



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
Ref :



جامعة محمد خيضر بسكرة
كلية العلوم و التكنولوجيا
قسم:.....
المرجع:.....

Thèse présentée en vue de l'obtention
Du diplôme de
Doctorat en sciences en : GENIE CIVIL

Option : MATERIAUX DE CONSTRUCTION

Etude du Comportement du béton soumis à haute température : Influence du type de béton et de la nature des constituants

Présentée par :
HACHEMI Samya

Soutenue publiquement le 13/12/2015

Devant le jury composé de :

Dr. MELLAS Mekki	Professeur	Président	Université de Biskra
Dr. OUNIS Abdelhafid	Professeur	Rapporteur	Université de Biskra
Dr. MEZGHICHE Bouzidi	Maitre de Conférences 'A'	Examineur	Université de Biskra
Dr. CHABIL Hocine	Professeur	Examineur	Université de Constantine
Dr. ZEGUICHI Leila	Professeur	Examineur	Université de M'sila
Dr. KRIKER Abdelouahed	Professeur	Examineur	Université de Ouargla



Remerciements

Je tiens à remercier Monsieur **OUNIS Abdelhafid**, Professeur à l'Université de Biskra, mon Directeur de thèse, pour les conseils et orientations prodigués. Je le remercie pour sa confiance et pour son aide scientifique.

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

- Monsieur **MELLAS Mekki**, Professeur à l'Université de Biskra, pour avoir présidé le jury au milieu de ses multiples tâches.
- Monsieur **MEZGHICHE Bouzidi**, Docteur à l'Université de Biskra, d'avoir accepté d'examiner mon travail et de faire partie de ce jury.
- Monsieur **CHABIL Hocine**, Professeur à l'Université de Constantine, Madame **ZEGUICHI Leila**, Professeur à l'Université de M'sila, Monsieur **KRIKER Abdelouahed**, Professeur à l'Université de Ouargla, qui m'ont fait l'honneur d'être membres du jury de soutenance de cette thèse. Je les remercie de trouver le temps et la volonté de faire le déplacement pour examiner ce travail.

La campagne expérimentale qui a fait l'objet de cette thèse a été réalisée à l'Université de Biskra, au sein du Laboratoire de Matériaux de construction du département de Génie Civil. Je veux remercier en particulier Monsieur **BOUZIANE Mohamed Toufik**, Professeur à l'Université de Biskra et Chef du département de génie civil, pour l'aide qu'il m'a apportée lors de la mise en œuvre et la réalisation des essais.

Un grand merci à mes **PARENTS** à qui je dois ce que je suis devenue.



RESUME

Les dégradations de béton par incendie qui affectent davantage les bâtiments ont soulevées la question du comportement des bétons (ordinaires ou hautes performances) vis-à-vis du feu. Des études théoriques et expérimentales ont permis d'avoir des explications sur les phénomènes observés dans le comportement du béton chauffé et de préciser les paramètres clés influençant le comportement au feu des bétons.

Le but de ce travail de recherche est de compléter, par une étude expérimentale, les connaissances déjà acquises sur le comportement du béton soumis à des températures élevées en mettant l'accent sur le comportement des granulats. Cette étude est construite en trois parties : l'étude du comportement des granulats (sable siliceux, sable calcaire, granulats calcaires et granulats de brique concassée) soumis à haute température, l'étude du comportement des bétons avec les granulats testés précédemment et enfin l'observation à différentes échelles des dégradations de ces bétons.

Trois familles de béton ont été étudiées : béton de granulats ordinaires (sable siliceux et granulats calcaires), béton à base de sable calcaire (sable calcaire et granulats calcaires) et béton de granulats de brique concassée (sable siliceux, 70% granulats calcaires et 30% granulats de brique concassée). Pour chaque famille de béton, trois rapports E/C sont utilisés : 0.60, 0.42 et 0.27. Les bétons sont soumis à des cycles de chauffage-refroidissement jusqu'à 150°C, 250°C, 400°C, 600°C et 900°C. Les propriétés physiques et mécaniques résiduelles des différents bétons formulés ont été analysées.

L'analyse des résultats des essais permet de caractériser les différentes propriétés physiques et mécaniques des bétons à hautes températures. Les résultats montrent que les granulats de brique concassée et les bétons confectionnés avec ces granulats présentent un meilleur comportement lorsqu'ils sont soumis à haute température.

Mots-Clés : Béton, Température, Propriétés mécaniques, Propriétés physiques, Dégradation, Sable calcaire, Brique concassée.



ABSTRACT

Concrete damage by fire which affects more buildings have raised the question of the behavior of concrete (ordinary or high performance) versus the fire. Theoretical and experimental studies have allowed having an explanation of the phenomena observed in the behavior of heated concrete and clarify key parameters influencing fire behavior of concrete.

The main objective of this research is to supplement, by an experimental study, existing knowledge on the behavior of concrete subjected to high temperatures by focusing on the behavior of aggregates. This study is built in three parts: the study of the behavior of aggregates (silica sand, limestone sand, limestone aggregates and crushed brick aggregates) subjected to high temperature, the study of the behavior of concretes with aggregates previously tested and finally the observations at different scales of degradations of these concretes.

Three concrete families were studied: ordinary aggregates concrete (silica sand and limestone aggregates), concrete with calcareous sand (calcareous sand and limestone aggregate) concrete with crushed brick aggregates (silica sand, 70% limestone aggregates and 30% crushed brick aggregates). For each concrete family, three W/C ratios are used: 0.60, 0.42 and 0.27. The concretes are subjected to heating-cooling cycles to 150°C, 250°C, 400°C, 600°C and 900°C. The residual physical and mechanical properties of different concretes were analyzed.

The analysis of the test results used to characterize the various physical and mechanical properties of concretes at high temperatures. The results show that the crushed brick aggregates and concrete made with these aggregates show a better behavior when submitted to high temperature.

Keyword: *Concrete, Temperature, Mechanical properties, physical properties, Deterioration, Limestone sand, Crushed brick.*



ملخص

إن تضرر الخرسانة بالحريق الذي يؤثر على البنايات بكثرة قد أثارت مسألة سلوك الخرسانة (العادية أو عالية الأداء) إزاء الحريق. بعض الدراسات النظرية و التطبيقية سمحت بإعطاء بعض التفسيرات للظواهر التي لوحظت في سلوك الخرسانة المعرضة للحرارة و تحديد العوامل الرئيسية التي تؤثر في سلوك الخرسانة المعرضة للحريق.

الهدف من هذا البحث هو تكملة، بدراسة تجريبية، للمعلومات الموجودة سابقا عن سلوك الخرسانة المعرضة لدرجة الحرارة العالية من خلال التركيز على سلوك الركام. تتألف هذه الدراسة من ثلاث أجزاء: دراسة سلوك الركام (رمل السيليكيا، رمل كلسي، حجارة كلسية، حجارة الأجر المكسر) المعرض لدرجة حرارة عالية، دراسة سلوك الخرسانة المحضرة بالركام المدروس سابقا و أخيرا مراقبة تضرر الخرسانة على مستويات مختلفة.

تمت دراسة ثلاث أنواع من الخرسانة: خرسانة تحتوي على حجارة عادية (رمل السيليكيا و حجارة كلسية)، خرسانة تحتوي على الرمل الكلسي (الرمل الكلسي و حجارة كلسية) و خرسانة تحتوي على حجارة الأجر المكسر (رمل السيليكيا، 70% حجارة كلسية و 30% حجارة الأجر المكسر). لكل نوع من الخرسانة، استخدمت ثلاث نسب من ماء/اسمنت: 0.60، 0.42 و 0.27. تعرضت هذه الخرسانات لدورات تسخين- تبريد إلى غاية 150 درجة مئوية، 250 درجة مئوية، 400 درجة مئوية، 600 درجة مئوية و 900 درجة مئوية. وقد تم تحليل الخصائص الفيزيائية والميكانيكية لمختلف الخرسانات.

تحليل نتائج الاختبارات المستخدمة سمح بوصف مختلف الخصائص الفيزيائية والميكانيكية للخرسانة المعرضة لدرجات حرارة عالية. وأظهرت النتائج أن حجارة الأجر المكسر والخرسانة المصنوعة من هذه الحجارة تظهر سلوكا أفضل عندما تكون معرضة لدرجات حرارة عالية.

الكلمات المفتاحية: خرسانة، حرارة، الخصائص الميكانيكية، الخصائص الفيزيائية، تدهور، رمل الكلسي، حجارة الأجر المكسر.



Table des Matières

Résumé	
Abstract	
ملخص	
Table des matières	i
Liste des figures	vi
Liste des tableaux	xii
Liste des Notations	xiv

INTRODUCTION GENERALE 2

CHAPITRE I : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

I.1 Introduction	6
I.2 Généralité sur la microstructure du béton durci	6
I.2.1 Microstructure de la pâte de ciment	6
I.2.2 Eau dans la microstructure du béton	10
I.2.2.1 L'Eau libre et capillaire	10
I.2.2.2 L'Eau adsorbée	10
I.2.2.3 L'Eau chimiquement liée	11
I.2.3 Structure poreuse du béton	11
I.2.4 Microstructure de l'interface pâte-granulats	13
I.3 Comportement mécanique du béton à température ambiante	14
I.3.1 Comportement en compression	14
I.3.2 Comportement en traction	15
I.4 Comportement au feu des structures en béton lors d'incendie	16
I.5 Comportement du béton a haute température	19
I.5.1 Effets des hautes températures sur les composants et les propriétés physiques du béton	20
I.5.1.1 Evolution de la pâte de ciment	20
I.5.1.2 Evolution des granulats	21
I.5.1.3 Dégradation de l'interface pâte granulats	23
I.5.1.4 Perte de masse	23
I.5.1.5 Evolution de la porosité	24
I.5.1.6 Evolution de la perméabilité	25
I.5.2 Evolution des propriétés thermiques du béton avec la température	27
I.5.2.1 La conductivité thermique	27
I.5.2.2 Chaleur spécifique	28
I.5.2.3 Diffusivité thermique	29
I.5.3 Evolution des propriétés mécaniques du béton avec la température	29
I.5.3.1 Résistance en compression à hautes températures	30
I.5.3.2 Résistance en traction à hautes températures	38
I.5.3.3 Module d'élasticité	41
I.5.4 Déformation thermiques du béton à hautes températures	48
I.5.4.1 Déformation thermique de la pâte de ciment	48
I.5.4.2 Déformation thermique des granulats	50
I.5.4.3 Déformation thermique du béton	50
I.5.4.4 Déformation thermique transitoire	52
I.6 Conclusion	54



CHAPITRE II : MATERIAUX TESTES ET PROGRAMME EXPERIMENTAL

II.1 Introduction 56

II.2 Les matériaux 57

 II.2.1 Caractérisation des constituants utilisés 57

 II.2.2 Courbes granulométriques 60

 II.2.3 Compositions des bétons testés 63

II.3 Fabrication et conditionnement des éprouvettes 66

 II.3.1 Fabrication 66

 II.3.2 Les corps d'épreuve 66

 II.3.3 Cure appliquée 66

II.4 Justification du programme expérimental 68

II.5 Essai de chauffage 70

 II.5.1 Dispositif de chauffage 71

 II.5.2 La méthodologie 72

 II.5.3 Disposition dans le four 73

II.6 Essais macrostructuraux 74

 II.6.1 Essai de compression 74

 II.6.2 Essai de flexion 77

 II.6.3 Perte de masse 79

 II.6.4 Porosité à l'eau 82

 II.6.5 Volume apparent 84

 II.6.6 Essai de vitesse de propagation d'ondes sonores 85

II.7 Essais microstructuraux 85

 II.7.1 Echelle macro 85

 II.7.2 Echelle méso 86

 II.7.3 Echelle micro 86

II.8 Caractérisation des granulats soumis à une température élevée 89

 II.8.1 Cycles de chauffage – refroidissement 90

 II.8.2 Perte de masse des granulats 90

 II.8.3 Porosité à l'eau, coefficient d'absorption et masse volumique des granulats 91

II.9 CONCLUSION 92

CHAPITRE III : PRESENTATION ET ANALYSE DES RESULTATS

III.1 Introduction 94

III.2 Comportement des granulats à hautes températures 94

 III.2.1 Observations macroscopiques des effets de la température des granulats 94

 III.2.2 Perte de masse des granulats en fonction de la température 99

 III.2.3 Porosité des granulats en fonction de la température 102

 III.2.4 Masse volumique des granulats en fonction de la température 103

 III.2.5 Coefficient d'absorption des granulats en fonction de la température 103

III.3 Caractérisation du comportement des bétons à haute température 105

 III.3.1 Perte de masse 105

 III.3.2 Porosité à l'eau 106

 III.3.3 Densité apparente 108

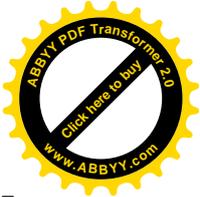
 III.3.4 Volume apparent des éprouvettes 109

 III.3.5 Vitesse des ondes soniques 110

 III.3.6 Résistance en compression 112

 III.3.7 Résistance à la flexion 115

III.4 Caractérisation du comportement des bétons à base de sable calcaire à haute température 117



III.4.1	Perte de masse	117
III.4.2	Porosité à l'eau	118
III.4.3	Densité apparente	119
III.4.4	Volume apparent des éprouvettes	119
III.4.5	Vitesse des ondes soniques	120
III.4.6	Résistance en compression	122
III.5	Caractérisation du comportement des bétons avec 30% de brique concassé à haute température	124
III.5.1	Perte de masse	124
III.5.2	Porosité à l'eau	125
III.5.3	Densité apparente	126
III.5.4	Volume apparent des éprouvettes	127
III.5.5	Vitesse des ondes soniques	127
III.5.6	Résistance en compression	129
III.6	Observations de l'endommagement des bétons soumis à hautes températures	131
III.6.1	Observations macroscopiques des dégradations des différents bétons après le refroidissement	131
III.6.2	Evolution de la fissuration du béton avec la température	139
III.6.3	Observations au Microscope Electronique à Balayage	141
III.7	CONCLUSION	143
CHAPITRE IV : ANALYSE COMPARATIVE ET RELATION DES PROPRIETES PHYSIQUES ET MECANQUES DES DIFFERENTS BETONS		
IV.1	Introduction	146
IV.2	Analyse comparative des propriétés physiques et mécaniques des différents bétons	146
IV.2.1	Perte de masse	146
IV.2.2	Porosité à l'eau	148
IV.2.3	Densité apparente	150
IV.2.4	Volume apparent des éprouvettes	151
IV.2.5	Vitesse des ondes soniques	153
IV.2.6	Résistance en compression	155
IV.3	Relation entre les propriétés physiques et mécaniques des différents bétons. .	159
IV.3.1	Relation entre la résistance en compression et la perte de masse	159
IV.3.2	Relation entre la résistance en compression et la porosité	160
IV.3.3	Relation entre la résistance en compression et la densité apparente	162
IV.3.4	Relation entre la résistance en compression et la vitesse des ondes soniques	163
IV.3.5	Relation entre la porosité et la perte de masse.	164
IV.3.6	Relation entre la densité apparente et la perte de masse	166
IV.3.7	Relation entre la vitesse des ondes soniques et la porosité	167
IV.4	Conclusion	168
CONCLUSION GENERALE		171

Références



Liste des Tableaux

CHAPITRE I : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

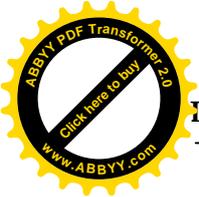
I.1.	Principales phases du ciment Portland	7
I.2.	Classification des dégradations d'ouvrage en béton par incendie	18

CHAPITRE II : MATERIAUX TESTES ET PROGRAMME EXPERIMENTAL

II.1.	Composition chimique du ciment	57
II.2.	Principales caractéristiques physiques et mécaniques du ciment	58
II.3.	Principales propriétés physiques du sable siliceux et calcaire	58
II.4.	Principales caractéristiques des granulats calcaires 5/15 et 15/25	59
II.5.	Principales caractéristiques de granulats de brique concassée	59
II.6.	Compositions des bétons testés B1-GO, B2-GO, B3'-GO et B3-GO	64
II.7.	Compositions des bétons testés B1-SC, B2-SC et B3-SC	65
II.8.	Compositions des bétons testés B1-BC, B2-BC et B3-BC	65
II.9.	Variation de masse des éprouvettes de béton de granulats de brique concassée pendant la conservation à l'air ambiant	68
II.10.	Quantité et programme des essais réalisés au cours de la durée de thèse.	70
II.11.	Les différents cycles de chauffage-refroidissement appliqués aux différents types de matériaux	73
II.12.	Résistance en compression des différents bétons	75
II.13.	Résistance à la flexion des bétons B1-GO, B2-GO et B3-GO	79
II.14.	Perte de masse des bétons calculée avec les masses d'éprouvettes pesées après démoulage et avant chauffage.	81

CHAPITRE III : PRESENTATION ET ANALYSE DES RESULTATS

III.1.	Photographies du sable siliceux avant et après exposition aux différentes températures.	95
III.2.	Photographies du sable calcaire avant et après exposition aux différentes températures.	96
III.3.	Photographies des granulats calcaires avant et après exposition aux différentes températures.	97
III.4.	Photographies des briques concassés avant et après exposition aux différentes températures.	99
III.5.	Classification de la qualité du béton selon la vitesse des ondes soniques	110
III.6.	Valeurs de la vitesse de propagation des ondes soniques et qualité des bétons de granulats ordinaires.	111
III.7.	Valeurs de la vitesse de propagation des ondes soniques et qualité des bétons à base de sable concassé	120
III.8.	Valeurs des vitesses des ondes soniques et qualité des bétons de granulats de brique concassée.	128
III.9.	Largeurs des macro-fissures des éprouvettes après chauffage à 400°C, 600°C et 900°C	141



Liste des figures

CHAPITRE I : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

I.1.	Image de silicate de calcium hydraté obtenue au MEB	8
I.2.	Image de Portlandite obtenue au MEB	8
I.3.	Image des cristaux d'étringite obtenue au MEB	9
I.4.	Représentation schématique de la microstructure du gel de CSH	9
I.5.	Schéma de principe de la zone d'adsorption empêchée	11
I.6.	Dimensions des pores et phases solides présentes dans le béton	12
I.7.	Distribution porosimétrique d'un béton en fonction du rapport E/C	12
I.8.	Microstructure de la zone de contact entre la pâte de ciment et le granulat.	13
I.9.	Courbe contrainte-déformation en compression simple	14
I.10.	Comportement du béton en traction simple	15
I.11.	À gauche, photo du bâtiment WINDSOR à Madrid après l'incendie. À droite, dessous du tablier du pont à Bruxelles après l'incendie	17
I.12.	Exemples de désordres de différentes classes, a/ écaillage superficiel, b/disparition du béton d'enrobage des armatures, c/ les armatures sont totalement dégagées et la perte de l'épaisseur de béton atteint 50%	19
I.13.	Evolution des quantités de phase d'une pâte de ciment durcie au cours de l'échauffement	20
I.14.	Observation au Microscope Electronique à Balayage de deux échantillons de pâte de ciment, à droite : pâte de ciment à température ambiante avec un grossissement de 400, à gauche : pâte de ciment à 1000 °C avec un grossissement de 150	21
I.15.	Courbes ATD de quatre types de granulats (10°C/min)	22
I.16.	Comparaison de la structure d'un BHP avant et après l'échauffement à 600 °C	23
I.17.	Perte de masse des bétons déterminées durant l'échauffement	24
I.18.	Evolution de la porosité du béton avec la température	25
I.19.	Evolution de la perméabilité intrinsèque résiduelle des bétons en fonction de la température	26
I.20.	Evolution de la conductivité thermique de différents bétons avec la température	27
I.21.	Variation de la chaleur spécifique en fonction de la température	28
I.22.	Variation de la diffusivité thermique de différents types de béton avec la température	29
I.23.	Evolution de la résistance en compression relative des bétons avec la température	31
I.24.	Influence du type de granulats sur l'évolution de la résistance en compression du béton avec la température	33
I.25.	Influence des additions sur la résistance en compression résiduelle en fonction de la température pour des bétons courants et des bétons à hautes performances	34
I.26.	Influence des conditions de la réalisation des essais sur la résistance en compression	35
I.27.	Effet de la vitesse de montée en température sur l'évolution de la résistance en compression du béton avec la température	36
I.28.	Evolution de la résistance en compression résiduel et relative des différents types de béton avec la température	37
I.29.	Evolution de la résistance résiduelle en traction avec la température	38



Liste des figures

I.30.	Evolution de la résistance à la traction du béton mesurée par essai de fendage après refroidissement	39
I.31.	Evolution de la résistance à la traction résiduelle et relative du béton âge 7, 28, 90 et 365 jours soumis à différentes températures	40
I.32.	Evolution des modules d'élasticité résiduels et des modules d'élasticité résiduels relatifs à différentes températures	42
I.33.	Evolution des modules d'élasticité apparents et des modules d'élasticité apparents relatifs déterminés à chaud à différentes températures	43
I.34.	Evolution du module d'élasticité apparents et des modules d'élasticité apparents relatifs obtenus à chaud et résiduelles	44
I.35.	Module d'élasticité résiduel du béton chauffé à une vitesse de 0.1, 1 et 10°C/min à différentes températures	45
I.36.	Evolution avec la température du module d'élasticité relatif d'un béton en fonction de la nature du granulat (calcaire et silico-calcaires)	46
I.37.	Evolution du module d'élasticité résiduel du béton avec la température et à différents âges (7, 28, 90, et 365 jours)	47
I.38.	Evolution des modules d'élasticité apparents et des modules d'élasticité apparents relatifs obtenus sur deux bétons fibrés et non fibrés	48
I.39.	Dilatation thermique de pâte de ciment durcie selon quatre différents travaux	49
I.40.	Evolution de la dilatation thermique de différents types de roches avec la température	50
I.41.	Déformation thermique de quatre différents bétons confectionnés avec des granulats calcaires et silico-calcaires	51
I.42.	Déformation thermique (DT), déformation thermique sous charge (DTSC) et déformation thermique transitoire (DTT) déterminées sur les bétons BO et BHP avec granulats calcaires, et BHP avec granulats silico-calcaires . .	53
 CHAPITRE II : MATERIAUX TESTES ET PROGRAMME EXPERIMENTAL		
II.1.	Différents granulats utilisés, GC: granulats calcaires, GBC: granulats de brique concassée, SS : sable siliceux, SC : sable calcaire	60
II.2.	Courbes granulométriques du sable, gravillon et gravier	61
II.3.	Courbe granulométrique de granulats de brique concassée	62
II.4.	Courbe granulométrique de du sable concassé	62
II.5.	Conservation des éprouvettes immergées dans l'eau	67
II.6.	Dispositifs de chauffage	72
II.7.	Cycles de chauffage-refroidissement (vitesse de chauffage 3°C/min)	73
II.8.	Disposition des éprouvettes dans les fours	74
II.9.	Résistance en compression moyenne à 28 jours des bétons de l'étude	76
II.10.	Eprouvette mise en place sur la presse hydraulique pour déterminer la résistance en compression	77
II.11.	Eprouvette mise en place dans l'appareil pour déterminer la résistance en flexion (charge centrée en un point)	78
II.12.	Résistance à la flexion moyenne à 28 jours des B1-GO, B2-GO et B3-GO	79
II.13.	Echantillons utilisés pour la mesure de la porosité à l'eau	82
II.14.	Dispositif de la mesure de la porosité du béton	84
II.15.	Pied à coulisse digital	84
II.16.	Microscope optique Magnit 24 ^x MPB-2	86
II.17.	Vue d'ensemble du microscope électronique à balayage	87
II.18.	Ensemble des radiations pouvant être émises lors de l'interaction entre le	



Liste des figures

	faisceau et l'échantillon	88
II.19.	Schémas de principe du Microscope électronique à balayage	89
II.20.	Courbe des différents cycles de chauffage	90
CHAPITRE III : PRESENTATION ET ANALYSE DES RESULTATS		
III.1.	État des granulats calcaires après chauffage à 900°C	98
III.2.	Perte de masse des différents types de granulats	100
III.3.	Perte de masse des différents types de granulats à 700°C, 750°C, 800°C, 850°C et 900°C	101
III.4.	Evolution de la porosité des granulats avec température	102
III.5.	Evolution de la masse volumique des granulats avec température	103
III.6.	Evolution du coefficient d'absorption des granulats avec température	104
III.7.	Évolution de la perte de masse en fonction de la température pour les bétons B1-GO, B2-GO et B3-GO	105
III.8.	Évolution de la porosité à l'eau des bétons de granulats ordinaires en fonction de la température	107
III.9.	Évolution de densité apparente des bétons de granulats ordinaires en fonction de la température	108
III.10.	Variation du volume apparent des bétons de granulats ordinaires avec la température	109
III.11.	Effet de la température sur la vitesse des ondes soniques des bétons de granulats ordinaires.	111
III.12.	Evolution de la résistance résiduelle et relative en compression des bétons de granulats ordinaires en fonction de la température	113
III.13.	Évolution de la résistance à la flexion des bétons de granulats ordinaires en fonction de la température	116
III.14.	Évolution de la perte de masse en fonction de la température pour les bétons B1-SC, B2-SC et B3-SC	117
III.15.	Évolution de la porosité à l'eau des bétons à base de sable concassé en fonction de la température	118
III.16.	Évolution de densité apparente des bétons à base de sable concassé en fonction de la température	119
III.17.	Variation du volume apparent des bétons à base de sable concassé avec la température	120
III.18.	Effet de la température sur la vitesse des ondes soniques des bétons à base de sable concassé.	121
III.19.	Evolution de la résistance résiduelle et relative en compression des bétons à base de sable concassé en fonction de la température	122
III.20.	Évolution de la perte de masse en fonction de la température pour les bétons B1-BC, B2-BC et B3-BC	124
III.21.	Évolution de la porosité à l'eau des bétons à base de sable concassé en fonction de la température	125
III.22.	Évolution de la densité apparente des bétons à base de sable concassé en fonction de la température	126
III.23.	Variation du volume apparent des bétons à base de sable concassé avec la température	127
III.24.	Effet de la température sur la vitesse des ondes soniques des bétons à base de sable concassé.	128
III.25.	Evolution de la résistance résiduelle et relative en compression des bétons à base de sable concassé en fonction de la température	130



Liste des figures

III.26.	Observations à l'œil nu de l'évolution de la dégradation des bétons B1-GO, B1-BC et B1-SC après les cycles de chauffage de 400°C, 600°C et 900°C	132
III.27.	Décarbonatation des granulats calcaires après le cycle de 900°C	133
III.28.	Fissuration à la surface des éprouvettes de B3'-GO après traitement thermique à 250°C, 400°C et 600°C	134
III.29.	Ecaillage de quelques éprouvettes après chauffage à 900°C	135
III.30.	Liaison entre les différents granulats et la pâte de ciment	136
III.31.	L'aspect des fissurations après l'essai de compression des éprouvettes chauffées à 400°C, 600°C et 900°C	139
III.32.	Observation au microscope optique des fissures de faible ouverture du B3-GO après chauffage à 150°C	140
III.33.	Observations au MEB d'échantillons de B3-BC chauffés à 150°C, 250°C, 400°C et 600°C	142

CHAPITRE IV : ANALYSE COMPARATIVE ET RELATION DES PROPRIETES PHYSIQUES ET MECANIQUES DES DIFFERENTS BETONS

IV.1.	Évolution de la perte de masse des bétons en fonction de la température	147
IV.2.	Évolution de la porosité à l'eau des différents types de bétons	149
IV.3.	Évolution de la densité apparente des différents bétons en fonction de la température	151
IV.4.	Variation du volume apparent des différents bétons	152
IV.5.	Effet de la température sur la vitesse des ondes soniques	154
IV.6.	Evolution de la résistance en compression avec la température	156
IV.7.	Faciès de rupture au sein du béton B3-BC	157
IV.8.	Clichés au microscope optique des bétons B3-GO, B3-BC et B3-SC après le chauffage à 250°C	158
IV.9.	Evolution de la résistance en compression en fonction de la perte de masse	160
IV.10.	Evolution de la résistance en compression en fonction de la porosité	161
IV.11.	Evolution de la résistance en compression en fonction de la densité.	162
IV.12.	Evolution de la résistance en compression en fonction de la vitesse des ondes soniques	164
IV.13.	Evolution de la porosité en fonction de la perte de masse	165
IV.14.	Evolution de la densité en fonction de la perte de masse	167
IV.15.	Evolution de la vitesse des ondes soniques en fonction de la porosité	168



Liste des Notations

CSH	Silicate de Calcium Hydraté
Ca(OH ₂)	Portlandite
CaO	Chaux
MEB	Microscope Électronique à Balayage
R _c	Résistance en Compression
BHP	Béton Haute Performance
DTSC	Déformation Thermique Sous Charge
DT	Déformation Thermique
DTT	Déformation Thermique Transitoire
E/C	Eau / Ciment
RILEM	Réunion Internationale des Laboratoires d'Essais et de Recherche sur les Matériaux et les Constructions
B1-GO, B2-GO et B3-GO	Béton de Granulats Ordinaires (granulats calcaires et sable siliceux)
B1-SC, B2-SC et B3-SC	Béton à base de Sable Calcaire (granulats calcaires et sable calcaire)
B1-BC, B2-BC et B3-BC	Béton confectionné avec granulats de Brique Concassée (70% granulats calcaires, sable siliceux et 30% granulats de brique concassée)
F_c	La contrainte de rupture
F_{max}	La charge à la rupture en compression
S	La surface de la section transversale de l'éprouvette
R_f	La contrainte de rupture en traction par flexion
F	La charge maximale appliquée par la presse sur l'éprouvette prismatique
l	La longueur entre les deux appuis
d_1 et d_2	Les dimensions de la section transversale de l'éprouvette prismatique
dm	Perte de masse
m_i	Masse initiale
m_t	Masse après chauffage
P	La porosité à l'eau
ρ_{app}	La masse volumique apparente
M_{sec}	La masse de l'échantillon à l'état sec
M_{sat}^{imm}	La masse de l'échantillon saturé immergé
M_{sat}	La masse de l'échantillon saturé d'eau
V	La vitesse des ondes soniques
t	Le temps de propagation



INTRODUCTION

GENERALE



INTRODUCTION GENERALE

Les qualités de résistance mécanique, de facilité d'utilisation et de durabilité font du béton l'un des matériaux les plus utilisés pour la réalisation de bâtiment et ouvrages de génie civil. L'utilisation des bétons à haute performance, matériau récent, a permis d'élargir le domaine d'emploi des bétons. Ces bétons sont différenciés des bétons ordinaires par leur faible porosité et leur forte densification ce qui leur offre de bonnes caractéristiques mécaniques et une meilleure durabilité.

Malgré le bon comportement des bétons ordinaires et des BHP à la température ambiante, ces bétons peuvent présenter une instabilité thermique sous diverses formes et montrent de forts endommagements de leurs structures lorsqu'ils sont soumis à des températures élevées comme lors d'un incendie ou un accident nucléaire.

Soumis à un incendie, le béton se dégrade régulièrement de l'extérieur vers le cœur pendant la durée de l'échauffement. Ce processus de dégradation conduit à la dégradation des propriétés physiques, des propriétés de transfert et des performances mécaniques du béton du fait de la modification de sa microstructure. Ces endommagements peuvent affecter la stabilité des ouvrages et compromettre l'évacuation des personnes et la sécurité des secours. De plus, une réparation et une rénovation coûteuses de la structure endommagée par un incendie doivent souvent être effectuées.

Plusieurs études de recherche ont été réalisées ces dernières années sur l'analyse, la compréhension et la modélisation de l'endommagement thermique du béton. Ces travaux de recherche ont permis d'améliorer la compréhension de l'évolution des propriétés physico-chimiques et microstructurales de la pâte de ciment. Cependant, moins d'études se sont intéressées à l'étude de l'influence de la nature des granulats sur le comportement du béton porté à haute température.

