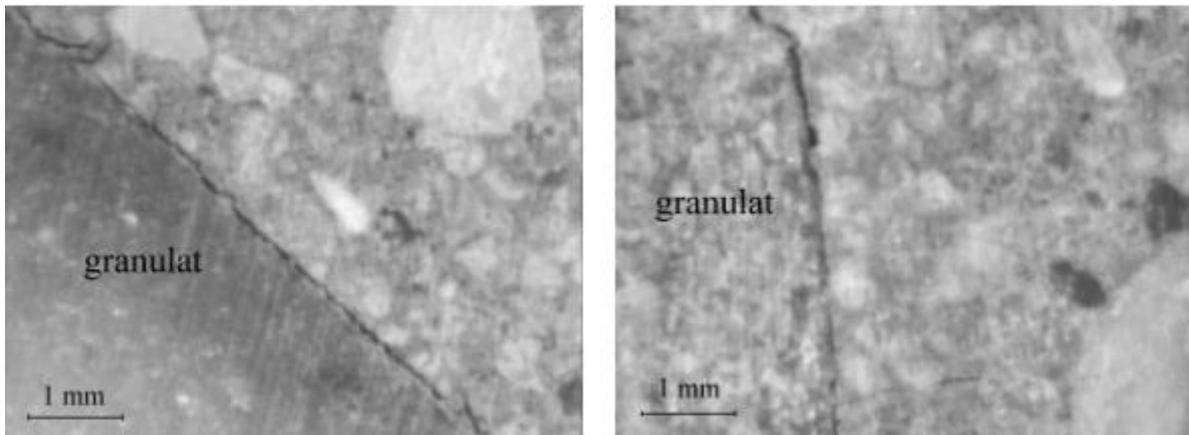


**Figure I. 12.** Perte de masse de deux types de granulats (calcaire et siliceux) [Menou, 2004].

Les études réalisées par Collet [Collet, 1977] sur l'évolution des propriétés de bétons composés de granulats siliceux, calcaires et légers chauffés entre  $200^{\circ}C$  et  $900^{\circ}C$ . Les résultats obtenus montrent que les bétons à base de granulat siliceux conduisent à une perte de résistance plus marquée que ceux à base de granulats calcaires.

### I.5.3 Dégradation de l'interface pâte-granulats

Dans les bétons, l'interface pâte-granulats est la partie et la plus fragile, la plus poreuse. Tous les éléments constituant le béton subissent avec la température des modifications physiques et chimiques.



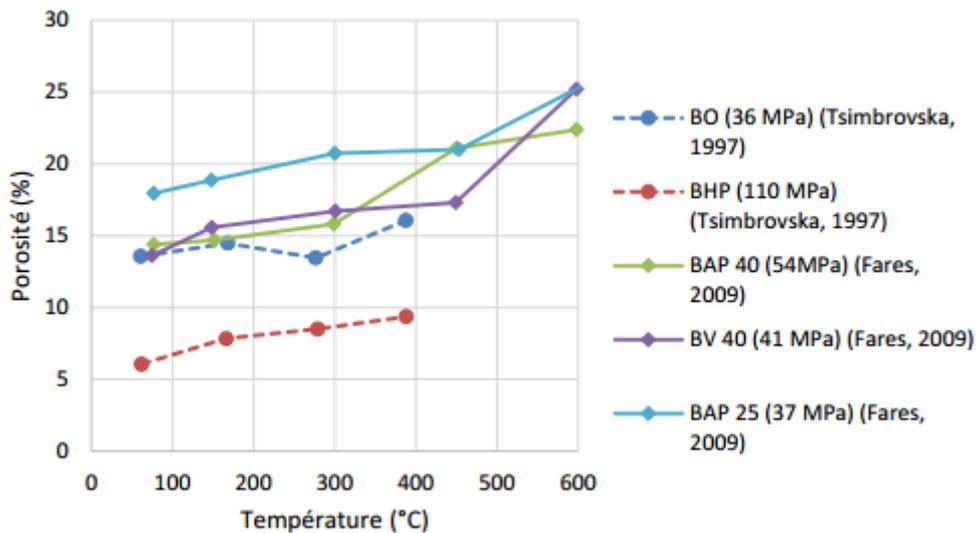
**Figure I.13.** Observation macroscopique des fissures dans deux éprouvettes de BHP avec granulats silico-calcaires sont principalement localisées à l'interface pâte-granulats [Carré et al, 2007].

La figure I.13 présente l'observation macroscopique les fissures dans les éprouvettes de un BHP avec granulats silico-calcaires sont principalement localisées à l'interface pâte-granulat, On observe que la pâte se contracte et les granulats se dilatent. La dilatation des granulats silico-calcaires est particulièrement importante à partir de 400°C [Carré, et al., 2007]

### **I.5.4 Evolutions des propriétés physiques**

#### **I.5.4.1 Evolutions de la porosité**

Dans le béton soumis aux hautes températures. La porosité de la pâte de ciment est fortement modifiée (changement dans la porosité totale, changement dans la distribution de tailles des pores). Les études de plusieurs auteurs Alarcon-Ruiz [Alarcon-Ruiz et al., 2002], Chan [Chan et al., 1996], Noumowé [Noumowé et al., 2003], Alonso [Alonso et al., 2003], Hager [Hager, 2004], [Tsimbrovska 1998] et Fares [Fares 2009] montrent que la porosité totale du béton augmente avec la température. La figure I.14 montre la variation de la porosité totale des bétons ordinaires, bétons à hautes performances, et bétons autoplaçants en fonction de la température mesurée par Tsimbrovska [Tsimbrovska, 1997] et Fares [Fares, 2009].



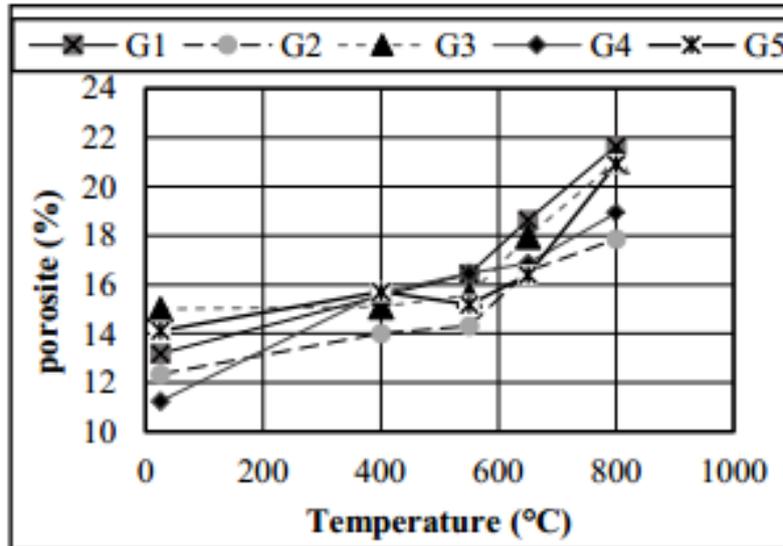
**Figure I.14.** Evolution de la porosité à l'eau des bétons, bétons à hautes performances, et bétons autoplaçants en fonction de la température [Tsymbrovska, 1997] et [Fares, 2009].

Les travaux de Tsymbrovska [Tsymbrovska, 1997] portent sur un BO (36 MPa) et un BHP (110 MPa) soumis à un chauffage à 0,2 °C/min. A la température de 400°C, l'auteur observe une augmentation de 0,9% et 1,8% de porosité pour le BO et le BHP respectivement. Fares [Fares 2009] a testé les bétons autoplaçants (BAP) (54 MPa), les bétons vibrés (41 MPa) à un chauffage à 1°C/min jusqu'à 600°C. L'auteur a constaté que la porosité augmente, quel que soit le béton (BO, BHP ou BAP). La décomposition des hydrates induit une faible évolution de la perméabilité qui augmente surtout au-delà de 400°C lorsque l'interface pâte-granulat fissure sous l'action des déformations thermiques différentielles.

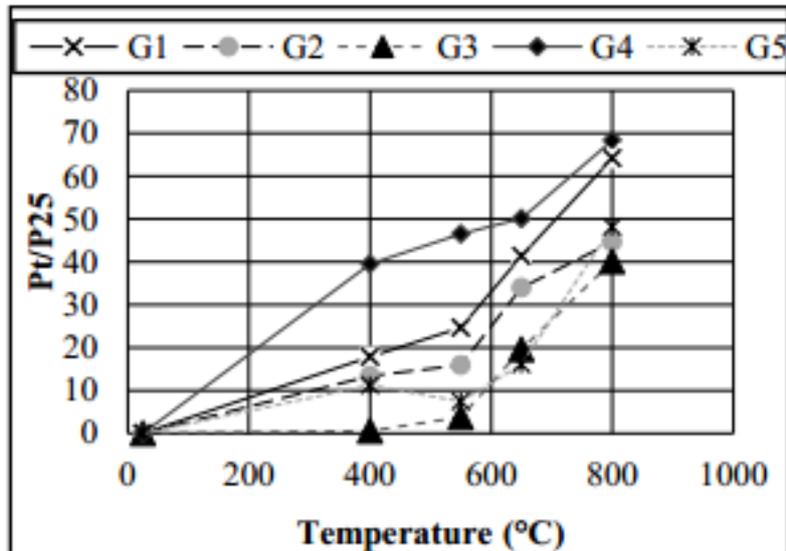
La figure I.15 et 16 représente l'évolution de porosité en fonction de type de granulats et de la température [Kessal, 2017]. L'auteur observe à travers l'augmentation de la température que la structure interne est devenue très poreuse. L'analyse globale de la porosité avant et après l'exposition à haute température réaliser par Kessel [Kessal, 2017] permet de tirer les remarques suivantes :

- Jusqu'à 400°C l'augmentation de la porosité est comprise entre 0,6% et 39%; en effet les granulats calcaires (particulièrement G4) présentent la plus grande porosité.
- Entre 400°C et 550°C ; une augmentation négligeable pour les tous types de béton sauf celle confectionner avec des granulats siliceux G5; on peut remarques une diminution de la porosité provoquer par l'augmentation du volume des granulats siliceux lors la transformation du quartz  $\alpha$  en quartz  $\beta$

- Une augmentation encore plus forte au-delà de 550°C spécialement pour les bétons de granulats calcaire due principalement à la décomposition endothermique du calcaire. L'équation de cette décomposition est présentée ci-dessous :



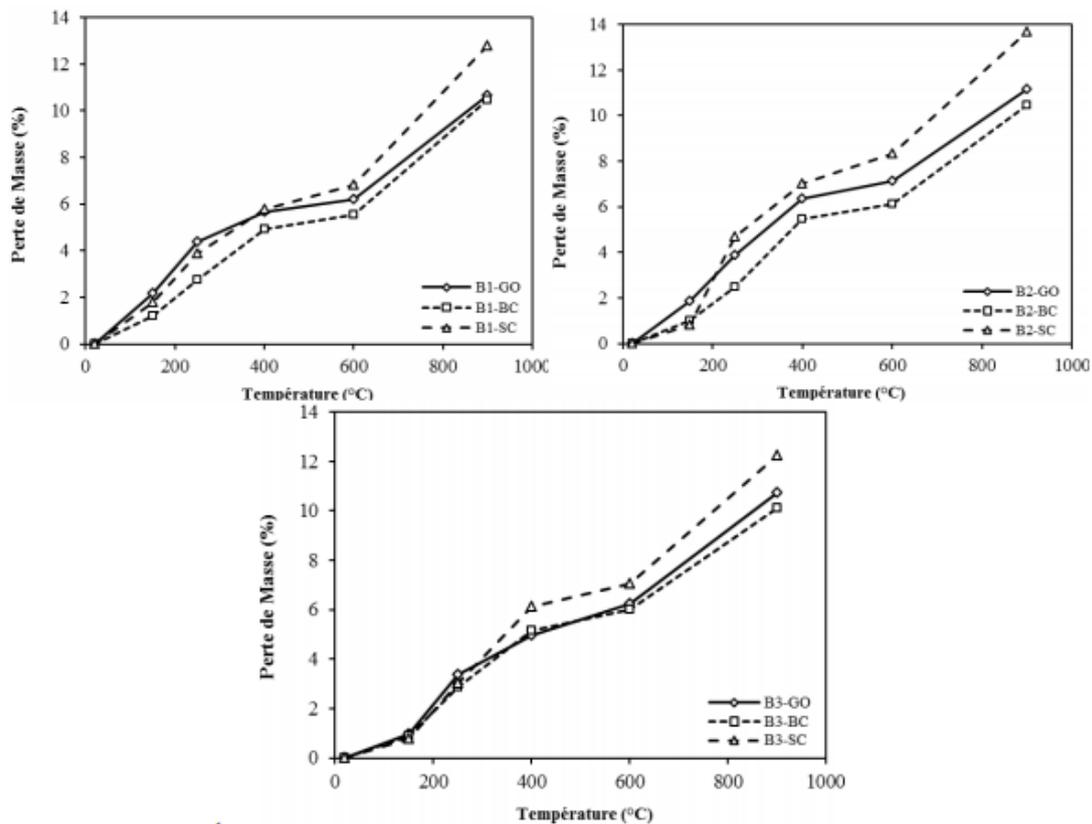
**Figure I.15.** Evolution de la porosité des bétons en fonction de la température de chauffage valeur de la porosité résiduelle [Kessal, 2017].



**Figure I.16.** Evolutions de la porosité des bétons en fonction de la température de chauffage valeur de la porosité résiduelle relative [kessal , 2017].

### I.5.4.2 Perte de masse

Durant l'échauffement du béton, la masse du béton diminue à cause de l'évaporation de l'eau et la d'déshydratation progressive des hydrates de la pâte de ciment. La figure I.17 montre les résultats expérimentaux de perte de masse du béton ordinaire (B1), béton haute résistance (B2) et BHP béton haute performance (B3) en fonction de la température obtenue par Hachemi [Hachemi, 2015].



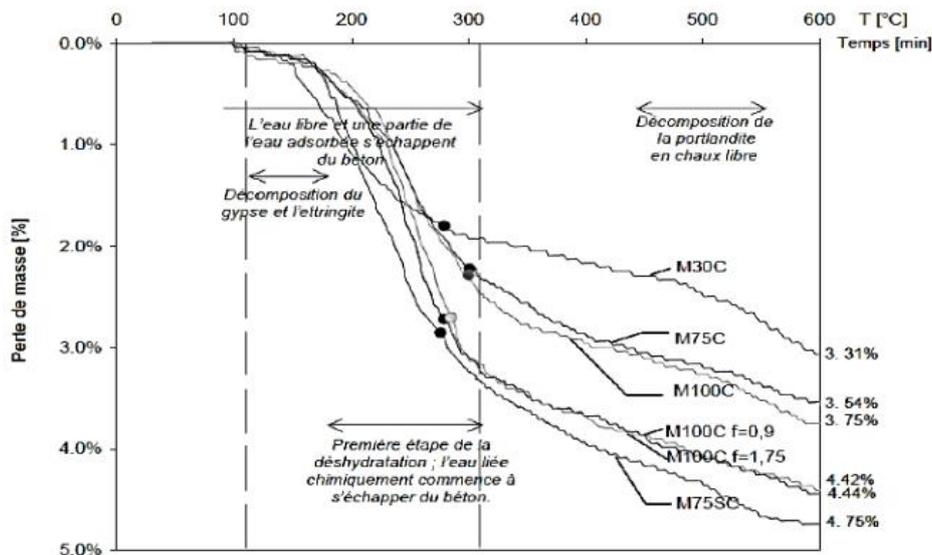
**Figure I.17.** Evolution de la perte de masse des bétons en fonction de la température [Hachemi, 2015].

L'auteur observe Entre la température ambiante et 250°C. Les bétons à rapport E/C élevé (B1) perdant plus de masse que les bétons à faible rapport E/C. Les bétons à E/C élevé contiennent plus d'eau et ont une perméabilité plus grande que les bétons à E/C faible qui facilite l'évaporation de l'eau.

Au-delà de 250°C, L'auteur a constaté que l'évolution de la perte de masse en fonction de la température est liée au type de granulats utilisés. Les bétons contenant des granulats de

brique concassée (BC) présentent la plus faible perte de masse par rapport aux autres bétons. Ces résultats sont expliqués par la plus faible perte de masse des granulats de brique concassée par rapport aux autres types de granulats, et aussi l'auteur montre que la plus grande perte de masse des bétons à base de sable calcaire (SC) peut s'expliquer par le départ de  $\text{CO}_2$  provenant des carbonates de calcium qui entraîne une augmentation de la perte de masse supplémentaire à partir de  $600^\circ\text{C}$ .

La figure I.18 présente les courbes de la perte de masse mesurées par Hager [Hager, 2004]. Les courbes obtenues montrent que la cinétique de la perte de masse augmente brusquement entre  $150$  et  $300^\circ\text{C}$ . Celle-ci correspond au départ de l'eau libre et de l'eau liée chimiquement [Kanema et al., 2005], [Hager, 2004]. La température de  $300^\circ\text{C}$  peut être considérée comme la fin de la migration d'eau évaporable [Hager, 2004]. A partir de cette température, la vitesse de perte de masse ralentit. Cependant, la diminution de la masse continue à cause de la déshydratation de la portlandite et du gel de CSH.



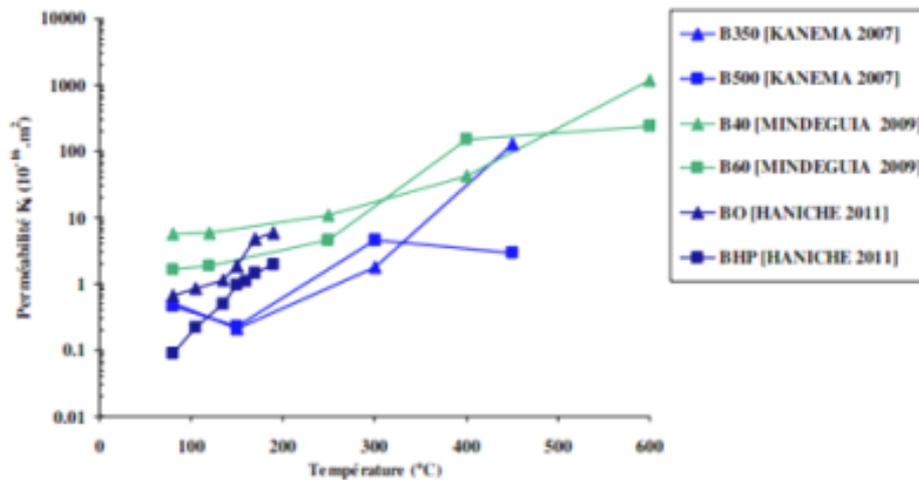
**Figure I.18.** Evolution de la perte de masse en fonction de la température pour différentes compositions de bétons [Hager, 2004].

### I.5.4.3 Evolutions de la perméabilité

La perméabilité des bétons est considérée comme un indicateur majeur de la durabilité des ouvrages en béton armé. La perméabilité de la pâte de ciment varie avec la progression de l'hydratation. Dans une pâte fraîche, l'écoulement de l'eau est contrôlé par la dimension, la forme et la concentration des grains de ciment anhydre. Lorsque l'hydratation progresse, la

perméabilité décroît rapidement. Dans le béton, la valeur du coefficient de perméabilité diminue de façon très significative avec la diminution du rapport E/C [Adam, 2000].

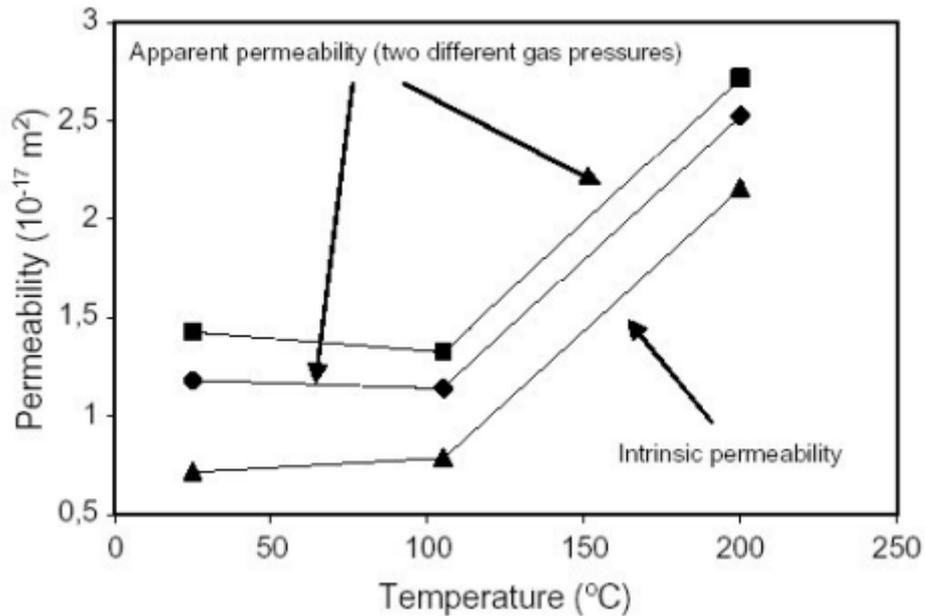
La synthèse des résultats obtenus par différentes hauteurs, Haniche [Haniche, 2011], Mindeguia [Mindeguia, 2009], Kanema [Kanema, 2007], indique que la perméabilité des bétons BO et BHP augmente avec la température comme présentées sur la figure I.19.