Le travail de doctorat présenté dans ce manuscrit a pour premier objectif d'améliorer la compréhension du comportement des bétons, béton ordinaire et béton à haute performance, exposés à hautes températures. Il pose le lien entre la formulation du béton et son comportement à de hautes températures. En effet, cette thèse contribue, de façon expérimentale, aux autres recherches déjà réalisées auparavant dans la littérature.



Le deuxième objectif de cette étude consiste, dans un premier lieu, à étudier l'effet des hautes températures sur les propriétés physiques et l'état macroscopique des différents granulats utilisés (granulats calcaires, granulats de brique concassée, sable siliceux et sable calcaire). En second lieu, il consiste à comparer les comportements des différents bétons confectionnés avec ces granulats. Trois groupes ont été formulés. Le premier groupe de béton est formulé avec des granulats calcaires et du sable siliceux (dits granulats ordinaires), le deuxième groupe de béton est formulé avec des granulats calcaires et du sable calcaire et le troisième groupe de béton est formulé avec 70% de granulats calcaires, 30% de granulats de brique concassée et du sable siliceux.

Le manuscrit est composé de quatre chapitres.

Le premier chapitre est une analyse bibliographique des travaux de recherche sur le comportement du béton à haute température. Cette analyse est organisée en deux parties principales. La première partie a pour but principal de décrire le béton comme milieu poreux dans son état sein. Nous présentons 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.

Un intérêt particulier a été porté à la seconde partie de ce chapitre qui est un état de l'art des résultats des travaux menés sur l'étude du comportement des bétons exposés à des températures élevées. Une synthèse sur l'évolution avec la température des propriétés physiques, thermiques et mécaniques est faite en fonction des différents paramètres influençant le comportement du béton. Ces résultats sont nécessaires à la maîtrise du comportement d'une structure en béton sous incendie.

Le deuxième chapitre décrit le programme expérimental défini dans le cadre de ce travail de thèse. Dans ce chapitre, nous présentons les formulations des différents bétons d'étude avec la nature, le dosage et les caractéristiques des constituants utilisés. Le mode d'élaboration et de conservation de ces bétons ainsi que les différents essais de caractérisation des propriétés physiques et mécaniques, avant et après sollicitation thermique, sont également présentés.

Le troisième chapitre débute par la présentation des observations macroscopiques des désordres des différents granulats soumis aux différents cycles de chauffage-refroidissement jusqu'à 900°C. Puis sont présentés les résultats de perte de masse, porosité et masse volumique des granulats en fonction de la température de chauffage. Ensuite, nous présentons



les résultats des différents essais de caractérisation de la perte de masse, la porosité à l'eau, la densité apparente, la variation du volume apparent, la vitesse des ondes soniques et la résistance en compression des différents bétons avant et après chauffage. La dernière partie de ce chapitre repose sur des observations macroscopiques, mésoscopiques et microscopiques des désordres et fournit des renseignements intéressants sur la propagation des fissures dans le béton avec l'augmentation de la température.

Le dernier chapitre de cette thèse est consacré à une étude comparative entre les trois groupes de bétons. Ce complément d'études a pour but d'observer l'influence des granulats calcaires et de brique concassée sur le comportement du béton à haute température. Ensuite, nous faisons le lien entre les différents résultats des propriétés physiques et mécaniques obtenus.

Enfin, une conclusion générale permet de faire une synthèse des principaux résultats obtenus sur l'influence de la température sur l'évolution des propriétés physiques et mécaniques des bétons confectionnés par différents types de granulats.

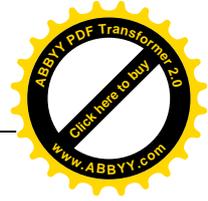


Chapitre

I

ETUDE

BIBLIOGRAPHIQUE



I.1 INTRODUCTION

Le béton est un matériau composite, formé par le mélange de ciment, de sable, de gravillon, d'eau et éventuellement des ajouts. En raison de son hétérogénéité, le béton s'avère un matériau complexe, il subit des transformations physico-chimiques et des changements des propriétés mécaniques lorsqu'il est soumis à une élévation de température.

L'objectif de ce chapitre est de présenter l'étendue des connaissances actuelles sur le comportement du béton porté à une température élevée. La première partie portera sur la description détaillée de la pâte de ciment. Cette description débutera par une présentation globale des éléments constitutifs de la pâte de ciment, puis se poursuivra par une compréhension du rôle joué par l'eau dans cette structure, et par une analyse de l'interface pâte-granulats. Ensuite, on donnera une description du comportement mécanique du béton à température ambiante.

La deuxième partie comporte une synthèse bibliographique sur les évolutions des caractéristiques hydriques, thermiques 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 durci est un matériau hétérogène multiphasique constitué d'un mélange de granulats, occupant 60 à 78 % du volume du béton, et de pâte de ciment hydraté qui représente 22 à 40% du volume total du béton. Chaque constituant joue un rôle bien défini, celui de remplissage atténuateur de variations volumiques (en retrait et en montée en température et de source de résistance mécanique pour les granulats) et celui de liant, et confère au matériau béton ses propriétés de rigidité et de résistance pour la pâte de ciment [De Sa, 2007].

I.2.1 Microstructure de la pâte de ciment

Le ciment généralement utilisé dans le génie civil est le ciment « Portland » qui est composé de clinker, de gypse et éventuellement certains produits d'addition (laitier de haut fourneau, les cendres volantes, etc.). Le clinker est un produit obtenu en cuisant, vers 1450°C, des mélanges appropriés de calcaire et d'argile. La fonction du gypse dans le ciment Portland est d'éviter le phénomène de fausse prise du clinker.

Les principaux constituants d'un ciment Portland sont rassemblés dans le tableau I.1.

Tableau I.1. Principales phases du ciment Portland.

	<i>Composition</i>	<i>Abréviation</i>	<i>Proportion</i>
Silicate tricalcique	$3\text{CaO}.\text{SiO}_2$	C_3S	60 – 65
Silicate bicalcique	$2\text{CaO}.\text{SiO}_2$	C_2S	20 – 25
Aluminate tricalcique	$3\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3$	C_3A	8 – 12
Alumino-ferrite tétracalcique	$4\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3.\text{Fe}_2\text{O}_3$	C_4AF	8 – 10
Gypse	CaSO_4	-	3 – 8

En présence d'eau, ces constituants forment des produits d'hydratation qui donnent, avec le temps, une masse ferme et dure : la pâte de ciment hydraté.

Les principaux produits de l'hydratation du ciment sont :

- **Le silicate de calcium hydraté ou gel CSH** : c'est le principal constituant du ciment Portland hydraté. 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** : elle représente environ 25% de la pâte de ciment. Ses cristaux de taille importante et sa grande solubilité dans l'eau sont susceptibles de limiter la résistance en compression du béton et de diminuer son durabilité.
- **D'autres hydrates** : il s'agit des aluminates de calcium hydraté et de l'étringite.

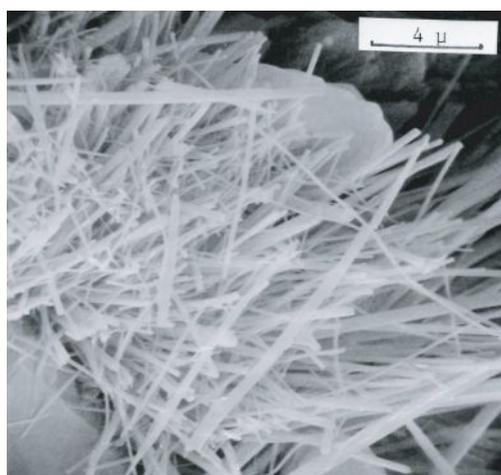


Figure I.1. Image de silicate de calcium hydraté obtenue au MEB
[Mehta et Monteiro, 2006].



Figure I.2. Image de Portlandite obtenue au MEB [Mehta et Monteiro, 2006].

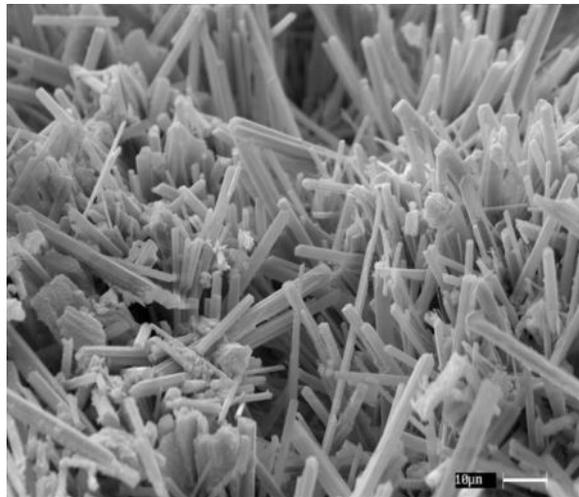


Figure I.3. Image des cristaux d'ettringite obtenue au MEB [Mehta et Monteiro, 2006].

De nombreux modèles existent dans la littérature scientifique pour décrire la structure et la morphologie de silicate de calcium hydraté CSH qui représente la structure de la pâte de ciment. Le modèle proposé par Feldman et Sereda est le plus à même de justifier la plupart des comportements mécaniques du matériau (figure I.4).

Les hydrates seraient constitués des particules de CSH modélisées, dans ce modèle, sous forme de feuillets simples mal cristallisés qui créent des espaces interfoliaires au cours de leur rapprochement. Ces feuillets peuvent avoir un mouvement relatif ou la pénétration et le départ d'eau des espaces interfoliaires sont possible.

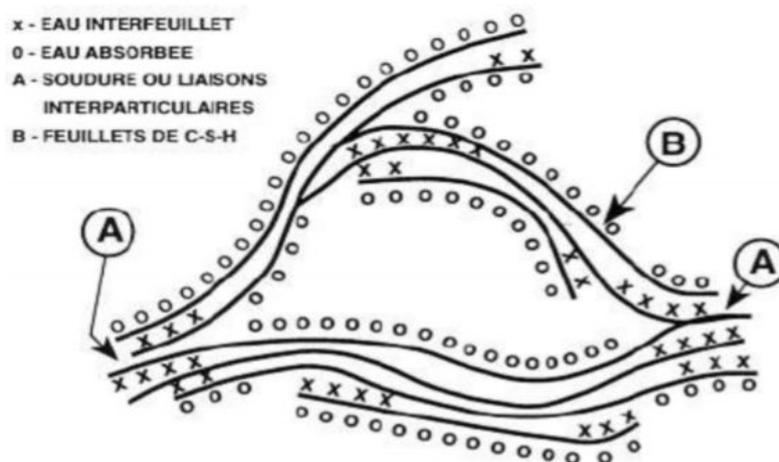


Figure I.4. Représentation schématique de la microstructure du gel de CSH [Reynouard et Pijaudier-Cabot, 2005].

I.2.2 Eau dans la microstructure du béton

L'eau est une composante essentielle pour la formation de chaque matériau cimentaire. Elle a essentiellement deux fonctions, une fonction chimique en tant que liant de la poudre de ciment, et une fonction physique qui permet, lors du gâchage, d'accroître la fluidité et la maniabilité facilitant une mise en place plus aisée du matériau. L'eau, présente dans la pâte de ciment, se trouve sous plusieurs formes.

I.2.2.1 L'Eau libre et capillaire

Elle est constituée de la phase condensée remplissant le volume poreux dans les zones qui ne sont pas sous l'influence des forces superficielles. Cette forme d'eau est séparée de la phase gazeuse par des ménisques, elle est la première à s'évacuer ou à s'évaporer lors d'un séchage.

I.2.2.2 L'Eau adsorbée

Cette forme d'eau est liée à la surface des pores solides sous l'action des forces d'attraction de type Van Der Waals suite à la condensation de la vapeur d'eau présente dans le matériau. Les forces d'adsorption décroissent à mesure que l'on s'éloigne de la surface des éléments solides.

Sur la face externe des lamelles de CSH, l'eau est librement adsorbée jusqu'à une épaisseur de 5 molécules. La molécule d'eau a un diamètre d'environ 2.6 \AA , ce qui donne une épaisseur de la couche d'adsorption de 13 \AA , donc il faudrait que l'espace inter-lamellaire soit de 26 \AA pour que l'adsorption physique se déroule de manière libre. Cette espace est en moyenne de 17 \AA , l'eau ne peut être adsorbée librement. Cette région est appelée zone d'adsorption

empêchée. Dans ces zones, l'eau fortement adsorbée est sous une forte pression de l'ordre de 130 Mpa, dite pression de disjonction. Cette eau est ainsi un élément structural à part entière du matériau et elle est capable de transmettre localement les contraintes [Reynouard et Pijaudier-Cabot, 2005].

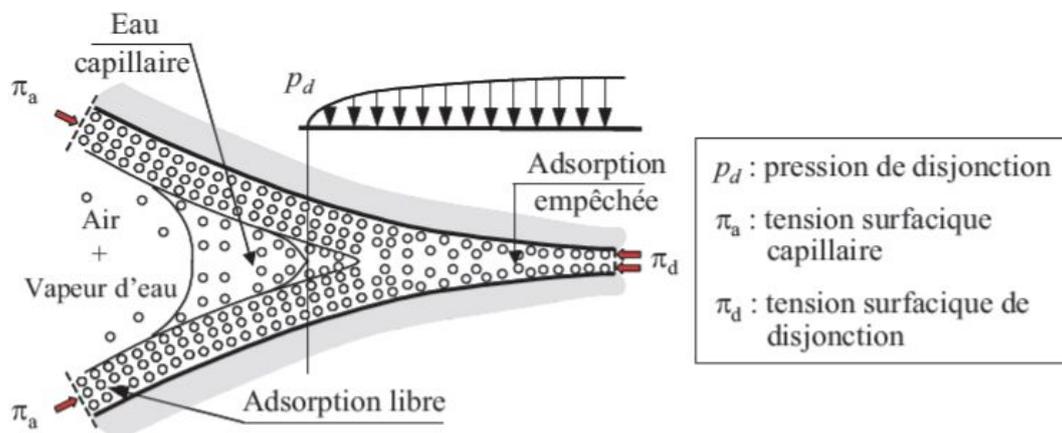


Figure I.5. Schéma de principe de la zone d'adsorption empêchée [Reynouard et Pijaudier-Cabot, 2005].

1.2.2.3 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.

1.2.3 Structure poreuse du béton

La pâte de ciment présente une porosité à différentes échelles d'observation qui varie d'un béton à un autre de façon significative. La structure poreuse, la connectivité, la distribution et la taille des pores jouent un rôle très important non seulement sur la résistance mécanique, mais aussi sur les phénomènes de transport et d'interaction avec le milieu extérieur.

Deux familles de taille de pores sont à considérer :

- **Les pores capillaires** : ils représentent les espaces intergranulaires et sont directement liés au rapport Eau/Ciment. Le volume d'eau fourni pour la fabrication du béton, en raison de maniabilité, est supérieur au volume nécessaire pour l'hydratation. Par conséquent, cet excédent d'eau s'évacue par séchage au cours du temps et laisse des pores capillaires disponibles pour la circulation de gaz.
- **Les pores des hydrates** : ces pores sont généralement des caractéristiques intrinsèques aux hydrates, 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.).

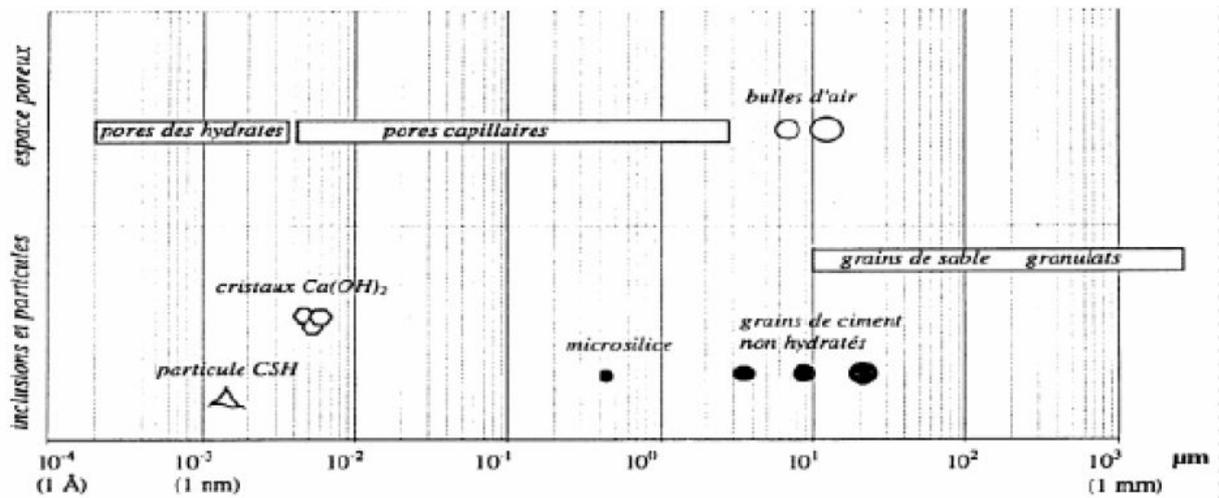


Figure I.6. Dimensions des pores et phases solides présentes dans le béton [Tsimbrovska, 1998].

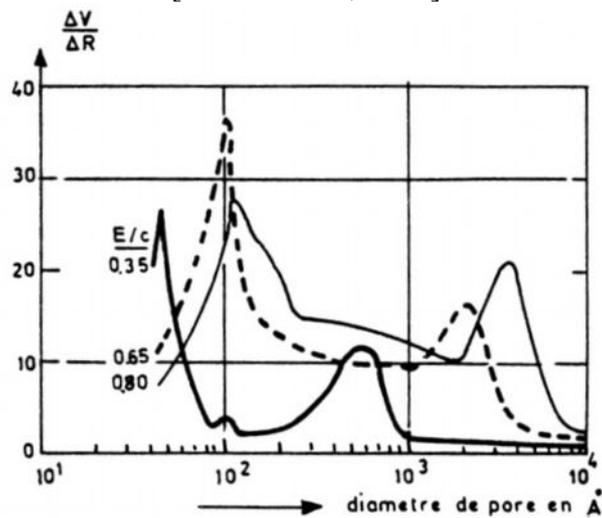


Figure I.7. Distribution porosimétrique d'un béton en fonction du rapport E/C [Malier, 1992].

I.2.4 Microstructure de l'interface pâte-granulats

Cette interface, appelée aussi auréole de transition, est la partie la plus poreuse, la mieux cristallisée et moins résistante que la matrice cimentaire. De ce fait, elle constitue le point faible des bétons soumis aux sollicitations mécaniques ou thermiques et les premières fissures se produisent à ce niveau. L'épaisseur de cette zone augmente avec la taille du granulats et le rapport E/C, mais reste dans tous les cas inférieure à 50 μm .

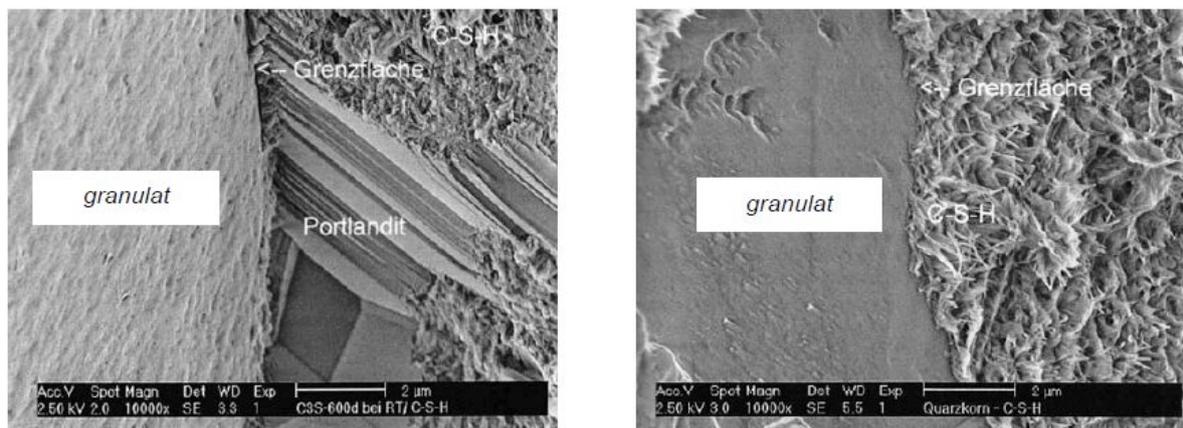


Figure I.8. Microstructure de la zone de contact entre la pâte de ciment et le granulats, à gauche : Béton sans fumée de silice - à droite : Béton avec fumée de silice [Stark et Wicht, 2001].

La qualité de la zone de transition dépend aussi de la nature des granulats. 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 résistante que la pâte de ciment. Par ailleurs, 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 COMPORTEMENT MECANIQUE DU BETON A TEMPERATURE AMBIANTE

Le béton se caractérise, pour la partie mécanique, par la résistance à la compression, généralement considérée comme sa propriété importante, et par la résistance à la traction. Cette partie permet de présenter un aperçu du comportement mécanique du béton à température ambiante sous sollicitation de compression et de traction.

I.3.1 Comportement en compression

La résistance en compression est le paramètre de base pour le béton, elle définit souvent une classe de résistance dont sont censées découler beaucoup d'autres propriétés.

Le comportement de béton en compression est traduit principalement par une relation contrainte-déformation, cette relation est présentée schématiquement à la figure I.9.

On peut distinguer, à déformation croissante, 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.

La phase de développement des surfaces de fracture et d'une fissuration plus ou moins généralisée, c'est-à-dire la propagation progressive de la rupture.

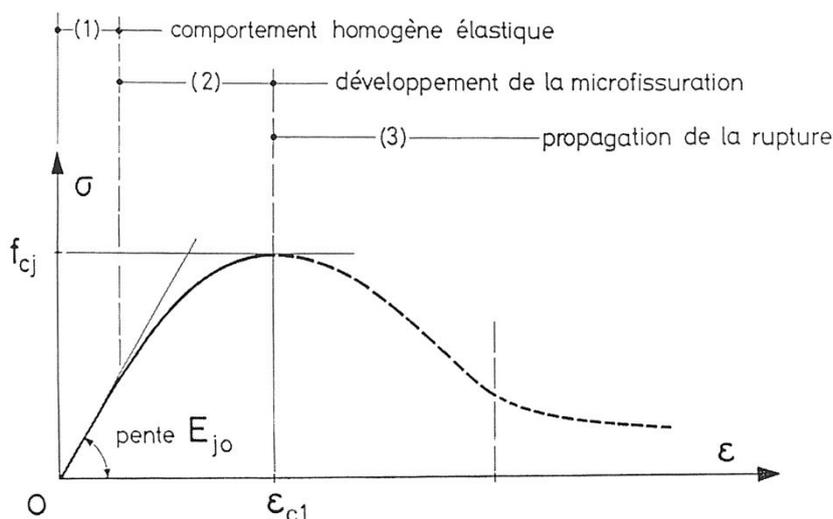


Figure I.9. Courbe contrainte-déformation en compression simple [Reynouard et Pijaudier-Cabot, 2005].

I.3.2 Comportement en traction

C'est le second paramètre de base, avec la résistance en compression, qui caractérise les propriétés mécaniques du béton. La figure I.10 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].

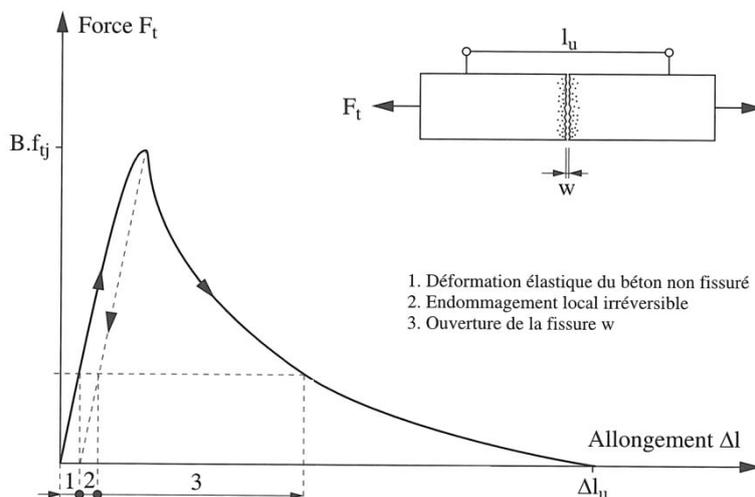


Figure I.10. Comportement du béton en traction simple [Reynouard et Pijaudier-Cabot, 2005].

I.4 COMPORTEMENT AU FEU DES STRUCTURES EN BETON LORS D'INCENDIE

Les qualités de résistance mécanique, de facilité d'utilisation, de durabilité et la très bonne tenue au feu, font du béton le matériau de construction par excellence. Mais lorsqu'il est exposé au feu, le béton perd graduellement sa résistance mécanique et il se dégrade régulièrement de l'extérieur vers le cœur. Cependant, ce processus de dégradation est suffisamment lent et progressif pour permettre un maintien de la stabilité des structures pendant un laps de temps, le plus souvent, suffisant à l'évacuation des personnes, mais aussi, pour permettre de retrouver après extinction de l'incendie un ouvrage endommagé mais réparable [Touidjine, 2011].

Les dégradations de béton par incendie sont relativement rares pour les ouvrages d'art et affectent d'avantage les bâtiments. A titre d'exemple, l'incendie du gratte-ciel Windsor de 29 étages à Madrid, la tour est resté debout malgré le feu qui s'est propagé à de nombreux étages. Le feu à démarré au 21^{ème} étage et s'est rapidement propagé, il s'est achevée après 26 heures de lutte laissant un bâtiment complètement brûlé [Denoël, 2007].

Néanmoins, il existe quelques cas d'incendie sous des ponts en béton qui ont provoqué un endommagement significatif du matériau. Le viaduc des trois Fontaines, construit en 1981 à Bruxelles, a subi l'agression d'un large feu localisé durant la nuit du 6 au 7 décembre 2003. Une température de 750°C été atteinte à la surface des poutres et le tablier. Les poutres présentent à plusieurs endroits des éclatements de béton au droit des semelles et des âmes. A certains endroits, des armatures et des torons précontraints sont visibles. En face inférieure de la dalle, des éclatements de béton (détachement de morceaux) sont aussi visibles [Denoël, 2007].



Figure I.11. À gauche, photo du bâtiment Windsor à Madrid après l'incendie. À droite, dessous du tablier du pont à Bruxelles après l'incendie [Denoël, 2007].

Dans le cas des tunnels routiers, les températures qui s'installent lors des incendies peuvent être supérieures à 1000°C [Denoël, 2007]. On peut citer l'incendie important du tunnel sous la Manche, le 18 Novembre 1996. Cet ouvrage a été soumis à un feu d'une durée de près de 9 heures et une température maximale de près de 1100°C.

Après l'incendie du tunnel du Mont-Blanc (24 mars 1999), une investigation in situ, qui a été complétée par une étude en laboratoire, a été menée par le Laboratoire Central des Ponts et Chaussées LCPC [Divet et al., 2005].

Cette investigation a pour objectif d'évaluer les caractéristiques mécaniques résiduelles du béton ainsi que de connaître la profondeur de l'endommagement dans le but d'optimiser les travaux de réparations.

Les différents faciès de dégradation du béton sont regroupés dans le Tableau I.2.

Tableau I.2. Classification des dégradations d'ouvrage en béton par incendie [Divet et al., 2005].

Classe de désordres	0	1	2	3	4
Vue en élévation d'une poutre sous dalle					
Coupe					
Désordres observés	Aucun. état de référence de béton sain.	Dépôts de suies, coloration, traces de microfissures non orientées (faïençage).	Ecaillage superficiel (0 à 10 mm), Fissures nettes et orientées (>0,5 mm).	Disparition du béton d'enrobage, Les armatures sont visibles, Le béton sous-jacent est légèrement feuilleté.	Les armatures sont totalement dégagées et présentent des déformations plastiques, Une forte épaisseur de béton a disparu ou est feuilletée et a perdu sa cohésion.



a- classe 2

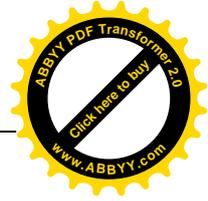


b- classe 3



c- classe 4

Figure I.12. Exemples de désordres de différentes classes, a/ écaillage superficiel, b/disparition du béton d'enrobage des armatures, c/ les armatures sont totalement dégagées et la perte de l'épaisseur de béton atteint 50% [Divet et al., 2005].



I.5 COMPORTEMENT DU BETON A HAUTE TEMPERATURE

Lorsque le béton est exposé à des hautes températures, le chargement thermique imposé conduit à des transferts thermiques et hydriques au sein de la structure en béton induisant des phénomènes très complexes.

Parmi les plus importants figurent la modification de la teneur en eau, la décomposition chimique de la pâte de ciment et le changement de pression interne. Ces mécanismes sont souvent considérés comme les principales causes des changements au niveau de la microstructure du béton qui entraînent des modifications des propriétés thermiques, hydriques et mécaniques.

Dans ce paragraphe, nous parlons des effets des hautes températures sur les éléments constitutifs et les principales propriétés physiques et thermiques du béton. Puis, nous attachons la plus grande attention sur ce que peuvent engendrer ces modifications sur le comportement mécanique et les déformations thermiques du béton.

I.5.1 Effets des hautes températures sur les composants et les propriétés physiques du béton

I.5.1.1 Evolution de la pâte de ciment

Les principales modifications physico-chimiques se passent dans la pâte de ciment, en raison de la présence de l'eau sous différentes formes. Tous les changements commencent par l'évaporation de l'eau libre. Entre 40 et 105°C, l'eau libre et une partie de l'eau adsorbée s'échappent du béton [Felicetti et Gambarova, 2008], [Alonso et al., 2003-a]. L'ettringite se décompose avant que la température n'atteigne 100°C [Alonso et al., 2003-a]. Les hydrates commencent à se décomposer à partir de 110°C [Schrefler et al., 2003] et se poursuit jusqu'à 850°C [Bažant et Kaplan, 1996]. L'eau liée chimiquement commence alors à s'échapper du béton. A partir de 400°C, la Portlandite Ca(OH)_2 se décompose en chaux libre CaO et en eau qui s'évapore [Wetzig, 2001]. A partir de 1100°C s'amorce la fusion de la pâte de ciment [Alonso et al., 2003-a].

Il est possible d'étudier ces réactions quantitativement à l'aide de l'analyse thermodiffraction (technique de diffraction de neutrons). Cette technique permet de suivre les transformations de phases des principaux constituants de la pâte de ciment. La figure I.13 présente les résultats d'essai réalisé sur une pâte de ciment par Castellote [Castellote et al., 2004].

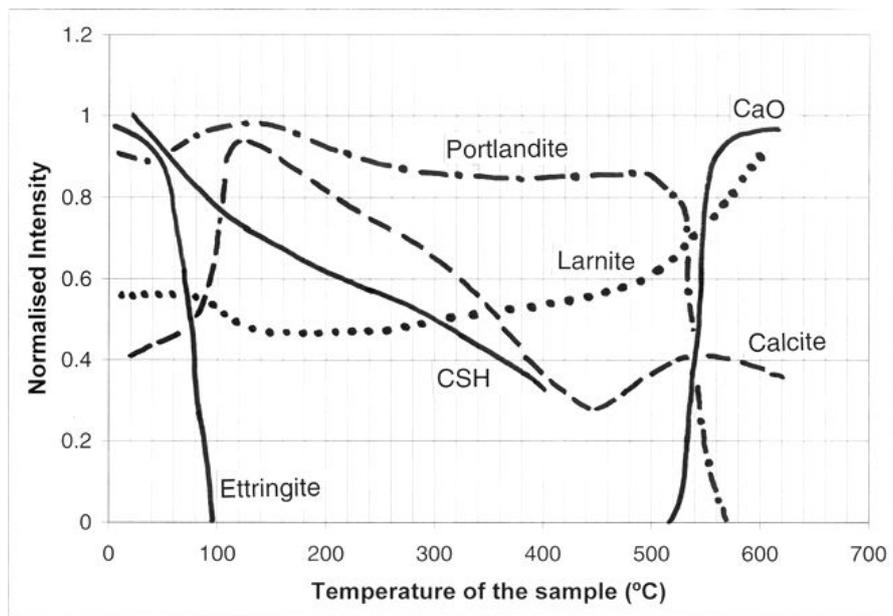


Figure I.13. Evolution des quantités de phase d'une pâte de ciment durcie au cours de l'échauffement. [Alonso et al., 2003-a].

L'observation des différentes courbes révèle une disparition complète de l'ettringite avant que le matériau atteigne 100°C. La déshydratation du gel CSH est progressive et commence avant 100°C. La Portlandite demeure stable au cours du chauffage, 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.

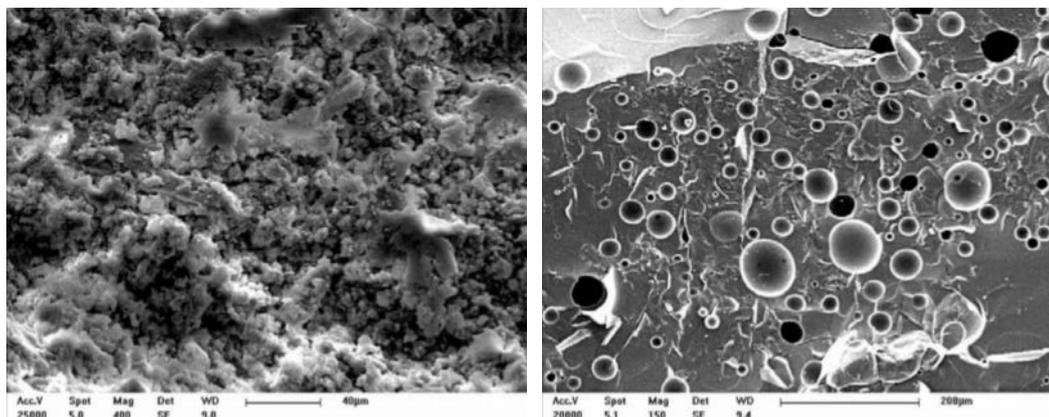


Figure I.14. Observation au Microscope Électronique à Balayage de deux échantillons de pâte de ciment, à droite : pâte de ciment à température ambiante avec un grossissement de 400, à gauche : pâte de ciment à 1000°C avec un grossissement de 150 [Divet et al, 2005].

La figure I.14 présente l'observation au MEB d'une pâte de ciment ordinaire à température ambiante et à 1000°C. La comparaison des deux photos met en évidence des modifications importantes de la microstructure de la pâte de ciment. La matrice cimentaire vitreuse présente

une macroporosité très importante, ce phénomène se produit au-delà de 1000°C et provient de la fusion puis du refroidissement de la pâte de ciment [Divet et al., 2005].

I.5.1.2 Evolution des granulats

Les granulats jouent un rôle important dans le béton car ils en constituent le squelette par lequel sont transmis les efforts. Sous l'effet de la température, les granulats se décomposent et subissent également des transformations chimiques et minéralogiques importantes qui modifient les caractéristiques micro-structurelles du matériau.

Généralement, la majorité des granulats utilisés pour la confection des bétons est stable jusqu'à 500°C [Felicetti et Gambarova, 2008]. La figure I.15 présente les résultats d'une analyse thermique différentielle (ATD) qui permet de déterminer, par des pics endothermiques et exothermiques, les températures auxquelles une instabilité peut survenir dans les granulats.

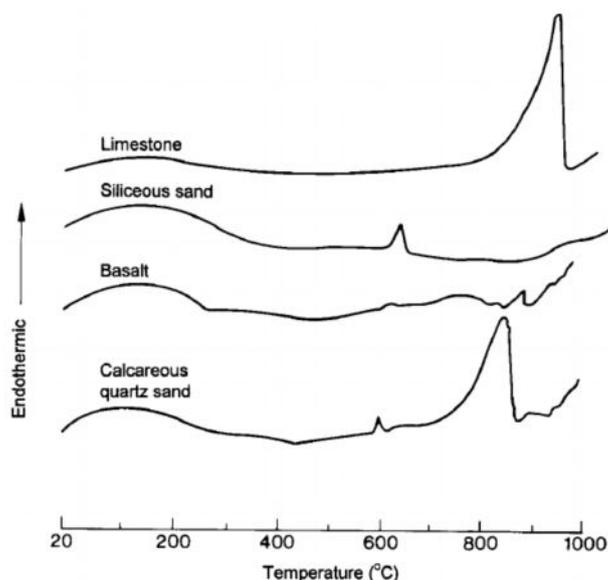
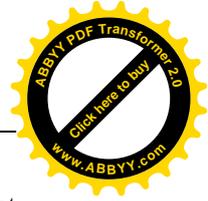


Figure I.15. Courbes ATD de quatre types de granulats (10°C/min) [Scherefleer et al., 2003].

Les granulats siliceux contiennent approximativement 20 % d'eau liée. Entre 120 et 600°C, cette eau est capable de se libérer partiellement en réduisant la résistance de ce matériau. En effet, le quartz présent dans les granulats siliceux est un édifice de tétraèdres (un atome de silicium entouré de quatre atomes d'oxygène) qui subit une légère rotation des liaisons pour former une structure cristalline de symétrie hexagonale à partir d'une température de 575°C. Cette variation de structure chimique de quartz (transformation du quartz- α en quartz- β) est accompagnée d'une dilatation de l'ordre de 1% à 5,7% [Alonso et al., 2003-a], [Scherefleer et



al., 2003], [Wetzig, 2001], [Felicetti et Gambarova, 2008]. Ces deux phénomènes peuvent provoquer l'endommagement de la structure du béton.

Les granulats calcaires présentent un comportement thermique stable jusqu'à une température de 650°C [Scherefleer et al., 2003]. Au-delà de cette température, le CaCO_3 se décompose (décarbonatation) en donnant du dioxyde de carbone (CO_2) et du monoxyde de calcium (CaO). Pendant le refroidissement, la chaux libre (CaO) peut réagir avec l'humidité pour donner la Portlandite $\text{Ca}(\text{OH})_2$ avec une augmentation de volume de 40 % [Alonso et al., 2003-a]. Cette réaction entraîne un accroissement de fissure et l'endommagement de la structure du béton, qui peut expliquer la diminution des résistances mécaniques résiduelles pour les bétons de granulats calcaires chauffés au-delà de 700°C.

I.5.1.3 Dégradation de l'interface pâte-granulats

Dans le béton, l'interface pâte/granulats est la partie la plus poreuse et la plus fragile. A haute température, cette partie se dégrade progressivement. Ceci est dû au départ de l'eau adsorbée entourant les granulats, qui favorise le développement des fissures au niveau de cette zone, et à la dilatation différentielle entre la pâte de ciment et les granulats.

La pâte de ciment se dilate jusqu'à la température de 150°C. Cette dilatation est supérieure à celle des granulats, donc les fissures se développent à l'interface pâte/granulats par décohesion (fissures tangentielles). Au-delà de 150°C, la matrice cimentaire subit un retrait tandis que les granulats subissent une expansion. Cette dilatation différentielle engendre des fissures radiales au sein de la matrice cimentaire [Hetteema, 1996].

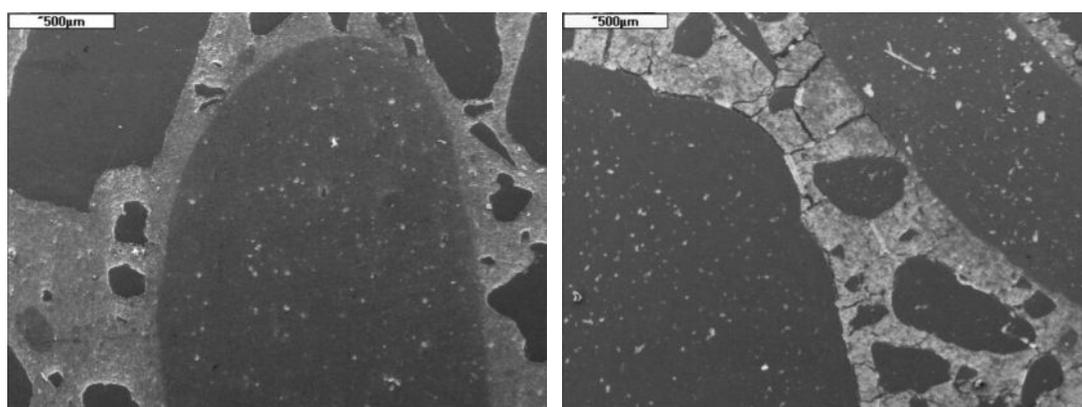


Figure I.16. Comparaison de la structure d'un BHP avant et après l'échauffement à 600°C.

[Hager, 2004].

I.5.1.4 Perte de masse

La masse du béton subit une perte de poids au cours du chauffage. Cette perte est due à l'évaporation de l'eau et la déshydratation progressive du gel CSH. Les travaux menés par Khoury [Khoury et Majorana, 2003], Lie [Lie et Kodur, 1995], Noumowé [Noumowe, 1995], Hager [Hager, 2004] et Kanema [Kanema et al., 2005] sur l'évolution de la perte de masse du béton avec la température montrent que la perte de masse commence à partir des températures supérieures à 100°C.

La figure I.17 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°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°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.

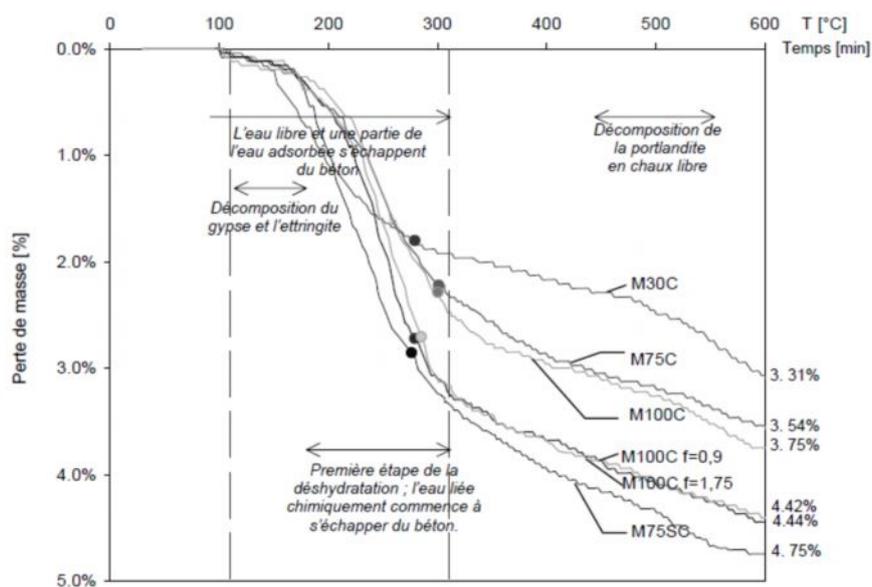
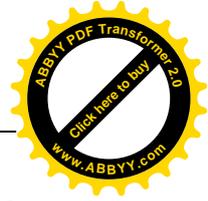


Figure I.17. Perte de masse des bétons déterminées durant l'échauffement [Hager, 2004].

I.5.1.5 Evolution de la porosité

La porosité d'une pâte de ciment est fortement modifiée avec la température. D'après Alarcon-Ruiz [Alarcon-Ruiz et al., 2002], elle passe de 22% pour un échantillon non chauffé à 40% pour un échantillon chauffé à 600°C. La synthèse des résultats obtenus par différentes hauteurs, Alarcon-Ruiz [Alarcon-Ruiz et al., 2002], Chan [Chan et al., 1996], Noumowé



[Noumowé et al., 2003], Alonso [Alonso et al., 2003-b] et Hager [Hager, 2004], indique que la porosité totale du béton augmente avec la température.

La figure I.18 montre la variation de la porosité totale en fonction de la température mesurée par Noumowé [Noumowe et al., 1996] sur un béton ordinaire ($R_c = 38,10$ MPa) et un béton de haute performance ($R_c = 61,10$ MPa).

Nous pouvons observer que la porosité totale augmente très peu entre la température ambiante et des températures de l'ordre de 120°C . Ceci confirme le fait qu'à ces températures l'eau libre s'est échappée mais la microstructure du béton n'est pas modifiée. A partir de 120°C , l'augmentation de la porosité est plus nette du fait de l'apparition de microfissures. Ces microfissures peuvent avoir pour origine la déshydratation de la pâte de ciment [Alonso et al., 2003-b] et l'incompatibilité de déformation des granulats et la pâte de ciment.

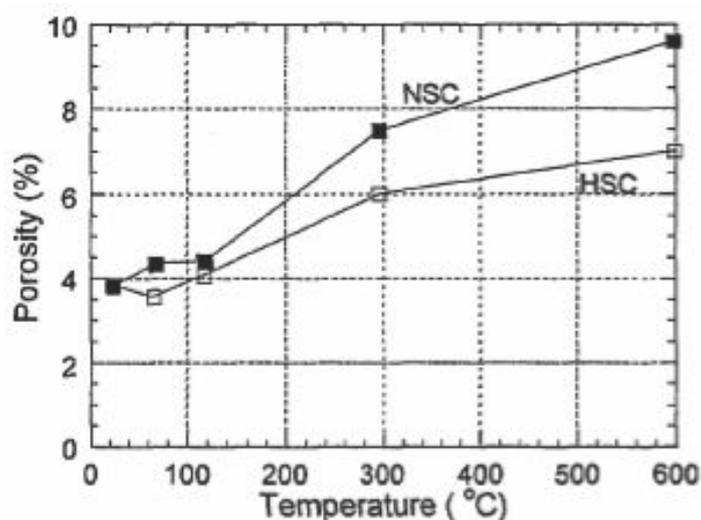


Figure I.18. Evolution de la porosité du béton avec la température [Noumowé et al., 1996].

I.5.1.6 Evolution de la perméabilité

La perméabilité d'un milieu poreux caractérise la capacité que possède ce milieu à se laisser traverser par un fluide sous un gradient de pression [Kanema et al., 2005]. Bien que cette perméabilité dépend fortement de la porosité du milieu poreux et d'autres paramètres, tel que la connectivité, la tortuosité ainsi que la constructivité du réseau poreux liée à la taille des pores, la perméabilité du béton dépend également de ses constituants [Choinska, 2006]. Elle est fonction du rapport E/C, qui est directement lié à la porosité capillaire, de la nature et de la quantité des granulats, qui peuvent modifier la tortuosité par la création de l'auréole de transition.

Certains résultats expérimentaux, Kanema [Kanema et al., 2005], Choinska [Choinska, 2006], Andrade [Andrade et al., 2003], Noumewé [Noumowe et al., 2009], Fares [Fares et al., 2009], ont montré que la perméabilité du béton subit un accroissement significatif quand la température dépasse 100°C.

La figure I.19 présente la variation de la perméabilité intrinsèque résiduelle du béton en fonction de la température obtenue par Kanema [Kanema et al., 2005]. Ils constatent que la perméabilité des bétons diminue à 150°C pour augmenter de manière exponentielle pour des températures supérieures. Ils attribuent la baisse de la perméabilité intrinsèque résiduelle à 150°C à la présence d'eau sous forme liquide dans les pores. L'augmentation de la perméabilité constatée entre 150 et 300°C est attribuée à un élargissement des pores capillaires tandis que celle observée entre 300 et 450°C est due à une détérioration de la matrice cimentaire.

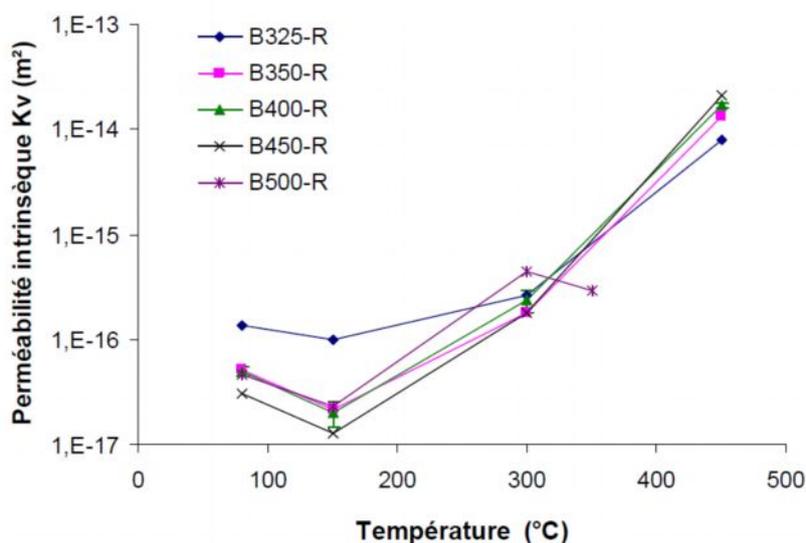


Figure I.19. Evolution de la perméabilité intrinsèque résiduelle des bétons en fonction de la température [Kanema et al., 2005].

I.5.2 Evolution des propriétés thermiques du béton avec la température

L'évolution de la distribution de température dans une structure est gouvernée en grande partie par les propriétés thermiques du matériau, particulièrement la capacité calorifique et la conductivité thermique. Cependant, la détermination de ces propriétés avec exactitude, dans le cas du béton, est très difficile, en raison de nombreux phénomènes qui se produisent au sein de la microstructure du béton.

I.5.2.1 La conductivité thermique

La conductivité thermique désigne l'aptitude que possède un matériau à conduire de la chaleur. Ce paramètre est prépondérant pour décrire la distribution de la température au sein du matériau lors du chauffage. La conductivité thermique du béton diminue, d'une manière générale, lorsque la température augmente. Ce comportement met en évidence la détérioration de la microstructure, les microfissures limitent les transferts de la chaleur.

Les principaux paramètres influençant l'évolution de la conductivité thermique sont : la teneur en eau, le type de granulats, le degré de saturation en eau liquide, la structure de l'espace poreux et la formulation du béton [Kodur et Sultan, 2003], [Gallé et al., 2003], [Noumowé et al., 2003], [Lie et Kodur, 1995].

La figure I.20 présente l'évolution de la conductivité thermique en fonction de la température pour différents types de béton. On constate sur cette figure que la conductivité thermique des bétons décroît avec l'élévation de la température. Ceci peut être attribué à la création des vides (fissuration) et au départ progressif de l'eau.

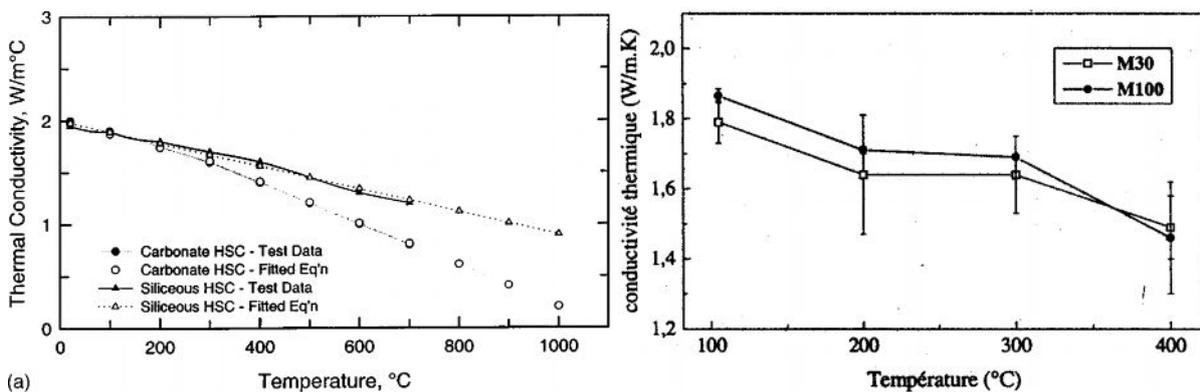


Figure I.20. Evolution de la conductivité thermique de différents bétons avec la température. A gauche, l'effet de type des agrégats [Kodur et Sultan, 2003]. À droite, l'effet de type du béton [Kalifa et Tsimbrovska, 1998].

I.5.2.2 Chaleur spécifique

La chaleur spécifique d'un matériau est la quantité d'énergie nécessaire pour faire monter de 1°C la température d'une masse unitaire de matière. Autrement dit, c'est la capacité du matériau à emmagasiner de la chaleur. L'évolution de la chaleur spécifique du béton est principalement liée à celle de la pâte de ciment et de type de granulats.

La figure I.21 montre que la chaleur spécifique augmente avec la température. Cette augmentation est peut être liée aux réactions chimiques et physiques qui ont lieu dans le béton aux hautes températures.

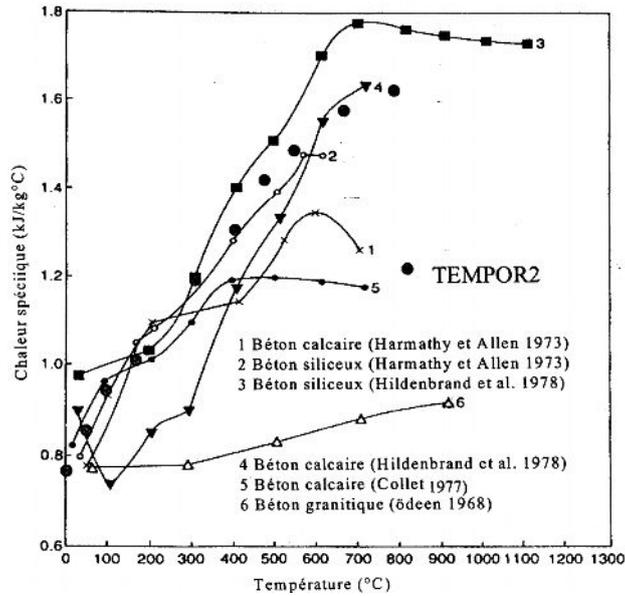


Figure I.21. Variation de la chaleur spécifique en fonction de la température [Bazant et Kaplan, 1996].

I.5.2.3 Diffusivité thermique

La diffusivité thermique décrit la vitesse à laquelle la chaleur se propage à l'intérieur d'une masse de béton. Elle est directement proportionnelle à la conductivité thermique et inversement proportionnelle à la masse volumique et la chaleur spécifique. La diffusivité thermique dépend fortement de la teneur en eau, du degré d'hydratation du ciment et de la nature de granulats.

La figure I.22 présente les variations de cette propriété avec la température obtenue par différents auteurs sur des bétons formulés avec différents types de granulats. Il apparaît que la diffusivité thermique du béton diminue avec l'élévation de la température.

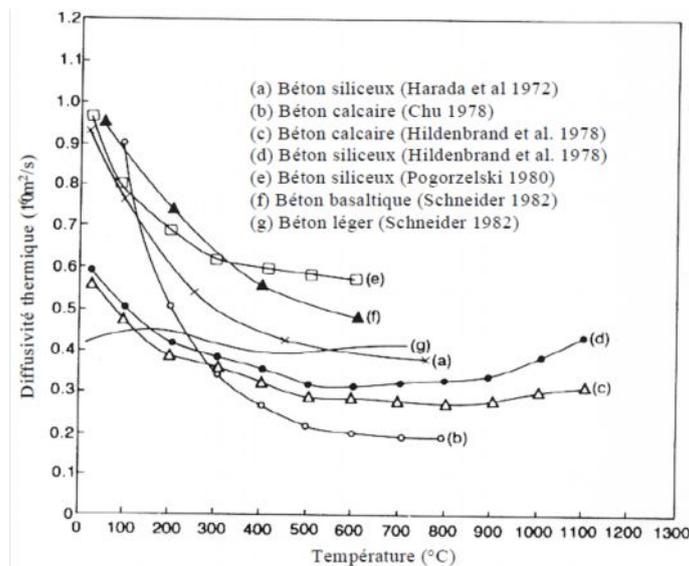
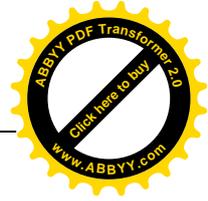


Figure I.22. Variation de la diffusivité thermique de différents types de béton avec la température [Bažant et Kaplan, 1996].



I.5.3 Evolution des propriétés mécaniques du béton avec la température

Le béton est le matériau le plus fréquemment utilisé dans le domaine de la construction. Il se caractérise, pour la partie mécanique, par la résistance à la compression, la résistance à la traction et le module d'Young.

En situation d'incendie, le béton est exposé à des températures élevées qui entraînent un certain nombre de transformations physico-chimiques et microstructurales qui influencent l'évolution de ses propriétés mécaniques avec la température.

Pendant ces dernières années, plusieurs équipes de différents pays se sont investis dans la réalisation des essais sur les différents types de béton soumis à hautes températures. Les résultats de ses essais interprètent différemment les évolutions des propriétés mécaniques du béton. Ces différences ne sont pas dues seulement au type du béton mais aussi aux conditions expérimentales comme le régime d'échauffement et refroidissement, la géométrie des éprouvettes, la présence de la charge mécanique et histoire de son application, le moment de la réalisation d'essai : à chaud ou après refroidissement, etc.

Dans ce qui suit, nous nous intéressons à l'évolution des propriétés mécaniques du béton avec une élévation de température.

I.5.3.1 Résistance en compression à hautes températures

La résistance en compression est la principale caractéristique utilisée pour faire la distinction entre les différents types de béton. Elle est aussi utilisée pour caractériser l'évolution des propriétés mécaniques des bétons avec la température.

Tous les auteurs, qui ont étudié l'influence de la température sur la résistance à la compression du béton, s'accordent sur le fait que cette dernière varie en fonction de la température. Ils ont également montré une diminution graduelle de cette résistance avec la température. 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.

La figure I.23 regroupe les résistances en compression déterminées à chaud obtenues par Phan [Phan et Carino, 2003] et comparées à celles obtenues par d'autres chercheurs.

On peut observer une importante dispersion des résultats pour un chauffage à 150°C. Les bétons présentent un gain de résistance de l'ordre de 20 % ou une perte de résistance allant jusqu'à 30 %. La principale raison de la diminution de la résistance en compression, entre 100 et 150°C, est la dilatation thermique de l'eau qui peut entraîner un écartement des feuillettes du gel de CSH. Cet écartement provoque une diminution des forces d'attraction entre ces feuillettes [Hager, 2004], [Mindeguia, 2009]. De 200 à 400°C, la résistance en compression augmente

par rapport à la valeur plus faible à 150°C. Cette augmentation peut avoir comme origine le départ de l'eau du matériau, celle-ci provoquant un retrait de la matrice pouvant ré-augmenter les forces d'attraction par le rapprochement des feuillets de CSH [Hager, 2004], [Mindegua, 2009]. Kanema [Kanema, 2007] indique également que ce gain de résistance provient de l'hydratation supplémentaire de la matrice cimentaire due à la migration de l'eau libre dans les pores. A partir de 400°C, tous les bétons présentent une baisse significative de la résistance en compression. Ceci peut être expliqué en grande partie par les transformations chimiques et minéralogiques qui modifient la microstructure de la pâte de ciment. Mais également, la déformation différentielle entre les granulats, qui se dilatent, et la pâte de ciment, qui subit un retrait important, permet d'expliquer cette diminution.

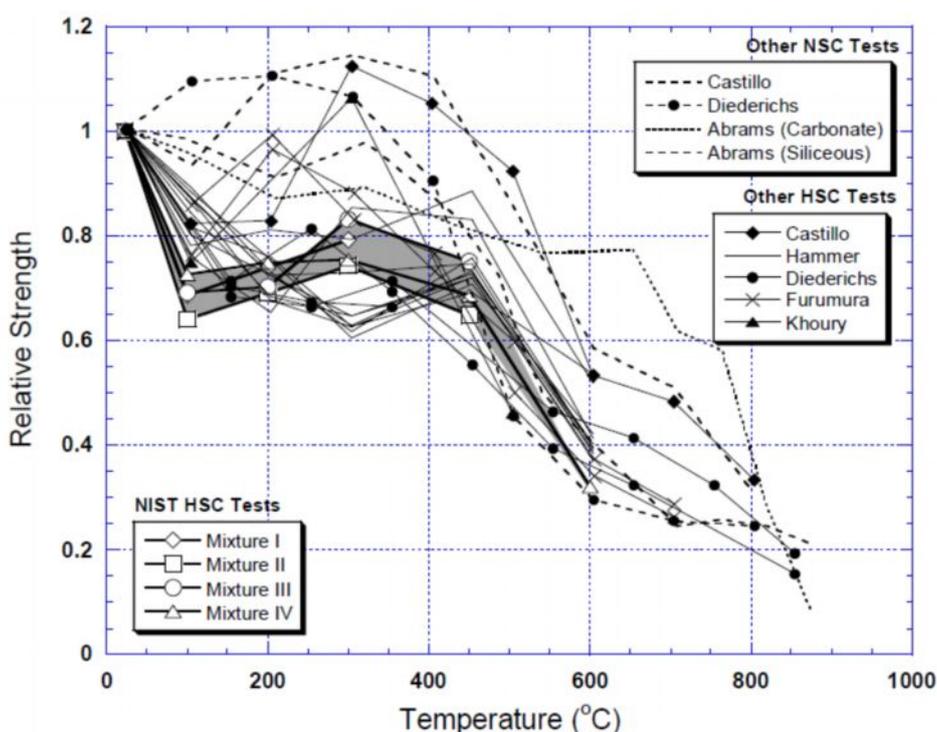


Figure I.23. Evolution de la résistance en compression relative des bétons avec la température [Phan et Carino, 2003].

- **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 [Abrams, 1971], [Xiao et König, 2004], [Sarshar et Khoury, 1993], [Cheng et al., 2004], [Arioz, 2007].

Les expériences faites par Abrams [Abrams, 1971] ont présenté des différences de comportement entre matériaux siliceux et calcaires, il rapporte que les bétons réalisés à partir

de granulats calcaires présentent des résistances plus élevées que des bétons réalisés à partir de granulats siliceux (figure I.24).

Abrams [Abrams, 1971] a confirmé que, à des températures supérieures à environ 430°C, un béton à base de granulats siliceux perd un pourcentage plus élevé de sa résistance que des bétons confectionnés avec des granulats calcaires, mais une fois la température de 800°C atteinte, le comportement de ces différents bétons est semblable.