**Figure I.19.** Evolution de la perméabilité des bétons BO et BHP en fonction de la température [Haniche, 2011, Mindeguia 2009, Kanema 2007].

L'augmentation de la perméabilité est due au départ de l'eau capillaire, à la microfissuration de la matrice liée à la déshydratation des CSH et aussi à l'incompatibilité de déformation entre pâte et les granulats.

La figure I.20 présente la variation de la perméabilité apparente et intrinsèque d'un mortier fonction de la température obtenue par Lion, al., 2005, [Lion, al., 2005]. Les auteurs observent une augmentation de la perméabilité avec la température. Cet accroissement de température est plus net après un chauffage à 105°C. Ils attribuent cette augmentation au départ de l'eau capillaire, à la microfissuration de la matrice en raison de la déshydratation des C-S-H et à l'incompatibilité de déformation entre la pâte de ciment et les granulats.



**Figure I.20.** Evolution des perméabilités apparentes et intrinsèques d'un mortier [Lion, et al.,2005].

### I.6 Evolution des propriétés mécaniques du béton avec la température

Le béton est un matériau de construction le plus utilisé dans le domaine de génie civil caractérisé, pour la partie mécanique, par la résistance à la compression, la résistance à la traction et le module d'Young. Sous l'effet de la haute température, la microstructure du béton subit d'importantes modifications physico-chimiques. Ces transformations au sein du matériau influencent le comportement mécanique.

L'objectif de cette partie est d'expliquer le comportement mécanique du béton à température élevée.

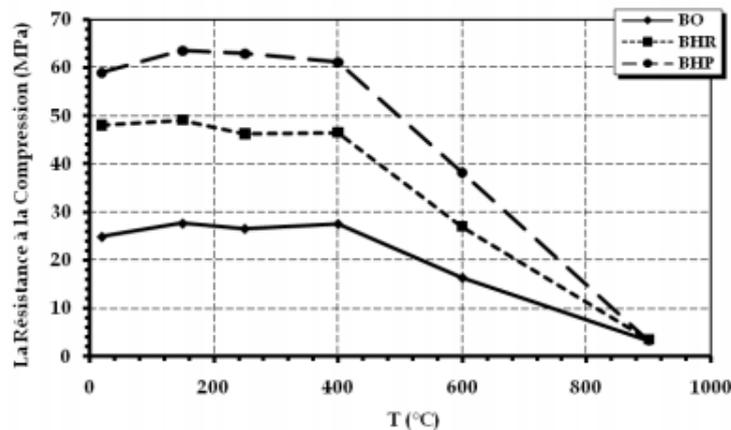
#### I.6.1 Résistance en compression à hautes températures

Dans le béton exposé aux hautes températures, la résistance à la compression est diminuée graduellement. La principale raison de la diminution de la résistance du béton est souvent attribuée à une modification de la microstructure de la pâte de ciment par déshydratation. Cette réaction de déshydratation étant chimiquement irréversible, la chute de résistance du béton est liée au degré d'hydratation de la matrice cimentaire. La deuxième raison de la diminution de la résistance du béton que la transforme le quartz  $\alpha$  en quartz  $\beta$  dans des granulats siliceux à 573°C que fragilise le granulat et peut entraîner également une chute des résistances mécaniques du béton [Felicitti et al., 2000].

La figure I.21 présentent les résultats de la résistance en compression résiduelle et relative (normalisée par rapport à la valeur initiale mesurée à 20°C) des trois types de béton étudié (BO, BHP, et BHR) mesurée par Hachemi [Hachemi et al., 2014].

A partir des résultats montrés sur la figure I.21 obtenues par Hachemi [Hachemi et al., 2014] distingue deux zones de comportement du béton :

- La première zone, qui varie de la température ambiante jusqu'à 400°C, on constate une augmentation de la résistance en compression de faible ampleur. Cette augmentation peu avoir comme origine le départ de l'eau du matériau qui ré-augmente les forces d'attraction par le rapprochement des feuillets de CSH.
- Dans la deuxième zone, qui varie de 400°C jusqu'à 900°C, il a été observé que la résistance en compression diminue de façon significative des résistances en compression pour les trois types du béton étudié. Elles demeurent inférieures à 10 MPa lorsque le béton est chauffé à 900°C. [Hachemi et al., 2014].



**Figure I.21.** Evolution de résistance en compression du béton avec la température [Hachemi et al., 2014].

• Type des Granulats

La possibilité d'une variation du comportement mécanique des bétons face au feu selon le type de granulats a été déjà signalée dans la littérature par Rijaniaina, et Niry Razafinjat [Rijaniaina, et Niry Razafinjat, 2015], Kessel [Kessel, 2017], Rahmouni et al., [Rahmouni et al., 2014].

La figure I.22 présente l'évolution des résistances en compression des bétons, « HSC » pour désigner les bétons à hautes performances ; « OC » pour désigner les bétons ordinaires ; « -X ; -G ; -N ; -B » : pour désigner ,respectivement, les granulats de silex, de granite, de calcaire noir et de calcaire blanc en fonction de la température mesurées par Rijaniaina, et Niry Razafinjat [Rijaniaina et Niry Razafinjat, 2015].

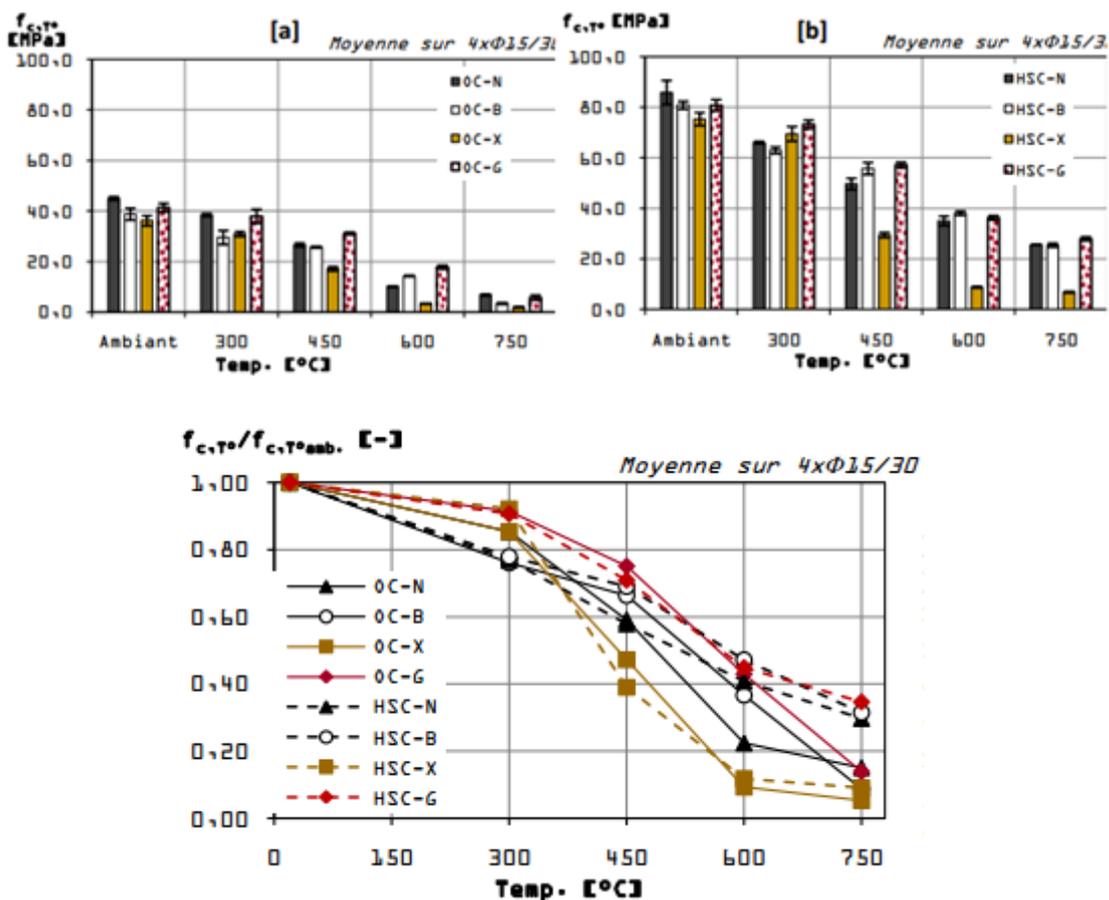


Figure I.22. Résistance résiduelle à la compression[a] des OC, [b] des HSC, relative de bétons [Rijaniaina, et Niry Razafinjat, 2015]

A partir du cycle à 450°C, une importante perte de résistance est observée systématiquement pour les bétons composés de silex quelque soit leur rapport E/C. Parmi les OC, le OC-G présente un meilleur maintien de résistance avec la température que les autres bétons. Les

bétons HSC-G, HSC-B et HSC-N ont globalement les mêmes résistances résiduelles. Les HSC présentent, quelque soit le granulat, une plus faible diminution de résistance entre 600°C et 750°C sauf pour les HSC-X [Rijaniaina et Niry Razafinjat, 2015].

La synthèse des résultats obtenu par Rijaniaina et Niry Razafinjat [Rijaniaina et Niry Razafinjat, 2015], indique que la nature minéralogique des granulats semble avoir une plus forte influence sur les résistances résiduelles en compression des OC que sur celles des HSC. La nature de la matrice cimentaire influe sur le gain de résistance pour les HSC étant donné que l'interface pâte-granulat est meilleure pour cette formulation et notamment pour la résistance en compression des bétons à 750°C. A température ambiante, malgré le maintien du volume de pâte pour les OC et les HSC, les résistances des granulats s'observent à travers les différentes résistances en compression des bétons. Toutefois, l'influence de la granulométrie respective des quatre natures de granulats peut être évoquée. Les performances mécaniques résiduelles de bétons de silex-X chutent entre 300°C et 450°C. Il est important de souligner l'instabilité thermique de ce type de granulat à partir de 300°C - 400°C et ce, dépendant de l'état hydrique du granulat et sa taille.

- **Additions minérales**

Différentes additions peuvent être mélangées au ciment pour modifier les propriétés du béton frais et durci (maniabilité, propriété mécanique). Les principales sont les fillers calcaires, la fumée de silice, le laitier de haut fourneau et les cendres volantes.

L'influence des additions minérales sur l'évolution des résistances mécaniques du béton à hautes températures a été étudiée par Poon [Poon et al., 2001], Saadi [Saadi, 2017].

La figure I.23 présente l'évolution des résistances en compression des bétons hautes performances, «**BHPL**» pour désigner les bétons à hautes performances à base de filler de laitier granulé et «**BHPfs** » pour désigner les bétons à hautes performances à base de la fumée de silice en fonction de la température mesurées par Saadi [Saadi, 2017].

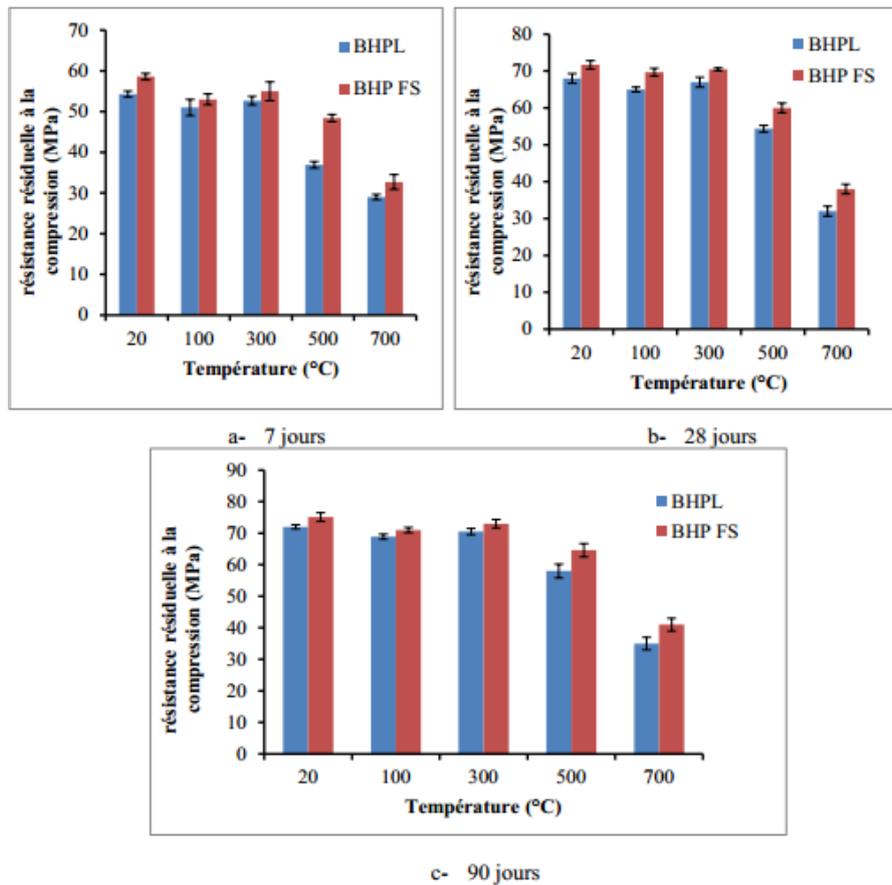
D'après les figures ci-dessous; l'auteur observe, que l'augmentation de la température diminue la résistance en compression des BHP. A toutes les températures, la résistance du BHPfs reste supérieure à celle du BHPL. Ceci peut s'expliquer par le fait que la fumée de silice est une addition à caractère très pouzzolanique qui accélère les résistances mécaniques et grâce à sa finesse plus élevée, l'interface pâte-granulats devient plus dense et plus résistante. A l'inverse, le laitier granulé présente une activité hydraulique plus moins lente et une finesse inférieure à celle de la fumée de silice.

Saadi [Saadi, 2017] distingué trois phases consécutives dans l'évolution de la résistance en compression en fonction de la température.

- Entre la température 20°C et 100°C, les résistances des deux types de bétons, à savoir, celle des BHPL et des BHPFs diminuent. Ceci est dû à la dilatation thermique de l'eau qui provoque un écartement des feuillettes du gel CSH. Cet écartement entraîne une diminution des forces d'attraction entre les feuillettes et engendre la naissance de microstructures occasionnant une diminution de la résistance des bétons.
- A température 300°C, un gain de résistance pour les deux bétons a été constaté. Ce gain est dû au départ de l'eau (l'eau liquide devient eau vapeur et arrive à s'échapper du béton) permettant une ré-augmentation des forces d'attraction par le rapprochement des feuillettes de CSH [Phan et Carino, 2003].
- Au-delà de la température de 300°C, la résistance résiduelle en compression décroît plus rapidement. Les résistances obtenues après un chauffage à la température de 700°C sont toutes inférieures à 40 MPa. Cette forte baisse de résistance suppose qu'il y a eut endommagement du matériau. Cet endommagement est dû à la dégradation de la matrice cimentaire et aussi à la désagrégation des granulats.

A travers l'ensemble des résultats, l'auteur regroupe le comportement des BHP en compression selon deux domaines.

- Le premier domaine allant de la température ambiante à la température de 300°C, caractérisé par une faible baisse et / ou amélioration de résistance.
- Le second domaine, au-delà de 300°C, présente une importante diminution de résistance. Cela est confirmé par certains auteurs y compris, Diederichs [Diederichs et al., 1992], Phan [Phan et al., 2001], Kanema [Kanema, 2007].



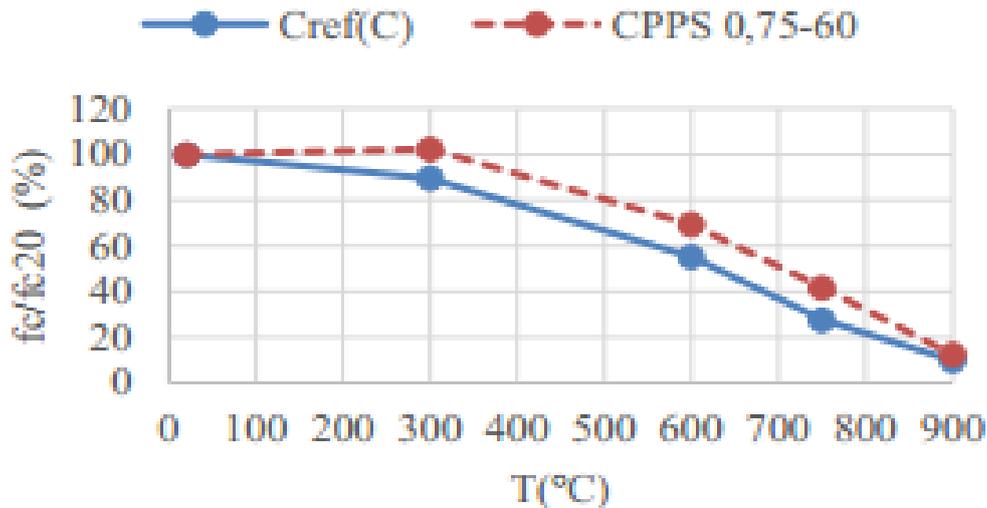
**Figure I. 23.** Résistance résiduelle en compression des BHPL et BHPFS en fonction de la température de chauffage [Saadi, 2017].

- **Ajout des fibres**

La présence des fibres dans la composition de base du béton traditionnel fait la particularité de ce type de béton. Cette matière, d'une longueur entre 5 à 60 mm, représente 2% du volume total du coulage, soit un dosage de 150 kg par mètre carré de béton. Les constituants du béton fibré dépendent de la nature des fibres (fibre métallique, fibre organique, fibre minérale).

L'influence des fibres sur l'évolution des résistances mécaniques du béton à hautes températures a été étudiée par Bidossessi et Prosper [Bidossessi et Prosper, 2010], Chen et Liu [Chen et Liu, 2004], et Yermak [Yermak, 2015].

La figure I.24 présente l'évolution des résistances en compression des bétons en fonction de la température mesurées par Yermak [Yermak, 2015].



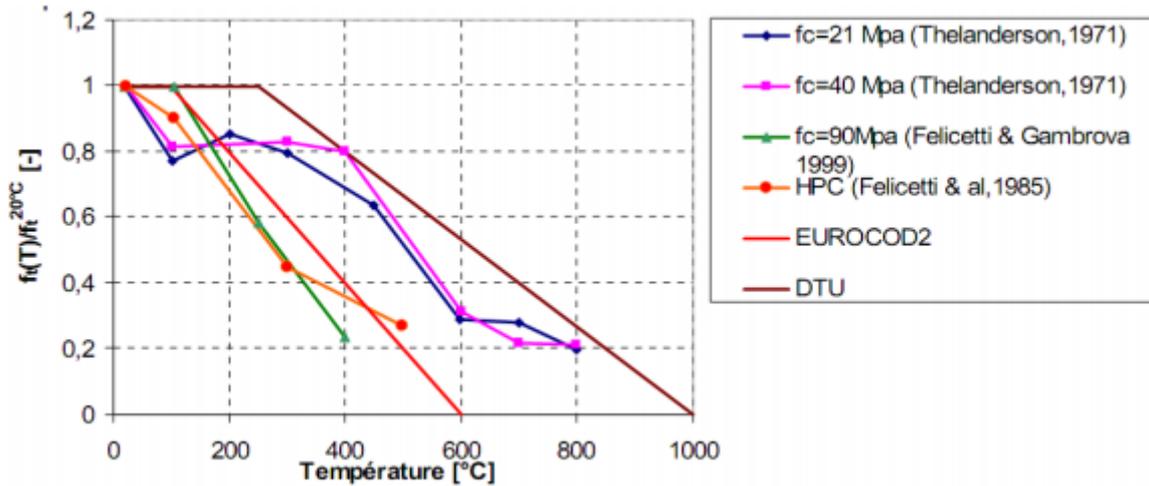
**Figure I. 24.** Evolution de la résistance relative en compression des bétons avec des fibres de polypropylène, et des fibres métalliques (CPPS 0.75-60) et béton de référence (Créf) [Yermak, 2015].