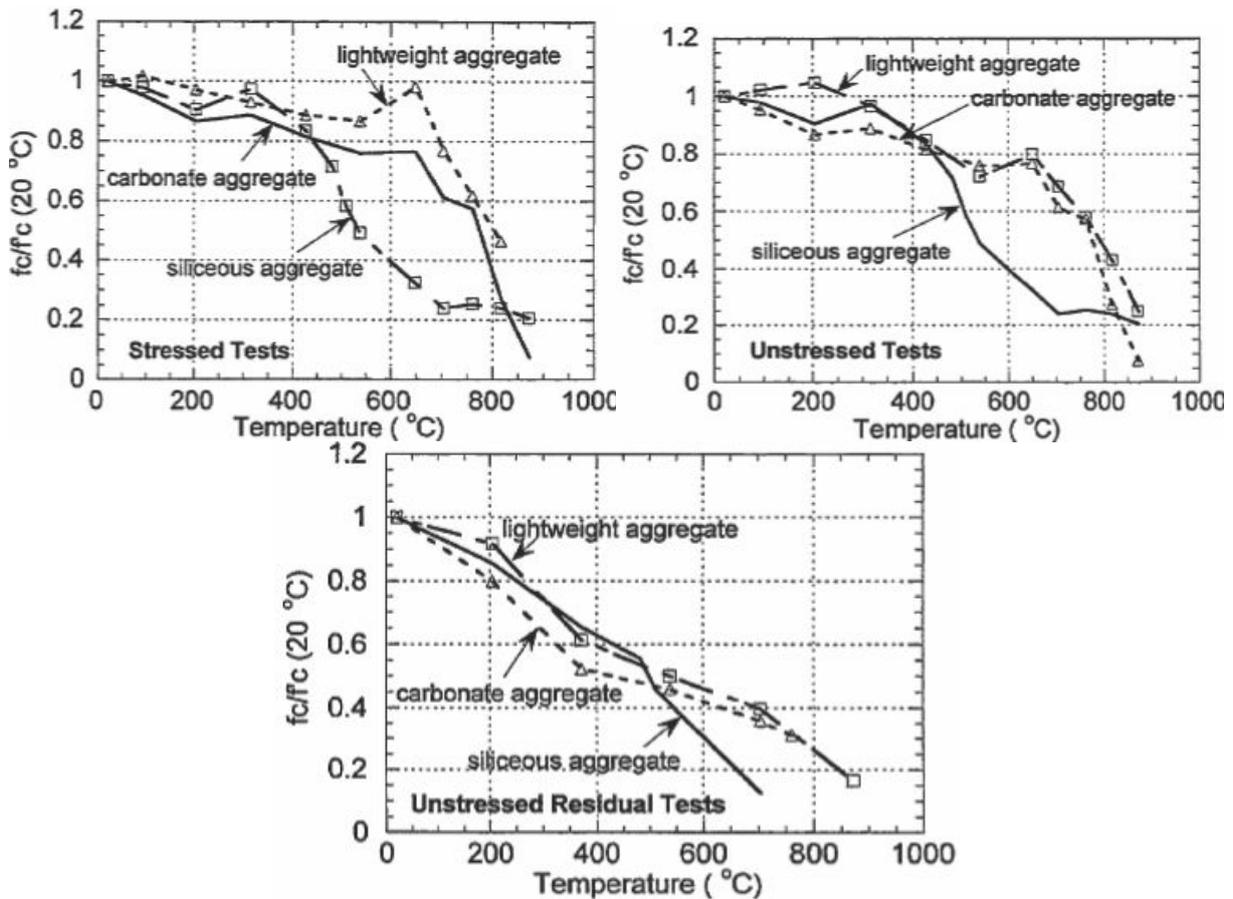


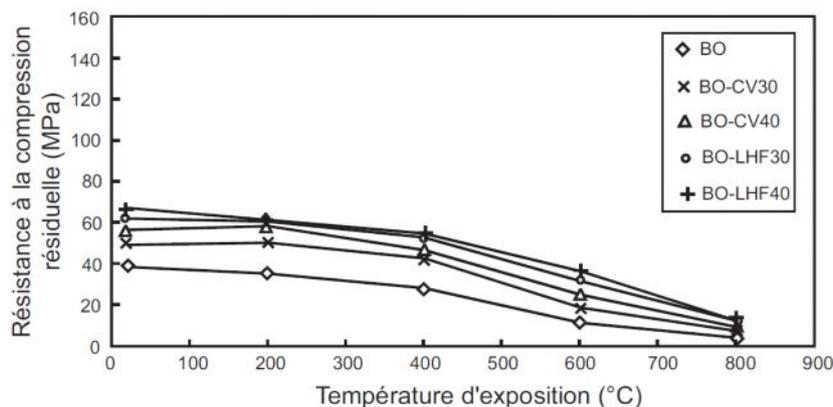
Figure I.24. Influence du type de granulats sur l'évolution de la résistance en compression du béton avec la température [Abrams, 1971].

- **Additions minérales**

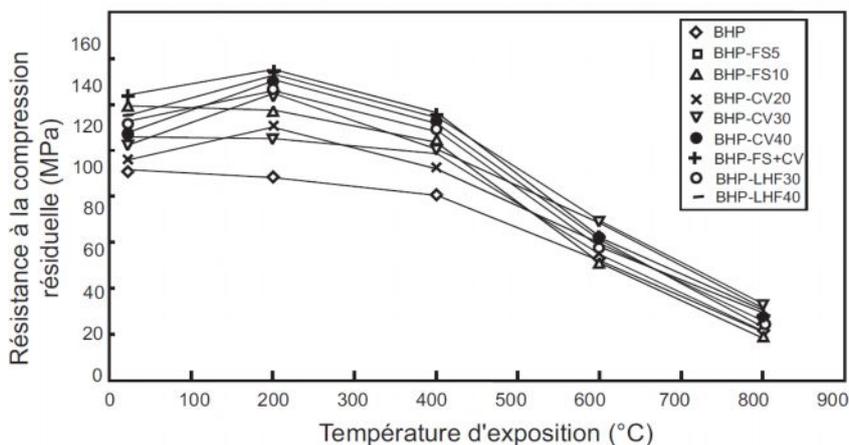
L'influence des additions minérales sur l'évolution des résistances mécaniques du béton à hautes températures a été étudiée par Poon [Poon et al., 2001], Lawson [Lawson et al., 2000], Mahdy [Mahdy et al., 2002], Behnood [Behnood et Ziari, 2008].

L'étude réalisée par Poon [Poon et al., 2001] a été menée sur un béton ordinaire ($f_c = 40$ PMa) et un BHP ($f_c = 90$ PMa) sans additions (formulation de référence). Des bétons de même résistance ont été confectionnés avec trois types d'additions minérales : Laitier de haut-fourneau, fumée de silice et les cendres volantes (figure I.25).

L'évolution de la résistance en compression du béton soumis à hautes températures est influencée aussi par les conditions de réalisation des essais. Ces essais peuvent être réalisés à chaud en charge, à chaud non chargé ou après refroidissement (essais résiduels).



BO : béton ordinaire de référence, CV : cendres volantes, LHF : laitier de haut-fourneau.



BHP : béton à haute performance de référence, FS : fumée de silice, CV : cendres volantes, LHF : laitier de haut-fourneau

Figure I.25. Influence des additions sur la résistance en compression résiduelle en fonction de la température pour des bétons courants et des bétons à hautes performances [Poon et al., 2001].

- **Conditions de la réalisation des essais**

Les essais réalisés à chaud permettent d'évaluer le comportement en cours d'incendie, tandis que l'essai réalisé après refroidissement sert à déterminer les propriétés mécaniques résiduelles du matériau testé. Dans le cas d'un essai charge, la charge représente 20% à 40% de la charge ultime en compression du matériau.

La figure I.26 présente les résultats des mesures de la résistance en compression, déterminées sur des éprouvettes chargées et non chargées testées à chaud et d'autres testés après refroidissement, obtenus par Abrams [Abrams, 1971].

Les valeurs de la résistance en compression obtenues après refroidissement sont plus faibles que celles obtenues à chaud. Cette différence de comportement peut s'expliquer par l'apparition d'une fissuration supplémentaire et une ré-humidification provoquant la réhydratation du gel de CSH qui endommagent d'avantage la structure du béton durant la phase de refroidissement [Fares, 2009].

La présence de la charge mécanique durant l'échauffement affecte fortement l'évolution de la résistance en compression testée à chaud. Un béton chauffé sous chargement conserve une plus grande part de sa résistance, alors que le chauffage d'éléments non chargés conduit à de plus faibles résistances.

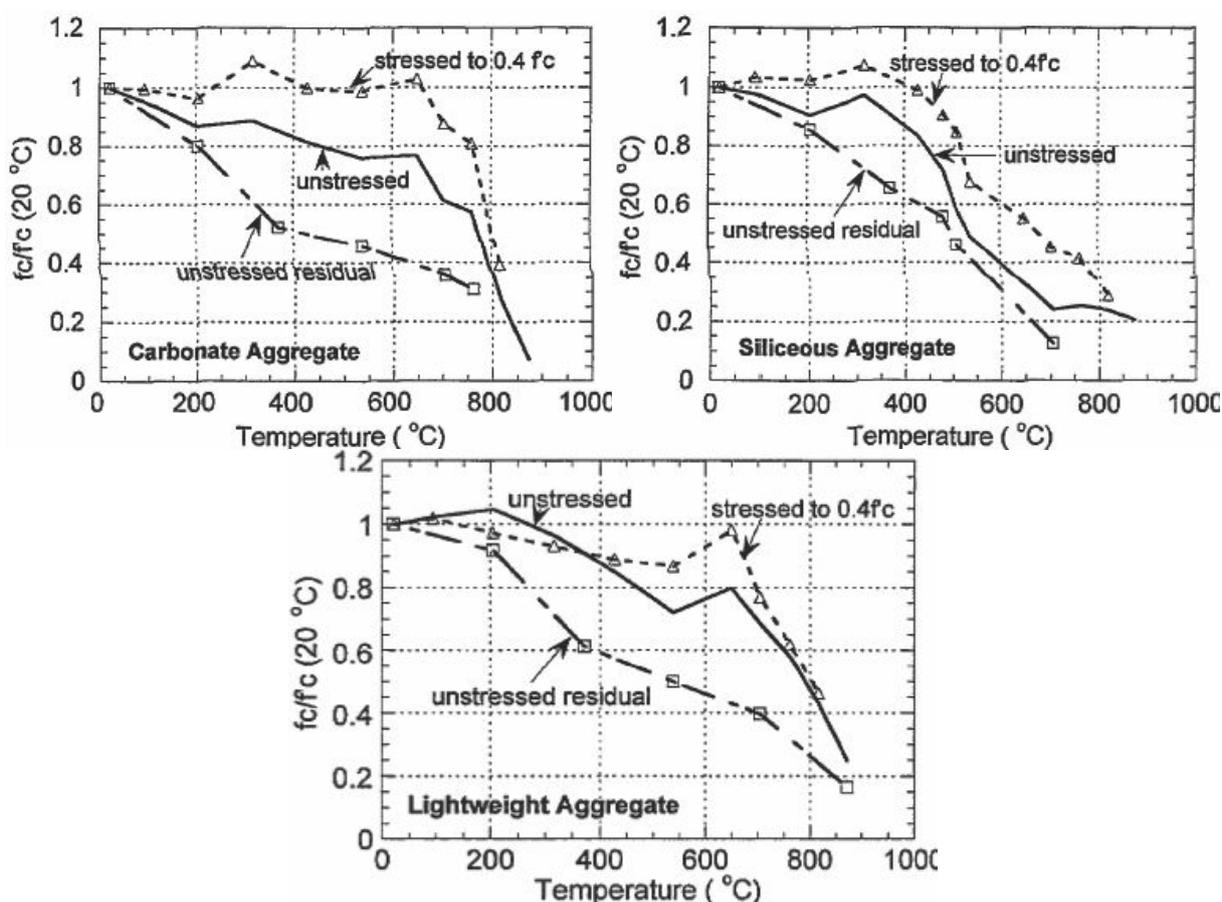
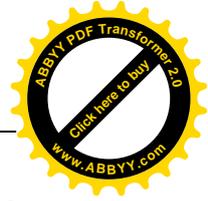


Figure I.26. Influence des conditions de la réalisation des essais sur la résistance en compression [Abrams, 1971].

- *Vitesse de montée en température*

Gallé [Gallé et al., 2003] a étudié l'influence de la vitesse de montée en température sur l'évolution de la résistance en compression avec la température. Il compare la résistance en compression résiduelle des bétons chauffés à une vitesse de $0,1^\circ\text{C}/\text{min}$ à celle des bétons chauffés à 1 et $10^\circ\text{C}/\text{min}$.



Gallé [Gallé et al., 2003] constate que les résistances résiduelles d'un béton chauffé avec une vitesse de 0,1°C/min étaient inférieures que celles d'un béton chauffé avec une vitesse de 1°C/min ou 10°C/min. Il apparaît que l'application d'une vitesse lente permet une transformation chimique plus complète dans le béton et donc une réduction plus significative des résistances [Kanema, 2007].

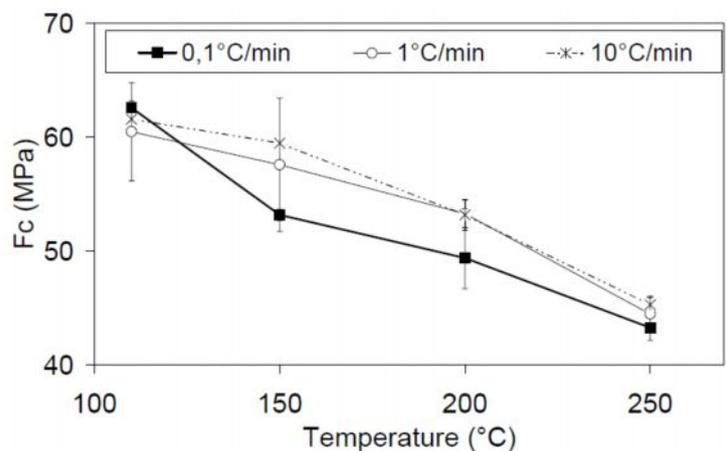


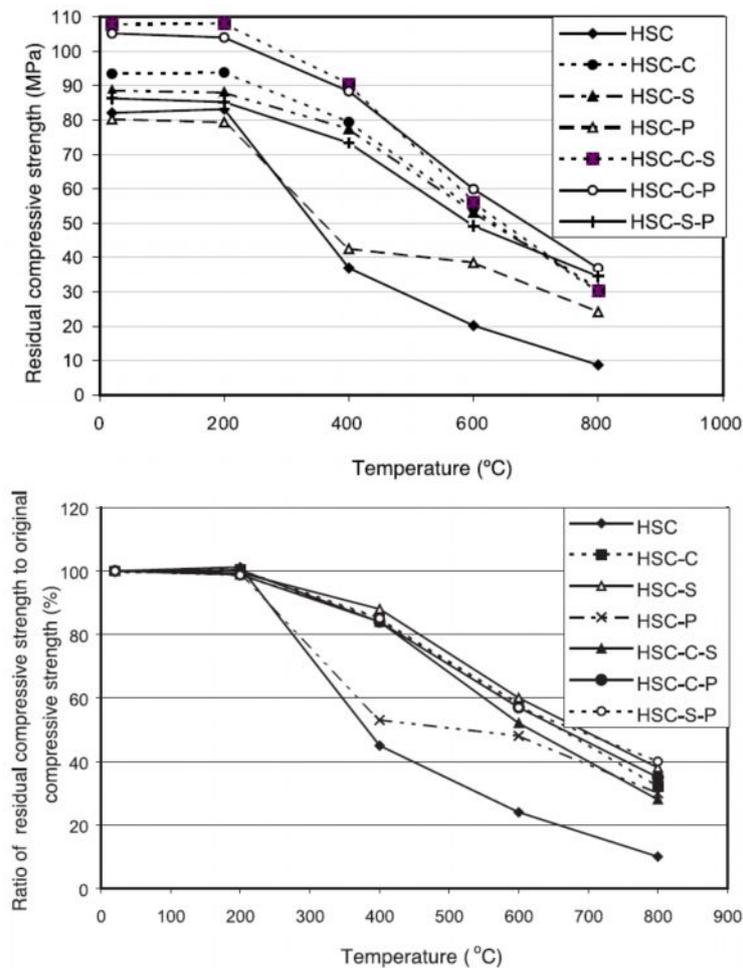
Figure I.27. Effet de la vitesse de montée en température sur l'évolution de la résistance en compression du béton avec la température [Gallé et al., 2003].

- **Ajout des fibres**

Chen [Chen et Liu, 2004] a étudié l'influence de l'ajout des fibres sur le comportement mécanique du béton soumis à hautes températures. Il a confectionné sept compositions de bétons : BHP sans fibre, BHP fibrés de fibres de carbone, BHP fibrés de fibres métalliques, BHP fibrés de fibres polypropylène et trois BHP hybrides : fibres de carbone et fibres métalliques, fibres de carbone et fibres polypropylène, fibres métalliques et fibres polypropylène. L'auteur constate que les résistances en compression des bétons fibrés sont supérieures à celles des bétons non fibrés.

La figure I.28 montre que les résistances en compression avec et sans fibres ne varient pas significativement pour des températures inférieures à 200°C. Au-delà de cette température, la résistance des différents bétons diminue progressivement. Notamment à 800°C, la résistance en compression des bétons non fibrés est de 10% par rapport à la valeur de référence mesurée à la température ambiante. Cependant, les valeurs de la résistance en compression pour BHP de fibres de carbone, BHP de fibres métalliques et BHP de fibres polypropylènes sont respectivement de 32%, 38% et 30% par rapport à la valeur de référence mesurée à 20°C.

Il apparaît, au vu de ces résultats, que les bétons fibrés ont une très bonne performance mécanique lorsqu'ils sont soumis à de hautes températures.



HSC : BHP, HSC-C : BHP avec fibres de carbone, HSC-S : BHP avec fibres métalliques, HSC-P : BHP avec fibres polypropylène

Figure I.28. Evolution de la résistance en compression résiduelle et relative des différents types de béton avec la température [Chen et Liu, 2004].

I.5.3.2 Résistance en traction à hautes températures

Il existe peu de résultats concernant l'évolution de la résistance en traction avec la température. Ceci peut s'expliquer par l'importance moindre de la résistance en traction du béton dans le comportement macroscopique des structures, d'une part, et d'autre part, par la difficulté de réaliser l'essai de traction directe.

Des études récentes, faites par Felicetti [Felicetti et Gambarova, 1999], Noumowé [Noumowe et al., 1996] et Kanema [Kanema et al., 2005], ont indiqué une chute de la résistance en traction avec l'augmentation de la température. L'évolution de cette résistance avec la température est effectuée par les mêmes paramètres que pour la résistance en compression (nature du liant et des granulats, teneur en eau, vitesse de chauffage...).

La figure I.29 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 Noumowe [Noumowe 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.

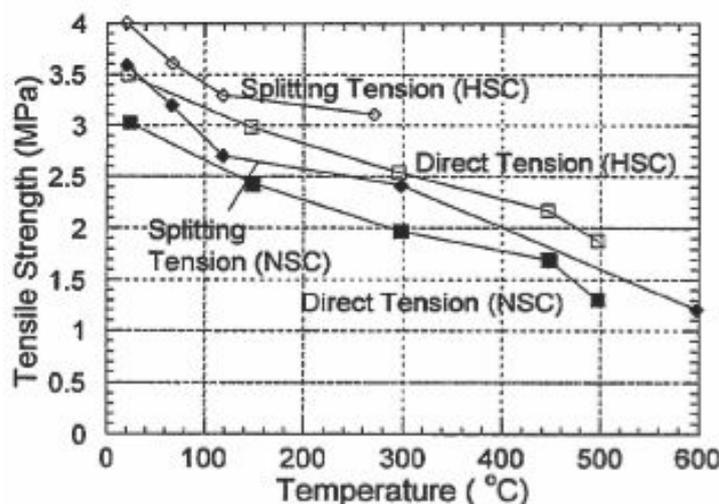


Figure I.29. Evolution de la résistance résiduelle en traction avec la température [Noumowe et al., 1996].

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 [Noumowe 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.

Kanema [Kanema, 2007] a choisi d'évaluer la résistance à la traction résiduelle en fonction de la température d'exposition par le biais de l'essai de traction par fendage à cause de sa simplicité de mise en œuvre. Les essais ont porté sur les cinq formulations de bétons (B325, B350, B400, B450 et B500) soumises à quatre cycles de chauffage-refroidissement composés d'une rampe de montée en température fixée à 1°C/min, d'un palier de stabilisation d'une heure aux températures cibles suivantes 150°C, 300°C, 450°C et 600°C et d'une rampe de descente en température. L'ensemble des résistances résiduelles et relatives (normalisées par rapport aux résistances à 20°C) des bétons à la traction est présenté sur les figures I.30.

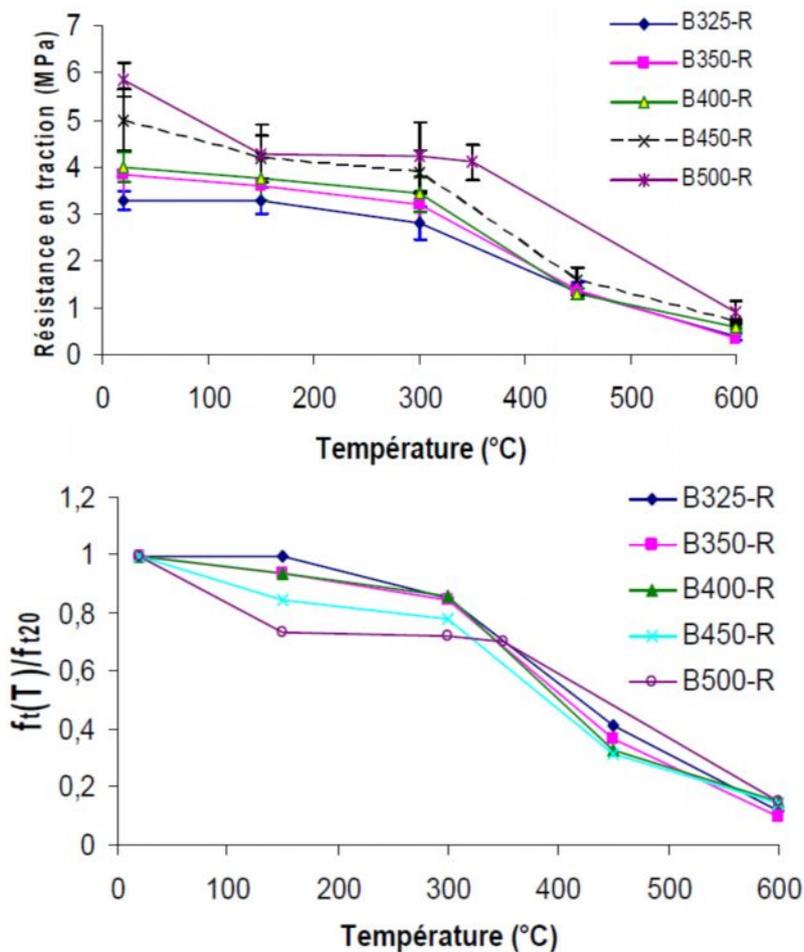


Figure I.30. Evolution de la résistance à la traction du béton mesurée par essai de fendage après refroidissement [Kanema, 2007].

Aucune amélioration de la résistance à la traction n'est observée dans la plage de température allant de 20°C à 300°C. Dans cette plage de température, les bétons à faible rapport E/C (B500 et B450) présentent une réduction plus importante de leur résistance à la traction comparativement au béton à fort rapport E/C (B325). Kanema [Kanema, 2007] pense que ce phénomène est dû à un affaiblissement du gel de CSH plus important dans la zone de transition pâte-granulats des bétons à faible rapport E/C. A partir de 450°C, tous les bétons présentent une baisse de résistance quasi-identique. Kanema [Kanema, 2007] juge que la diminution de résistance au-delà de 450°C est due à une conjugaison des pertes dues à la déshydratation de la matrice cimentaire et à la transformation chimique des granulats.

Kanema [Kanema, 2007] a étudié l'influence du temps de la durée de cure sur l'évolution de la résistance résiduelle à la traction du béton. La figure I.31 présente l'évolution de la résistance à la traction résiduelle et relative du béton testé à l'âge de 7, 28, 90 et 365 jours.

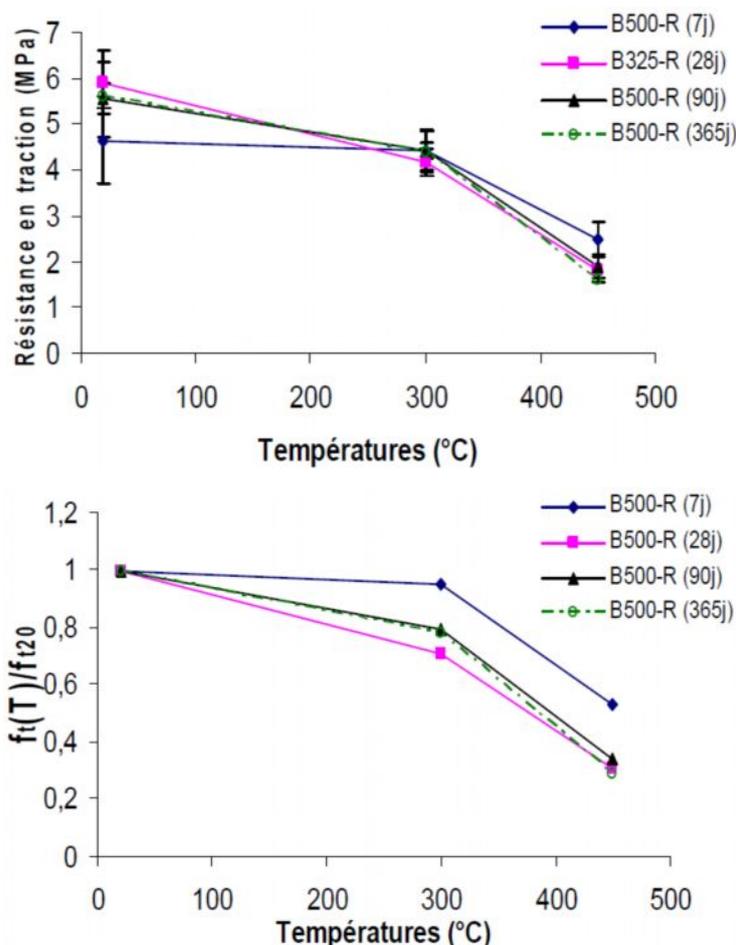


Figure I.31. Evolution de la résistance à la traction résiduelle et relative du béton âgé de 7, 28, 90 et 365 jours soumis à différentes températures [Kanema, 2007].

On constate que la résistance à la traction du béton diminue avec la température quel que soit l'âge du béton. On observe aussi que les bétons âgés (28, 90 et 365 jours) présentent une réduction de résistance constatée après un cycle de chauffage à 300°C plus marquée que les bétons âgés de 7 jours.

I.5.3.3 Module d'élasticité

Le comportement des structures dépend souvent du module d'élasticité du béton qui exprime la rigidité du matériau. Il lie la contrainte normale à la déformation instantanée longitudinale lorsque le béton est soumis à des sollicitations uniaxiales. Plusieurs auteurs ont étudié l'influence de la température sur le module d'élasticité du béton [Gallé et al., 2003], [Cheng et al., 2004], [Hager, 2004]. 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...).

La figure I.32 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 utilisé. 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].

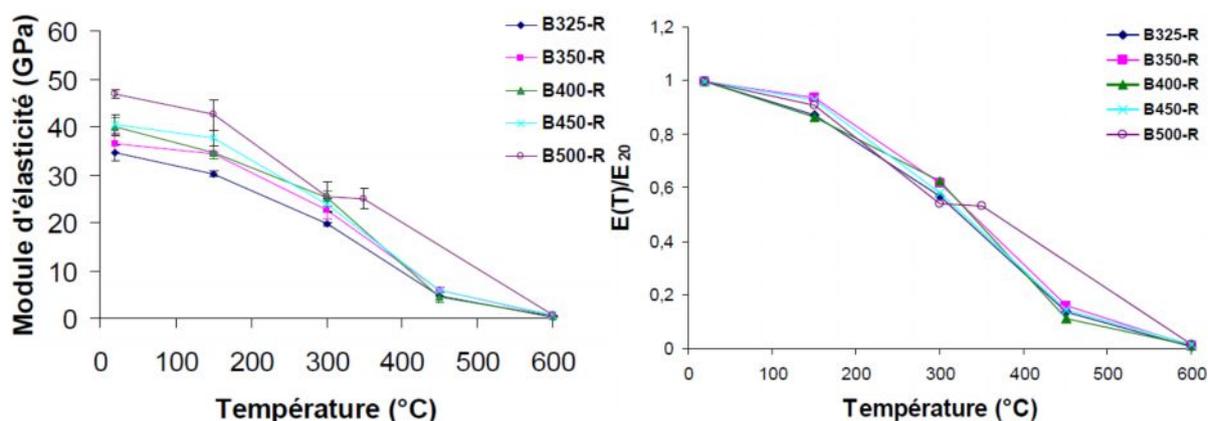


Figure I.32. Evolution des modules d'élasticité résiduels et des modules d'élasticité résiduels relatifs à différentes températures [Kanema et al., 2005].

Hager [Hager, 2004] a effectué des essais de modules d'élasticité à chaud sur trois bétons de rapport E/C égal à 0.3, 0.4 et 0.5. Elle constate que le module d'élasticité apparent diminue de façon monotone dans toute la gamme de température et que le rapport E/C n'influence pas l'évolution du module d'élasticité relatif.

Kanema [Kanema, 2007] observe également une faible influence du rapport E/C sur la baisse du module d'élasticité en fonction de la température.

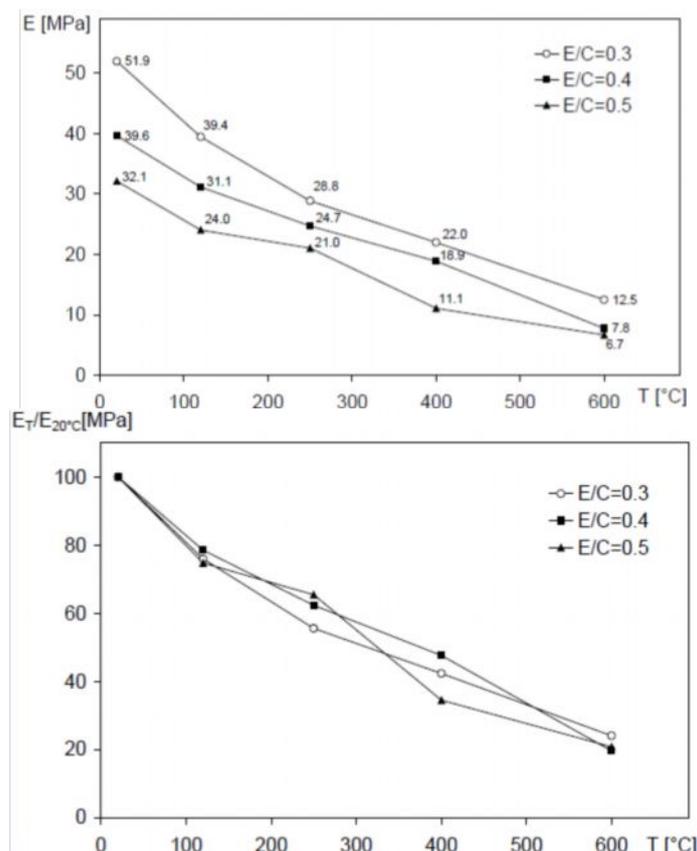


Figure I.33. Evolution des modules d'élasticité apparents et des modules d'élasticité apparents relatifs déterminés à chaud à différentes températures [Hager, 2004].

La figure I.34 montre les évolutions des modules élastiques à chaud et après refroidissement [Hager, 2004]. On observe que, au-delà de 120°C, le module d'élasticité apparent résiduel est inférieur aux valeurs obtenues à chaud. Hager [Hager, 2004] a attribué cette différence aux trois mécanismes. En premier lieu, c'est le gradient thermique supplémentaire induit durant la phase de refroidissement, qui engendre des contraintes thermiques de signe inversé, que durant la phase de montée en température. De plus, durant la phase de refroidissement, elle observe l'absence de la déformation thermique transitoire, ce phénomène permet de relaxer les contraintes entre la pâte qui subit un retrait important et les granulats qui se dilatent. Le troisième mécanisme qui intervient dans le processus d'affaiblissement est lié à la réaction de la chaux CaO avec l'eau. Le produit de cette réaction, la portlandite Ca(OH)₂, possède un volume plus important que la CaO. Cette augmentation du volume engendre une baisse du module d'élasticité.

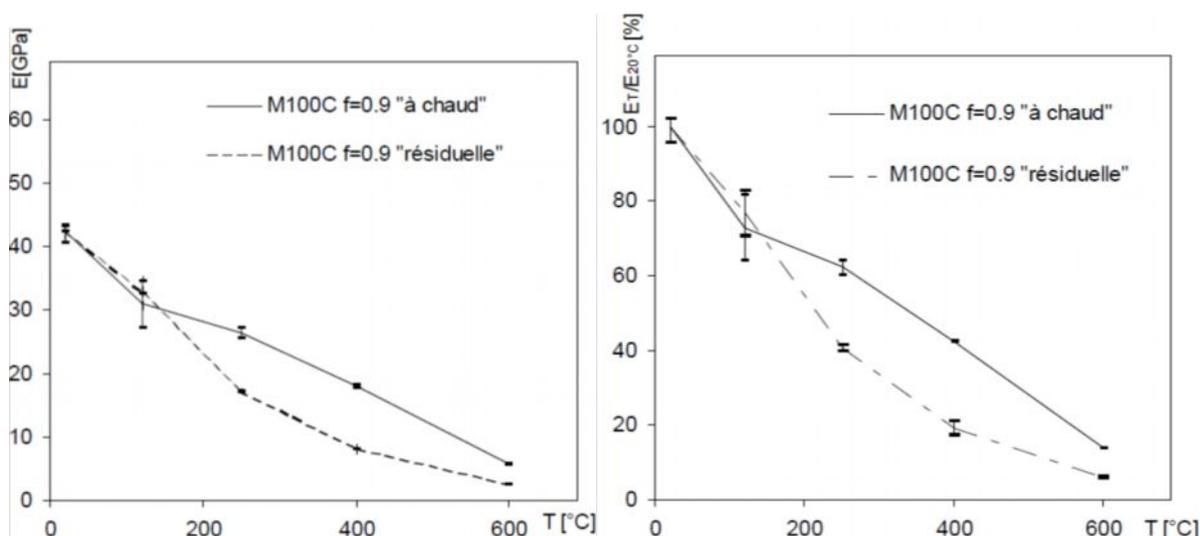


Figure I.34. Evolution du module d'élasticité obtenus à chaud et résiduelles [Hager, 2004].

Galle [Gallé et al., 2003] compare le module d'élasticité résiduel des bétons chauffés à une vitesse de 0,1°C/min à ceux des bétons chauffés à 1°C/min et 10°C/min (figure I.35). Il constate que la diminution du module d'élasticité est plus importante pour le béton chauffé avec une vitesse de 10°C/min que pour les mêmes bétons chauffés à une vitesse de 0,1°C/min et 1°C/min. La variation relative entre les valeurs de module d'élasticité chauffé à 0,1°C/min et 10°C/min est de 9%.

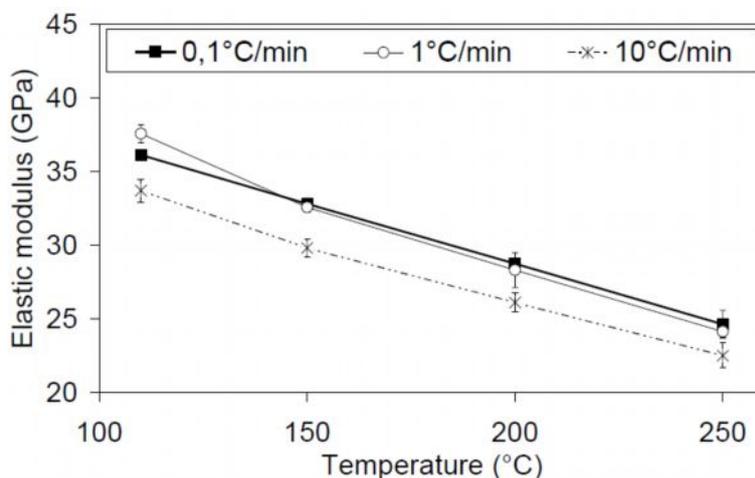


Figure I.35. Module d'élasticité résiduel du béton chauffé à une vitesse de 0,1°C/min, 1°C/min et 10°C/min à différentes températures [Gallé et al., 2003].

D'après les recherches menées par Mindeguia [Mindeguia, 2009], l'influence de la nature des granulats sur l'évolution du module d'élasticité avec la température est notable. Il constate que la substitution des granulats calcaires par des granulats silico-calcaires fait chuter le module d'élasticité d'environ 14%. La figure I.36 montre l'évolution du module d'élasticité

de deux bétons confectionnés à partir de granulats silico-calcaires et de granulats calcaires [Pimienta et Hager, 2002]. L'endommagement provoqué par la forte incompatibilité de déformation pâte/granulats du béton silico-calcaire entraîne une perte totale de rigidité dès 600°C.

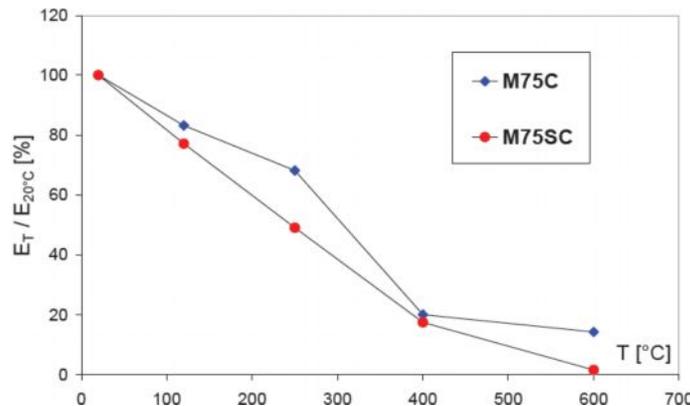


Figure I.36. Evolution avec la température du module d'élasticité relatif d'un béton en fonction de la nature du granulat (calcaire et silico-calcaires) [Pimienta et Hager, 2002].

Kanema [Kanema, 2007] a étudié l'influence de l'âge du béton sur le module d'élasticité. L'évolution du module d'élasticité résiduel de béton âgé de 7, 28, 90 et 365 jours en fonction de la température obtenu par Kanema [Kanema, 2007] est présentée sur la figure I.37. L'auteur observe que le module d'élasticité supérieur des bétons les plus âgés est conservé après un chauffage à 300°C et pas après un chauffage à 450°C. Il pense que la différence observée après un chauffage à 450°C est issue de la microstructure changeante de la matrice car le volume granulaire des bétons étant identique. Il observe également que le module d'élasticité résiduel relatif du béton âgé de 7 et 28 jours est légèrement inférieur à ceux du même béton âgé de 90 et 365 jours. Cette différence de module reste néanmoins peu significative.

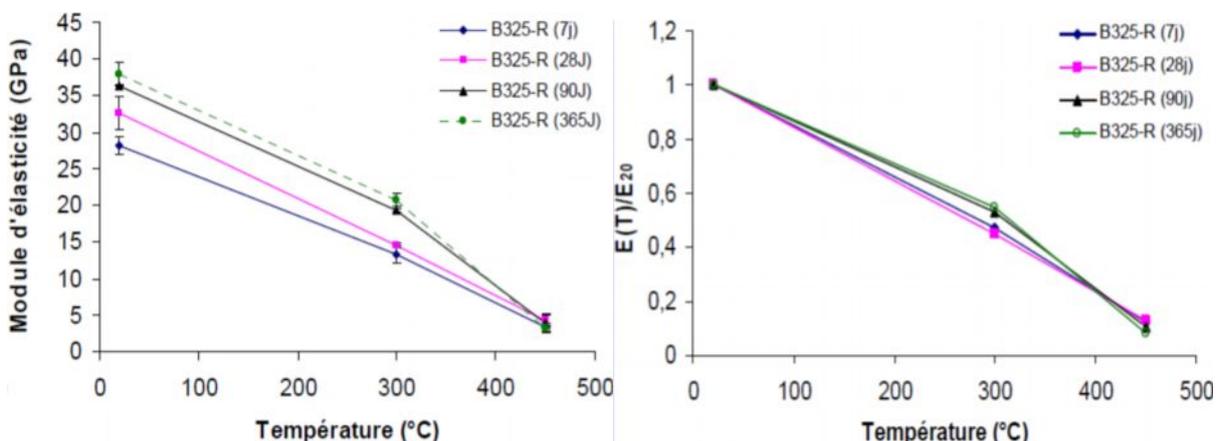


Figure I.37. Evolution du module d'élasticité résiduel du béton avec la température et à différents âges (7, 28, 90, et 365 jours) [Kanema, 2007].

Enfin, il est intéressant de noter l'influence de l'ajout des fibres polypropylène sur l'évolution du module d'élasticité du béton avec la température. Les valeurs des modules d'élasticité apparents des bétons avec fibres polypropylène et des bétons non fibrés obtenues par Hager [Hager, 2004] sont présentées sur la figure I.38. Hager [Hager, 2004] constate que le module d'élasticité relatif du béton fibré présente une évolution semblable à celle du béton sans fibres. Elle observe aussi que, excepté à 600°C, les modules d'élasticité apparents relatifs des bétons fibrés sont globalement inférieurs à ceux des bétons non fibrés. A 600°C, les valeurs déterminées sont toutes très proches.

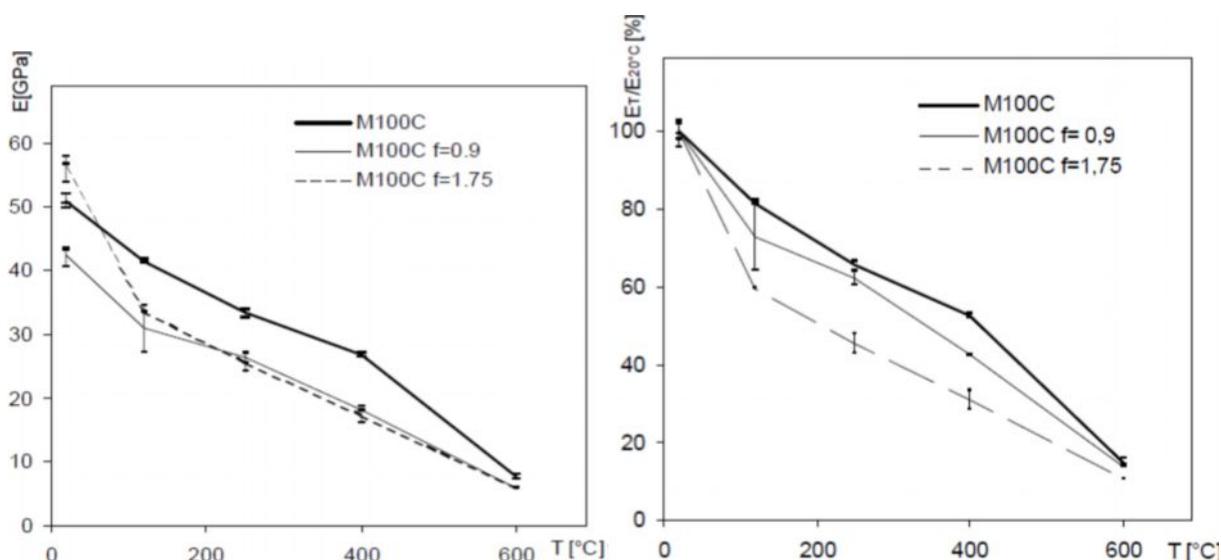


Figure I.38. Evolution des modules d'élasticité apparents et des modules d'élasticité apparents relatifs obtenus sur deux bétons fibrés et non fibrés [Hager, 2004].

I.5.4 Déformation thermiques du béton à hautes températures

Comme la majorité des matériaux, lorsqu'il est soumis à un changement de température, le béton subit une déformation thermique. Cette déformation joue un rôle très important dans le comportement des structures en béton soumises à de hautes températures.

La déformation thermique du béton est la superposition des déformations de la matrice et des granulats au cours de l'échauffement, elle dépend fortement des propriétés des constituants du béton notamment de leur nature et de leur quantité. Nous présentons ici la déformation thermique des constituants du béton, la pâte de ciment et les granulats.

I.5.4.1 Déformation thermique de la pâte de ciment

Sous l'effet de la température, la pâte de ciment durcie subit, dans un premier temps, une dilatation jusqu'à 150°C (l'expansion maximum est de l'ordre de 0,2%). A partir de cette

température, elle subit un retrait important. La phase de dilatation est généralement attribuée à la mise en mouvement et à la dilatation volumique des molécules d'eau ainsi qu'à la réduction des forces capillaires de l'eau sur le solide du fait de l'augmentation de la température [Bazant et Kaplan, 1996]. La phase de contraction est attribuée au départ de l'eau libre puis de l'eau liée chimiquement qui provoque un retrait important de la pâte de ciment. La figure I.39 présente la dilatation thermique de la pâte de ciment durcie selon quatre différents travaux.

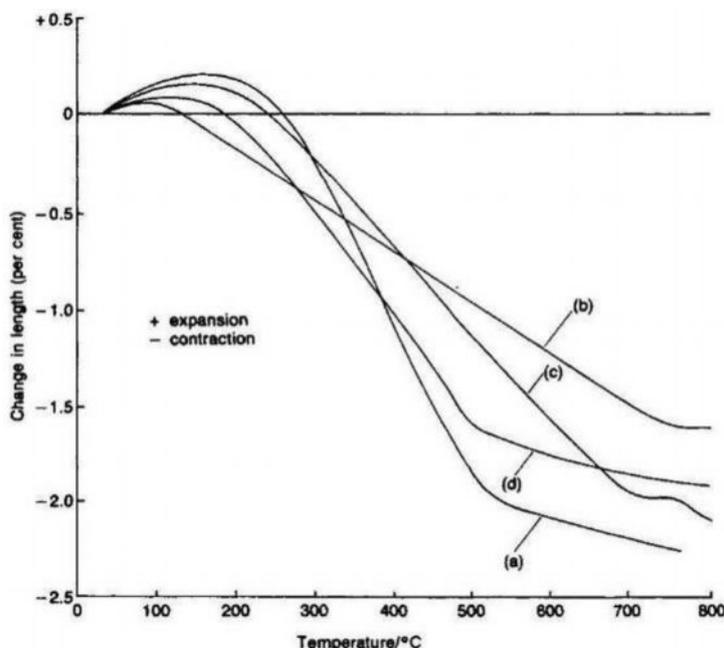


Figure I.39. Dilatation thermique de la pâte de ciment durcie selon quatre différents travaux [Bazant et Kaplan, 1996].

L'évolution du coefficient de dilatation thermique de la pâte de ciment est fortement influencée par plusieurs paramètres. La température de changement de signe du coefficient de dilatation thermique dépend selon Hager [Hager, 2004] de la vitesse d'échauffement. Pour un échauffement de l'échantillon avec les vitesses de 0,5°C/min et 1°C/min, ces températures se situent respectivement aux alentours de 125°C et 183°C [Hager, 2004]. En augmentant la vitesse d'échauffement, la température de changement augmente également.

Il a été également montré que l'ajout de la fumée de silice en quantité de 10% augmente, au cours de l'échauffement, le retrait de la pâte de ciment [Sliwinski et Ehrenfeld, 1998]. De plus, le coefficient de dilatation est très influencé par l'humidité relative initiale de la pâte de ciment.

I.5.4.2 Déformation thermique des granulats

Les granulats sont les principaux constituants volumétriques du béton (ils occupent environ 70% du volume total). Leur dilatation thermique est le paramètre dominant de la déformation

totale du béton. Plusieurs paramètres vont influencer la dilatation thermique des granulats, elle dépend de la nature de la roche, de la teneur en silice et de la teneur en eau dans la roche. La figure I.40 regroupe les courbes d'évolution de la déformation thermique de différentes roches. On peut noter sur cette figure que la roche à haute teneur en silice (quartz) a une forte expansion thermique. Par contre, les roches ne contenant pas ou peu de silice, telles que les roches calcaires, ont des expansions thermiques moins importantes.

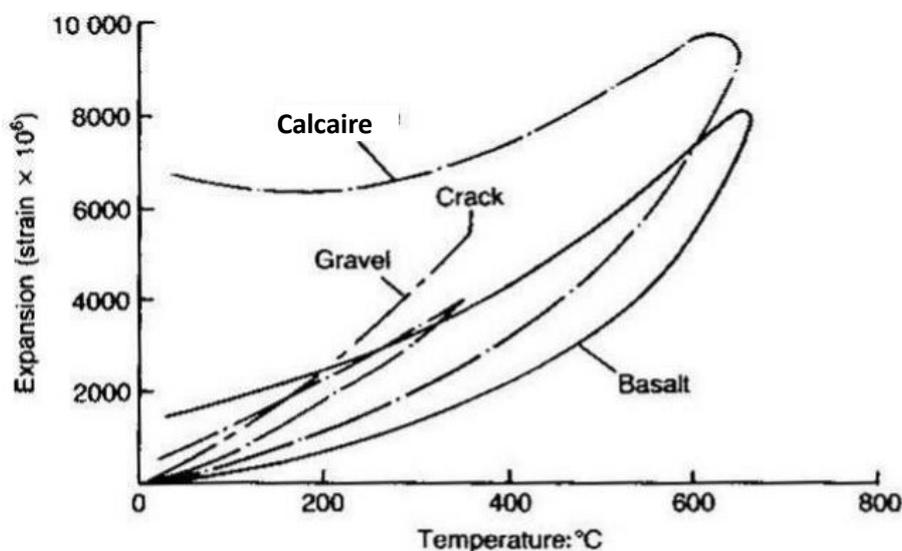


Figure I.40. Evolution de la dilatation thermique de différents types de roches avec la température [Khoury, 1992].

I.5.4.3 Déformation thermique du béton

La déformation totale d'une éprouvette en béton non chargée soumise à une élévation de température très lente est due aux effets composés suivants :

- Expansion thermique des granulats.
- Retrait de matrice cimentaire,
- Microfissuration et contraintes engendrées par l'incompatibilité entre ces deux premiers effets,
- Transformations et décompositions des constituants du béton s'accompagnant de variations dimensionnelles.

L'analyse des résultats présentés sur la figure I.41 montre que la déformation thermique des bétons est très fortement influencée par la nature des granulats. Hager [Hager, 2004] a montré que la déformation thermique du béton est une fonction non linéaire de la température. Les

résultats de Hager [Hager, 2004] montrent également que le béton contenant des granulats silico-calcaires présente des déformations qui deviennent supérieures à partir de 300°C. La déformation thermique plus élevée des bétons de granulats silico-calcaires est environ 2,5 fois supérieure à celles des bétons de granulats calcaires à 600°C. Ceci peut s'expliquer par la nature des granulats silico-calcaire qui possèdent un coefficient de dilatation thermique plus élevé que celui du calcaire. De plus, les transformations du quartz- α en quartz- β à 573°C qui s'accompagnent d'une augmentation de volume de l'ordre de 1%, ce qui a contribué à la fissuration significative du matériau [Kodur et Sultan, 2003], [Hager, 2004].

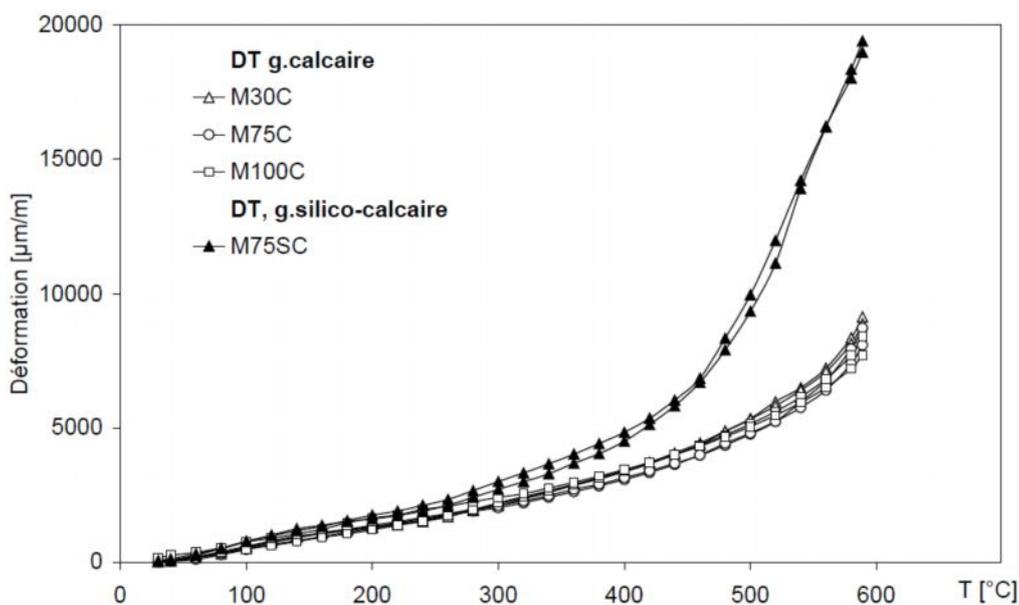
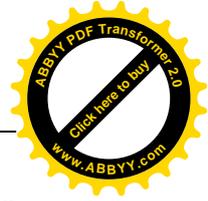


Figure I.41. Déformation thermique de quatre différents bétons confectionnés avec des granulats calcaires et silico-calcaires [Hager, 2004].

1.5.4.4 Déformation thermique transitoire

La déformation thermique du béton est fortement influencée par la présence d'une charge pendant le chauffage. La déformation supplémentaire engendrée par la température en régime transitoire est appelée « déformation thermique transitoire ». Cette déformation caractérise le comportement du béton lorsqu'il est simultanément soumis à une sollicitation mécanique et à une augmentation de la température (essentiellement lors de la première montée en température).

La méthode pratique pour obtenir la valeur des déformations thermiques transitoires est la soustraction de déformation thermique sous la sollicitation mécanique, des valeurs de la déformation purement thermique.



La figure I.42 présente les courbes des déformations thermiques des quatre (4) bétons : un béton ordinaire de granulats calcaire, deux (2) bétons de haute performance de granulats calcaire et un béton de haute performance de granulats silico-calcaire. Les mesures des déformations thermiques sous charge (DTSC) ont été réalisées sur des échantillons de béton chargés en compression à 20% et 40% de la charge de rupture à froid et chauffés avec une vitesse de montée en température de 1°C/min jusqu'à 600°C.

Sur l'ensemble des courbes nous pouvons observer que :

- La valeur absolue de la déformation thermique sous charge (DTSC) lorsque le béton est chargé à 20% est inférieure à la déformation thermique. Lorsque le taux de chargement augmente de 20% à 40%, la valeur absolue de la déformation thermique sous charge reste inférieure à celle de la déformation thermique (DT).
- La déformation thermique transitoire (DTT) dépend fortement de la charge appliquée durant l'échauffement. La déformation thermique transitoire (DTT) des bétons chargés à 40% est supérieure à celle correspondant au taux de chargement de 20% et l'augmentation est environ 50% pour un doublement du taux de chargement.
- Les déformations thermiques transitoires (DTT) d'un BHP avec granulats calcaires sont supérieures aux déformations thermiques transitoires (DTT) du béton ordinaire de même type de granulats. L'écart entre les courbes augmente jusqu'à 600°C. Cette différence de comportement des bétons ordinaires et BHP peut avoir pour origine la nature et la quantité de la pâte [Hager et Pimienta, 2004].
- La déformation thermique du BHP contenant des granulats silico-calcaires présente des résultats qui deviennent supérieures à partir de 300°C. La déformation thermique à 600°C d'un BHP avec des granulats silico-calcaires est environ 2,5 fois supérieure à celles des autres bétons de granulats calcaire. Cette déformation thermique plus élevée est liée à la nature des granulats silico-calcaires, qui possèdent un coefficient de dilatation thermique plus élevée que le calcaire.

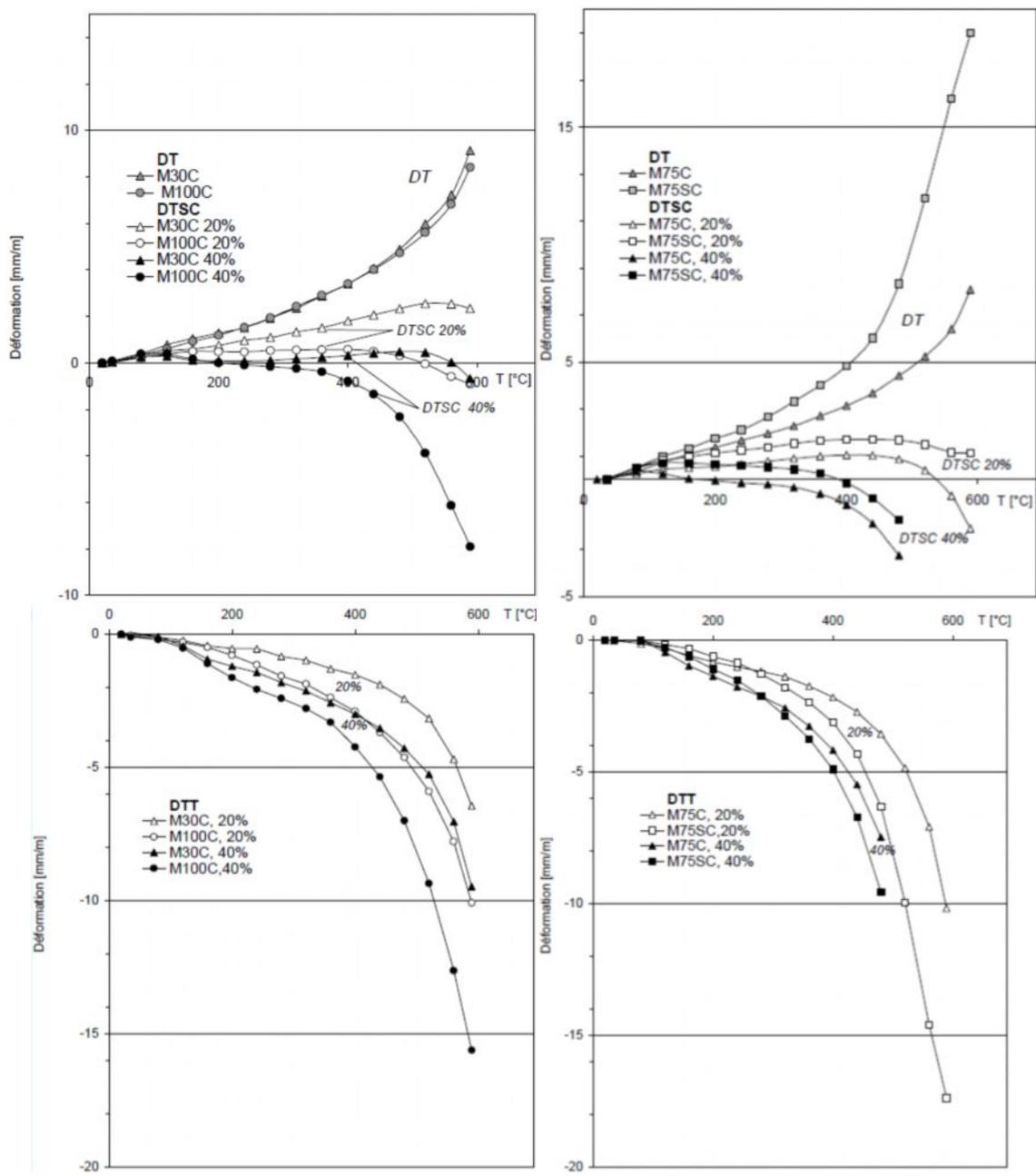
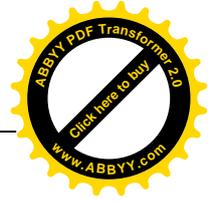
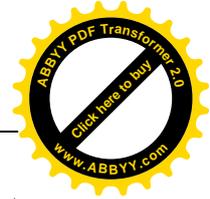


Figure I.42. Déformation thermique (DT), déformation thermique sous charge (DTSC) et déformation thermique transitoire (DTT) déterminées sur les bétons BO et BHP avec granulats calcaires, et BHP avec granulats silico-calcaires [Hager et Pimienta, 2004].

I.6 CONCLUSION

L'objectif de ce chapitre est de faire la synthèse des connaissances existantes et des résultats expérimentaux sur le comportement du béton à température ambiante et à hautes températures. La synthèse des observations et des expérimentations réalisées a révélée que le



béton subit de nombreuses transformations physico-chimiques durant le chauffage conduisant à la modification de la microstructure et de ses propriétés macroscopiques.

Les diverses transformations physico-chimiques que subit le béton chauffé 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.

La perte des propriétés mécaniques est liée fortement au départ de l'eau qui représente la principale cause de perte de masse, d'augmentation de la porosité et de la perméabilité et la destruction de la matrice cimentaire.

Nous proposons dans la suite du document d'étudier le comportement à haute température d'un béton ordinaire, d'un béton de haute résistance et d'un béton à haute performance. Les caractéristiques physiques et mécaniques sont déterminées pour pouvoir expliquer les phénomènes mis en jeu dans le comportement du béton à de hautes températures.

Parallèlement à l'étude des propriétés physiques et mécaniques, nous allons réaliser des observations à différentes échelles (macro, méso et microscopique). Pour compléter cette étude, des essais seront réalisés pour caractériser le comportement à haute température de béton à base de sable concassé et de béton avec 30% de brique concassée.



Chapitre **II**

**MATERIAUX
TESTES ET
PROGRAMME
EXPERIMENTAL**



II.1 INTRODUCTION

A partir des résultats présentés dans l'étude bibliographique, et en particulier des lacunes toujours existantes en ce qui concerne le comportement des BHP exposés à des hautes températures, nous justifions dans cette partie la construction de notre programme expérimental. L'intérêt de cette étude est d'utiliser des bétons de références ayant des caractéristiques proches de celles des bétons utilisés dans des structures ayant subi des situations extrêmes (incendie) et qui ont été endommagées par l'effet de l'augmentation de la température.

Du point de vue résistance mécanique, nous avons choisi d'étudier le comportement de trois types de béton, un béton ordinaire (B1-GO), un béton de haute résistance (B2-GO) et un béton haute performance (B3-GO). Ces bétons ont la particularité d'avoir des volumes de squelette solide constants. Afin d'appréhender plus précisément le rôle joué par le rapport E/C sur les propriétés physiques et mécaniques du béton soumis à haute température, nous avons varié le rapport E/C par la modification de la quantité d'eau et de ciment.

La composition du B1-GO est obtenue en utilisant la méthode de formulation de Dreux-Gorisse [DREUX ET FESTA, 1998], elle sert de base de déclinaison des autres compositions (B2-GO et B3-GO) par ajout de ciment. Nous avons également testé deux autres groupes de bétons en prenant les mêmes proportions des constituants que les formulations du premier groupe (B1-GO, B2-GO et B3-GO). Le deuxième groupe est obtenu en remplaçant le sable siliceux par un sable calcaire (sable concassé). Le troisième groupe est obtenu en substituant 30% des granulats naturels par des granulats de brique concassée.

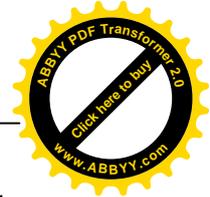
Tous ces bétons sont ensuite chauffés dans un four suivant cinq cycles de chauffage-refroidissement dont les paliers sont fixés à 150°C, 250°C, 400°C, 600°C et 900°C. A la suite, les propriétés physiques et mécaniques sont déterminées à la température ambiante et après traitement thermique.

Dans ce chapitre, nous caractérisons dans un premier temps les matériaux utilisés au cours des travaux expérimentaux. En particulier, la composition, la fabrication et la cure appliquée. Dans un deuxième temps, nous présentons les essais thermiques et mécaniques réalisés dans cette étude.

II.2 LES MATERIAUX

II.2.1 Caractérisation des constituants utilisés

Pour cette étude, il a été 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 plastifiant. 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 de brique concassée et d'autre contenant du sable calcaire concassé ont été également étudiés.

II.2.1.1 Ciment

Le ciment utilisé dans toutes les formules de l'étude est le CPJ CEM II/A 42,5. Ce ciment est principalement constitué de 94% de clinker et gypse et 6% de calcaire. La composition chimique du ciment est présentée dans le tableau II.1. Les principales caractéristiques physiques et mécaniques sont présentées dans le tableau II.2.