D'après une étude réalisée par Yermak [Yermak, 2015]. On constate, sur cette figure, deux zones de comportement du béton. Dans la première zone qui varie de la température ambiante à 300°C, nous constatons une baisse ou une faible augmentation de résistance résiduelle. Dans la seconde zone, de 300°C à 900°C, nous remarquons une baisse progressive de la résistance résiduelle à la compression pour les deux types de béton. Ces résultats s'inscrivent dans la continuité des études de plusieurs auteurs : [Hager, 2004], [Pilya, 2010]. L'augmentation de la résistance résiduelle à la compression entre la température ambiante et 300°C peut être due, premièrement, à la réhydratation des CSH lors de la migration et la condensation de l'eau vers les zones plus froides de l'éprouvette et, deuxièmement, à une formation de liaisons de siloxane (Si-O-Si), qui contribuent au retrait de la pâte et à l'augmentation de la résistance.

### I.6.2 Résistance en traction à hautes températures

Peu de recherches ont été faites pour déterminer la résistance à la traction à hautes températures, vu la complexité de la réalisation des essais. La plupart des observations, de l'évolution de la résistance en traction en fonction de la température, sont réalisées après le refroidissement par fendage [Thelandersson, 1971], [Noumowé, 1995].

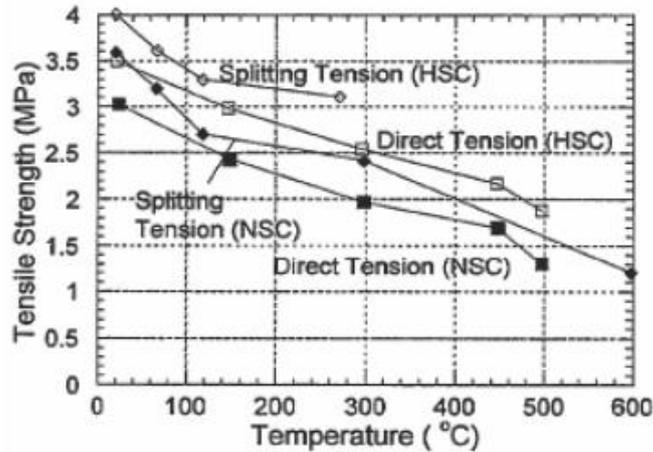
La figure I.25 présente les résultats de traction directe à chaud obtenus par Thelandersson [Thelandersson, 1971], Felicetti[Felicetti et al., 1999] et Felicetti et Gambarova[Felicetti et Gambarova, 1972]. Comparés avec les valeurs proposées par l'EUROCODE 2 et le DTU Feu-Béton.



**Figure I. 25.** Résultats des essais de résistance en traction relative [Thelandersson, 1971] [Felicetti et al., 1999], [Felicetti et Gambarova, 1972] comparés à ceux de la DTU et EUROCODE.

Toutes les valeurs déterminées se situent au-dessous de celle du DTU. À partir de ce graphique, comme pour la variation de la résistance en compression, la résistance en traction chute avec l'élévation de la température. En effet, la résistance en traction du béton avec la température est affectée par les mêmes paramètres que pour la résistance en compression (nature du liant et des granulats, teneur en eau, vitesse de chauffage etc.). Par ailleurs, Harada et al., [Harada et al., 1972] affirment que, par rapport à la résistance en compression, la diminution de la résistance en traction est très marquée.

La figure I.26 présente l'évolution de la résistance résiduelle en traction des deux bétons des granulats calcaires, un béton ordinaire (38,10 MPa) et un béton de haute performance (61,10 MPa), déterminées par Noumowé [Noumowé et al., 1996] à l'aide des essais de traction direct et de fendage. Les éprouvettes ont été chauffées à la vitesse de 1°C/min jusqu'aux températures du palier (150°C, 300°C, 450°C, 500°C et 600°C). Après un palier de stabilisation de température de 1 heure, les éprouvettes ont été refroidies à la vitesse de 1°C/min jusqu'à la température ambiante.



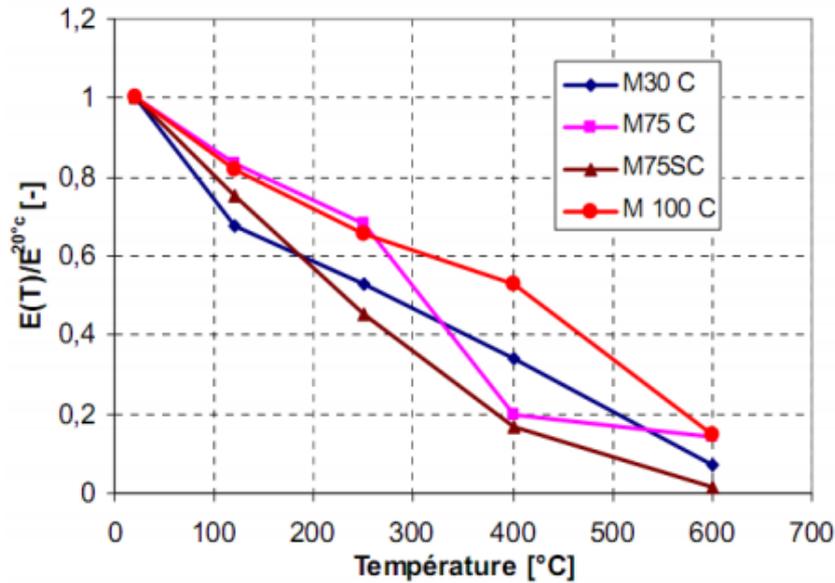
**Figure I.26.** Evolution de la résistance résiduelle en traction avec la température [Noumowé et al., 1996].

Aucune amélioration de la résistance en traction n'est observable au cours de l'évolution de la température. Elle diminue de façon quasi-linéaire. Noumowé [Noumowé et al., 1996] note que la résistance résiduelle à la traction du béton à haute performance est supérieure de 15% par rapport à celle du béton ordinaire. Il apparaît au vu de ces résultats, que la résistance à la traction résiduelle par fendage est supérieure à celle déterminée par traction directe.

### I.6.3 Module d'élasticité

Le module d'élastique en fonction de la température est déterminé à partir des courbes contraintes -déformation lors d'un essai de compression ou de traction. Ce module traduit l'évolution de la rigidité du béton avec la température. Plusieurs auteurs ont étudié l'influence de la température sur le module d'élasticité du béton Gallé et al [Gallé et al., 2003], Cheng et al [Cheng et al., 2004], Hager [Hager, 2004], Kanema [Kanema, 2007], Gaweska [Gaweska, 200 ] et Noumowé [Noumowé1995]. Les différents résultats expérimentaux montrent que le module d'élasticité du béton est fortement affecté par la température. Les variations du module d'élasticité avec la température dépendent principalement de la microstructure de la pâte de ciment d'une part et des paramètres expérimentaux d'autre part (la vitesse de chauffage, la teneur en eau, la nature des granulats ...). Gaweska [Gaweska, 2004] a noté une décroissance du module d'élasticité relatif entre 20°C et 600°C sur trois BHP M100C, M75C, M75SC et un BO M30C comme montre la figure I.27. Les valeurs du module d'élasticité à 600°C sont inférieures à 15%. La plus faible valeur est celle du M75SC (moins de 2%).

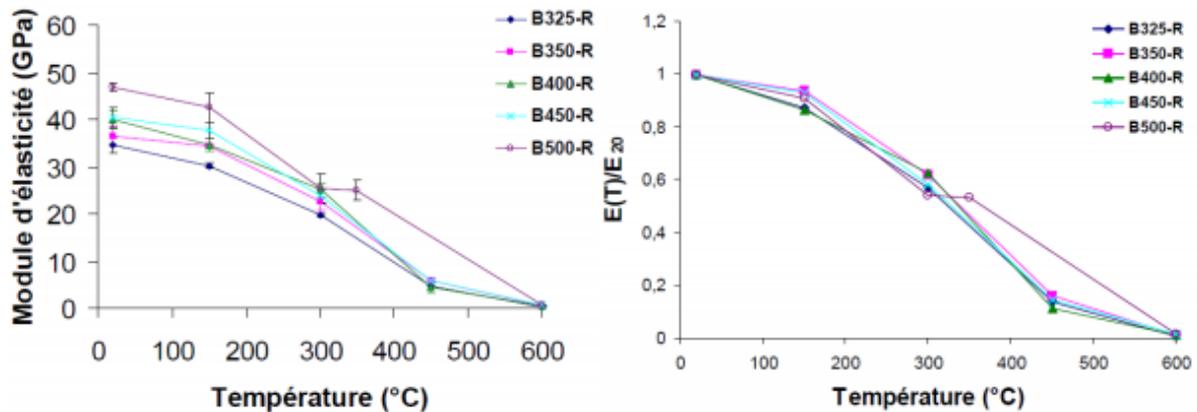
Gaweska [Gaweska, 2004] conclut aussi que le rapport E/C n'a aucune influence sur l'évolution du module d'élasticité avec la température.



**Figure I. 27.** Evolution du module d'élasticité relatif pour les bétons M30C, M75C, M75SC, M100C [Gaweska, 2004].

La comparaison du module d'élasticité mesuré à chaud et en résiduel effectuée par Gaweska [Gaweska, 2004] indique une diminution plus importante du module d'élasticité résiduel au-delà de 120°C. La différence entre les deux types d'essais semble croître avec l'augmentation de la température. Le gradient thermique additionnel induit durant la période de refroidissement et la réaction de réhydratation expansive de la chaux CaO semblent être à l'origine d'une fissuration additionnelle du matériau.

La figure I.28 présente des variations de module d'élasticité en fonction de la température d'après une étude réalisée par Kanema [Kanema et al., 2005]. On constate, sur cette figure, que le module d'élasticité du béton est détérioré par le chauffage de manière continue dès 150°C. Cette baisse se fait de manière quasi-identique pour toutes les formulations de béton. Après une exposition à un cycle de chauffage à 600°C, les éprouvettes de béton ne présentent plus de rigidité significative. Kanema [Kanema et al., 2005] affirme que la baisse de module d'élasticité, de plus de 98% de la rigidité initiale à 600°C, semble être due au type de granulats utilisés. La dilatation thermique des granulats induit dans la matrice cimentaire la formation de larges fissures ouvertes visibles après un chauffage à 600°C. Les déformations thermiques différentielles des granulats et de la matrice cimentaire créent des zones de traction localisées autour des granulats qui favorisent le développement des fissures [Kanema et al., 2005].



**Figure I.28.** Evolution des modules d'élasticité résiduels et des modules d'élasticité résiduels relatifs à différentes températures [Kanema et al., 2005].

### I.7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté une étude sur l'effet de la haute température sur le béton. L'intérêt de ce chapitre est de faire un aperçu sur les connaissances et les résultats expérimentaux requis par différents chercheurs sur le comportement du béton à température ambiante et à hautes températures.

Sous l'effet de la température, le béton subit diverses transformations physico-chimiques conduisant à la modification de la microstructure et de ses propriétés mécaniques. Les diverses transformations physico-chimiques sont : la déshydratation des CSH, la déshydroxylation de la portlandite et la décarbonatation des calcaires. Ces différentes transformations engendrent sur le plan macroscopique une baisse de performances mécaniques. Les résultats des différents auteurs montrent une diminution de la résistance en compression, de la résistance en traction et du module d'élasticité.

L'eau, présente dans le béton sous forme libre, liée ou adsorbée, s'échappe progressivement et représente la principale cause de perte de masse, d'augmentation de la porosité et de la perméabilité et la destruction de la matrice cimentaire.

Généralement l'étude bibliographique montre clairement que le comportement à haute température des bétons dépend très étroitement des modifications microstructurales et physico-chimiques qui se produisent au sein du matériau.

# Chapitre II

---

MATERIAUX TESTES  
ET PROGRAMME  
EXPERIMENTAL

### II.1 INTRODUCTION

Dans ce chapitre, nous exposons les caractéristiques et le dosage des différents constituants utilisés pour la formulation des bétons influent grandement sur leur comportement. Nous procédons donc dans ce chapitre, tout d'abord, à la caractérisation des matériaux de base (ciment, sable et granulats) ainsi qu'à la formulation des différents bétons analysés dans ce travail de recherche, ensuite nous présentons les différents essais réalisés dans le cadre de ce travail de recherche (essai de résistances mécaniques, essai de la perte de masse, essai de la porosité et essai de vitesse de propagation d'ondes ultrasonores). Les essais physiques et mécaniques sont déterminées à la température ambiante et à des températures 150°C, 250°C, 400°C, 600°C et 800°C.

### II.2 LES MATERIAUX

#### II.2.1 Caractérisation des constituants utilisés

Pour notre étude, on a choisi de fabriquer les différents bétons à partir d'un squelette granulaire issu d'un mélange tertiaire de gravier, de gravillon et de sable, d'un ciment, de l'eau et d'un superplastifiant. Et pour pouvoir étudier l'influence de la nature des constituants sur le comportement des différents types de bétons soumis à haute température, des béton contenant des granulats naturel et d'autre contenant des granulats de briques réfractaires (gros et fin granulats) ont été étudiés.

##### II.2.1.1 Ciment

Un ciment Portland CEM II/ A 42,5 utilisée provenant de la cimenterie d'Aïn-Touta. La composition chimique et les caractéristiques physico-mécaniques du ciment sont données dans les tableaux II.1 et II.2.

**Tableau II. 1.** Composition chimique du ciment.

Élément	Teneur (%)
CaO	60.1%
SiO <sub>2</sub>	16.64%
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.39%
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4.34%
MgO	1.29%
SO <sub>3</sub>	3.29%
K <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.686%
Na <sub>2</sub> O	0.189%

**Tableau II. 2.** Principales caractéristique physiques et mécaniques du ciment.

Caractéristiques physique	Masse volumique (g/cm <sup>3</sup> )	3.2	
Caractéristiques mécanique	Résistance à la compression (MPa)	2j	18.20
		7j	30.40
		28j	40.00

### II.2.1.2 Sable

La classe granulaire du sable utilisé est 0/5. Il s'agit d'un sable alluvionnaire roulé. Les principales propriétés physiques des sables sont présentées dans le tableau II.3.

**Tableau II. 3.**Principales propriétés physiques du sable siliceux.

Propriétés	Sable siliceux 0/5
Masse volumique absolue (g/cm <sup>3</sup> )	2.58
Masse volumique apparente (g/cm <sup>3</sup> )	1.55
Module de finesse	2.51
Equivalent de sable (%)	75.80
Teneur en eau (%)	0.67

D'après le tableau II.3 on peut constater que :

Le sable siliceux utilisé est un sable moyen avec un module de finesse de l'ordre de 2.51.

L'essai de l'équivalent de sable montre que les sables utilisés sont des sables propres.

### II.2.1.3 Granulats

Les granulats utilisés sont des granulats naturels concassés de type calcaire de fraction 5/15 et 15/25. Certaines de leurs propriétés sont rassemblées dans le tableau. II.4.

**Tableau II. 4.** Principales caractéristiques de granulats 5/15 et 15/25

Propriétés	Graviers 15/25 mm	Gravillon 5/15 mm
Masse volumique absolue (g/cm <sup>3</sup> )	2.70	2.69
Masse volumique apparente (g/cm <sup>3</sup> )	1.39	1.43
Coefficient Los Angeles (%)	30	30
Absorption (%)	0.26	0.22
Porosité (%)	1.58	1.16

Pour pouvoir étudier l'influence des granulats sur le comportement des bétons soumis à température élevée, des granulats de brique réfractaire (gros et fin granulats) ont été utilisés. Leurs principales caractéristiques physiques et chimiques sont présentées dans le tableau II.5, et le tableau II.6 respectivement.

**Tableau II. 5.** Principales caractéristiques physique de granulats de brique réfractaires 5/15, 15/25 et 0/5.

Propriétés	Graviers 15/25 mm	Gravillon 5/15 mm	sable GR 0/5
Masse volumique absolue (g/cm <sup>3</sup> )	2.90	2.90	3.00
Masse volumique apparente (g/cm <sup>3</sup> )	1.33	1.33	1.59
Coefficient Los Angeles (%)	58	58	/
Absorption (%)	3.53	2.88	/
Porosité (%)	9.97	9.30	/
Module de finesse	/	/	2.60
Equivalent de sable (%)	/	/	82.55

D'après le tableau II.3, tableau II.4 et tableau II.5 on peut constater que :

- Le granulat de brique réfractaire 0/5 été sable moyen avec un module de finesse de l'ordre de 2.60.
- L'essai de l'équivalent de sable montre que les sables utilisés sont des sables propres.
- Les trois fractions granulaires utilisées dans cette étude (0/5, 5/15 et 15/25) donnent un squelette granulaire continu avec un maximum de compacité.

L'analyse chimique des granulats de brique réfractaires est effectuée sur un échantillon finement broyés (taille des grains inférieure à 63 µm). Les résultats sont présentés sous forme d'oxydes au tableau II.6.

**Tableau II. 6.** Principales composition chimique de granulats brique réfractaires.

Elements	GBR % ( par poids)
O	49.49
Al	22.95
Si	15.76
C	7.62
K	1.43
Ca	1.23
Fe	0.85
Cl	0.68

L'analyse aux rayons X par diffraction des granulats brique réfractaires présentés par la figure II.1

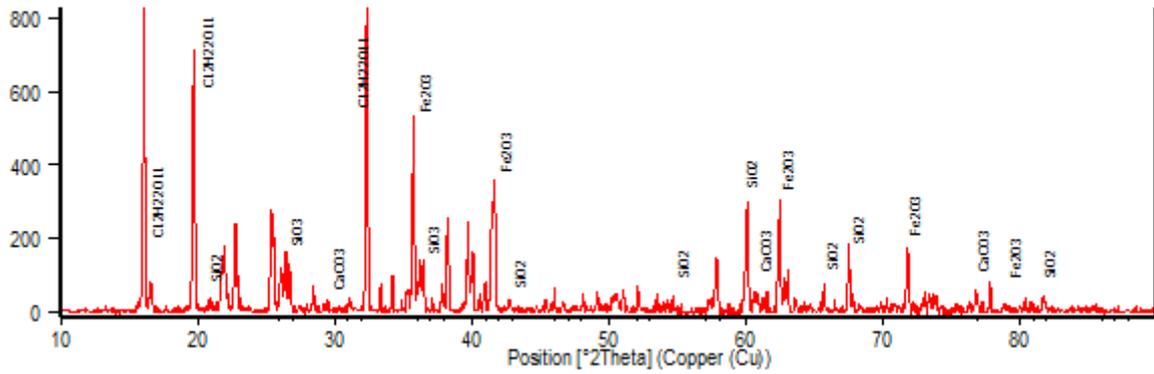


Figure II. 1. Diffractogramme des granulats brique réfractaires.

L'analyse par microscopie électronique à balayage des granulats brique réfractaires présentés sur la figure II.2.

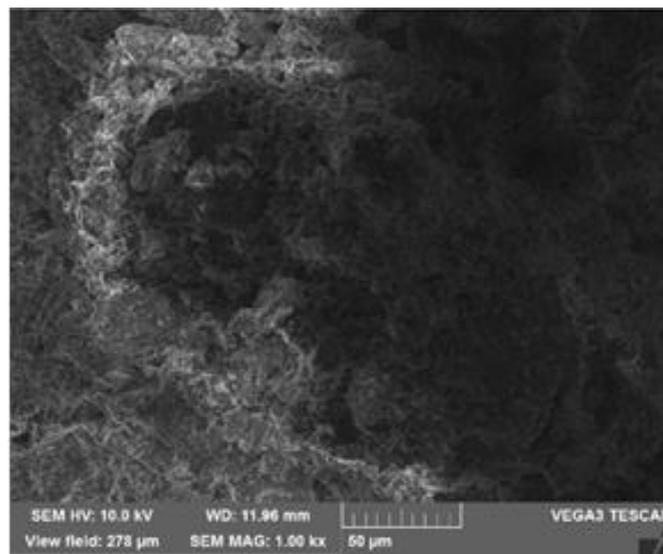
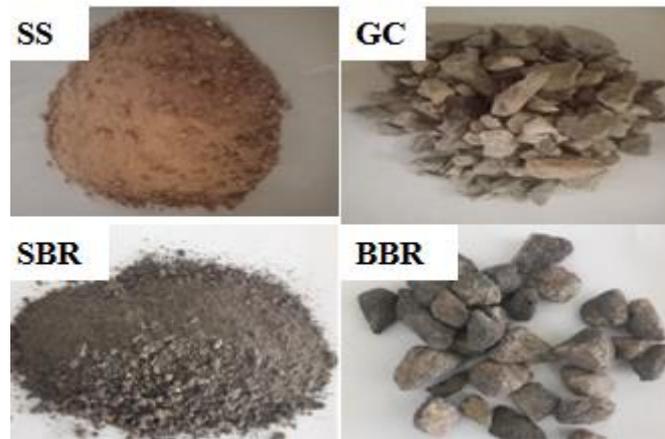


Figure II. 2. Image en microscopie électronique à balayage des granulats brique réfractaire.