Tableau II.1. Composition chimique du ciment [Fiche de qualité, 2013].

<i>Eléments</i>	<i>Teneur (%)</i>
CaO	56.30
Al ₂ O ₃	4.52
SiO ₂	23.88
Fe ₂ O ₃	3.34
MgO	1.08
Na ₂ O	0.33
K ₂ O	0.90
Cl-	0.02
SO ₃	2.66
P.A.F	4.96
Résidus Insolubles	7.01
CaO Libre	0.77

Tableau II.2. Principales caractéristiques physiques et mécaniques du ciment [Fiche de qualité, 2013].

<i>Caractéristiques physiques</i>		<i>Caractéristiques mécaniques</i>	
Poids spécifique (g/cm ³)	3,09	Résistance en compression	20,98
Retrait (µm/m)	834	(MPa)	32,38
Gonflement (µm/m)	0,00		44,15
S.S. Blaine (cm ² /g)	4152	Résistance à la flexion	2,51
Consistance (%H ₂ O)	27,3	(MPa)	6,23
Début de prise (h:min)	2h : 06'		7,42
Fin de prise (h:min)	2h : 56'	Lim. Inf. R. C. à 2 jrs	19,03
Exp. à chaud (mm)	0,90	Lim. Inf. R. C. à 28 jrs	44,93
Refus sur tamis 45 µm (%)	14,24	Lim. Sup. R. C. à 28 jrs	53,41



II.2.1.2 Sable

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

Tableau II.3. Principales propriétés physiques du sable siliceux et calcaire.

<i>Propriétés</i>	<i>Sable siliceux 0/5</i>	<i>Sable calcaire 0/5</i>
Masse volumique absolue (g/cm ³)	2,60	2,50
Masse volumique apparente (g/cm ³)	1,70	1,64
Module de finesse	2,65	2,63
Equivalent de sable (%)	85,0	53,87
Teneur en eau (%)	0,35	0,20
Absorption (%)	1,03	3,92

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 des granulats calcaires 5/15 et 15/25.

<i>Propriétés</i>	<i>Graviers 15/25 mm</i>	<i>Gravillon 5/15 mm</i>
Masse volumique absolue (g/cm ³)	2,61	2,65
Masse volumique apparente (g/cm ³)	1,27	1,28
Coefficient Los Angeles (%)	21,98	21,98
Teneur en eau (%)	0,14	0,14
Absorption (%)	0,57	0,57
Porosité (%)	1,53	1,53

Pour pouvoir étudier l'influence de la nature des granulats sur le comportement des bétons soumis à température élevée, des granulats de brique concassée ont été également utilisés. Leurs principales caractéristiques sont présentées dans le tableau II.5.

Tableau II.5. Principales caractéristiques des granulats de brique concassée.

<i>Propriétés</i>	<i>Granulats de brique concassée 5/25</i>
Masse volumique absolue (g/cm ³)	2.12
Masse volumique apparente (g/cm ³)	0.94
Coefficient Los Angeles (%)	60.0
Teneur en eau (%)	0.13
Absorption (%)	8.04
Porosité (%)	13.22



Figure II.1. Différents granulats utilisés, GC: granulats calcaires, GBC: granulats de brique concassée, SS : sable siliceux, SC : sable calcaire.

II.2.1.4 L'eau

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.

II.2.1.5 Adjuvant

Le rôle d'ajout d'adjuvant est d'améliorer la maniabilité du béton de haute performance. L'adjuvant utilisé est un plastifiant haut réducteur d'eau Sikaplast[®] BV +40. Il s'agit d'un adjuvant liquide marron sans chlore. Sa densité est de 1.04 ± 0.015 et son Ph est de 4.7 ± 1 . La plage d'utilisation recommandée est de 0.3 à 1.5% du poids de liant selon les performances recherchées.

II.2.2 Courbes granulométriques

Les courbes granulométriques ont été déterminées sur des échantillons représentatifs de sable, de gravillon, de gravier et des granulats de brique concassée selon la norme P 18-560.

La figure II.2 présente les courbes granulométriques de trois fractions des granulats naturels (gravier, gravillon et sable), sur la même figure, la courbe granulométrique optimale selon la méthode Dreux-Gorisse [Dreux et Festa, 1998] est tracée aussi.

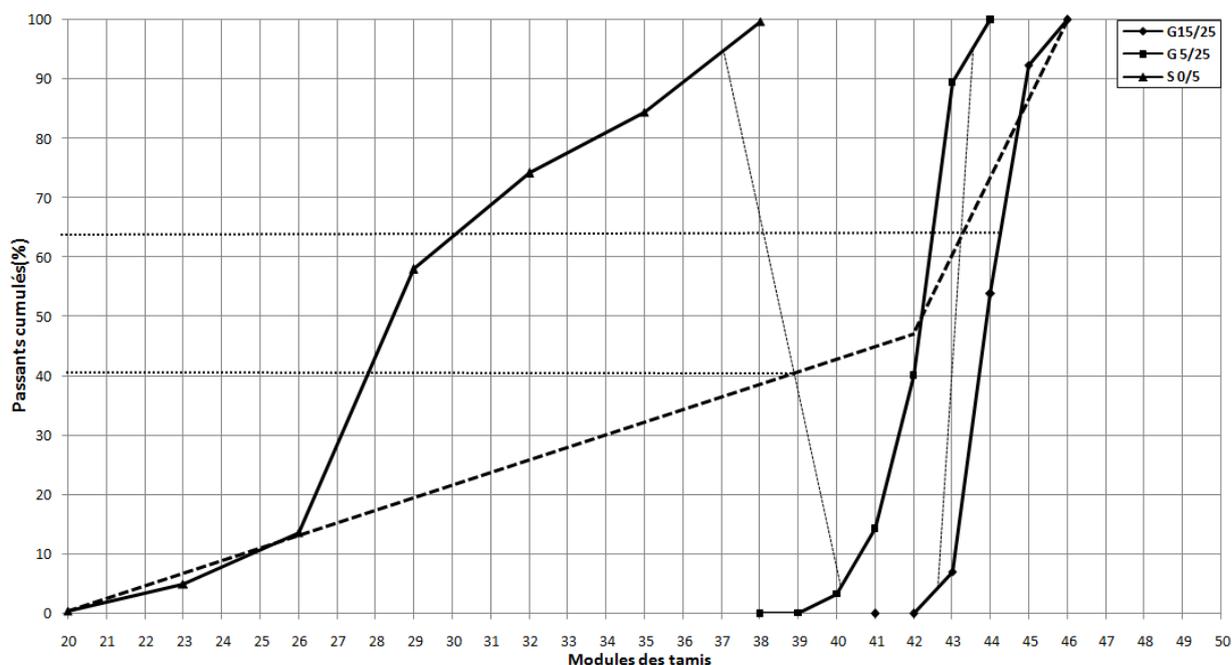


Figure II.2. Courbes granulométriques du sable siliceux, gravillon et gravier calcaires.

La droite de référence de Dreux-Gorisse représente la courbe idéale d'un matériau à minimum de vides. Cette courbe granulométrique est obtenue en considérant trois points sur le graphique. Le premier point est situé à l'origine des axes, le second à l'ordonnée 100% correspondant à la dimension maximale du plus gros granulat. L'abscisse du troisième point est située au milieu du segment gravier limité par le diamètre du tamis 5 mm et le diamètre correspondant à D_{max} et à l'ordonnée 47%.

Pour déterminer les pourcentages en volumes absolus de granulats permettant la confection d'un mélange à minimum de vide, il est nécessaire de tracer des droites reliant deux à deux les courbes granulométriques des matériaux du mélange. Ces droites sont définies par 5% de refus pour le matériau à faible granularité et par 5% de passant pour le matériau à forte granularité. L'intersection de ces droites avec la courbe de référence de Dreux permet, par prolongement sur l'axe des ordonnées, de déterminer les pourcentages en volumes absolus de chaque matériau. Nous obtenons une composition granulair optimisée à base de 41% de sable, de 22% de gravillon et de 37% de gravier. Ces valeurs sont utilisées pour formuler les bétons étudiés.

Les figures II.3 et II.4 présentent les courbes granulométriques des granulats de briques concassés et du sable calcaire, respectivement.

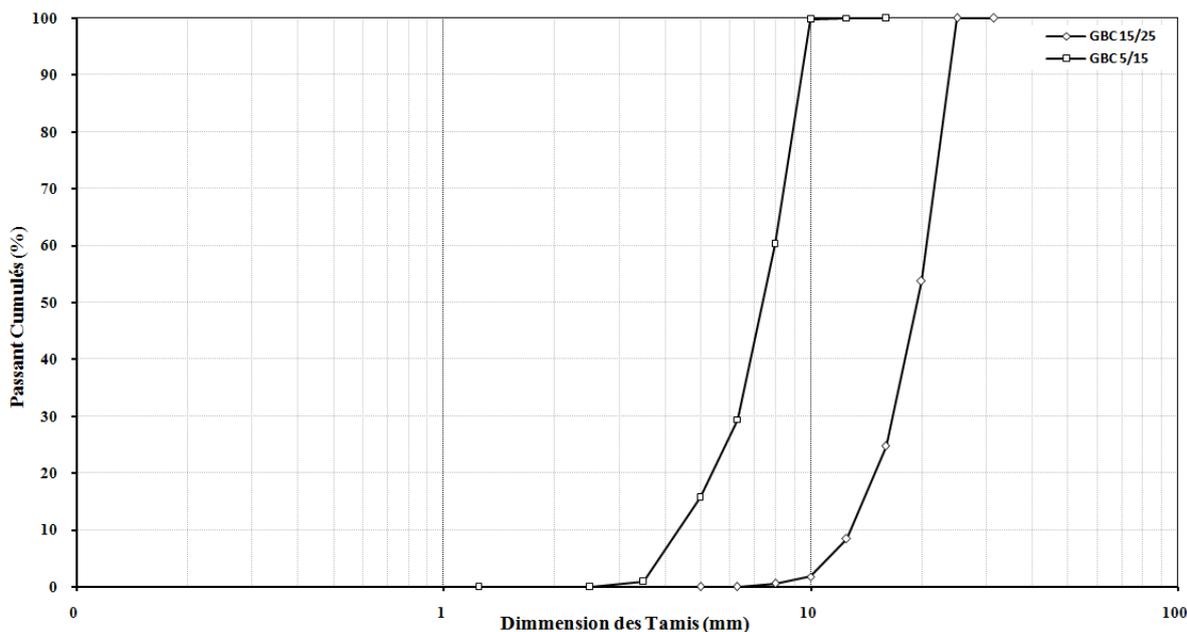


Figure II.3. Courbe granulométrique de granulats de brique concassée.

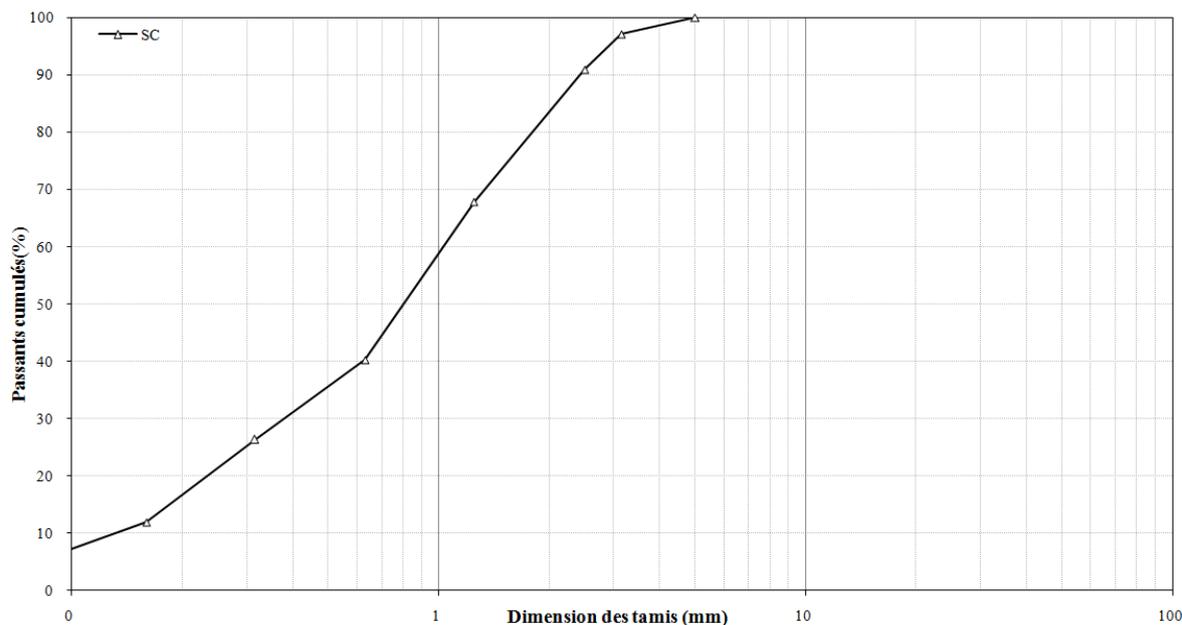


Figure II.4. Courbe granulométrique de du sable concassé.

II.2.3. Compositions des bétons testés

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 quatre formulations différentes de béton (B1-GO, B2-GO, B3'-GO et B3-GO), qui permettent de couvrir la gamme des bétons ordinaires à ceux des bétons à hautes performances. Elles sont obtenues en gardant un squelette granulaire constant et en faisant



varier le dosage en ciment. Les compositions de bétons sont obtenues en utilisant la méthode de formulation de Dreux-Gorisse [Dreux et Festa, 1998]. Deux autres groupes de béton ont été étudiés, un groupe de béton (B1-SC, B2-SC et B3-SC) a été confectionné en utilisant un sable calcaire et l'autre groupe de béton (B1-BC, B2- BC et B3- BC) a été confectionné en remplaçant 30% des granulats calcaires par des granulats de brique concassée.

II.2.3.1. Formule de base

Le béton de base de notre étude est un béton ordinaire de rapport $E/C = 0,6$. Il s'agit d'une formule de béton dont la résistance en compression à 28 jours atteignant environ 26 MPa, ce béton de base prendra le nom de B1-GO dans le reste du document. Sa formule est donnée dans le tableau II.6.

II.2.3.2. Formules déclinées

A partir de la composition de béton de base B1-GO, nous avons testé le comportement à haute température des formules complémentaires de béton. Ces différentes déclinaisons de la formulation de base nous permettront d'étudier l'influence de certains paramètres sur le comportement du béton soumis à haute température.

- **Influence de la compacité**

La compacité du béton est un paramètre très important dans l'étude du comportement du béton soumis à haute température. En effet, une forte compacité augmente le risque d'instabilité thermique du béton [Mindeguia, 2009]. C'est notamment le cas des bétons à hautes performances (B3-GO).

Pour augmenter la compacité du béton, nous avons choisi de réduire le rapport E/C en réduisant le dosage en eau et en augmentant le dosage en ciment. La perte de maniabilité du béton à l'état frais a été compensée par l'ajout d'un plastifiant. Nous avons fabriqué trois déclinaisons de formule de base en modifiant le rapport E/C , les trois nouvelles valeurs du rapport E/C choisies sont 0.42, 0.34 et 0.27 (tableau II.6) conférant respectivement aux trois formules les appellations de B2-GO, B3'-GO et de B3-GO. Les mesures de résistance en compression à 28 jours ont donné 49 MPa, 65 MPa et 77 MPa pour le rapport E/C de 0.42, 0.34 et 0.27, respectivement.

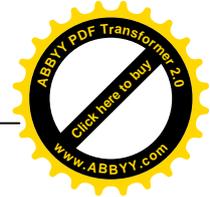


Tableau II.6. Compositions des différents bétons testés.

Dosage (kg/m ³)	B1-GO	B2-GO	B3'-GO	B3-GO	B1-SC	B2-SC	B3-SC	B1-BC	B2-BC	B3-BC
Ciment CPJ CEM II/A 42.5	350	400	450	500	350	400	500	350	450	500
Granulats calcaires 15/25	646	646	646	646	646	646	646	452	452	452
Granulats calcaires 5/15	390	390	390	390	390	390	390	273	273	273
Granulats de brique concassée 15/25	-	-	-	-	-	-	-	194	194	194
Granulats de brique concassée 5/15	-	-	-	-	-	-	-	117	117	117
Sable siliceux 0/5	715	715	715	715	715	-	-	715	715	715
Sable calcaire 0/5	-	-	-	-	-	715	715	-	-	-
Eau	214	197	180	164	214	197	164	214	197	164
Plastifiant (%)	-	-	0.60	1.50	-	-	1.50	-	-	1.50
Rapport E/C	0.61	0.49	0.40	0.32	0.61	0.49	0.32	0.61	0.49	0.32

• **Influence de la nature des constituants**

La nature des constituants est un autre paramètre très important dans l'étude du comportement du béton soumis à haute température. Afin d'étudier l'influence de ce paramètre, un deuxième groupe de matériau a été réalisé.

Comme nous l'avons vu dans l'étude bibliographique, les granulats calcaires présentent un bon comportement thermiques jusqu'à 650°C. Au-delà de cette température, le carbonate de calcium commence à se décomposer en monoxyde de calcium (CaO) appelé chaux qui peut réagir avec de l'eau pour reformer de la portlandite Ca(OH)₂. Cette réaction entraîne une perte de masse et s'accompagne d'une expansion volumique qui pourrait accentuer l'endommagement des granulats [Nyry et al., 2012], [Xing, 2011]. Ces aspects nous ont motivé à tester des bétons contenant des granulats calcaires (sable calcaire).

A partir des formulations du premier groupe (B1-GO, B2-GO et B3-GO), nous avons substitué le sable purement siliceux par un sable calcaire concassé de classe granulaire 0/5. Ces bétons seront appelés dans la suite du document B1-SC, B2-SC et B3-SC et leurs formulations sont reportées dans le tableau II.6.

Un troisième groupe de matériaux a été réalisé afin d'étudier l'influence d'utilisation des granulats de brique concassé sur le comportement du béton soumis à haute température. La composition de ces bétons a été déduite des compositions de bétons B1-GO, B2-GO et B3-GO, par substitution de 30% du gravier et du gravillon par des granulats de brique concassée de classe granulaire 5/25. Dans le tableau II.6, la composition de ces trois bétons (B1-BC, B2-BC et B3-BC) est présentée.



Le choix du pourcentage de substitution de 30% du gravier et du gravillon par des granulats de brique concassée s'inspire des essais réalisés par Zong [Zong et al., 2014] et Hachana [Hachana, 2008]. Dans ces essais, les auteurs ont montré que le remplacement de plus de 30% des granulats naturels par des granulats de brique concassé provoque une plus forte réduction de la résistance en compression.

II.3 FABRICATION ET CONDITIONNEMENT DES EPROUVETTES

II.3.1 Fabrication

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 a été utilisé auparavant.
- Introduction des constituants solides en commençant par les graviers, le sable et puis le ciment.
- De (T_0) à (T_0+1') : malaxage à sec des constituants solides.
- De (T_0+1') à ($T_0+1' 30''$) : ajout de l'eau.
- De ($T_0+1' 30''$) à ($T_0+3' 30''$) : malaxage.
- De ($T_0+3' 30''$) à ($T_0+3' 45''$) : ajout du plastifiant (le malaxeur continue à tourner).
- De ($T_0+1' 45''$) à (T_0+5') : fin du malaxage.
- De (T_0+5') : vidange de malaxeur.

Le béton a été coulé dans les moules cubiques et prismatiques en deux couches. Chaque couche a été vibrée sur une table vibrante pendant 10 secondes par couche. Les éprouvettes sont ensuite protégées de la dessiccation par un couvercle plastique.

II.3.2. Les corps d'épreuve

Pour réaliser les essais, nous utiliserons des moules cubiques de dimensions 10x10x10 cm et des moules prismatiques de dimensions 10x10x40 cm. Ces moules sont en métal (acier), cette matière est imperméable, non absorbante et non réactive au liant. Les éprouvettes cubiques sont destinées aux essais de perte de masse et aux essais de compression avant et après exposition aux cycles thermiques. Les éprouvettes prismatiques sont réservées à la mesure de la résistance à la flexion.

II.3.3. Cure appliquée

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.

Après démoulage, les éprouvettes ont été conservées pendant 24 heures dans leur moule à température ambiante (20 ± 2)°C. A l'issue de ce temps de conservation initiale, elles ont été démoulées, puis plongées dans l'eau à 20°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 et de se rapprocher ainsi des conditions réelles qu'on peut rencontrer dans certains ouvrages souterrains (le cas de certains tunnels).



Figure II.5. Conservation des éprouvettes immergées dans l'eau.

A l'issue du temps de cure dans l'eau, les éprouvettes ont été stockées à l'air ambiant pendant 4 jours afin de diminuer les gradients hydriques et thermiques dans les éprouvettes pour diminuer en conséquence l'endommagement des éprouvettes lors du traitement thermique. Le tableau II.7 présente la masse des éprouvettes cubiques de dimensions 10x10x10 cm des formulations de béton avec granulats de brique concassée après la cure et avant le chauffage thermiques (variation de masse pendant la conservation à l'air ambiant).

Ces éprouvettes, qui ont été exposées à une humidité relative environnante inférieure à celle régnant au sein du matériau, ont subi un déséquilibre hygrométrique (à la fin de cure des éprouvettes lors de leur soumission à l'air ambiant). Ce déséquilibre se traduit alors par un mouvement de l'eau de l'intérieur du matériau vers l'extérieur pour rétablir l'équilibre de milieu, conduisant le séchage de celui-ci.

Tableau II.7. Variation de masse des éprouvettes de béton de granulats de brique concassée pendant la conservation à l'air ambiant destinées au chauffage à différentes températures.

		Masse après cure (g)	Masse avant chauffage (g)	Perte de masse (g)	Perte de masse (%)
B3-BC 150°C	ép.1	2383,40	2375,20	8,20	0,344
	ép.2	2404,20	2395,40	8,80	0,366
	ép.3	2579,30	2569,50	9,80	0,380
	moy.	2455,63	2446,70	8,93	0,363
B3-BC 250°C	ép.1	2402,90	2381,00	21,90	0,911
	ép.2	2420,10	2404,00	16,10	0,665
	ép.3	2510,10	2489,50	20,60	0,821
	moy.	2444,37	2424,83	19,53	0,799
B3-BC 400°C	ép.1	2538,90	2517,30	21,60	0,851
	ép.2	2396,60	2377,00	19,60	0,818
	ép.3	2403,00	2382,60	20,40	0,849
	moy.	2446,17	2425,63	20,53	0,839
B3-BC 600°C	ép.1	2459,60	2437,40	22,20	0,903
	ép.2	2392,90	2372,50	20,40	0,853
	ép.3	2412,50	2391,30	21,20	0,879
	moy.	2421,67	2400,40	21,27	0,878
B3-BC 900°C	ép.1	2445,80	2424,20	21,60	0,883
	ép.2	2403,60	2383,80	19,80	0,824
	ép.3	2376,00	2355,80	20,20	0,850
	moy.	2408,47	2387,93	20,53	0,852

II.4 JUSTIFICATION DU PROGRAMME EXPERIMENTAL

Nous rappelons que ce travail repose sur deux grands axes, qui sont l'étude de l'influence du type de béton et l'étude de l'influence de la nature des constituants sur le comportement à haute température des matériaux. Les formulations de bétons retenus diffèrent pour chacun des axes et dépendent de l'information recherchée. Nous avons coulé quatre formulations dans le cadre de l'étude de l'influence de type de béton, et six formulations pour l'étude de l'influence de la nature des constituants.

Le programme expérimental peut se décomposer en deux parties :

- **Essais macrostructuraux**

Nous avons choisi de réaliser une campagne expérimentale de caractérisation des principales propriétés de nos matériaux à haute températures, parmi lesquelles :

- La résistance à la compression sur éprouvettes cubiques 10x10x10 cm.
- La résistance à la flexion sur éprouvettes prismatiques 10x10x40 cm.



- La perte de masse sur éprouvettes cubiques 10x10x10 cm.
- La porosité à l'eau et la densité.
- Le changement du volume pour les éprouvettes 10x10x10 cm.
- La vitesse des ondes soniques sur éprouvettes cubiques 10x10x10 cm.

• **Essais microstructuraux**

L'étude de la microstructure du béton soumis à haute température repose en grande partie sur la mesure de la largeur des fissures se développant sur la surface et à l'intérieure des éprouvettes chauffées, d'une part. D'autre part, sur des observations au Microscope Electronique à Balayage MEB. Ces essais doivent nous permettre de mieux comprendre le comportement du béton sous hautes températures.

Le programme expérimental est regroupé dans le tableau II.8. Ce tableau propose une vue d'ensemble des essais réalisés dans le cadre de cette thèse en fonction du type de matériau.

Tableau II.8. Quantité et programme des essais réalisés au cours de la durée de thèse.

Essais macro-structuraux	T (°C)	B1-GO	B2-GO	B3-GO	B3'-GO	B1-BC	B2-BC	B3-BC	B1-SC	B2-SC	B3-SC
<i>Résistance en compression + Perte de masse + Changement de volume + Vitesse des ondes soniques</i>	20	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
	150	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
	250	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
	400	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
	600	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
	900	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
<i>Résistance en flexion</i>	20	3	3	-	3	-	-	-	-	-	-
	150	3	3	-	3	-	-	-	-	-	-
	250	3	3	-	3	-	-	-	-	-	-
	400	3	3	-	3	-	-	-	-	-	-
	600	3	3	-	3	-	-	-	-	-	-
	900	3	3	-	3	-	-	-	-	-	-
<i>Porosité à l'eau + Masse volumique apparente</i>	20	2	2	2	-	2	2	2	2	2	2
	150	2	2	2	-	2	2	2	2	2	2
	250	2	2	2	-	2	2	2	2	2	2
	400	2	2	2	-	2	2	2	2	2	2
	600	2	2	2	-	2	2	2	2	2	2
	900	2	2	2	-	2	2	2	2	2	2
<i>Essais mésostructuraux (observation au microscope)</i>	20	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	150	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	250	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	400	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	600	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	900	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
<i>Essais microstructuraux (observation au MEB)</i>	20	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	150	-	-	-	-	-	-	1	-	-	-
	250	-	-	-	-	-	-	1	-	-	-
	400	-	-	-	-	-	-	1	-	-	-
	600	-	-	-	-	-	-	1	-	-	-
	900	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-



Dans un premier temps, les expériences ont été réalisées sur les compositions des bétons du premier groupe (B1-GO, B2-GO et B3-GO) présentées dans le tableau II.6. Ces études ont été complétées par des études sur des formules complémentaires de béton déclinées des formules du premier groupe de béton. Ces formulations du deuxième et troisième groupe de béton doivent nous permettre d'étudier l'influence de certains paramètres sur le comportement du béton soumis à haute température. Les résultats de 342 essais sont présentés dans ce document. Le programme expérimental sera détaillé et expliqué dans chaque paragraphe propre à un type d'essai.

II.5 ESSAI DE CHAUFFAGE

Pour étudier le comportement à haute température du béton, il est nécessaire de lui faire subir différents cycles thermiques. La Norme RILEM [Rilem, 2004] recommande pour un diamètre des cylindres compris entre 6 et 10 cm une montée en température comprise entre 1°C/min et 4°C/min et un palier de 60 ± 5 min. 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 et 5°C/min n'ont pas d'influence sur le caractère explosif du béton [Haniche, 2011].

La gamme de température retenue pour nos essais s'étend de la température ambiante à 900°C. Cette amplitude couvre les températures pour lesquelles les principales transformations physico-chimiques des bétons s'observent. 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- α en quartz- β est atteinte (575 °C).

- 900°C : destruction du béton est l'apparition des fissures.

II.5.1. Dispositif de chauffage

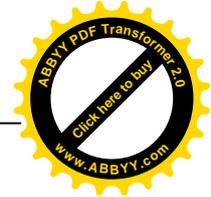
Afin de réaliser les cycles de chauffage, nous utilisons un four électrique programmable dont les dimensions utiles sont de 250 x 255 x 355 mm. Ce four permet le chauffage de trois éprouvettes cubiques de dimensions 10x10x10 cm en même temps. Un autre four de dimensions 380 x 380 x 480 mm est utilisé pour le chauffage de trois éprouvettes prismatiques de béton. Les deux fours (figure II.6) sont pilotés par un régulateur-programmateur, relié à un thermocouple placé dans les fours, offrant la possibilité à un opérateur d'installer des programmes prédéfinis et permettant l'enregistrement des températures à l'intérieur du four.



Figure II.6. Dispositifs de chauffage.

II.5.2. La méthodologie

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 900°C. Chaque cycle de chauffage-refroidissement se compose de trois phases, une phase de montée en température, une phase de stabilisation à température constante et une troisième phase de descente de la température du palier à la température ambiante. La rampe de montée en température est constante et la vitesse égale à 3°C/min. Ces rampes de montée en température sont suivies d'un palier de stabilisation en



température d'une durée d'une heure. La dernière phase est une rampe de 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.9 dresse un récapitulatif des différents cycles thermiques appliqués aux matériaux.

Tableau II.9. Les différents cycles de chauffage-refroidissement appliqués aux différents types de matériaux.

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
900	3	60	Libre

La figure II.7 présente les évolutions de la température en fonction du temps au cours des cinq cycles de chauffages étudiés appliqués aux différents types de matériaux.

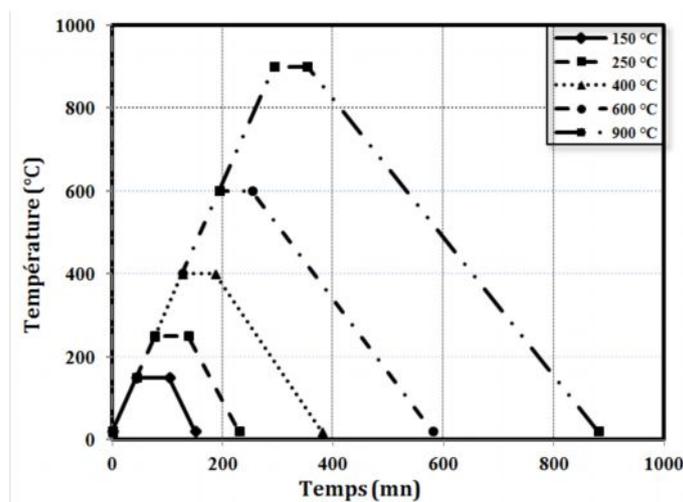


Figure II.7. Cycles de chauffage-refroidissement (vitesse de chauffage 3°C/min).

II.5.3. 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.8 illustre la disposition des éprouvettes dans le four.



Figure II.8. Disposition des éprouvettes dans les fours.

II.6 ESSAIS MACROSTRUCTURAUX

A la suite des essais thermiques, les éprouvettes sont sorties du four et préparées pour subir les mesures de perte de masse, des dimensions, de vitesse des ondes soniques et pour subir ensuite les essais mécaniques de compression et de flexion. Ces essais permettent d'observer l'évolution des propriétés physiques et mécaniques résiduelles des matériaux avec l'élévation de la température.

II.6.1. Essai de compression

Après 28 jours de cure, trois éprouvettes de chaque composition destinées à la détermination de la résistance en compression à température ambiante sont sorties de l'eau de conservation. Elles sont essuyées à l'aide d'un chiffon sec, puis pesées. Leurs longueurs, largeurs et hauteurs sont mesurées à l'aide d'un pied à coulisse. Une fois les dimensions relevées, les éprouvettes sont placées sous la presse, centrées et chargées mécaniquement.

L'application de la charge mécanique est effectuée via une presse hydraulique de capacité 3000 KN. La vitesse de chargement est gardée constante durant toute la durée de l'essai grâce au cadencemètre de la presse hydraulique (5 KN/s). La charge de compression est appliquée jusqu'à rupture de l'éprouvette. La charge maximale atteinte est enregistrée et la contrainte de rupture est obtenue par la formule suivante :

$$f_c = \frac{F_{\max}}{S} \quad (II.1)$$

F_{\max} désigne la charge à la rupture en compression et S la surface de la section transversale de l'éprouvette.

Trois essais ont été réalisés pour chaque matériau. Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau II.10.

Tableau II.10. Résistance en compression des différents bétons.

<i>Résistance en compression à 28 jours à température ambiante (MPa)</i>				
	ép.1	ép.2	ép.3	moy.
B1-GO	29,39	25,98	23,78	26,38
B2-GO	52,83	46,02	-	49,43
B3'-GO	58,83	70,50	-	64,66
B3-GO	76,85	-	-	76,85
B1-BC	35,07	36,03	37,81	36,30
B2-BC	50,30	-	-	50,30
B3-BC	54,56	-	-	54,56
B1-SC	33,57	35,39	36,54	35,16
B2-SC	44,44	45,68	48,23	46,12
B3-SC	53,14	56,15	59,52	56,27

La figure II.9 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 26 MPa et 76 MPa.

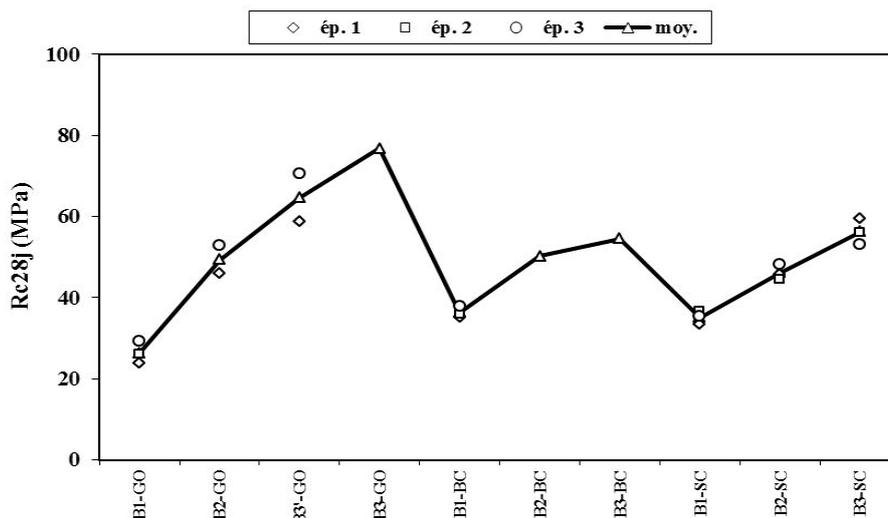


Figure II.9. Résistance en compression moyenne à 28 jours des bétons de l'étude.

A la lecture de ce graphique, 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 du sable calcaire (B1-SC) et les granulats de brique concassée (B1-BC) dans le béton d'un rapport E/C = 0,6 permet d'augmenter légèrement la résistance en compression (environ 33% pour le B1-SC et 37% pour le B1-BC).

- Pour les bétons de rapport E/C faible ($E/C = 0,27$), l'utilisation du sable calcaire (B3-SC) et les granulats de brique concassée (B3-BC) fait chuter la résistance en compression d'environ 27% et 29%, respectivement.

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 900°C sont sorties du four et testées suivant la même procédure. Mais avec la nuance que les éprouvettes sorties du four ne sont pas essayées.

Toutes les dimensions des éprouvettes ont été mesurées grâce au pied à coulisse. Ces dimensions servent à déterminer les sections transversales réelles prenant en compte les dilatations éventuelles des éprouvettes après chauffage.

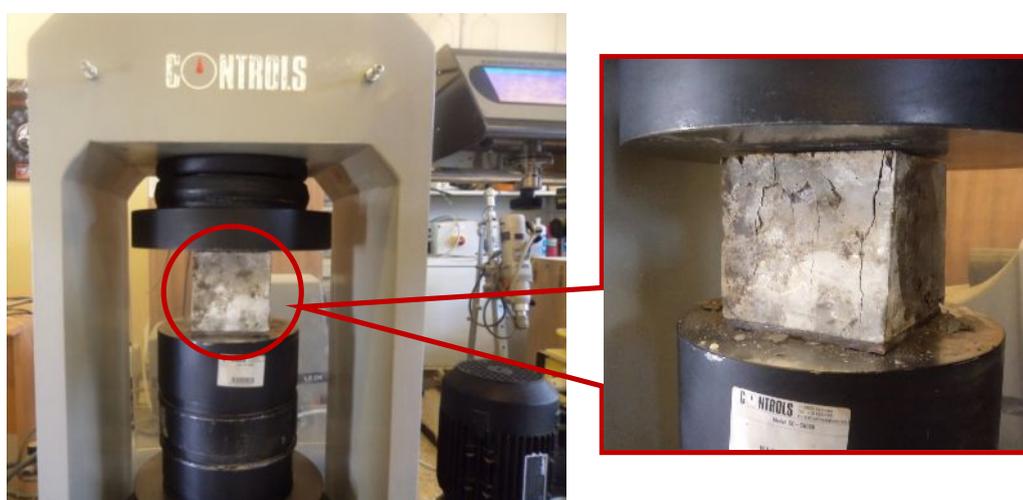


Figure II.10. Epreuve mise en place sur la presse hydraulique pour déterminer la résistance en compression.

II.6.2. Essai de flexion

La procédure de préparation des éprouvettes destinées à l'essai de flexion est la même que celle utilisée lors de l'essai de compression. Le principe de l'essai de flexion est d'appliquer une charge au moyen de rouleaux supérieurs et inférieurs.

L'essai est réalisé au minimum sur trois éprouvettes prismatiques, 10x10x40 cm, à la température ambiante et après les cycles chauffage-refroidissement de 150°C, 250°C, 400°C, 600°C et 900°C.

L'éprouvette est placée dans l'appareil de chargement en prenant comme faces de chargement ses faces de moulage et l'axe longitudinale de l'éprouvette est placé dans le plan de flexion de l'appareil. L'application de la charge est effectuée d'une manière continue et sans chocs jusqu'à rupture de l'éprouvette.

Cet essai est assez simple à réaliser et permet de déterminer la résistance en flexion. Pour cela, la formule permettant d'obtenir la contrainte de rupture en traction par flexion est la suivante [NF EN 12390-5]:

$$R_f = \frac{F.l}{d_1.d_2^2} \tag{II.2}$$

Où, F est la charge maximale appliquée par la presse sur l'éprouvette prismatique. l , est la longueur entre les deux appuis, d_1 et d_2 sont les dimensions de la section transversale de l'éprouvette.

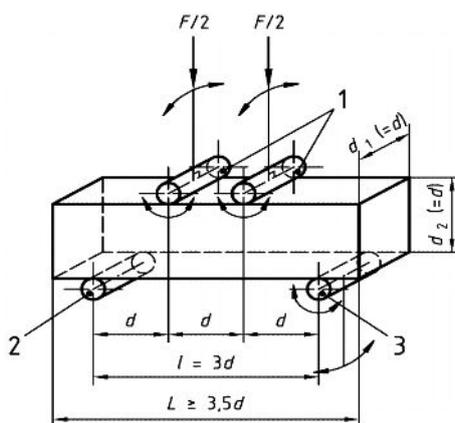


Figure II.11. Epreuve mise en place dans l'appareil pour déterminer la résistance en flexion.

Les valeurs de la résistance en flexion mesurée à 28 jours à température ambiante des bétons de l'étude sont présentées sur la figure II.12 et regroupées dans le tableau II.11.

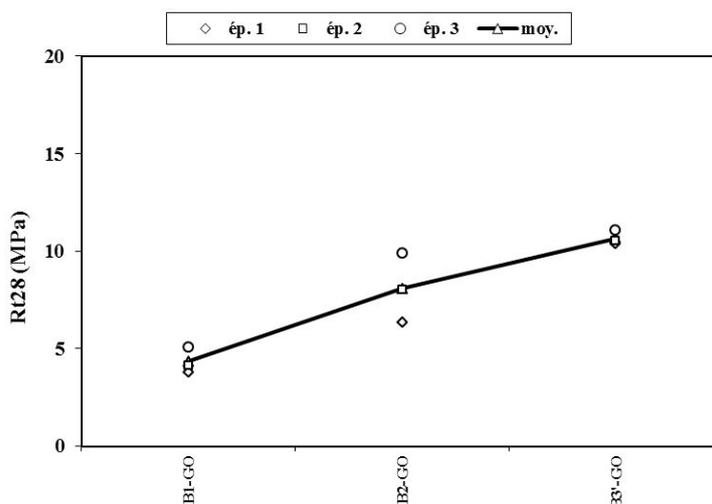


Figure II.12. Résistance à la flexion moyenne à 28 jours des B1-GO, B2-GO et B3'-GO.

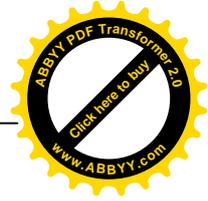


Tableau II.11. Résistance à la flexion des bétons B1-GO, B2-GO et B3-GO.

		B1-GO	B2-GO	B3'-GO
<i>Résistance à la flexion à 28 jours à température ambiante (MPa)</i>	ép.1	3.78	6.36	10.39
	ép.2	4.12	8.02	10.55
	ép.3	5.09	9.88	11.05
	moy.	4.33	8.09	10.66

L'examen de la figure II.12 nous permet de faire les commentaires suivants :

- La résistance à la flexion des bétons de l'étude s'échelonne entre 4 MPa et 10 MPa.
- L'augmentation du dosage en ciment permet d'augmenter la résistance en flexion du béton.

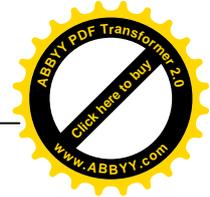
II.6.3. Perte de masse

La perte de masse est un indicateur important des dégradations au sein du matériau, et notamment de la perte en eau. Elle permet, en complément des essais mécaniques réalisés après application des cycles thermiques, de suivre l'évolution du poids des matériaux ayant subi un cycle de chauffage. Pour la quantification de l'eau perdue, la masse des éprouvettes est mesurée avant et après chaque cycle de chauffage-refroidissement.

De la fabrication au traitement thermique, les éprouvettes subissent des variations de masse dues au ressuage, à la dessiccation ou absorption d'eau. Pour rendre compte de ces variations, les éprouvettes sont pesées à différents temps : après leur démoulage, les éprouvettes de béton sont pesées et placées dans les bacs remplis d'eau pour limiter une longue durée d'exposition à l'air libre qui entrainerait une dessiccation. A la fin de la période de cure, les éprouvettes sont essuyées avec un chiffon sec et pesées. Elles sont ensuite placées dans le four pour subir un cycle de chauffage-refroidissement.

Après le traitement thermique, chacune des éprouvettes est pesée une dernière fois pour quantifier la quantité de l'eau évaporée au cours du chauffage. Ces mesures sont effectuées sur l'ensemble des éprouvettes placées dans le four et pour tous les cycles de chauffage et pour chacune des compositions.

Les essais de mesure de la perte de masse ont été réalisés grâce à deux balances. La première balance a une capacité de 10 kg et une précision de 1 g, et la seconde d'une capacité de 3 kg et une précision de 0,1 g. La première balance est destinée aux éprouvettes prismatiques 10x10x40 cm, tandis que la deuxième balance est réservée aux échantillons cubiques de béton 10x10x10 cm.



La perte de masse a été calculée par rapport à la masse initiale des éprouvettes et exprimée en pourcentage de la masse de départ.

$$dm = \frac{m_i - m_t}{m_i} \times 100, \quad (\%) \quad (II.3)$$

dm : perte de masse (%).

m_i : masse initiale (g).

m_t : masse après chauffage (g).

Le tableau II.12 présente la différence de masse des éprouvettes pesées après le démoulage et celles pesées avant application du cycle de chauffage dans le four. La perte de masse constatée, pour toutes les éprouvettes, est inférieure à 1%. Elle présente la quantité d'eau perdue au moment de la conservation des éprouvettes à l'air ambiant 4 jours avant le traitement thermique. Les masses des éprouvettes mesurées avant chauffage sont prises comme référence et retenus pour la suite de l'étude.

Tableau II.12. Perte de masse des bétons (destinés au chauffage à différentes températures) calculée avec les masses d'éprouvettes pesées après démoulage et avant chauffage.

		<i>Masse après démoulage (g)</i>	<i>Masse avant chauffage (g)</i>	<i>Perte de masse (g)</i>	<i>Perte de masse (%)</i>
B3-GO 20°C	ép.1	2412,50	2417,50	- 5,00	- 0,21
	ép.2	2406,70	2414,00	- 7,30	- 0,30
	ép.3	2441,40	2447,30	- 5,90	- 0,24
	moy.	2420,20	2426,27	- 6,07	- 0,25
B3-GO 150°C	ép.1	2396,40	2404,40	- 8,00	- 0,33
	ép.2	2449,80	2457,50	- 7,70	- 0,31
	ép.3	2459,60	2465,60	- 6,00	- 0,24
	moy.	2435,27	2442,50	- 7,23	- 0,30
B3-GO 250°C	ép.1	2448,50	2454,30	- 5,80	- 0,24
	ép.2	2410,70	2417,10	- 6,40	- 0,27
	ép.3	2424,00	2430,60	- 6,60	- 0,27
	moy.	2427,73	2434,00	- 6,27	- 0,26
B3-GO 400°C	ép.1	2417,40	2417,40	- 6,40	- 0,27
	ép.2	2469,60	2477,20	- 7,60	- 0,31
	ép.3	2436,40	2443,10	- 6,70	- 0,27
	moy.	2439,00	2445,90	- 6,90	- 0,28
B3-GO 600°C	ép.1	2436,60	2444,30	- 7,70	- 0,32
	ép.2	2376,20	2384,60	- 8,40	- 0,35
	ép.3	2456,70	2465,50	- 8,80	- 0,36
	moy.	2423,17	2431,47	- 8,30	- 0,34
B3-GO 900°C	ép.1	2395,10	2403,00	- 7,90	- 0,33
	ép.2	2411,00	2418,80	- 7,80	- 0,32
	ép.3	2394,30	2402,70	- 8,40	- 0,35
	moy.	2400,13	2408,17	- 8,03	- 0,33

II.6.4. Porosité à l'eau

La porosité et la masse volumique sont deux grandeurs physiques importantes de béton, elles ont un rôle majeur vis-à-vis de la durabilité du matériau. La porosité accessible à l'eau et la masse volumique apparente des différents bétons sont étudiées. Les essais se font à température ambiante et après le refroidissement des éprouvettes.

Nous avons utilisé la technique de la porosimétrie à l'eau par pesée hydrostatique recommandée par l'AFREM [Afrem, 1997] pour déterminer la porosité accessible à l'eau et la masse volumique apparente. Cette méthode permet une estimation de la porosité globale ou la porosité ouverte mais ne permet pas de déterminer la distribution des pores [Haniche, 2011], [Fares, 2009].

Les échantillons testés sont prélevés sur les éprouvettes après les essais mécaniques de compression pour chaque champ de température. Ces échantillons représentent quelques centimètres cubes. L'essai est réalisé sur deux échantillons.



Figure II.13. Echantillons utilisés pour la mesure de la porosité à l'eau.

Premièrement la masse de l'échantillon à l'état sec a été prélevée (M_{sec}). Ensuite les éprouvettes ont été immergées dans l'eau. Tout d'abord, les éprouvettes sont mises dans un récipient, puis l'immersion est réalisée sur la moitié de la hauteur des échantillons. Après 15 minutes, les échantillons sont complètement immergés. Ce procédé réduit l'enfoncement de l'air au cœur des échantillons [Hager, 2004].

Des mesures de masse sont effectuées au fil du temps jusqu'à saturation complète. Nous considérons qu'un échantillon est saturé lorsque l'écart entre deux mesures successives de masse espacées de 24 heures est de l'ordre de la précision de la balance utilisée, soit 0.01 g.

Une fois que l'échantillon est saturé, la pesée en état saturé immergé dans l'eau est réalisée sur une balance hydrostatique (M_{sat}^{imm}), puis elle est suivie par le pesage en état saturé d'eau (M_{sat}). Avant cette pesée, chaque éprouvette est essuyée avec un linge afin d'enlever les surplus d'eau de la surface. Cette opération doit être rapide afin de ne pas enlever l'eau dans les pores proches de la surface de l'éprouvette.

Les échantillons testés sont ceux issus des chauffages à 150°C, 250°C, 400°C, 600°C et 900°C, et plus des échantillons non chauffés. Concernant la pesée, il est nécessaire d'avoir une balance très précise pour réduire les erreurs de mesure, donc, nous avons utilisé une balance de 4.20 kg avec une précision de 0.01 g disposant d'un crochet pour réaliser les pesées hydrostatiques.

La porosité à l'eau est déterminée selon l'équation (II.4) :

$$P = \frac{M_{sat} - M_{sec}}{M_{sat} - M_{sat}^{imm}} \times 100 \quad (II.4)$$

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) nous permet également de déterminer la densité D des échantillons, Eq. (II.5).

$$D = \frac{M_{sec}}{M_{sat} - M_{sat}^{imm}} \quad (II.5)$$



Figure II.14. Dispositif de la mesure de la porosité du béton.

II.6.5. Volume des éprouvettes

Les dimensions des éprouvettes (longueur, largeur et hauteur) ont été calculées par la moyenne de trois mesures pour chaque dimension et pour chaque éprouvette. Pour la mesure des dimensions des éprouvettes, on a utilisé le pied à coulisse de précision de 0,01 mm et qui est capable de mesurer une longueur de 300 mm. La mesure de la longueur, largeur et hauteur des éprouvettes a permis de calculer le volume apparent de chaque éprouvette des différents bétons avant et après chaque cycle de chauffage et d'évaluer la surface sur laquelle elle a été appliquée la charge de compression.



Figure II.15. Pied à coulisse digital.

II.6.6. Essai de vitesse de propagation d'ondes ultrasonores

Cet essai non destructif permet de déterminer la vitesse de propagation d'ondes longitudinales (de compression). La mesure de la vitesse de propagation des ondes sonores présente l'énorme avantage de donner des informations sur l'intérieure d'un élément de béton. 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.

Dans le cas d'un béton soumis au feu, l'élévation de température provoque une modification physico-chimique du matériau. L'auscultation sonore, basée sur des mesures de temps de parcours, est une méthode particulièrement bien adaptée à ce type d'investigation [Divet et al., 2005].

Le principe de la méthode consiste à mesurer le temps mis par une onde, dont le nom de la méthode, à parcourir une distance connue. L'appareil comprend des capteurs mis en contact avec le béton, un générateur d'ondes, un circuit de mesure du temps et un affichage digital du

temps mis par les ondes longitudinales pour traverser le béton entre les transducteurs. La norme P 18-418 [NF P 18-418] décrit la méthode d'essai.

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

$$V = \frac{l}{t} \quad (\text{II.6})$$

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

t est le temps de propagation (s).

II.7 ESSAIS MICROSTRUCTURAUX

L'observation des changements dans la structure du béton soumis à hautes températures a été étudiée au moyen de diverses techniques d'investigation. Ces observations ont été réalisées sur trois niveaux différents : macro, méso et micro.

II.7.1. Echelle macro

Les observations sont réalisées à l'œil nu. Elles permettent de donner une première appréciation de l'état global des éprouvettes après leur refroidissement et d'observer les changements de couleur du matériau (granulats et pâte de ciment) et l'apparition des microfissures sur les surfaces exposées à hautes températures.

II.7.2. Echelle méso

Les observations au microscope optique (Magnit 24^x MPB-2) sont réalisées en utilisant un agrandissement d'environ 24x. A cette échelle, nous pouvons évaluer la largeur de l'ouverture des fissures et à quelle température se manifestent ces fissures. Nous pouvons également observer deux natures de fissures. Les premières sont des fissures qui passent à travers la matrice cimentaire et les secondes sont des fissures intergranulaires, où la rupture contourne les granulats et se propage dans la zone de transition entre la pâte de ciment et les granulats.



Figure II.16. Microscope optique Magnit 24^x MPB-2.

II.7.3. Echelle micro

A cette échelle nous pouvons analyser la microstructure du béton. L'observation de la microstructure de la pâte de ciment en fonction de la température a été étudiée au moyen d'un microscope électronique à balayage (MEB).

Un grossissement de 600x permet d'observer les microfissures qui apparaissent au sein de la pâte de ciment suite à la détérioration par l'augmentation de la température.



Figure II.17. Vue d'ensemble du Microscope Electronique à Balayage MEB.

- **Principe du MEB**

La microscopie électronique à balayage MEB est une technique de microscopie électronique capable de produire des images en haute résolution de la surface d'un échantillon en utilisant le principe des interactions électrons-matière. Le principe de la microscopie électronique à balayage consiste à déplacer un faisceau d'électrons de haute énergie et très focalisé suivant une série de lignes parallèles sur la surface de l'échantillon à analyser. Les photons réémis sont remplacés par tout un spectre de particules ou rayonnement : électrons secondaires, électrons rétrodiffusés, électrons Auger ou rayons X. Ces différentes particules ou rayonnement apportent différents types d'informations sur la matière dont est constitué l'échantillon [Goldstein, 1992].

L'utilisation des électrons secondaires est le mode habituel de formation d'images pour les microscopes à balayage courants. Elle donne une information sur la topographie d'un

échantillon massif. En effet, la grande profondeur de champ et la haute résolution permettent la visualisation de détails très fins de la microstructure. Le contraste de composition ou de numéro atomique peut être visualisé à partir des électrons rétrodiffusés. Par contre, cette technique nécessite de travailler sur des surfaces polies. Enfin, il est possible d'analyser, à l'aide d'un spectromètre, les photons X caractéristiques de chaque élément entrant dans la composition chimique de l'échantillon [Divet et al., 2005].

L'image en électrons rétrodiffusés a une résolution latérale au mieux de l'ordre de 0.1 μm . L'utilisation d'un détecteur spécialisé permet de faire ressortir un contraste qui est fonction du numéro atomique des éléments présents. Un élément lourd donnera un signal intense et donc une zone claire et un élément léger donnera un signal faible et donc une zone sombre, en quelque sorte une cartographie de numéro atomique. Ce mode de fonctionnement nécessite une surface plane pour minimiser le contraste dû au relief [Faerber, 2004].

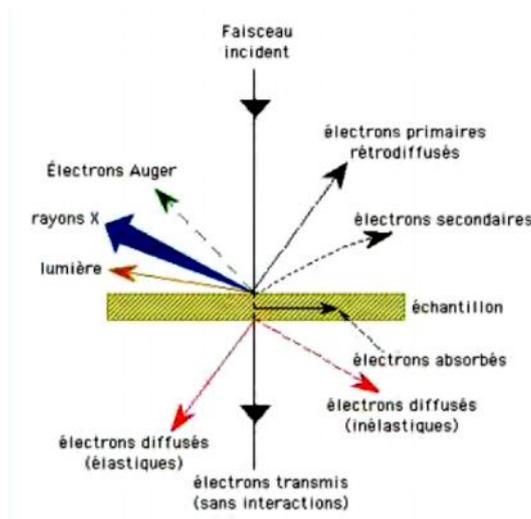


Figure II.18. Ensemble des radiations pouvant être émises lors de l'interaction entre le faisceau et l'échantillon [Fares, 2009].

• *Dispositif expérimental*

Le dispositif expérimental décrit ici est celui de l'Université de Biskra. Il s'agit d'un microscope électronique à balayage JEOL Model JSM-6390LV. Il est composé d'une chambre à échantillon, d'une colonne, d'un détecteur d'électrons secondaires, d'un détecteur d'électrons rétrodiffusés, de deux écrans de visualisation et d'un système de pompage destiné à assurer le vide dans la colonne et la chambre.

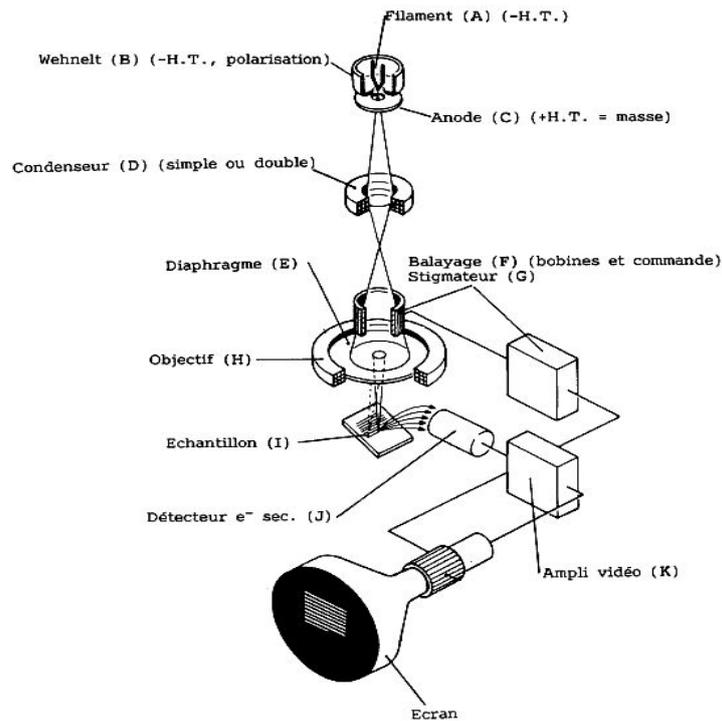


Figure II.19. Schémas de principe du Microscope électronique à balayage [Faerber, 2004].

II.8 CARACTERISATION DES GRANULATS SOUMIS A UNE TEMPERATURE ELEVEE

Nous avons également étudié l'effet de la température sur les propriétés physiques des différents types de granulats utilisés afin d'améliorer la compréhension du comportement à haute température des bétons constitués de ces granulats.

Les propriétés étudiées sont : les observations macroscopiques des effets de la sollicitation thermique, la perte de masse, la porosité à l'eau, la masse volumique et le coefficient d'absorption.

II.8.1. Cycles de chauffage – refroidissement

Nous avons appliqué dix cycles de chauffage – refroidissement de 20°C à différentes températures de palier : 150°C, 250°C, 400°C, 600°C, 650°C, 700°C, 750°C, 800°C, 850°C et 900°C.

La figure II.20 montre les courbes de chauffage – refroidissement des différents cycles.

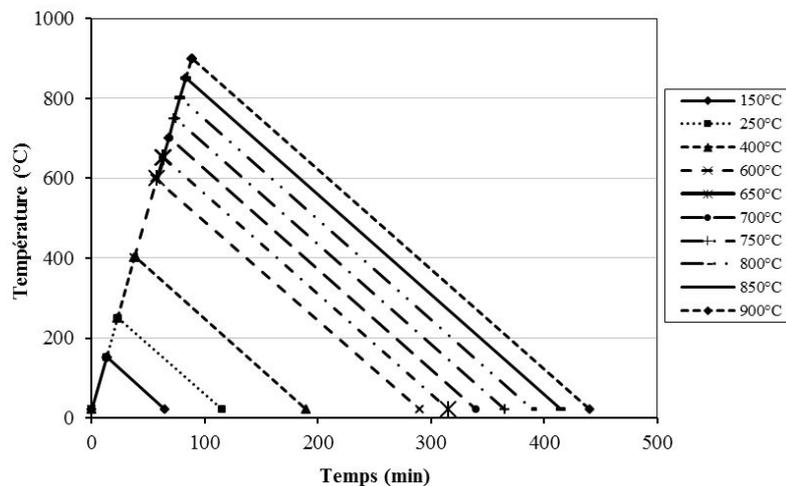


Figure II.20. Courbes des différents cycles de chauffage.

II.8.2. Perte de masse des granulats

Les pertes de masse ont été déterminées par pesée des échantillons avant et après chaque cycle de chauffage – refroidissement. Elle permet de quantifier la matière perdue pendant le cycle thermique.

Les pertes de masse des granulats sont mesurées à l'aide d'une balance d'une capacité de 4200 g avec une précision de 0.01 g. La perte de masse est calculée à partir de l'équation suivante :

$$dm_{Gr} = \frac{m_{i,Gr} - m_{t,Gr}}{m_{i,Gr}} \times 100, (\%) \quad (II.7)$$

dm_{Gr} : perte de masse des granulats, (%).

$m_{i,Gr}$: la masse de l'échantillon à la température ambiante (g).

$m_{t,Gr}$: la masse de l'échantillon après le refroidissement (g).

II.8.3. Porosité à l'eau, coefficient d'absorption et masse volumique des granulats

La porosité à l'eau, le coefficient d'absorption d'eau et la masse volumique des granulats ont été déterminés selon les recommandations de la norme NF P 18-554. Ces propriétés physiques sont déterminées à la température ambiante et après refroidissement suite à des cycles thermiques de 100°C, 250°C, 400°C, 500°C, 600°C et 700°C.

Les échantillons des granulats chauffés sont pesés à l'air après leur refroidissement, puis ils sont immergés dans l'eau jusqu'à saturation. Les échantillons en état saturé sont pesés après



avoir épongé soigneusement avec un chiffon absorbant pour enlever le film d'eau superficiel. Ensuite, les échantillons sont pesés dans l'eau avec une balance hydrostatique.

La porosité est calculée par l'équation suivante :

$$P_{Gr} = \frac{M_{sat,Gr} - M_{sec,Gr}}{M_{sat,Gr} - M_{sat,Gr}^{imm}} \times 100 \quad (II.8)$$

La masse volumique, le coefficient d'absorption et la porosité sont déterminés à partir d'un même essai. La masse volumique ρ_{Gr} et le coefficient d'absorption d'eau A_b sont donnés par les équations suivantes :

$$\rho_{Gr} = \frac{M_{sec,Gr}}{M_{sat,Gr} - M_{sat,Gr}^{imm}} \quad (II.9)$$

$$A_b = \frac{M_{sat,Gr} - M_{sec,Gr}}{M_{sec,Gr}} \times 100 \quad (II.10)$$

$M_{sec,Gr}$: est la masse sèche obtenue après le refroidissement des granulats.

$M_{sat,Gr}$: est la masse des granulats saturé dans l'air.

$M_{sat,Gr}^{imm}$: est la masse des granulats saturé dans l'eau.

II.9 CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous avons présenté les différents matériaux utilisés dans le cadre de cette étude. Le détail des différentes formulations a été présenté dans cette partie. Notre étude est principalement menée sur un béton ordinaire, un béton haute résistance et un béton hautes performances. A partir de ces trois formulations, nous avons décliné d'autres formulations afin d'étudier l'effet de la température sur le comportement du béton contenant du sable concassé ou bien des granulats de brique concassée.

Ces différentes formulations seront utilisées pour la réalisation de notre campagne expérimentale: études des propriétés physiques et mécaniques en fonction de la température.



Chapitre

III

PRESENTATION ET
ANALYSE DES
RESULTATS



III.1 INTRODUCTION

Dans le chapitre précédent, nous avons présenté les matériaux, les matériels et les protocoles expérimentaux retenus pour l'étude de l'effet de la température sur le comportement du béton. Dans ce chapitre, nous présentons les résultats expérimentaux des tests réalisés sur trois familles de bétons : béton de granulats ordinaires, béton à base de sable concassé et béton avec 30% de brique concassée.

Dans un premier temps, nous présentons une analyse des propriétés physiques et des observations macroscopiques des différents types de granulats utilisés après leurs expositions à des cycles de chauffage-refroidissement. En deuxième lieu, nous présentons et discutons les résultats obtenus pour les propriétés physiques et mécaniques des trois familles de bétons. Le dernier paragraphe est consacré aux observations macroscopiques et microscopiques des dégradations des bétons en fonction de la température de chauffage.