**Figure II. 3.** Différents granulats utilisés, GC : granulats calcaires, GBR : granulats brique réfractaire, SS : sable siliceux, SBR : sable brique réfractaire.

### II.2.1.4 L'eau

Les conditions imposées à l'eau de gâchage sont précisées par la norme NF EN. L'eau utilisée pour les différentes gâchées de béton est issue du robinet de laboratoire. Aucune analyse n'a été effectuée, l'eau est supposée potable et ne contenir aucune impureté nuisible (matières organiques).

### II.2.1.5 Adjuvant

Master Glenium 27 est un superplastifiants haut réducteur d'eau à base d'éther polycarboxylique. Il s'agit d'un adjuvant liquide brun sans chlor. Ces caractéristiques sont indiquées dans le tableau II.7.

La plage d'utilisation recommandée est: 0,2% à 3% du poids du liant ou du ciment.

**Tableau II. 7.** Caractéristique de l'adjuvant.

Caractéristique	
Aspect	liquide
Masse volumique à +20 C°	$1.05 \pm 0.02 \text{ g/cm}^3$
Teneur en chlorure (%)	<0.1%
Extrait sec (%) EN 480-8	$19.9\% \pm 2.0\%$
Na <sub>2</sub> O eq	$\leq 2\%$
Ph	$6.0 \pm 1.0$

### II.2.2 Courbe granulométriques

Les courbes granulométriques ont été déterminées sur des échantillons représentatifs de sable, de gravillon, de gravier et des granulats de brique réfractaire selon la norme P 18-560. La figure II.4 présente les courbes granulométriques de trois fractions des granulats naturels (gravier, gravillon et sable) et des granulats de brique réfractaire (gros et fin granulats), sur la même figure II.4.

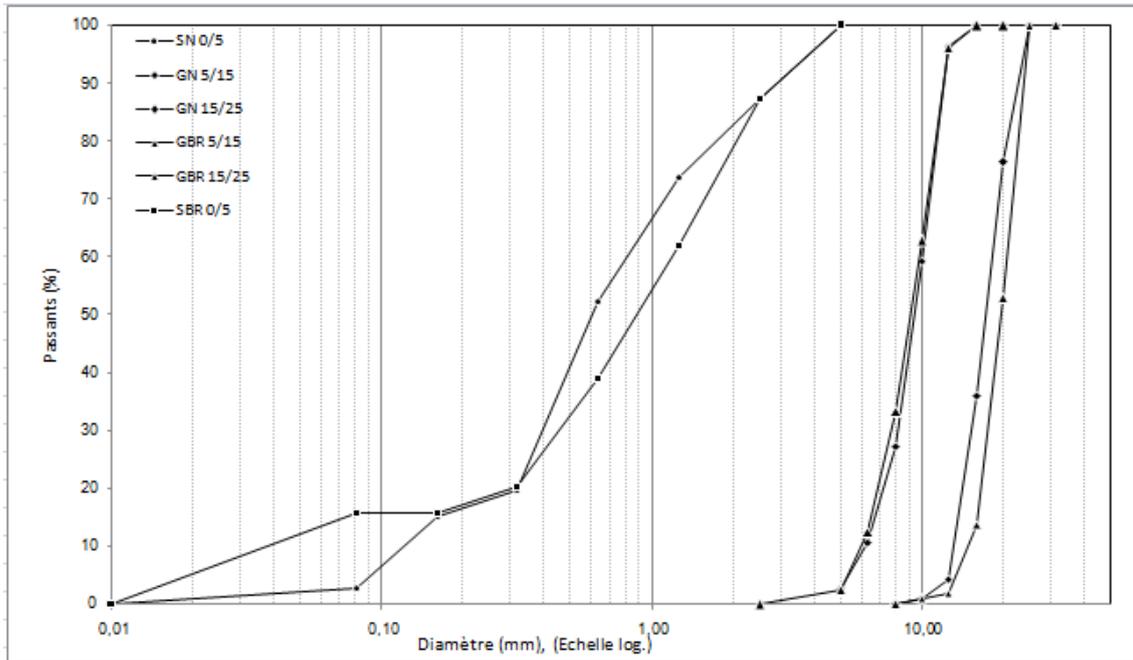


Figure II. 4. Courbes granulométriques de granulats naturels (gravier, gravillon et sable) et des granulats de brique réfractaire (gros et fin granulats).

### II.2.3 Absorption des granulats de la brique réfractaire

L'absorption d'eau de granulats est directement liée à la taille et forme des pores, ainsi que la connectivité du milieu poreux. Le taux d'absorption des granulats de brique réfractaire (GBR) est très élevé. Pour réduire son taux d'absorption nous suivons les étapes suivantes :

- Poids 500g des gros granulats de la brique réfractaire.
- Placer les gros granulats de la brique réfractaire dans un bol d'eau.
- Mesurer la variation de masse de l'échantillon au cours de temps (1h) jusqu'à stabilisation de leur masse (avant chaque pesée la face de l'éprouvettes en contact avec l'eau est essuyée avec un chiffon humide afin d'éliminer la pellicule d'eau superficielle).

La figure II.5 récapitule l'évolution de l'absorption d'eau des granulats de la brique réfractaire.

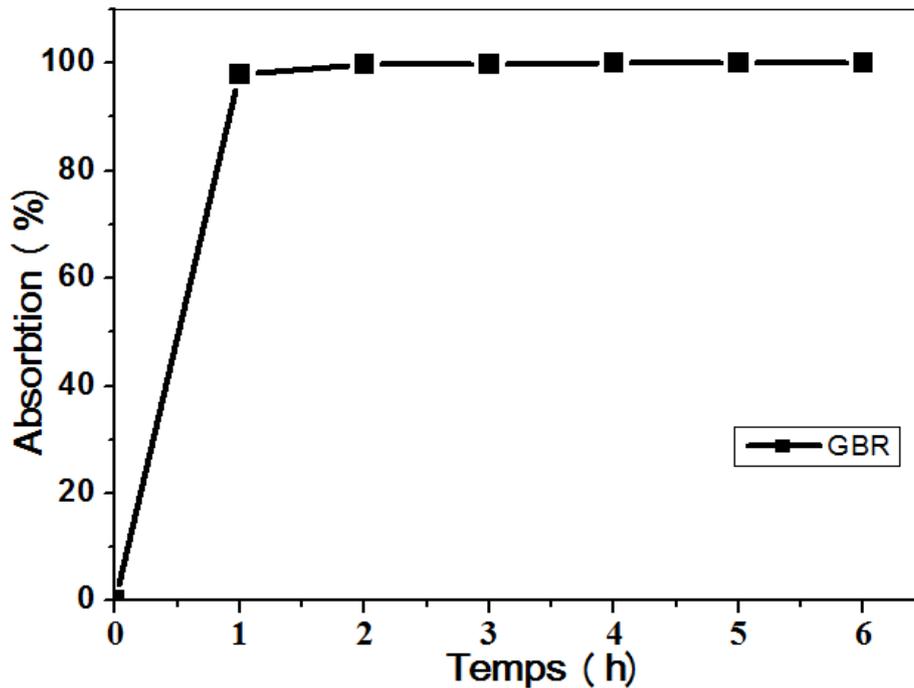


Figure II. 5. Evolution de l'absorption d'eau du GBR.

### II.3. FORMULATION DES BETONS D'ETUDES

Après une caractérisation détaillée des différents constituants, nous présenterons ensuite la méthode de formulation choisie pour déterminer la composition optimale des Bétons ordinaire de notre étude. La méthode de formulation adoptée pour le mélange des constituants entrant dans la composition du béton ordinaire est celle méthode pratique de DREUX-GORISSE [Dreux et Festa, 1998].

#### ➤ Présentation de la Méthode de Dreux-Gorisse

La méthode de Dreux-Gorisse, constitue une synthèse des diverses théories existantes sur la composition des bétons, appuyée sur un examen statistique de nombreux chantiers sérieusement contrôlés. Son but est de définir d'une manière simple et rapide une première formulation de béton en fonction de deux paramètres principaux du béton à savoir : La résistance en compression et ouvrabilité. La formulation définitive étant obtenue par quelques gâchées d'essais permettant d'ajuster au mieux la formule théorique du béton en fonction des qualités désirées et des matériaux réellement employés. La procédure de formulation est illustrée sur l'organigramme ci-dessous :

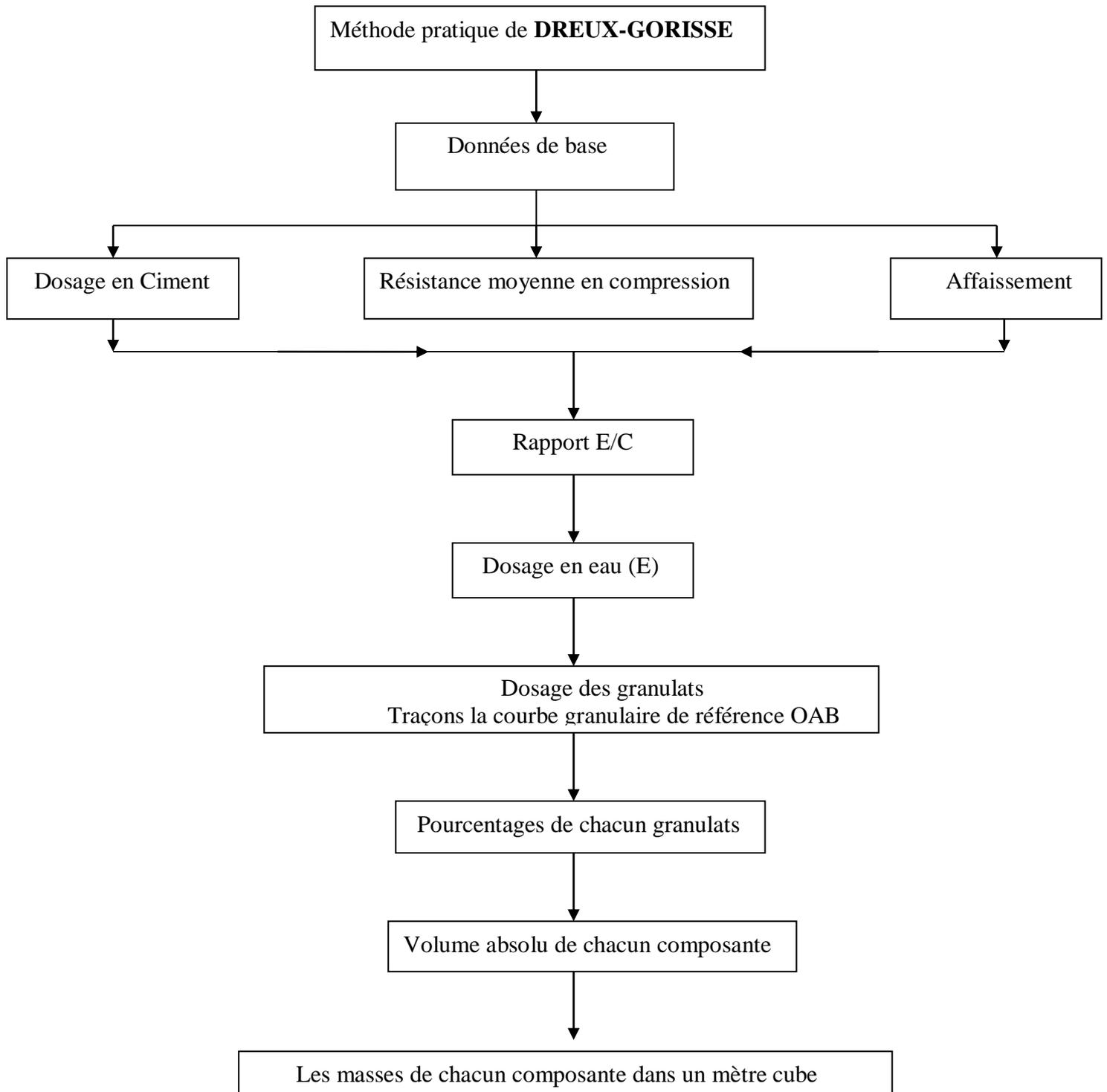


Figure II. 6. Organigramme simple de la méthode DREUX-GORISSE pour formuler les BO.

Comme mentionné auparavant, l'objectif de cette étude est de mieux comprendre le comportement à haute température des différents types de béton. Pour cet objectif, nous avons confectionné trois formulations différentes de béton (BGN1, BGN2 et BGN3), qui permettent de couvrir la gamme des bétons ordinaires. Elles sont obtenues en gardant un squelette granulaire constant et en faisant varier le dosage en ciment. Les compositions des mélanges pour un mètre cube de béton sont présentées dans le tableau II.8.

**Tableau II. 8.** La composition des bétons ordinaire sans granulats BR pour 1m<sup>3</sup>  
(Béton témoin).

Béton	BGN1	BGN2	BGN3
Ciment	350	400	450
Eau	206.50	190.48	173.08
Granulat naturel 5/15	226.64	239.88	180.90
Granulat naturel 15/25	947.84	926.06	958.54
Sable 0/5	688.34	654.83	639.43
Gravier BR 5/15	/	/	/
Gravier BR15/25	/	/	/
Sable BR 0/5	/	/	/
Superplastifiant	/	/	1.40
E/C	0.59	0.47	0.38

Autres groupes de béton ont été étudiés, un groupe de béton (BGR1, BGR2 et BGR3) a été confectionné en remplaçant 20% des granulats naturels par des granulats de brique réfractaire (gros et fin granulats).

**Tableau II. 9.**La composition des bétons avec les granulats de brique réfractaire (gros et fin granulats) BR pour 1m<sup>3</sup>

Béton	BGR1	BGR2	BGR3
Ciment	350	400	450
Eau	206.50	190.48	173.08
Granulat naturel 5/15	181.31	191.91	144.15
Granulat naturel 15/25	785.27	740.85	766.83
Sable 0/5	550.67	523.86	511.54
Gravier BR 5/15	48.93	51.79	38.90
Gravier BR15/25	203.90	199.21	206.19
Sable BR 0/5	160.08	152.29	148.70
Superplastifiant	/	/	1.40
E/C	0.59	0.47	0.38

### ➤ Désignation des bétons utilisés:

**BGN** : Béton ordinaire à base de des granulats naturel.

**BGR** : Béton ordinaire à base des granulats naturel avec l'ajout les granulats de brique réfractaire (gros et fin granulats).

## II.4 FABRICATION ET CONDITIONNEMENT DES EPROUVETTES

### II.4.1 Fabrication et conditionnement des éprouvettes

Pour réaliser nos essais, nous utiliserons des moules cubiques de dimensions  $10 \times 10 \times 10 \text{ cm}^3$  et des moules cubiques de dimensions  $4 \times 4 \times 4 \text{ cm}^3$ . Ces moules sont en métal (acier), cette matière est imperméable, non absorbante et non réactive au liant. Les éprouvettes cubiques de dimensions  $10 \times 10 \times 10 \text{ cm}^3$  sont destinées aux essais de perte de masse et aux essais de compression avant et après exposition aux cycles thermiques. Les éprouvettes cubiques de dimensions  $4 \times 4 \times 4 \text{ cm}^3$  sont réservées à la mesure de la porosité.

Le malaxage des bétons a été effectué à l'aide d'une bétonnière d'axe vertical, et mouvement planétaire de capacité 50 litres. La fabrication des bétons ordinaires a été effectuée conformément à la norme NF P 18-404.

La modalité de fabrication des différents types de bétons que nous avons suivie se déroule comme suit :

- Prémouillage du malaxeur pour limiter une absorption supplémentaire de l'eau de gâchage par les parois du malaxeur ou nettoyage de celui-ci s'il à été utilisé auparavant.
- Introduction des constituants solides en commençant par les plus grossiers au plus fin (graviers, sable, et pour finir le ciment).
- Malaxage à sec pendant 1 minute.
- Introduction de l'eau et malaxage pendant 3 minutes.
- Ajout du superplastifiant à la fois le malaxeur continue à tourner.
- Vidange de malaxeur.



**Figure II.7.** Photo de la bétonnière utilisée.

Le béton a été coulé dans les moules cubiques de dimensions  $10 \times 10 \times 10 \text{ cm}^3$  et  $4 \times 4 \times 4 \text{ cm}^3$  en deux couches. Chaque couche a été vibrée sur une table vibrante pendant 10 secondes par couche.

### **II.4.2 Conservation des éprouvettes**

#### **➤ Conservation initiale en moule**

Après la mise en place du béton dans les moules, les éprouvettes sont laissées pendant 24 heures dans leur moules, protégées (facette supérieure) par un film plastique contre le départ d'eau, dans l'ambiance du laboratoire.



**Figure II. 8.** Conservation des moules par un film plastique.

#### **➤ Conservation des éprouvettes après démoulage**

Toutes les éprouvettes utilisées dans cette campagne expérimentale ont suivi la même cure et le même conditionnement conformément à la norme NF P 18-404.

Les conditions de conservations normalisées ont été réalisées suivant la norme NF P18-404

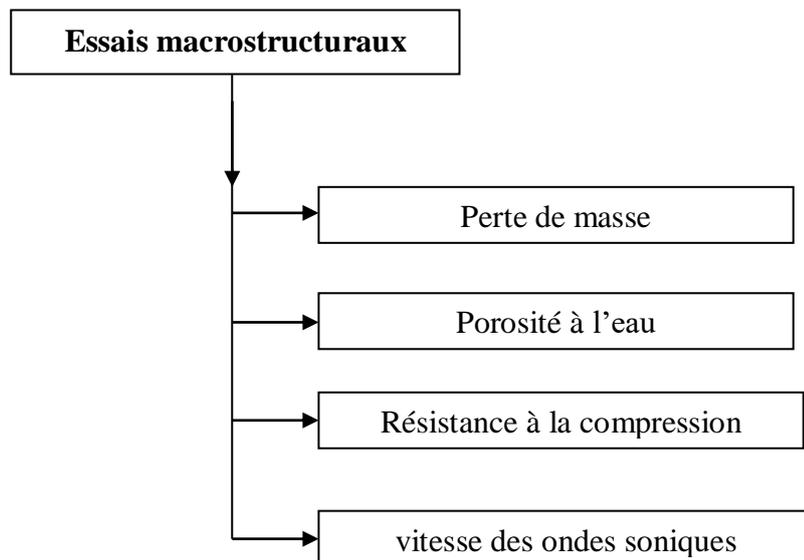
dans l'eau à température de  $20\text{ °C} \pm 2\text{ °C}$  pendant 28 jours. Ce mode de conservation permet d'assurer l'hydratation du béton et d'éviter toute fissuration due à la dessiccation. Il permet également de maintenir les bétons saturés.



**Figure II. 9.** Conservation des éprouvettes immergées dans l'eau.

### II.5 ESSAIS EXPERIMENTAUX

Dans cette partie. Nous avons choisi de réaliser une campagne expérimentale de caractérisation des principales propriétés des matériaux à haute températures (la perte de masse, la porosité à l'eau et la résistance à la compression, etc). Généralement les essais expérimentaux sont illustrés sur l'organigramme ci-dessous :



**Figure II. 10.** Organigramme simple expliquant les essais expérimentaux.

### II.6 ESSAI DE CHAUFFAGE

Pour étudier le comportement à haute température du béton, il est nécessaire de lui faire subir différents cycles thermiques. D'après les travaux réalisés dans la littérature, l'étude du comportement des bétons exposés à des températures élevées peut être effectuée dans la marge de températures entre 20°C et 1200°C [Hager 2004]. Cependant, dans notre travail une plage de température choisie, entre 20°C et 800°C, Parceque, entre 650°C et 800°C le béton est généralement endommagée au point de ne plus être suffisamment résistant [Kessal, 2017]. Par ailleurs, cela correspond aussi aux capacités des moyens expérimentaux utilisés. Dans la plupart des essais, les températures spécifiques suivantes ont été retenues pour la mesure des propriétés du matériau :

- **20°C** : cette température est considérée comme étant la température de référence.
- **150°C**: cette température d'essai permet de mesurer les différentes propriétés du béton à température supérieure mais proche de 100°C qui correspond à l'évaporation de l'eau libre et à la déshydratation de l'ettringite. De plus, à cette température, la déshydratation des CSH débute.
- **250°C** : à cette température, la déshydratation des CSH est dans un état avancé.
- **400°C** : à cette température, les CSH sont déshydratés et la portlandite est encore dans son état initial d'hydratation.
- **600°C** : la portlandite est décomposée à cette température et l'éventuelle transformation du quartz- $\alpha$  en quartz- $\beta$  est atteinte (575 °C).
- **800°C** : l'apparition des fissures.

Dans ce travail, nous avons choisi, pour la sollicitation thermique des éprouvettes, d'appliquer une vitesse de chauffage moyenne de 3°C/min pour tous les bétons. L'échauffement rapide avec les vitesses de montée en température très importantes provoque des contraintes thermiques dues aux gradients thermiques. Les vitesses de chauffage comprises entre 1°C/min et 5°C/min n'ont pas d'influence sur le caractère explosif du béton [Haniche, 2011].

Toutes les éprouvettes retenues pour cette étude sont testées après leur refroidissement. Nous appliquons cinq cycles de chauffage-refroidissement de 20°C à différentes températures de palier : 150°C, 250°C, 400°C, 600°C et 800°C. Chaque cycle de chauffage-refroidissement se compose de trois phases:

- La première constitue une rampe de montée en température à une vitesse de 3°C/min
- La deuxième phase de stabilisation à température constante d'une heure pour chaque palier de 150°C, 250°C, 400°C, 600°C et 800°C.

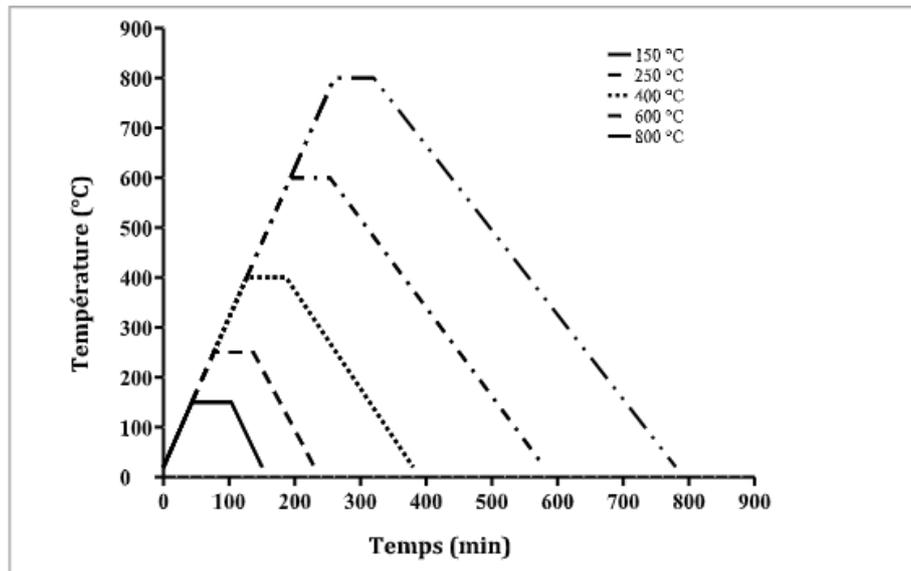
- La troisième phase est le refroidissement jusqu'à la température ambiante.

La durée du palier d'1 heure a été choisie pour permettre une confrontation de nos résultats à ceux de la littérature. Le tableau II.10 dresse un récapitulatif des différents cycles thermiques appliqués aux matériaux.

**Tableau II. 10.** Les différents cycles de chauffage-refroidissement appliqués aux différents types de béton.

Températures du Palier (°C)	Vitesse de montée en température (°C/min)	Durée de palier de stabilisation (min)	Refroidissement (°C/min)
150	3	60	Libre
250	3	60	Libre
400	3	60	Libre
600	3	60	Libre
800	3	60	Libre

La figure II.10 présente les évolutions de la température en fonction du temps au cours des cinq cycles de chauffages étudiés appliqués aux différents types de matériaux.



**Figure II. 11.** Cycles de chauffage-refroidissement (vitesse de chauffage 3°C/min)

### II.6.1 Dispositif de chauffage

Les cycles de chauffage sont réalisés dans un four électrique programmable de dimensions 250×255×355 cm<sup>3</sup>. Ce four permet le chauffage de trois éprouvettes cubiques de dimensions 10×10×10 cm<sup>3</sup> en même temps. Le four est piloté par un régulateur programmeur, relié à

un thermocouple placé dans le four, offrant la possibilité à un opérateur d'installer des programmes prédéfinis et permettant l'enregistrement des températures à l'intérieur du four.



**Figure II. 12.** Dispositifs de chauffage.

### II.6.3 Disposition dans le four

Pour réaliser un essai de chauffage, nous disposons dans le four trois éprouvettes de béton. Ces éprouvettes sont disposées au milieu du four de façon à avoir une exposition à la chaleur homogène. La figure II.12 illustre la disposition des éprouvettes dans le four.



**Figure II. 13.** Disposition des éprouvettes dans le four.

### II.7 ESSAIS MACROSTRUCTURAUX

#### II.7.1 Mesure des propriétés mécaniques

La propriété mécanique étudiée dans ce travail est: la résistance en compression. L'essai est réalisés sur des éprouvettes non chauffées et sur des éprouvettes ayant subi un traitement thermique. Les essais permettent d'étudier le comportement mécanique résiduel du béton porté à une température élevée. L'essai de résistances est réalisé au moins sur trois éprouvettes pour chaque cycle de chauffage – refroidissement.

##### II.7.1.1 Essai de compression

L'essai de la résistance mécanique en compression a été réalisé sur des éprouvettes de forme cubique de dimensions  $10 \times 10 \times 10 \text{ cm}^3$ . Les éprouvettes sont conservées dans l'eau jusqu'aux 28 jours. Pour chaque béton et chaque cycle de chauffage, la résistance en compression obtenue est la moyenne issue de trois éprouvettes. Le protocole des étapes de cet essai est le suivant :

- Essuyer toute humidité excessive de la surface de l'éprouvette avant de la positionner dans la machine d'essai.
- Mesurer les longueurs et largeurs à l'aide d'un pied à coulisse.
- L'éprouvette, une fois rectifiée doit être centrée sur la presse d'essai.
- La mise en charge doit être effectuée à raison de 0.5 MPa
- La charge de rupture est la charge maximale enregistrée au cours de l'essai.

La résistance à la compression est le rapport entre la charge de rupture et la section transversale de l'éprouvette, elle est obtenue par la formule suivante :

$$R_c = F/S$$

**R<sub>c</sub>** : résistance à la compression (MPa).

**F**: la charge de rupture (N).

**S**: section de l'éprouvette (mm<sup>2</sup>).



**Figure II. 14.** Eprouvette mise en place sur la presse hydraulique.

Tableau II.12 présente la résistance en compression moyennes à 28 jours des différents bétons de l'étude mesurée à température ambiante. Nos formulations permettent de couvrir une gamme de résistance en compression située entre 19.60 MPa et 50.23 MPa.

**Tableau II. 11.** Résistance en compression des différents bétons.

Résistance en compression à 28 jours à température ambiante (MPa)				
	ép.1	ép.1	ép.1	moy.
<b>BGN1</b>	22.40	18.23	18.18	19.60
<b>BGN2</b>	20.98	26.57	-	23.77
<b>BGN3</b>	48.55	52.02	-	50.23
<b>BGR1</b>	29.24	28.66	28.71	28.87
<b>BGR2</b>	31.65	33.40	34.04	33.03
<b>BGR3</b>	48.65	51.38	54.29	51.44

A la lecture de ce tableau, nous pouvons faire quelques remarques :

- Les valeurs de la résistance en compression varient en fonction du dosage en ciment et du rapport E/C.
- Les valeurs de la résistance en compression varient aussi en fonction de type de granulats utilisés.
- L'utilisation des granulats de brique réfractaire dans le béton (BGR) d'un rapport E/C = 0,38 permet d'augmenter légèrement la résistance en compression.

Les autres éprouvettes de béton destinées à la détermination de la résistance en compression résiduelles après application des cycles thermiques de 150°C, 250°C, 400°C, 600°C et 800°C sont sorties du four et testées suivant la même procédure.

### II.7.1.2 Essai de vitesse de propagation d'ondes ultrasonores

L'utilisation des méthodes de caractérisation et de contrôle non destructifs est en pleine expansion dans le domaine du génie civil. Parmi ces méthodes, l'utilisation des techniques basées sur la propagation des ondes ultrasonores a déjà fait ses preuves sur divers matériaux, notamment le béton. Ainsi, il est possible d'identifier certaines caractéristiques mécaniques et d'établir des critères quantitatifs et qualitatifs pour le suivi de la dégradation du matériau. L'essai est donc utilisé pour évaluer l'homogénéité du matériau et détecter la fissuration, les vides et les détériorations dues au feu. Donc, l'objectif principal de cette méthode est d'obtenir le maximum d'informations sur la qualité des bétons soumis à une élévation de température.

Le principe de la méthode consiste à mesurer le temps de propagation de la première impulsion d'un train d'ondes appelées ondes longitudinales générées par un transducteur, entre deux déterminés du béton. On peut, à partir du temps de propagation mesuré, exprimer une vitesse conventionnelle de propagation : c'est le quotient de la distance entre transducteurs par le temps mesuré.

La vitesse des ondes,  $V$ , est calculée par la formule :

$$V = l/t$$

Où :  $l$  est la distance entre les transducteurs (m).

$t$  est le temps de propagation (s).

L'appareillage est essentiellement constitué d'un générateur d'impulsions électriques, de plusieurs transducteurs et d'un dispositif de chronométrage permettant de mesurer l'intervalle de temps qui s'écoule entre le départ de l'impulsion générée par le transducteur-émetteur et la détection de son arrivée au transducteur-récepteur, ou le temps qui s'écoule entre le passage de cette impulsion entre deux transducteurs-récepteurs



Figure II. 15. Ultrason de PUNDIT.

### II.7.2 Mesure des propriétés physiques

L'analyse des propriétés physiques ont été effectuées après avoir soumis les éprouvettes aux cycles de chauffage.

#### II.7.2.1 Perte de masse

Durant le chauffage, des transformations physico-chimiques au sein de béton provoquent une perte de masse, elle permet de suivre l'évolution du poids du béton après application des cycles thermiques. L'essai consiste donc à déterminer la perte de matière qu'ont subie les éprouvettes lors du chauffage par rapport à leur état initial (état avant le chauffage). La perte de masse a été calculée par rapport à la masse initiale des éprouvettes et exprimée en pourcentage de la masse de départ :

$$dm = \frac{m_i - m_t}{m_i} 100 \text{ (\%)}$$

$dm$  : Perte de masse (%).

$m_i$  : Masse initiale (g).

$m_t$  : Masse après chauffage (g).

Les essais de mesure de la perte de masse des éprouvettes cubiques de béton  $10 \times 10 \times 10 \text{ cm}^3$  sont réalisés à l'aide une balance à une capacité de 3 kg et une précision de 0,1 g.

#### II.7.2.2 Porosité accessible à l'eau

La porosité est définie comme le rapport du volume des vides et du volume apparent du matériau. La porosité des bétons se mesure classiquement par imbibition d'eau sous vide : on parle de porosité accessible à l'eau. La porosité est un paramètre global dont dépendent toutes les propriétés de transfert, comme le coefficient de diffusion du  $\text{CO}_2$ . C'est donc un indicateur de première importance vis-à-vis des agressions extérieures.

L'essai de porosité accessible à l'eau a consisté à mesurer la porosité des éprouvettes de béton afin de déterminer le pourcentage de vide pouvant être occupé par l'eau. La technique utilisée est une variante de la porosité à l'eau par pesée hydrostatique recommandée par Afrem [Afrem, 1997].

Après le traitement thermique, nous prenons la masse de les éprouvette de taille  $4 \times 4 \times 4 \text{ cm}^3$  à l'état sec ( $M_{\text{sec}}$ )

Nous plaçons les éprouvettes dans un bol, puis immergeons le bol dans de l'eau. La quantité atteint la moitié des éprouvettes. Après 15 minutes, nous avant immergent complètement les éprouvette avec de l'eau pendant 24 heures jusqu'à ce qu'il atteigne le degré de saturation,

mais nous avons atteint un état de saturation après une période de près de dix jours. Une fois l'échantillon saturé d'eau, cet échantillon est essuyé avec un chiffon pour éliminer l'excès d'eau de la surface, puis nous le pesons ( $M_{est}$ ). Cette opération doit être rapide afin de ne pas enlever lent dans les pores proches de la surface de l'éprouvette. Ensuite, nous prenons cet échantillon saturés, il est suspendu à une balance hydrostatique, puis pesage en immersion dans une quantité d'eau ( $M_{sat}^{imm}$ ).

La porosité à l'eau est déterminée selon l'équation :

$$P = \frac{M_{set} - M_{sec}}{M_{sat} - M_{sat}^{imm}} \times 100.$$

P s'exprime en % (c'est un rapport volumique). La connaissance de la masse de l'éprouvette dans ces trois états (sèche, saturée immergée et saturé dans l'air).



Figure II. 16. Dispositif de la mesure de la porosité du béton.

### II.8. Conclusion

Dans un premier temps, nous avons présenté le programme expérimental retenu dans cette étude, les différentes caractéristiques des matériaux ainsi que les compositions retenues des différents bétons utilisés dans cette recherche.

Dans un deuxième temps, nous avons montré les méthodes d'essais de mesure les propriétés physico-mécaniques.

# **Chapitre III**

---

## **PRESENTATION ET ANALUSE DES RESULTATS**

### III.1 INTRODUCTION

Dans ce chapitre, nous présentons les résultats expérimentaux des tests réalisés sur deux types de bétons : béton de granulats naturels et béton avec 20% des granulats de brique réfractaire.

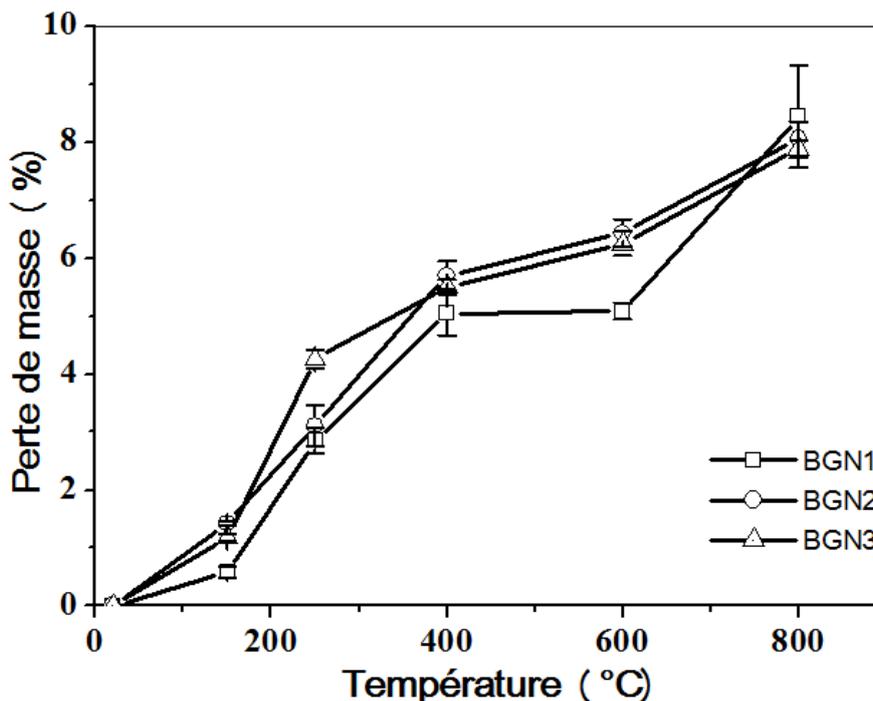
Dans un premier temps, nous présentons et discutons les résultats obtenus pour les propriétés physiques et mécaniques de deux types des bétons (béton de granulats naturels et béton avec 20% des granulats de brique réfractaire). En deuxième lieu, nous comparons les propriétés physiques et mécaniques des bétons des granulats naturels avec celles des granulats de brique réfractaire.

### III.2 L'EFFET DE L'HAUTE TEMPERATURE SUR LES PROPRIETES PHYSIQUES ET MECANIQUE DU BETON CONFECTIONNES AVEC DES GRANULATS NATURELS

Notre étude portera sur le comportement des bétons ordinaires soumis aux différents cycles de chauffage-refroidissement. Trois groupes de béton ordinaire sont confectionnées. Les rapports E/C des bétons varient de 0.38 (BGN1) à 0.59 (BGN3) et un béton intermédiaire (BGN2) de rapport 0.47.

#### III.2.1 Perte de masse

Le béton exposé à de hautes températures subit une dégradation au niveau microstructural qui conduit à une perte de densité du matériau. La pesée des éprouvettes avant et après chaque cycle de chauffage-refroidissement a permis d'étudier l'évolution de la perte de masse des bétons formulés en fonction de la température. La figure III.1 récapitule l'évolution de la perte de masse des bétons ordinaires en fonction de la température.



**Figure III. 1.** Evolution de la perte de masse en fonction de la température pour les bétons BGN, BGN2 et BGN3.

L'allure de la courbe de perte de masse est presque identique pour tous les bétons. Elle ne dépend donc pas du rapport E/C. Pour les bétons étudiés, trois domaines s'observent comme l'ont remarqué certains auteurs : Noumowé [Noumowé, 1995], Hager [Hager, 2004], Kanéma [Kanéma, 2007], Hachemi [Hachemi, 2015].

Dans le premier domaine, de la température ambiante à 400°C, une importante perte de masse s'observe. Pour un chauffage à 150°C, la perte de masse pour le béton des granulats naturel est d'environ 0,58% pour BGN1 et d'environ 1,42% pour BGN2 (E/C=0.47) et d'environ 1,18% pour BGN3. La perte de masse dans ce domaine correspond au départ de l'eau capillaire présente dans la couche externe du matériau et de l'eau libre. À partir de 150°C, la diminution de la masse continue jusqu'à 400°C. À cette température, la perte de masse, pour les trois bétons, représente plus que la moitié de la quantité totale de matière perdue par l'éprouvette. Cette perte de masse est due essentiellement au départ d'une partie de l'eau liée dans les hydrates.

Le deuxième domaine s'étend de la température de 400°C à 600°C. Il est caractérisé par une faible variation de perte de masse par rapport au deux autres domaines. Ce domaine est marqué par la décomposition de la portlandite. Cette transformation se manifeste par une

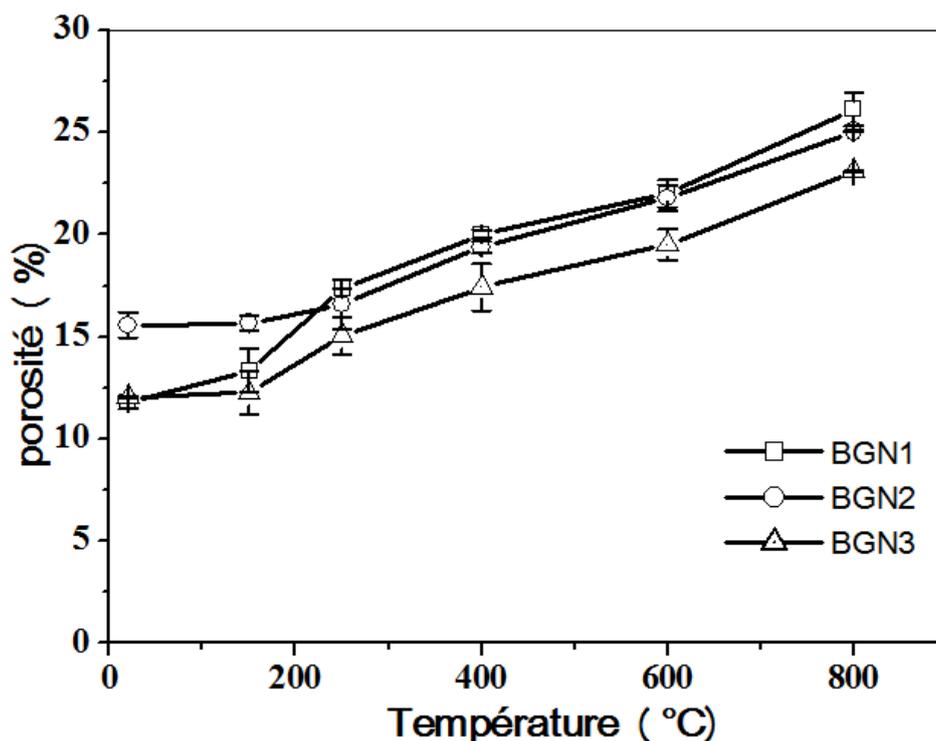
perte de masse moins importante que celle accompagnant le départ de l'eau libre et la déshydratation de CSH.

Le troisième domaine allant de la température de 600°C à 800°C, ce domaine se caractérise par une forte augmentation de la perte de masse pour tous les bétons. Ceci qui peut être expliqué par le départ de CO<sub>2</sub> et d'autres gaz du béton pendant l'échauffement [Robert et Colina, 2009].

Pour un chauffage à 800°C, une perte de masse est d'environ 8.45% pour le béton BGN1 et d'environ 8.06% pour BGN-2, tandis que pour le béton BGN-3 elle est d'environ 7.88%.

#### III.2.2 Porosité accessible à l'eau

La mesure de la porosité permet de caractériser la microstructure poreuse du béton. Les résultats de la porosité sont obtenus par l'essai de pesée hydrostatique et récapitulés. La figure III.2 présente l'évolution de la porosité des bétons à 28 jours en fonction de la température de chauffage.



**Figure III. 2.** Evolution de porosité à l'eau des bétons de granulats naturels en fonction de la température.

D'après la figure III.2, on observe à travers l'augmentation de la température que la structure interne est devenue très poreuse. L'analyse globale de la porosité après l'exposition à haute température permet de tirer les remarques suivantes :

- Entre 20°C et 150°C, la porosité augmente très peu. Ceci confirme le fait qu'à cette température, l'eau libre s'est échappée mais la microstructure du béton n'est pas modifiée [Noumowé, 1995].
- Une augmentation de la porosité est encore plus forte au-delà de 150°C. Cette augmentation peut être attribuée au départ de l'eau adsorbée dans les pores capillaires et de l'eau liée des hydrates de la pâte de ciment qui ont pour conséquence d'augmenter les dimensions des pores [Noumowé, 1995], [Elalaoui, 2012].
- Au-delà de 400°C, l'augmentation de la porosité est considérée due à la rupture des cloisons des capillaires sous l'effet de la pression de la vapeur d'eau engendrée par l'élévation de température [Noumowé, 1995] et à la microfissuration engendrée par la dilatation différentielle entre la pâte de ciment et les granulats [Pliya, 2010].

### III.2.3 Résistance en compression

La résistance en compression des différents bétons a été déterminée à température ambiante et aussi après les cycles de chauffage-refroidissement. La figure III.3 présente les résultats de la résistance en compression résiduelle et relative (normalisée par rapport à la valeur initiale obtenue à la température ambiante) de bétons.

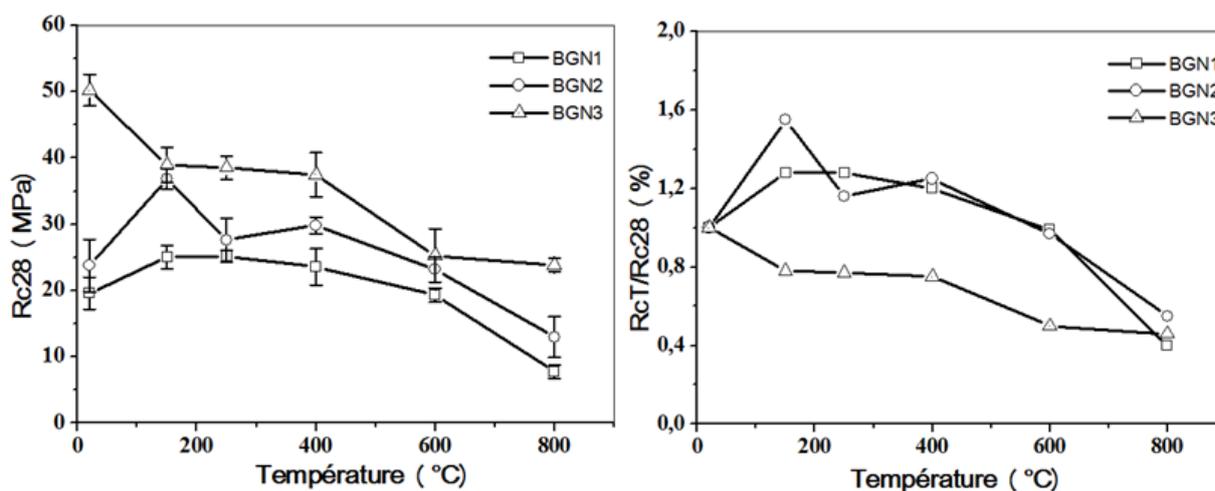


Figure III. 3. Evolution de la résistance résiduelle et relative en compression des bétons de granulats ordinaire en fonction de la température.

D'après la figure III.3, on remarque que la résistance en compression varie avec l'augmentation de la température. Ce fait a déjà été observé et discuté à plusieurs reprises dans la littérature par Yermak [Yermak, 2015], Pilya [Pilya, 2010], Kanéma [Kanéma, 2007], Phan [Phan, 2001], Qian [Qian, 2000], Hachemi [Hachemi, 2015] et Belaribi [Belaribi, 2019], qui ont conclu que ce décroissement peut être lié à la dégradation de la microstructure de la pâte de ciment et granulats ainsi qu'au départ d'eau.

On observe sur la figure III.3 trois zones d'évolution différentes de la résistance en compression selon la température de chauffage.

Dans la première zone, qui varie de la température ambiante à 150°C, on peut noter une légère diminution de résistance à la compression d'environ 22% pour le béton BGN3, Cependant, un gain de résistance a été observé d'environ 28% pour les bétons BGN1 et d'environ 55% pour BGN2. Cette augmentation a été expliquée par plusieurs hypothèses; selon [Dias, 1990] le départ de l'eau favorise une augmentation des forces de liaison entre les hydrates, ce qui justifie le gain de la résistance en compression observé.

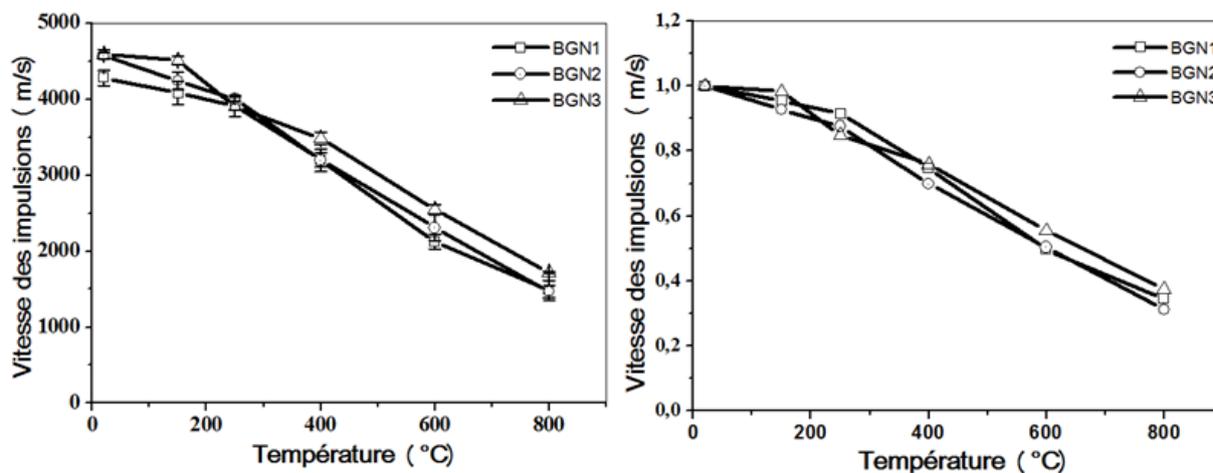
Dans la deuxième zone, entre 150°C et 400°C, on peut noter une légère diminution de résistance à la compression, la perte de résistance à 400°C est d'environ 22% pour le BGN3, la résistance en compression des bétons BGN1 et BGN2 diminue dans cette intervalle de température mais elle reste toujours supérieure à celle mesurée à 20°C, elle est d'environ 28% pour BGN1 et 55% pour BGN2 après le chauffage à 400°C. Différentes hypothèses ont été émises dans la littérature afin d'expliquer ce gain de résistance. Dias [Dias, 1990] suppose que le gain de résistance provient de l'hydratation supplémentaire de la matrice cimentaire due à la migration de l'eau libre dans les pores. Fares [Fares, 2009] confirme, grâce aux analyses d'images et des observations sur les micrographies, que le départ de l'eau déliée provenant de la déshydratation des CSH conduit à une augmentation de la porosité des CSH et permet à l'eau d'accéder aux grains anhydres donc en résulte l'hydratation de ces derniers. Selon Hager [Hager, 2004], cette augmentation de la résistance peut avoir comme origine le départ de l'eau du matériau qui ré- augmente les forces d'attraction par le rapprochement des feuilles de CSH.

Au-delà de 400°C, la perte de résistance résiduelle est similaire pour les BGN1 et BGN2. On remarque que le BGN3 perd plus grande de résistance en compression (environ 50% à 600°C) Cette forte perte de résistance est expliquée par l'endommagement du matériau provoqué par la dégradation de la matrice cimentaire et aussi à la désagrégation des granulats [Pilya, 2010]. Cette remarque a également été faite par Kanema [Kanema, 2007] et Pimi [Pimi, 2000].

### III.2.4 Vitesse des ondes soniques

Cet essai est une méthode véritablement non destructive, car elle est basée sur des ondes ultrasoniques utilisées pour obtenir le maximum d'informations sur la qualité des bétons soumis à une élévation de température.

Les valeurs de la vitesse des ondes soniques obtenues à température ambiante et après les différents traitements thermiques sont présentées dans la figure III.4.



**Figure III. 4.** Effet de la température sur la vitesse des ondes soniques des bétons de granulats naturels.

On remarque, d'après la figure III.4, que la vitesse des ondes soniques diminue avec l'augmentation de la température.

Nos résultats sont interprétés selon la classification de [Whitehurst, 1966], énumérée dans le tableau III.1, où l'on remarque que tous les bétons présentent une excellente qualité après l'exposition à 150°C. Au delà de cette température, la vitesse des ondes diminue progressivement. Cela montre que les fissures dont la diffusion est d'origine thermique, ralentissent la vitesse de propagation des ondes.

**Tableau III. 1.** Classification de la qualité du béton selon la vitesse des ondes soniques  
[Whitehurst, 1966]

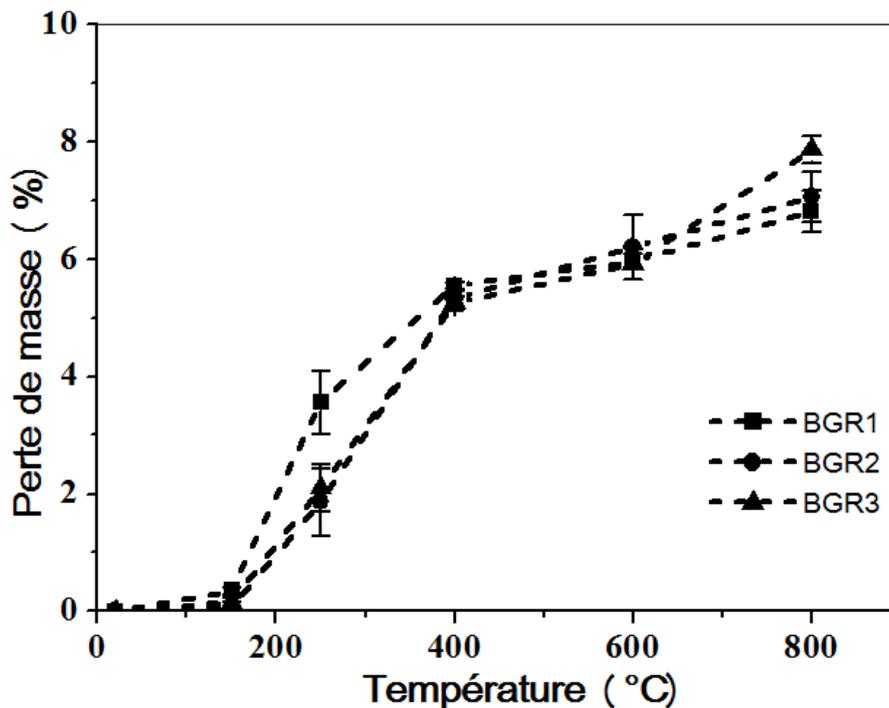
<b>Vitesse des ondes sonique (m/s)</b>	<b>Qualité du béton</b>
> 4500	Excellente
3500 – 4500	Bonne
3000 – 3500	Médiocre
2000 – 3000	Faible
< 2000	Très faible

### **III.3 L'EFFET DE L'HAUTE TEMPERATURE SUR LES PROPRIETES PHYSIQUES ET MECANIQUES DU BETON CONFECTIONNES AVEC 20% DES GRANULATS DE BRIQUE REFRACTAIRE**

L'étude de l'influence de substitution de 20% des granulats ordinaires par des granulats de brique réfractaire sur le comportement du béton soumis à haute température fait l'objet de cette partie. Comme dans le cas des études précédentes, trois formulations de bétons ont été confectionnées. Il s'agit de bétons BGR1, BGR2 et BGR3.

#### **III.3.1 Perte de masse**

La figure III.5 présente l'évolution de la perte de masse avec la température des éprouvettes des bétons confectionnés par le remplacement d'une partie des granulats naturels (20%) par des granulats de brique réfractaire.



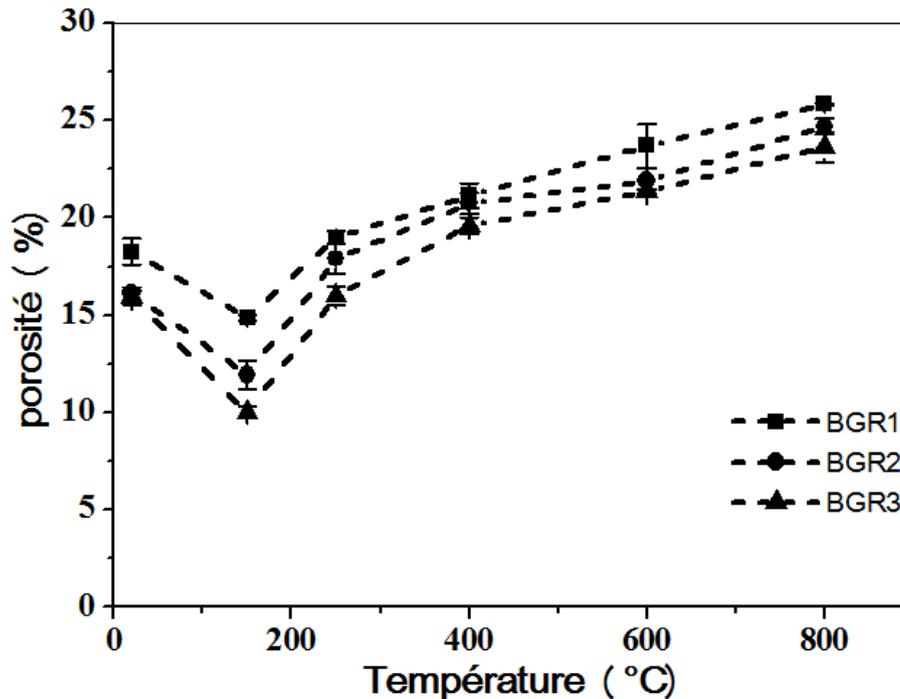
**Figure III. 5.** Evolution de la perte de masse en fonction de la température pour les bétons BGR1, BGR2 et BGR3.

D'après la figure III.5, les trois domaines d'évolution de la perte de masse observés pour les bétons confectionnés avec des granulats ordinaires (BGN1, BGN2 et BGN3) se retrouvent pour les bétons contenant des granulats de brique réfractaire. L'analyse globale de la perte de masse après l'exposition à haute température permet de tirer les remarques suivantes :

- Entre 20°C et 400°C, la perte de masse augmente. Ceci confirme le fait qu'à cette température, les liaisons chimiques entre l'eau et les CSH se rompent. L'eau adsorbée en surface de gel puis l'eau de constitution du gel et ainsi l'eau initialement liée passent à l'état libre et peut s'échapper [Noumowé, 1995].
- Entre 400°C et 600°C, la perte de masse des bétons ralentit.
- Au-delà de 600°C, la perte de masse s'accélère jusqu'à 800°C. La perte de masse à 800°C est d'environ 6,81%, 7,06% et 7,87% pour les BGR1, BGR2 et BGR3, respectivement.

### III.3.2 Porosité à l'eau

L'évolution de la porosité à l'eau de béton de 20 % de granulats de brique réfractaire est présentée sur la figure III.6.



**Figure III. 6.** Evolution de la porosité à l'eau des bétons de granulats de brique réfractaire en fonction de la température.

Nous observons que les valeurs de la variation de la porosité des trois bétons sont proches.

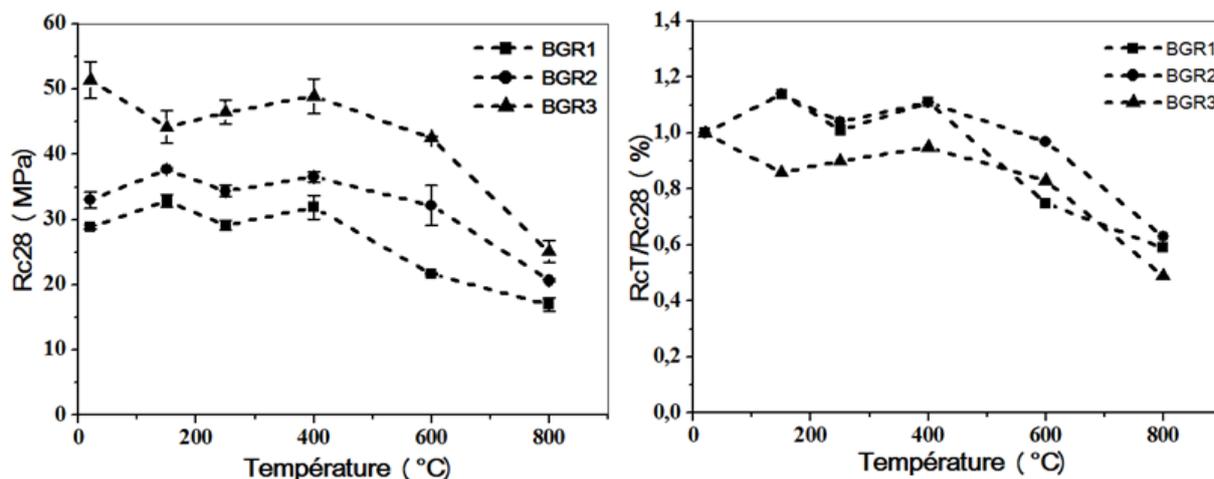
Deux phases ont été constatées :

- Dans la première phase qui varie de la température ambiante à 150°C, on peut noter une diminution de la porosité
- Dans la deuxième phase, Au-delà de 400°C, on observe, pour les trois bétons, une augmentation assez régulière de la porosité avec la température. Ceci est justifié par la déshydratation importante de la pâte de ciment et une forte fissuration de la matrice, ce qui entraîne une augmentation de la porosité du squelette solide.

Ainsi, lors du chauffage, la microstructure du béton est modifiée et le matériau béton devient plus poreux. Cette porosité ouverte facilite le transport de flux d'humidité, réduisant ainsi « l'effet bouchon ».

### III.3.2 Résistance en compression

La figure III.7 présente la variation de la résistance en compression des bétons contenant des briques réfractaire en fonction de la température. De plus, ces résultats sont normalisés par rapport à la valeur initiale mesurée à 20°C.



**Figure III. 7.** Evolution de résistance résiduelle et relative en compression des bétons de granulats de brique réfractaire en fonction de la température.

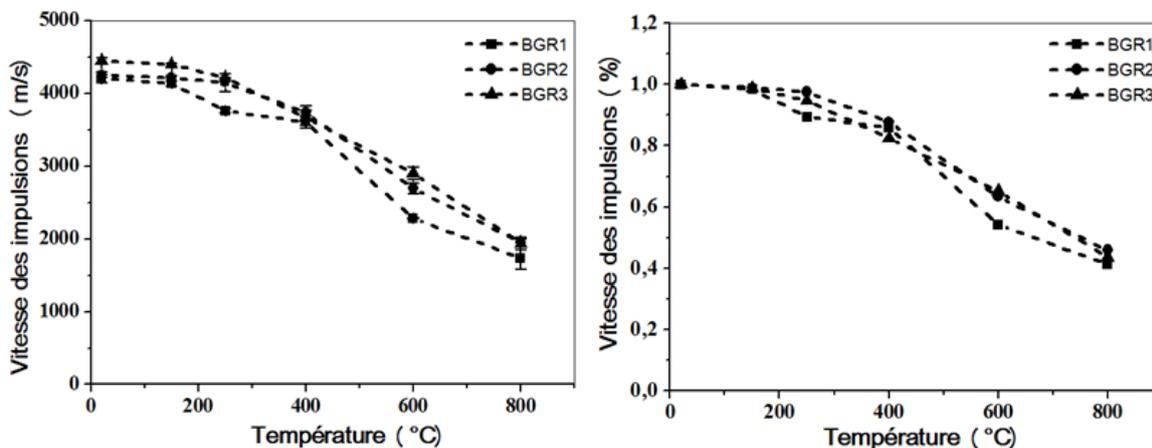
Entre la température 20°C et 150°C, les résistances des BGR3 diminuent. Ceci est dû à la dilatation thermique de l'eau qui provoque un écartement des feuillets du gel CSH. Cet écartement entraîne une diminution des forces d'attraction entre les feuillets et engendre la naissance de microstructures occasionnant une diminution de la résistance des bétons, par contre on peut observer un gain de résistance de 14% pour les BGR1 et BGR2. A la température de 400°C, on constate un gain de résistance pour les trois bétons.

Au-delà de 400°C, tous les bétons testés présentent une baisse de résistance importante. Nous observons des quantités importantes de fissures qui peuvent être expliquées par l'incompatibilité des déformations pâtes-granulats, la déshydratation des hydrates autre que CH.

Après le chauffage à 800°C, une baisse de la résistance en compression de 41% pour le BGR1, de 37% pour le BGR2 et de 51% pour le BGR3, a été constatée.

### III.3.4 Vitesse des ondes sonique

Les valeurs de la vitesse des ondes soniques obtenues à température ambiante et après les différents traitements thermiques sont présentées dans la figure III.8



**Figure III. 8.** Effet de la température sur la vitesse des ondes soniques des bétons de granulats de brique réfractaire

A travers l'ensemble des résultats présentés dans la figure III.8 et le tableau décrit dans le paragraphe III.1.4, nous pouvons regrouper le comportement de la vitesse des ondes soniques selon deux domaines. Le premier domaine allant de la température ambiante à la température de 400°C, les valeurs de la vitesse des ondes sont supérieures à 3500m/s, donc les bétons montrent une bonne qualité. Le second domaine, au-delà de 400°C présente une importante diminution. Les pourcentages de diminution à 800°C est d'environ 66% pour BGR1, 69% pour BGR2 et 63% pour BGR3. La baisse des valeurs de la vitesse des ondes est expliquée par, la microfissuration engendrée dans les éprouvettes et bien entendu par la déshydratation qui entraîne une augmentation de la porosité contribuant à l'endommagement du béton et l'évaporation de l'eau liée.

### III.4 ANALYSE COMPARATIVE DES PROPRIÉTÉS PHYSIQUES ET MÉCANIQUES DES DIFFERENTS BETONS

Le but de cette partie est de comparer le comportement à haute température du béton contenant des granulats ordinaires (granulats concassés et sable siliceux) des bétons contenant 20% de granulats de brique réfractaire. Cette étude comparative permet de caractériser l'influence des granulats de brique réfractaire (gros et fin) sur l'évolution des propriétés physiques et mécaniques du béton avec la température.

### III.4.1 Perte de masse

La figure III.9 présente l'évolution de la perte de masse des bétons de granulats ordinaires (BGN1, BGN2 et BGN3) comparée à celle des bétons confectionnés par le remplacement de 20% des granulats naturel par des granulats de brique réfractaire (BGR1, BGR2 et BGR3)

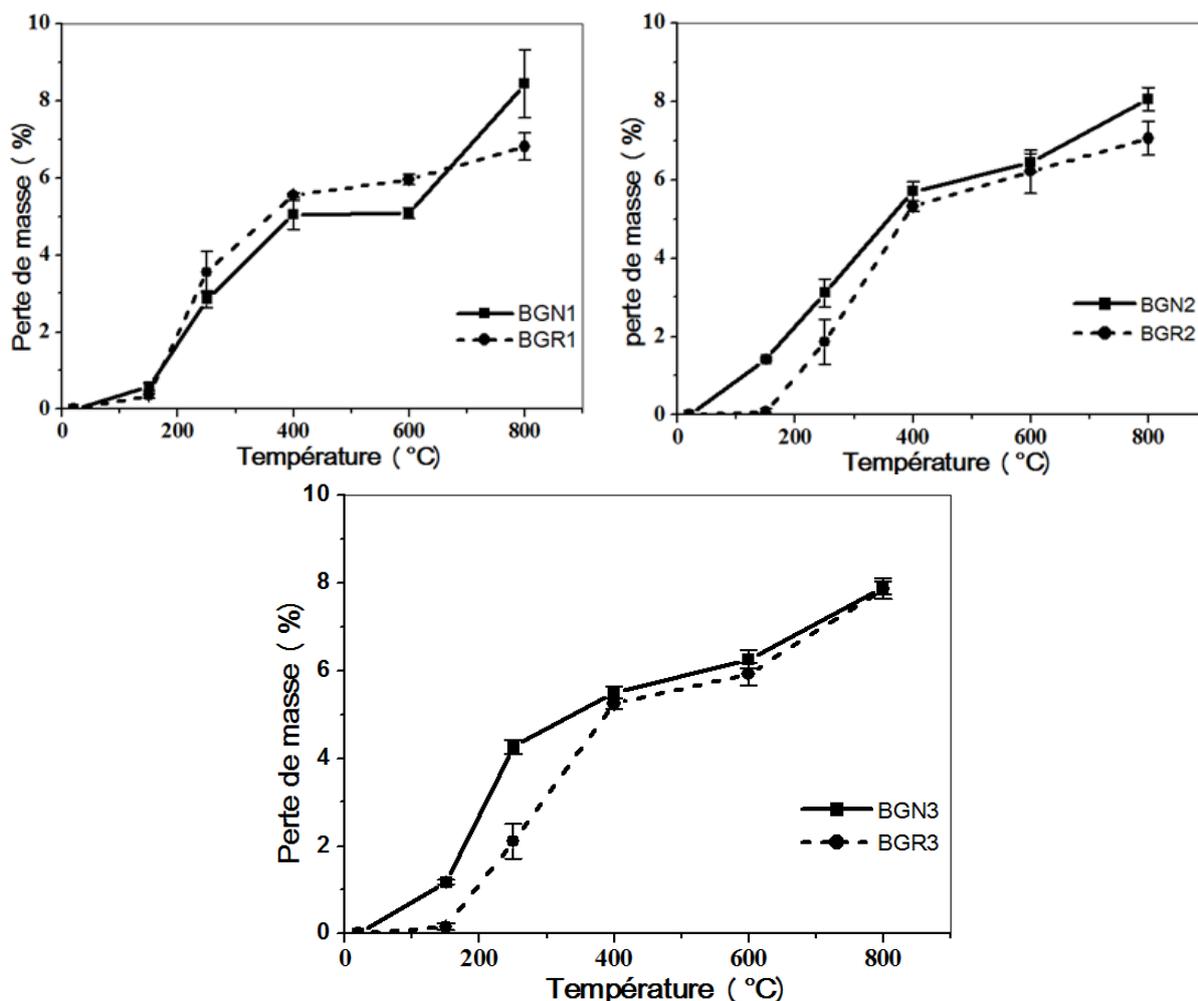


Figure III. 9. Evolution de la perte de masse de bétons en fonction de la température.

On peut observer que l'augmentation de la température conduit à une diminution continue de la masse pour tous les bétons.

Entre 20°C et 150°C, la perte de masse est très faible pour les bétons contenant des granulats de brique réfractaire en comparaison avec le béton des granulats ordinaires. Ceci peut être expliqué par le départ de l'eau libre contenue dans les pores du béton (séchage du béton).

Au-delà de 150°C, on remarque une forte augmentation de la perte de masse.

Au-delà de 400°C, d'une manière générale, l'évolution de la perte de masse en fonction de la température est liée au type de granulats utilisés. Les bétons contenant des granulats de brique réfractaire présentent la plus faible perte de masse par rapport aux autres bétons. Ces résultats sont expliqués par le sable des granulats de brique réfractaire qui sont des granulats très fin, donc l'absorption est plus grande par rapport à d'autres granulats.

Pour les bétons des granulats ordinaires la perte de masse augmente rapidement pour tous les mélanges. Cette perte est due à la décarbonatation des granulats calcaire, le CO<sub>2</sub> et d'autres gaz s'échappant du béton pendant l'échauffement [Robert et Colina, 2009].

### III.4.2 Porosité à l'eau

La figure III.10 illustre l'évolution de la porosité des différents bétons étudiés en fonction de la température de chauffage.

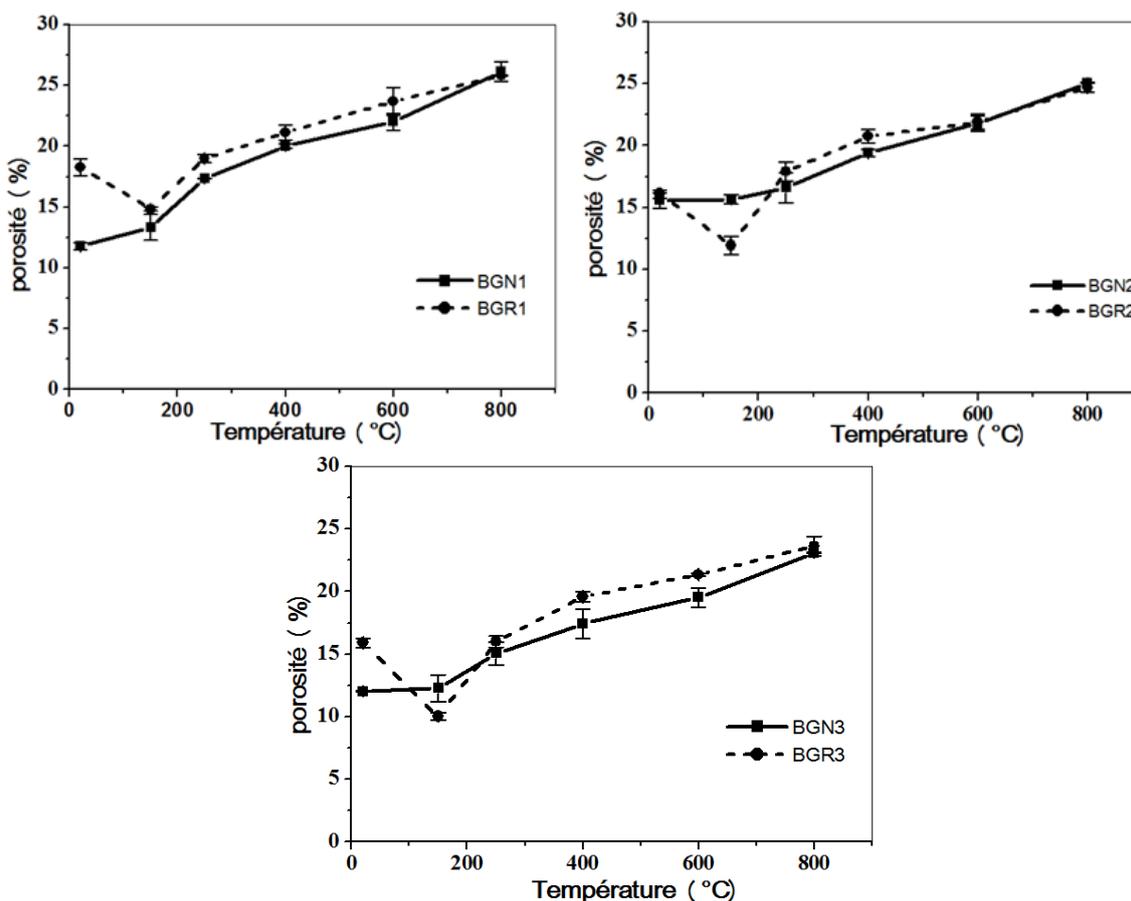


Figure III. 10. Evolution de la porosité à l'eau des différents types de bétons.

La figure III.10 montre que l'utilisation des granulats de brique réfractaire entraîne une légère augmentation de la porosité dans la gamme de température de 250°C à 600°C. La porosité du béton BGR1, BGR2 et BGR3 est supérieure à celle du béton BGN1, BGN2 et BGN3, respectivement à 20°C. Cela peut être expliqué par la porosité importante des granulats de brique réfractaire qui est supérieure à celle des granulats naturels.

Après chauffage à 800°C, la porosité à l'eau pour les deux bétons atteint de valeurs maximales 25% pour le béton de granulats naturel et 25% pour le béton de granulats brique réfractaire. à cette température, les deux bétons présentent une porosité semblable, c'est-à-dire que l'effet de la nature des granulats est négligeable vue la dégradation importante du béton et de ses constituants

### III.4.3 Résistance en compression

L'action des hautes températures sur le béton provoque une diminution graduelle de résistances mécaniques, qu'elles soient mesurées à chaud ou après refroidissement (propriétés résiduelles). La perte en résistances mécaniques varie selon le type de béton (la nature des constituants, la teneur en eau), la température atteinte et la vitesse de montée en température.

La résistance en compression résiduelle du béton de granulats ordinaires est comparée aux résistances en compression résiduelles du béton contenant 20% de granulats de brique réfractaire. La figure III.11 regroupe l'évolution de la résistance en compression résiduelle et relative en fonction de la température de chauffage des deux groupes du béton.

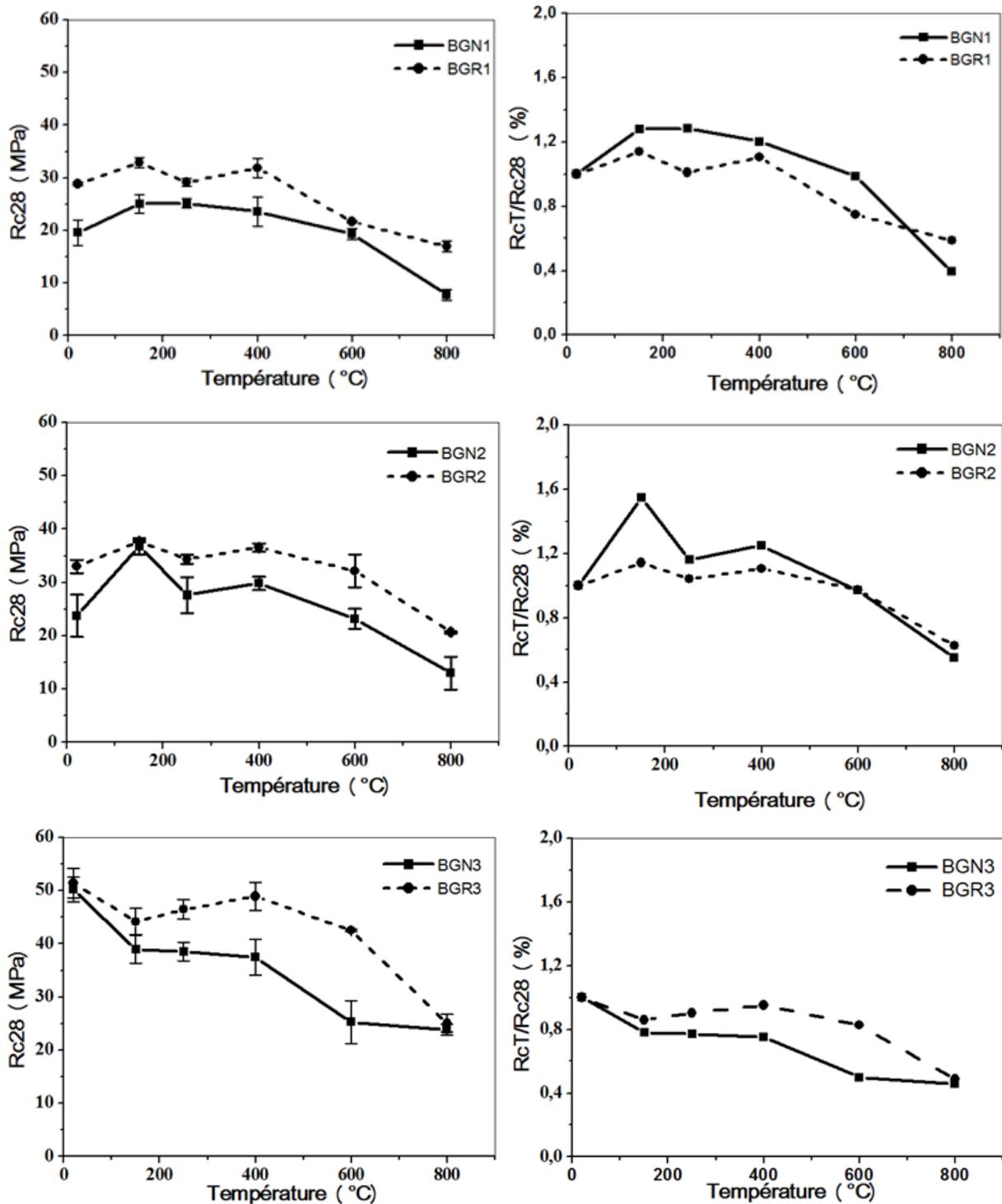


Figure III. 11. Evolution de la résistance en compression avec la température.

Pour les bétons des granulats de brique réfractaire, une amélioration de la résistance en compression résiduelle par rapport au les bétons des granulats naturels est notée dans le domaine de température de 20°C jusqu'au 800°C.

Les granulats brique réfractaire améliorent la résistance en compression résiduelle des bétons. L'amélioration du comportement en compression des bétons de granulats de brique réfractaire semble liée au coefficient d'absorption des granulats utilisés (brique réfractaire  $\emptyset < 3mm$  ). Ces granulats ont un coefficient d'absorption plus élevé que les granulats naturels, ce qui mène à une diminution de la quantité de l'eau de gâchage et par conséquent une amélioration de la résistance en compression.

Nous pouvons observer, à partir de la figure III.11, que le béton confectionné avec des granulats de brique réfractaire présente une meilleure résistance à température ambiante par rapport aux bétons des granulats naturels. Après chauffage, on peut noter une meilleure évolution de la résistance résiduelle du béton granulats de brique réfractaire. Ce qui peut être expliqué par la plus forte densité et la meilleure résistance en compression (70 MPa avant l'utilisation de ces granulats) des granulats de brique réfractaire qui conduit à un béton plus résistant.

### III.3.4 Vitesse des ondes soniques

Les valeurs des vitesses résiduelles et relatives des ondes soniques avant et après l'exposition des bétons aux hautes températures sont présentées sur les figures III.12. Les mesures ont été répétées 3 fois pour chaque éprouvette.

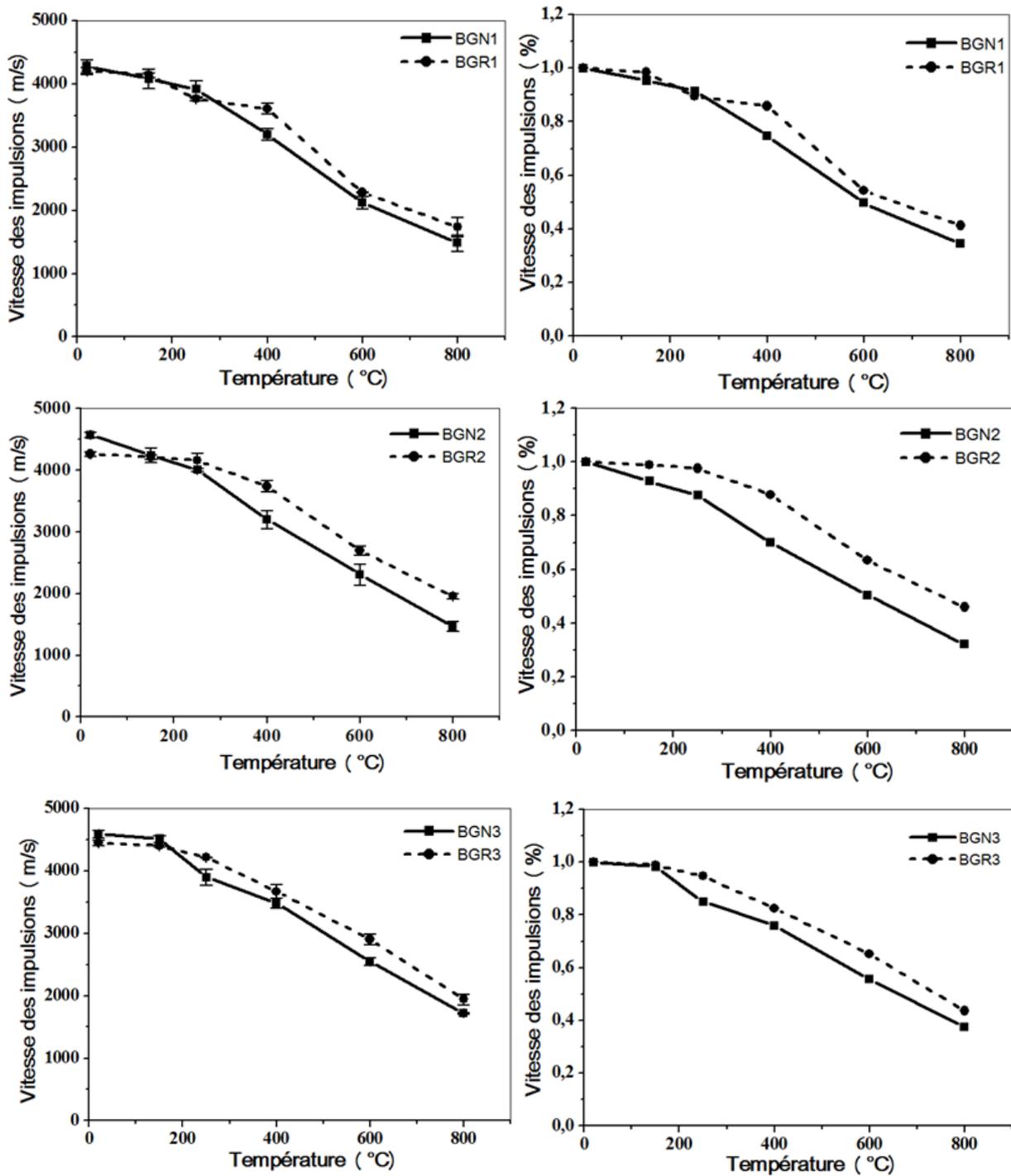


Figure III. 12. Effet de la température sur la vitesse des ondes soniques.

On remarque d'après la figure III.12 montre que la vitesse des ondes soniques diminue avec l'augmentation de la température quelque soit le type de béton.

La vitesse des ondes soniques des bétons confectionnés avec des granulats ordinaires est la plus affectée par l'élévation de la température que la vitesse des bétons des granulats de brique réfractaire. Ces derniers possèdent les meilleures valeurs de la vitesse des ondes soniques.

### III.5 Conclusion

La première partie de ce chapitre est consacrée à la caractérisation des propriétés physiques et mécaniques des différents bétons à l'état initial et après traitement thermique jusqu'à 150°C, 250°C, 400°C, 600°C et 800°C.

La perte de masse augmente avec l'augmentation de la température dans tous les bétons, jusqu'à 400°C. La phase entre 400°C et 600°C, la cinétique de perte de masse ralentie. Au-delà de 600°C, la perte de masse est attribuée au départ de l'eau fortement liée. L'ajout des granulats de brique réfractaire ne modifier pas l'allure de la courbe de la perte de masse.

Avec l'augmentation de la température, la porosité des bétons des granulats de la brique réfractaire s'accroît plus vite que celle des bétons de granulats naturels.

La résistance en compression diminue avec l'augmentation de la température. La résistance du BGR reste supérieure à celle du BGN.

D'une manière globale, nous avons remarqué la baisse des performances mécaniques résiduelles des bétons avec la montée en température.

La deuxième partie de ce chapitre présente une analyse comparative des propriétés physiques et mécaniques des différents bétons à l'état initial et après exposition à des cycles de chauffage refroidissement de 150°C, 250°C, 400°C, 600°C et 800°C.

La perte de masse diminue avec l'augmentation de la température dans tous les bétons. La perte de masse des bétons de granulats ordinaires est supérieure à celle du béton contenant des granulats de brique réfractaire.

La porosité à l'eau des bétons augmente avec l'augmentation de la température. De 250°C à 800°C, les bétons contenant des granulats de brique réfractaire présentent une porosité plus forte que celles des autres bétons. Ceci peut être expliqué par la porosité plus importante des granulats de brique réfractaire.

Le béton contenant des granulats de brique réfractaire donne une meilleure résistance en compression ce qui peut expliquer par leur forte densité par rapport aux granulats naturels.

# **CONCLUSION GENERALE**

## CONCLUSION GENERALE

Le premier objectif de la présente étude était de présenter une meilleure compréhension de la connaissance du comportement du béton soumis à une température élevée. L'étude a consisté à analyser l'influence des granulats de brique réfractaire sur les différentes formulations de béton.

Le deuxième objectif est de faire une connaissance sur les essais destructifs qui ont été pratiqués pour déterminer les propriétés mécaniques comme la résistance en compression, et les propriétés physiques comme la perte de masse, et la porosité. Des essais non destructifs pour déterminer la vitesse des impulsions ultrasoniques. Ces propriétés ont été déterminées à la température ambiante et cinq cycles de chauffage-refroidissement de la température ambiante à 150°C, 250°C, 400°C, 600°C et 800°C. La vitesse de chauffage était de 3°C/min.

Après les études expérimentales réalisées, nous pouvons présenter les conclusions suivantes :

- ✓ La perte de masse augmente avec l'augmentation de la température dans tous les bétons, jusqu'à 400°C, due au départ de l'eau libre contenue dans les capillaires et de l'eau contenue dans les hydrates. Entre 400°C et 600°C, la cinétique de perte de masse ralentit. Au-delà de 600°C, la perte de masse augmente. Dans la troisième zone, le béton perd essentiellement de l'eau fortement liée présente dans les hydrates, cette perte de masse est associée aussi à la décarbonatation des granulats.
- ✓ La perte de masse des bétons de granulats ordinaires est supérieure à celle du béton contenant des granulats de brique réfractaire.
- ✓ La porosité à l'eau des bétons augmente avec l'augmentation de la température. De 250°C à 800°C, les bétons contenant des granulats de brique réfractaire présentent une porosité plus forte que celles des autres bétons. Ceci peut être expliqué par la porosité plus importante des granulats de brique réfractaire.
- ✓ Les essais de résistance à compression nous ont montré que les performances mécaniques des bétons se dégradent avec l'augmentation de la température. Les résultats des essais mécaniques de compression évoluent suivant trois domaines. Dans le premier domaine, entre 20°C et 150°C. Dans le deuxième domaine, entre 150°C et 400°C, Le troisième domaine est caractérisé par une forte baisse de la résistance en compression.

- ✓ Le béton contenant des granulats de brique réfractaire donne une meilleure résistance en compression on peut expliquer ces résultats sont caractérisées par leur forte densité par rapport aux granulats naturels.
- ✓ La valeur de la vitesse des ondes soniques diminue de manière contenue avec l'élévation de la température pour tous les bétons.
- ✓ La vitesse des ondes soniques des bétons confectionnés avec des granulats naturels est la plus affectée par l'élévation de la température que la vitesse des bétons des granulats de la brique réfractaire. Ces derniers possèdent les meilleures valeurs de la vitesse des ondes soniques.

Généralement l'utilisation des granulats de brique réfractaire améliore les propriétés physiques des bétons et la résistance en compression du béton ordinaire lorsqu'ils sont portés à une forte température.

## Références

- Alonso C, Fernandez L., Dehydration and rehydration processes of cement paste exposed to high temperature environments. *Journal of materials sciences*, Vol. 39, 2004, p.3015-3024.
- Alonso C., Andrade C., Khoury G.A., Porosity & Microcracking, Course on Effect of Heat on Concrete, International Centre for Mechanical Sciences (CISM), Udine, Italy, 9-13 June 2003.
- Alarcon-Ruiz L., Galle C., Massieu E., Analyse de l'évolution de la porosité des pâtes de ciment à haute température, *Matériaux*, 2002.
- Afram, Durabilité des bétons – Méthodes recommandées pour la mesure des grandeurs associées à la durabilité des bétons INSA-LMDC, Toulouse, 11-12 décembre 1997.
- Bourouis M., Etude de l'effet des hautes températures sur l'évolution de la vitesse des ondes soniques du béton de granulats recyclés (brique concasse) mémoire de master Université Mohamed Khider, Biskra, Algérie, 2013.
- Bidosse A. Prosper PLIYA Contribution des fibres de polypropylène et métalliques à l'amélioration du comportement du béton soumis à une température élevée Thèse de doctorat université de CERGY-PONTOISE,2010.
- Baron, J., Desdevises, A., Buil, M., Detriche, C. H., Vernet, C., Duval, R., Dumas, T., La durabilité des bétons, 1992.
- Bidosse A. Prosper P., Contribution des fibres de polypropylène et métalliques à l'amélioration du comportement du béton soumis à une température élevée , thèse de doctorat, Université de Cergy-Pontoise, 2010.
- Cléo Laneyrie.,Valorisation des déchets de chantiers du BTP: comportement à haute température des béton des granulats recyclés, 2014.
- Collet Y., étude des propriétés du béton soumis à des températures élevées. *Annales des travaux publics belges* ,1977.
- Carré, H., Mindeguia, J. C., Borderie, C. L., & Pimienta, P., Dispositif d'observation de la microstructure et de pesée des bétons au cours d'un chauffage. In *Annales du Batiment et des Travaux Publics* (No. 5, p. 32), 2007.
- Chan S. Y. N., Peng G.-F., Chan J. K. W., Comparison between high strength concrete and normal strength concrete subjected to high temperature, *Materials and Structures*, Vol. 29, pp. 616-619, 1996.

- Chen B., Liu J., Residual strength of hybrid-fiber-reinforced highstrength concrete after exposure to high temperatures, *Cement and Concrete Research*, Vol. 34, pp. 1065–1069, 2004.
- Castillo C., Durrani A. J., « Effect of transient high temperature on high-strength concrete », *ACI Materials Journal*, N°87-M7, p.47-53, 1990.
- Dreux G., Festa J., *Nouveau guide de béton et de ses constituants*, Huitième édition, Eyrolles, 1998.
- Diederichs, U., Jumppanen, U.M., High temperature properties and spalling behaviour of high strength concrete, *Verlogfürarchitektur undtechn.wissencheften*, Ernst & schn, pp. 191 -197, 1992.
- Dupain.R., Lanchon-j. R., Saint-Arroman., *caractérisation des matériaux de génie civil par les essais de laboratoire, granulats, sols, ciments et bétons 2<sup>e</sup> édition conforme aux normes européennes*, casteilla ,2000.
- Damidot. D., Glasser.F.P. “Investigation of the CaO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O system at 25 °C by thermodynamic calculations”. *Cement and Concrete Research*, vol. 25 n° 1, 1995, p. 22-28.
- Fares. H. Contribution à l'étude des propriétés mécaniques et physicochimique des bétons autoplaçants soumis à de haute température. Thèse de doctorat, université de cergy pontoise, 2009.
- Felicetti, R., Gambarova, P. G., Sora, M. N., & Khoury, G. A., Mechanical behaviour of HPC and UHPC in direct tension at high temperature and after cooling. In *Fifth RILEM symposium on fibre-reinforced concretes*, N (pp. 749-758), 2000.
- Gao Y., De Schutter G., Ye G., Huang H., Tan Z. et Wu K. : Characterization of itz in ternary blended cementitious composites : experiment and simulation. *Construction andbuilding Materials*, 41:742–750, 2013.
- Gallé C., Pin M., Ranc G., Rodrigues S., Effect of the heating rate on residual thermohydro-mechanical properties of a high-strength concrete in the context of nuclear waste storage, *The 17th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology (SMiRT 17) Prague, Czech Republic, Paper # H01 -1, August 17 –22, 2003*.
- Gaweska I. H., « Comportement à haute température des bétons à haute performance-évolution des principales propriétés mécaniques », Thèse de doctorat, Ecole Doctorale MODES, 2004.

- Hachemi.S., Etude du Comportement du béton soumis à haute température : Influence du type de béton et de la nature des constituants Thèse de doctorat Université Mohamed Khider, Biskra, Algérie,2015.
- Hachemi, S., Ounis, A., Guerira, B., & Chabi, S. L'endommagement d'un élément en béton soumis au feu , 2014.
- Harmathy, T. Z. Design of concrete masonry walls for fire endurance, 1973.
- Hager, I., Comportement à haute température des bétons à haute performance-évolution des principales propriétés mécaniques, Thèse de doctorat, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées et Ecole Polytechnique de Croatie, 2004.
- Haniche R., Contribution à l'étude des bétons portés en température : Evolution des propriétés de transfert / Etude de l'éclatement, Thèse de Doctorat, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, 2011.
- Harada T., Takeda J., Yamane S., Furumura F., « Strength, elasticity and thermal properties of concrete subjected to elevated temperatures », Concrete for Nuclear Reactors, Detroit : American Concrete Institute, SP-39, p. 179-203, 1973.
- Jacques, Baron., Jean-Pierre Ollivier,. "Durabilité des bétons." Presses de l'École nationale des ponts et chaussées,1992.
- Jebli ,M., Caractérisation à l'échelle locale des propriétés mécaniques de l'interphase pâte de ciment-granulat et application à la lixiviation .Thèse de doctorat, Université de Montpellier, 2016.
- Kamali S., Keinde D. et Bernard F. : Effect of aggregate type on the concrete matrix/aggregate interface and its influence on the overall mechanical behavior. a numerical study. In Key Engineering Materials, Switzerland, volume 617, pages 14–17. Trans Tech Publ, 2014.
- Kessal.O., Étude multi échelle de l'influence des granulats sur le comportement de béton soumis à haute température Thèse de doctorat Université Mohamed Khider, Biskra, Algérie, 2017.
- Kanema T. M., Influence des paramètres de formulation sur le comportement à haute température des bétons, Thèse de Doctorat, Université de Cergy-Pontoise, 2007.
- Kanema M., Noumowe A., Gallias J.-L., Cabrillac R., Influence des paramètres de formulation et microstructuraux sur le comportement à haute température des bétons, XXIII<sup>èmes</sup> Rencontres Universitaires de Génie Civil – Risque & Environnement, 2005.

- Lion, M., Skoczylas, F., Lafhaj, Z., & Sersar, M., Experimental study on a mortar. Temperature effects on porosity and permeability. Residual properties or direct measurements under temperature. cement and concrete research, 35(10), 1937-1942, 2005.
- Mehta., Povindar Kumar., Concrete, Structure properties, and materials, 1986.
- Marsel Carlier., (Améliorer la valorisation des déchets industriels en BTP) PREDIS - Groupe de travail. n°5.guides techniques régionaux relatifs à la valorisation des déchets et coproduits industriels.
- Mindeguia J.-C., Contribution expérimentale a la compréhension des risques d'instabilité thermique des bétons, Thèse de Doctorat, l'Université de Pau et des Pays de l'Adour, 2009.
- Menou, A., Etude du comportement thermomécanique des bétons à haute température: approche multi échelles de l'endommagement thermique, Thèse de doctorat, Université de Pau et des Pays de l'Adour, 2004.
- Normalisation française P 18-554, Granulats – mesures des masses volumiques, de la porosité, du coefficient d'absorption et de la teneur en eau des gravillons et des cailloux, Association Française de Normalisation (AFNOR), tour Europe cedex 7 92049, Paris, 1990.
- Normalisation française P18-560, Analyse granulométrique par tamisage, Association Française de Normalisation (AFNOR), tour Europe cedex 7 92049, Paris, 1990.
- Normalisation française P18-404, essais d'étude de convenance et de contrôle confection et conservation des éprouvettes, Association Française de Normalisation (AFNOR), Paris, 1981.
- Norme Européenne Norme Française NF EN 12390-3, Essai pour béton durci Partie 3 : Résistance à la compression sur éprouvettes, ISSN 0335-3931, l'Association Française de Normalisation (AFNOR), avenue Francis de Pressensé - 93571 Saint-Denis La Plaine Cedex, 2003.
- Normalisation française P 18-418, Béton, Auscultation sonique – mesure du temps de propagation d'ondes soniques dans le béton, Association Française de Normalisation (AFNOR), tour Europe cedex 7 92049, Paris, 1989.
- Niry R., Beaucour A-L, Hebert R., Ledesert B., Noumowe A., Bodet R., Comportement à haute température des bétons de granulats naturels siliceux et calcaires, 32èmes Rencontres de l'AUGC, Polytech Orléans, 4-6 juin 2014.

- Noumowe A.N., Effet des hautes températures (20-600°C) sur le béton – Cas particulier du béton à hautes performances, Thèse de Doctorat, Institut National des Sciences Appliquées INSA de Lyon, 1995
- Noumowé A., Ranc G., Hochet C., Moisture Migration and Thermomechanical behaviour of Concrete at High Temperature up to 310°C, The 17th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology (SMiRT 17) Prague, Czech Republic, Paper H01-3, August 17 –22, 2003.
- Noumowé, N.A., Mechanical properties and microstructure of high strength concrete containing polypropylene fibres exposed to temperatures up to 200°C, Cement and Concrete Research, Vol. 35, 2005, pp. 2192-2198.
- Noumowe A.N, Clastres P., Debicki G., Costaz J.L., Thermal stresses and water vapor pressure of high performance concrete at high temperature, Proceedings, 4th International symposium on utilization of High-strength/HighPerformance Concrete, Paris France, 1996.
- Otis ;N., influence de divers superplastifiants sur le ressuage et l'interface pâte/ granulats dans le matériaux cimentaires, mémoire de master Université sherbrooke, 2000.
- Phan L. T., Carino N. J., Code Provisions for High Strength Concrete Strength-Temperature Relationship at Elevated Temperatures, Materials and Structures, Vol. 36, pp. 91-98, 2003.
- Phan, L.T., Lawson, J.R., Davis, F.L., Effects of elevated temperature exposure on heating characteristics, spalling, and residual properties of high performance concrete, Materials and Structures, Vol. 34, 2001, pp;. 83-91.
- Pilya P., Contribution des fibres de polypropylène et métalliques à l'amélioration du comportement du béton soumis a une température élevée, thèse doctorat université de Cergy Pontoise, 2010.
- Reynouard ., Pijaudier-Cabot., Comportement mécanique du béton, 2005.
- Razafinjato, Rijiaina Niry, comportement des bétons à une température élevée – Influence de nature du granulats -, thèse doctorat université de Cergy Pontoise, 201 5.
- Regourd.M., Hornan.H. « Applications de la microscopie électronique à balayage ». Revue des matériaux de construction, n° 693, p. 73-87, 1975.
- Saadi.I., Contribution à l'étude du comportement à haute température des bétons à hautes performances effet des additions minérales et fibres de polypropylène Thèse de Doctorat, Université Badji Mokhtar – Annaba, 2017.

Suhaendi, S.L., Horiguchi, T., Effect of short fibers on residual permeability and mechanical properties of hybrid fiber reinforced high strength concrete after heat exposition, *Cement and Concrete Research*, Vol. 36, 2006, pp. 1672-1678.

Tsimbrovska M., Dégradation des bétons à hautes performances soumis à des températures élevées. Evolution de la perméabilité en liaison avec la microstructure, Thèse de doctorat, Université Grenoble 1, 1998.

Xing Z., Influence de la nature minéralogique du granulats sur leurs comportement et celui de béton à une température élevée , Thèse de doctorat, Université de Cergy Pontoise, 2009.

Yermak Nonna. Comportement à hautes températures des bétons additionnés de fibres, Thèse de doctorat, Université de Cergy Pontoise, 2015.