III.2 COMPORTEMENT DES GRANULATS A HAUTES TEMPERATURES

Lorsque les granulats sont soumis à une élévation de température, ils peuvent présenter des instabilités thermiques (modifications minéralogique et dilatation thermique) qui influencent fortement le comportement du béton gâché avec ces granulats lors d'une élévation de la température. Donc, il est important de connaître le comportement des granulats à haute température.

Cette partie porte sur l'étude et l'observation macroscopique de l'effet des sollicitations thermiques pour chaque type de granulats utilisés dans cette étude. Les résultats obtenus apportent plus de connaissance des modifications induites sur les granulats par la température.

III.2.1 Observations macroscopiques des effets de la température sur les granulats

Les observations macroscopiques des effets des sollicitations thermiques sur différents types de granulats sont faites après le refroidissement sur les cycles de chauffage à 150°C, 250°C, 400°C, 600°C et 900°C.

Tous les granulats sont intacts après le traitement thermique des échantillons à 150°C, nous ne remarquons aucunes dégradations macroscopiques. À partir de cette température, nous avons observé des changements sur quelques granulats par rapport à l'état initial (20°C).

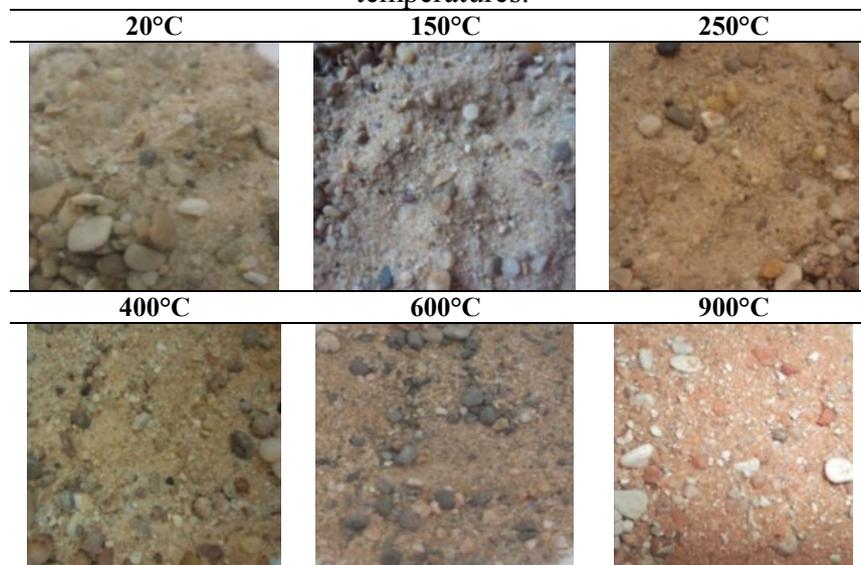
Les descriptions de ces changements ainsi que les photographies des échantillons avant et après le traitement thermique sont données ci-après.

III.2.1.1 Sable naturel (siliceux)

Les grains de sable naturel restent intacts jusqu'à 400°C. À partir de cette température, nous remarquons une variation dans la couleur des grains de sable naturel. Un rougissement léger et progressif se produit tout au long de l'augmentation de la température de chauffage (600°C et 900°C). Cette coloration rouge est expliquée par la déshydratation de la goethite (hydroxyde de fer $\text{FeO}(\text{OH})$) qui se transforme en oxyde ferrique (Fe_2O_3) à partir de 300°C [Ingham, 2009].

Les photographies des échantillons de sable siliceux avant et après le traitement thermique sont regroupées dans le tableau III.1.

Tableau III.1. Photographies du sable siliceux avant et après exposition aux différentes températures.

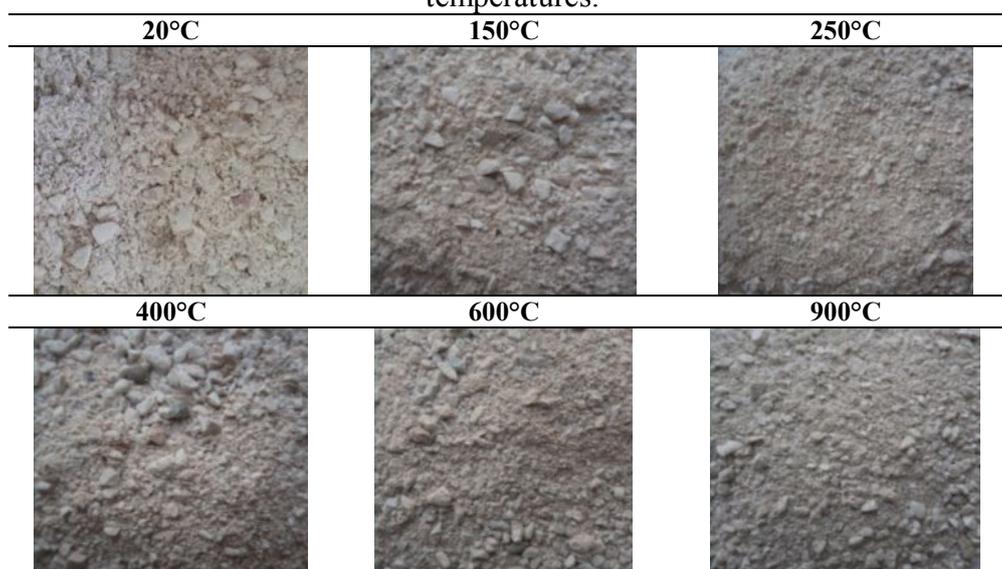


III.2.1.2 Sable calcaire

La couleur de grains de sable calcaire reste inchangée jusqu'à 600°C. Après le cycle de chauffage à 900°C, la majorité des grains devenant gris.

Les photographies des échantillons de sable calcaire avant et après le traitement thermique sont regroupées dans le tableau III.2.

Tableau III.2. Photographies du sable calcaire avant et après exposition aux différentes températures.

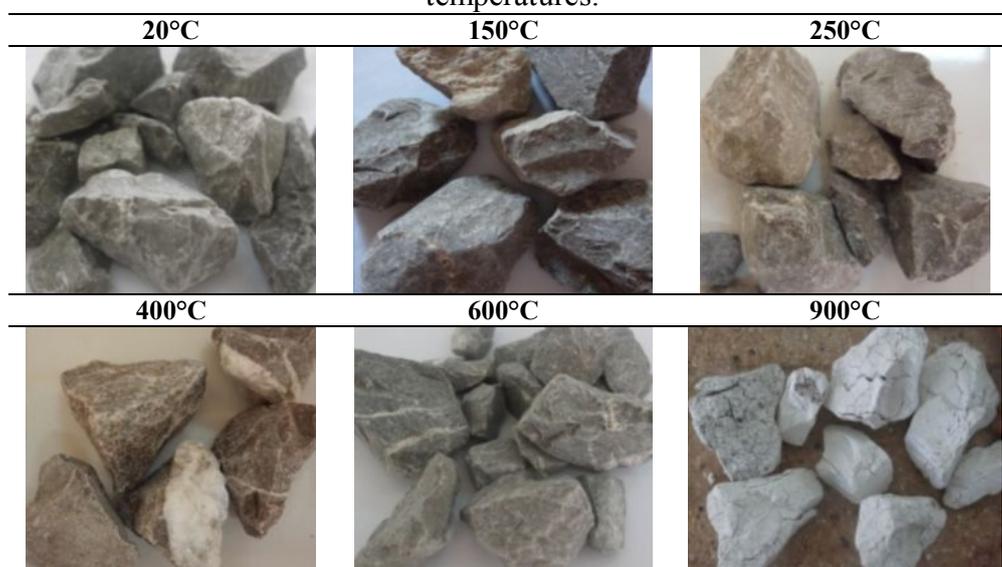


III.2.1.3 Granulats calcaires

Les granulats calcaires présentent un changement de couleur léger à partir de 250°C. Après le cycle de chauffage à 250°C et 400°C, les granulats calcaires réagissent légèrement. À partir de 600°C, les grains commencent à blanchir (début de la décarbonatation), ils se décomposent à 750°C. À 900°C, tous les grains sont totalement fissurés et leur surface a blanchi sans observation d'éclatement.

Les photographies des échantillons des granulats concassés avant et après le traitement thermique sont regroupées dans le tableau III.3.

Tableau III.3. Photographies des granulats calcaires avant et après exposition aux différentes températures.



La formation de la couche blanche sur les surfaces des granulats calcaires est la conséquence de la décarbonatation des calcaires, la calcite (CaCO_3) se transformant en chaux (CaO) suite au départ de CO_2 [Xing et al., 2011], [Nyry et al., 2013], [Xing et al., 2013]. Après refroidissement, le CaO réagit avec l'humidité de l'air et se transforme en portlandite Ca(OH)_2 [Nyry et al., 2012].

Après les cycles de chauffage à 750°C , 800°C , 850°C et 900°C , nous avons observé que l'épaisseur de la couche décarbonatée augmente avec l'augmentation de la température. Cette épaisseur de la couche blanche est d'environ 1.0 mm après traitement thermique des échantillons à 900°C (figure III.1).



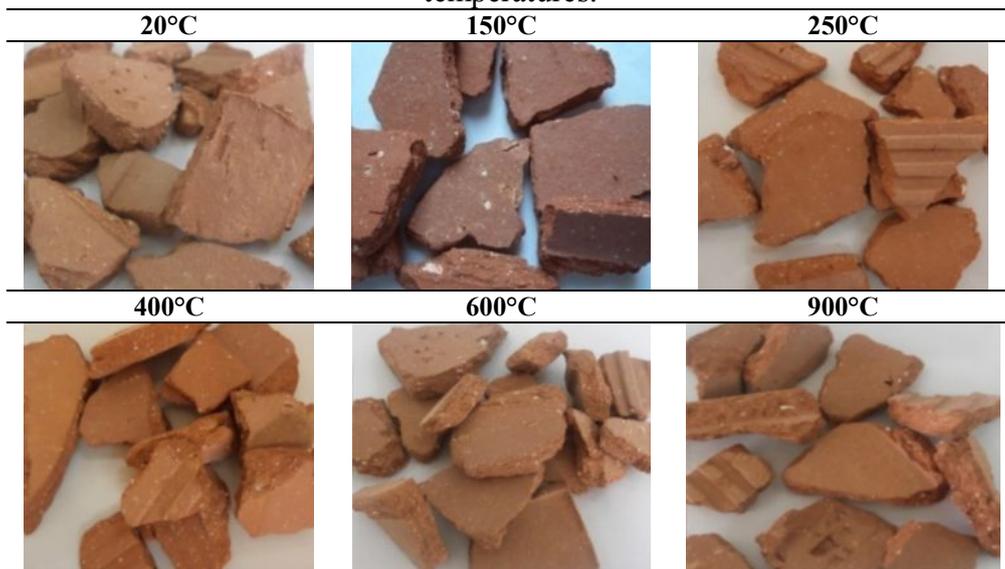
Figure III.1. État des granulats calcaires après chauffage à 900°C .

III.2.1.4 Brique concassé

Aucune dégradation macroscopique, telles que l'éclatement, la fissuration ou bien le changement de couleur, n'a été observée après avoir chauffé les granulats de brique concassée à différentes température. D'après Kesegic [Kesegic et al., 2008], les granulats de brique concassée sont des granulats thermiquement stables et considérés comme l'un des meilleurs granulats de béton qui peuvent résister au feu.

Les photographies des échantillons de brique concassée avant et après le traitement thermique sont regroupées dans le tableau III.4.

Tableau III.4. Photographies des briques concassés avant et après exposition aux différentes températures.



III.2.2 Perte de masse des granulats en fonction de la température

Les pertes de masse des différents types de granulats ont été déterminées par pesée des échantillons avant et après chaque cycle de chauffage. Les valeurs de perte de masse sont négligeables (inférieure à 0,2%) pour les cycles de température de 150°C, 250°C et 400°C. À partir de 600°C, la perte de masse des granulats augmente.

Les pertes de masse des différents types de granulats sont regroupées dans la figure III.2.

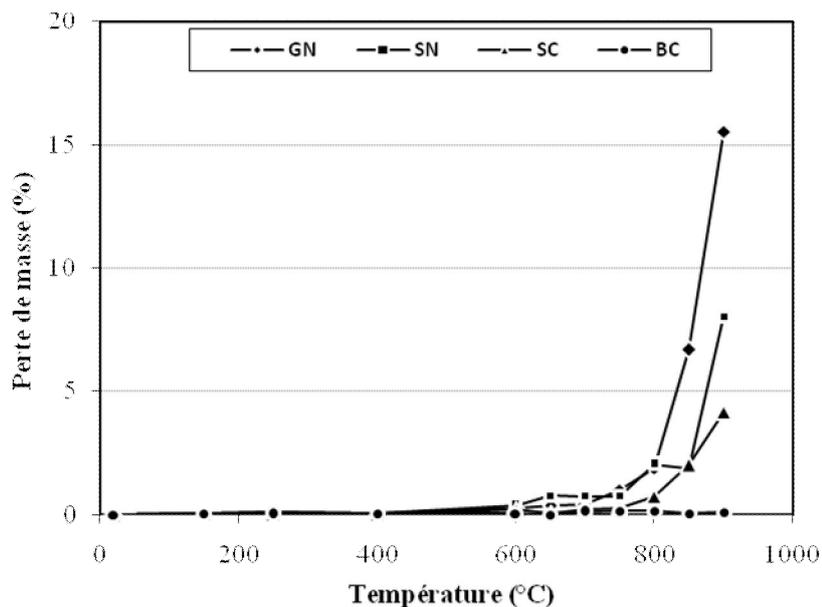


Figure III.2. Perte de masse des différents types de granulats.

Les échantillons de granulats calcaires montrent une perte de masse plus importante entre 750°C et 900°C. Selon la figure III.3, la perte de masse des granulats calcaires est d'environ 1% après le cycle de chauffage à 750°C. À 900°C, la perte de masse de ces granulats augmente, elle est d'environ 16%. Cette perte de masse correspond au phénomène de décarbonatation de la calcite (CaCO_3) en chaux (CaO) induisant un dégagement de CO_2 [Nyry et al., 2012].

Les échantillons de sable calcaire perdent moins de masse que les échantillons de sable siliceux. Cette différence de perte de masse peut être attribuable au départ de l'eau piégée dans les microporosités du sable siliceux. La perte de masse des échantillons de sable calcaire est à peu près stable jusqu'à 800°C (inférieure à 1%). Après le cycle de chauffage à 900°C, la perte de masse de sable calcaire est deux fois plus faible que celle du sable siliceux.

La perte de masse des granulats de brique concassée est très faible, de l'ordre d'un millième pour des températures supérieures à 700°C.

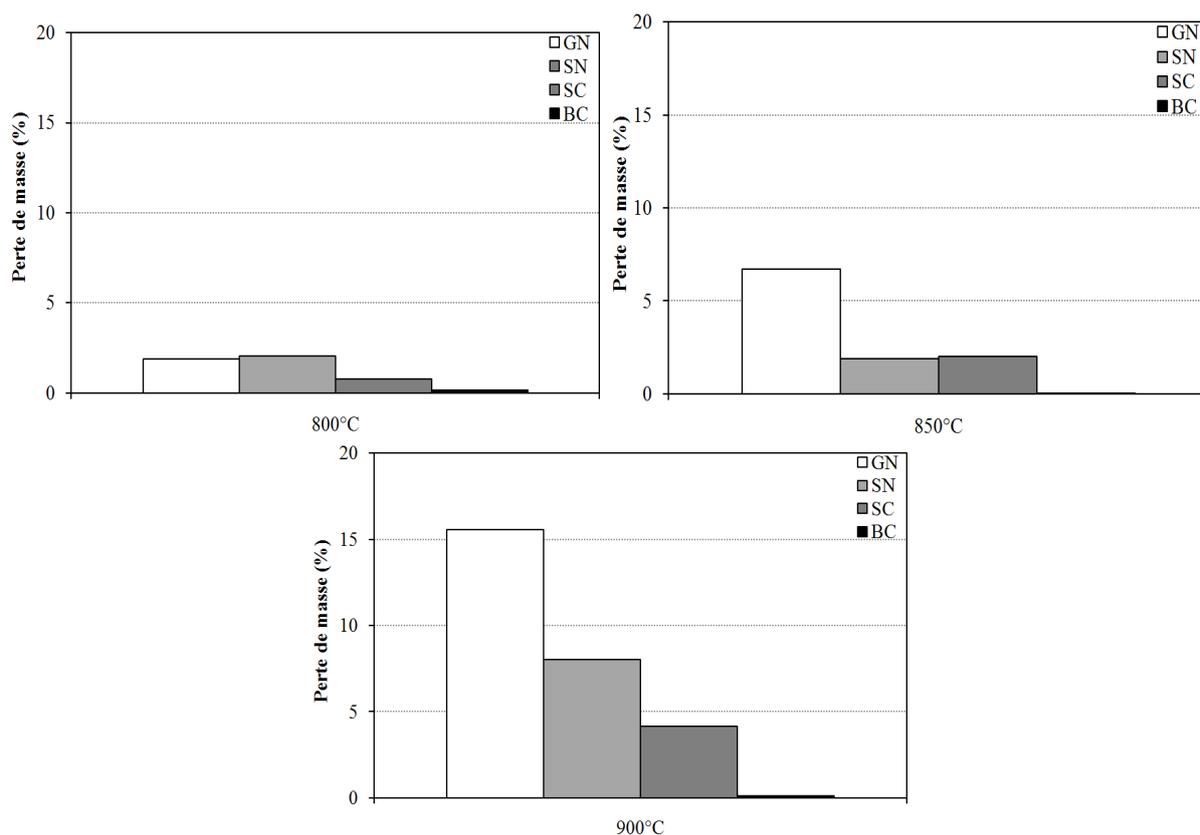


Figure III.3. Perte de masse des différents types de granulats à 700°C, 750°C, 800°C, 850°C et 900°C.

III.2.3 Porosité des granulats en fonction de la température

La figure III.4 présente l'évolution de la porosité des granulats calcaires et des granulats de brique concassée.

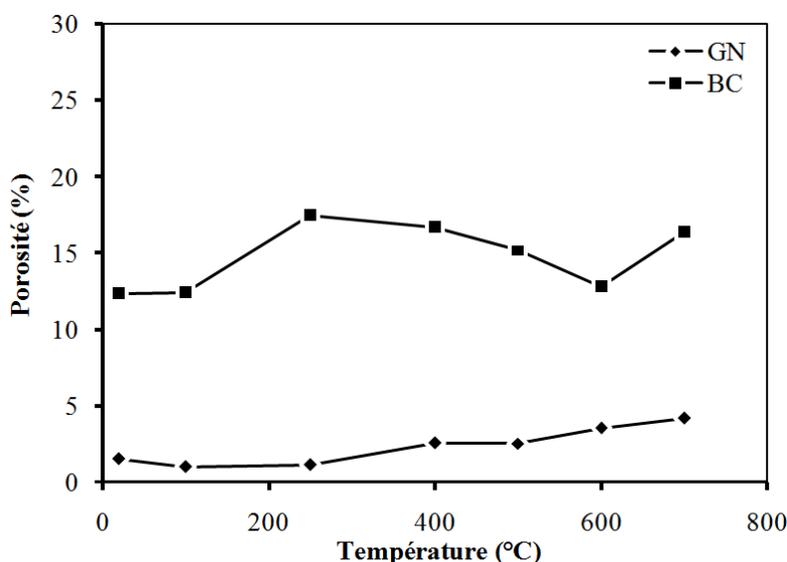


Figure III.4. Evolution de la porosité des granulats avec température.

La figure III.4 montre qu'à toutes les températures, la porosité des granulats calcaires est inférieure à celle de la brique concassée. Ceci confirme que les granulats de brique concassée sont plus poreux que ceux des granulats calcaires.

La variation de la porosité des granulats calcaires est faible dans la gamme de températures de 20°C à 250°C. Au-delà de 250°C, la porosité de ces granulats augmente sensiblement plus que celle des granulats de brique concassée. L'échauffement à la température de 400°C provoque une augmentation de la porosité totale des granulats calcaires de l'ordre de 69% et d'environ 174% après l'échauffement à la température de 700°C.

Pour les granulats de brique concassée, on note une stabilisation de la porosité dans la plage de température 20°C-100°C, puis une augmentation d'environ 41% après le chauffage à 250°C. La porosité diminue entre 250°C et 600°C et ce n'est qu'à 700°C que cette propriété augmente à nouveau d'environ 32%.

III.2.4 Masse volumique des granulats en fonction de la température

La figure III.5 donne l'évolution de la masse volumique des granulats calcaires et des granulats de brique concassée à la température ambiante et après chauffage jusqu'à 700°C.

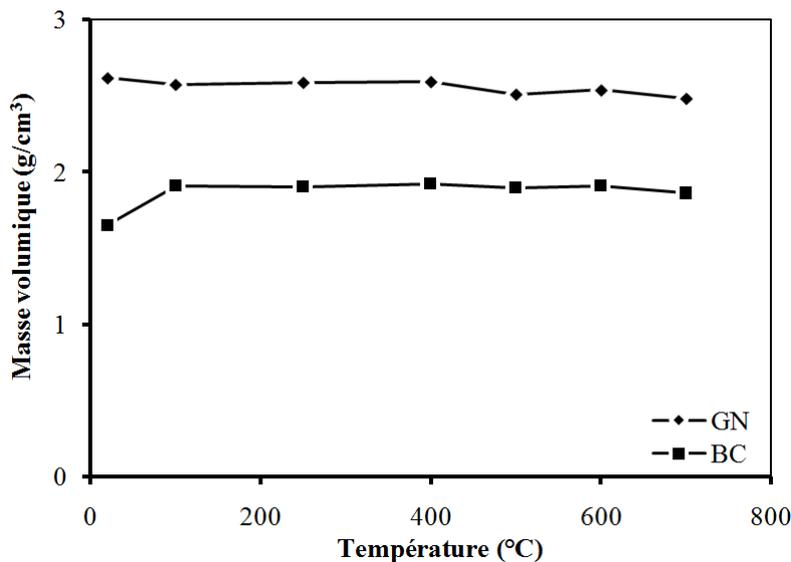


Figure III.5. Evolution de la masse volumique des granulats avec température.

La masse volumique des granulats calcaires diminue un peu entre 100°C et 700°C. Cette diminution est d'environ 2% à 100°C et d'environ 5% à 700°C.

Les granulats de brique concassée ne présentent qu'une légère augmentation de la masse volumique lorsqu'ils sont chauffés jusqu'à 700°C. L'échauffement jusqu'à 100°C des granulats de brique concassée conduit à une augmentation de la masse volumique de 16%, elle reste quasiment constante jusqu'à 700°C.

III.2.5 Coefficient d'absorption des granulats en fonction de la température

La figure III.6 présente la variation du coefficient d'absorption des deux granulats, calcaires et brique concassée, après les cycles de chauffage dont les paliers de température sont fixés à 100°C, 250°C, 400°C, 500°C, 600°C et 700°C.

On constate sur la figure III.6 que les granulats calcaires et les granulats de brique concassée présentent une allure générale des courbes de coefficient d'absorption similaire à celle de la porosité.

Pour les granulats calcaires, la variation du coefficient d'absorption avant 250°C est très faible. Au-delà de cette température, le coefficient d'absorption augmente avec l'augmentation de la température. Cette augmentation correspond à une augmentation de la porosité des granulats calcaires. Une augmentation de 189% du coefficient d'absorption est enregistrée après le chauffage à 700°C.

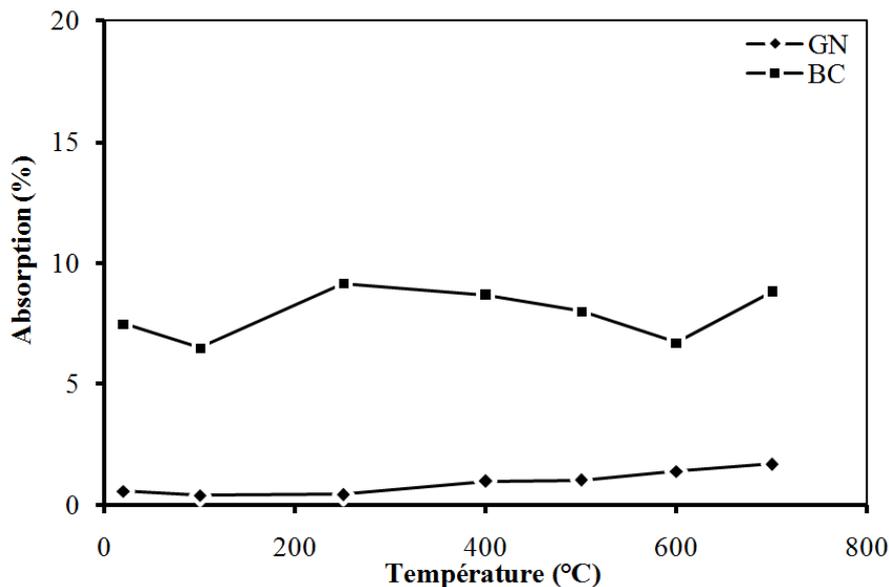


Figure III.6. Evolution du coefficient d'absorption des granulats avec température.

Pour les granulats de brique concassée, nous constatons de façon globale que le coefficient d'absorption augmente à 250°C, passe par une valeur maximale d'augmentation d'environ 22%, puis diminue jusqu'à 600°C et ré-augmente à 700°C.

III.3 CARACTERISATION DU COMPORTEMENT DES BETONS A HAUTE TEMPERATURE

L'exposition des bétons aux hautes températures entraîne des transformations physico-chimiques et microstructurales qui vont alors conduire aux changements des propriétés physiques et mécaniques. Dans les paragraphes suivants, nous allons présenter l'évolution de certaines propriétés physiques et mécaniques de trois formulations du béton sous l'effet de la température. Les résultats obtenus serviront de référence pour les deux autres familles de béton.

III.3.1 Perte de masse

Au cours d'une élévation de température, les différentes catégories d'eau du béton (liée dans les hydrates, adsorbée à la surface des éléments solides et libre dans les pores) sont successivement éliminées en fonction de leur énergie de liaison. Le suivi de la perte de masse des éprouvettes permet de quantifier l'eau libre et l'eau liée présentes dans le béton.

La valeur de la perte de masse est une moyenne des mesures effectuées sur trois éprouvettes pour chaque type de béton. Les courbes de la perte de masse en fonction de la température sont présentées sur la figure III.7.

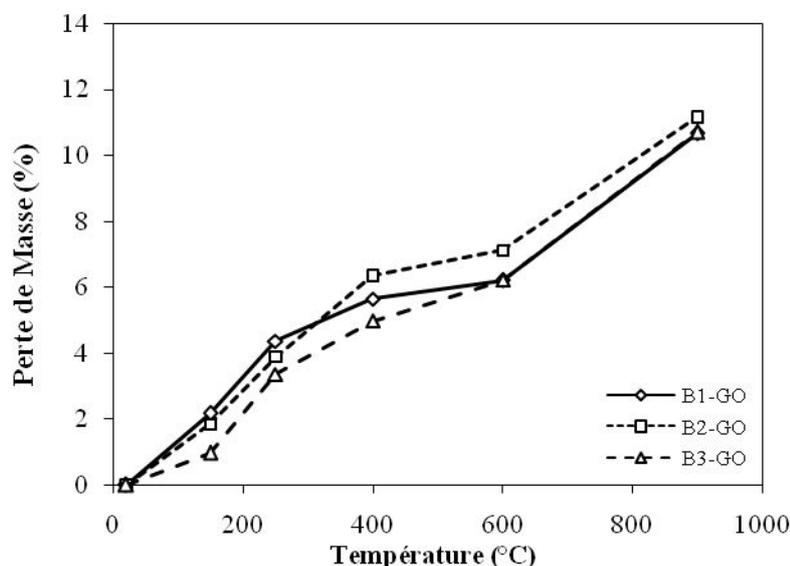


Figure III.7. Évolution de la perte de masse en fonction de la température pour les bétons B1-GO, B2-GO et B3-GO.

L'allure des courbes de perte de masse, pour la plage de température adoptée, présente trois domaines. 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 est de 2.2% pour B1-GO, 1.8% pour B2-GO et de 1% pour B3-GO. 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 la moitié de la quantité totale de matière perdue par l'éprouvette. Cette perte de masse est due essentiellement au départ de l'eau liée dans les hydrates. Le béton B3-GO est caractérisé par un plus faible rapport E/C, donc il perd moins d'eau que le béton B1-GO et B2-GO. Ces résultats sont en accord avec la littérature [Noumowe, 1995], [Kanema, 2007], [Pliya, 2010], [Xing, 2011].

Le deuxième domaine s'étend de la température 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 600°C à 900°C. Ce domaine se caractérise par une forte augmentation de la perte de masse, ce qui peut être expliqué par le départ de CO₂ provenant de la décomposition du carbonate de calcium [Xing, 2011].

Les mesures de perte de masse indiquent, qu'à 900°C, la variation de masse (10.6% pour le B1-GO, 11.1% pour le B2-GO et 10.7% pour le B3-GO) est légèrement supérieure à la quantité d'eau initiale dans le béton (8.7% pour le B1-GO, 8.2% pour le B2-GO et 6.6% pour le B3-GO).

III.3.2 Porosité à l'eau

La mesure de la porosité à l'eau est un des paramètres qui permet de caractériser la microstructure poreuse des bétons testés. Les valeurs de la porosité obtenues par pesée hydrostatique pour tous les bétons (B1-GO, B2-GO et B3-GO) sont reportées sur la figure III.8. Ces valeurs sont des moyennes de mesures réalisées sur deux échantillons.

La porosité initiale (état de référence) est considérée comme étant celui obtenu à la température ambiante (20°C). Pour tous les bétons, nous observons une augmentation de la porosité à l'eau avec l'augmentation de la température d'exposition.

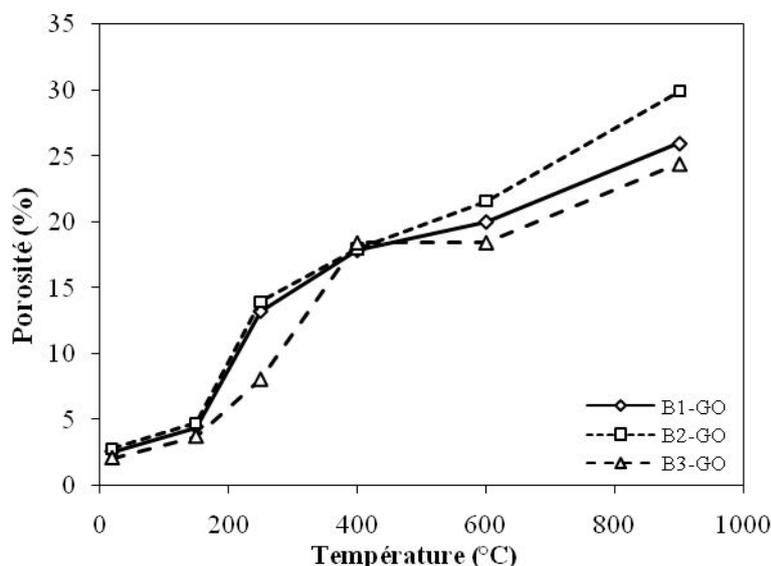


Figure III.8. Évolution de la porosité à l'eau des bétons de granulats ordinaires en fonction de la température.

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 [Noumowe, 1995]. La porosité augmente rapidement pour des températures supérieures à 150°C. Elle atteint environ 18% après un traitement à 400°C. Cette augmentation de la

porosité 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 [Noumowe, 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 [Noumowe, 1995] et à la microfissuration engendrée par la dilatation différentielle entre la pâte et les granulats [Pliya, 2010].

III.3.3 Densité

La figure III.9 présente l'évolution de la densité des bétons en fonction de la température de chauffage. Nous observons une diminution de la densité avec l'augmentation de la température. Cette propriété varie d'une manière presque inverse à la perte de masse [Elalaoui, 2012].

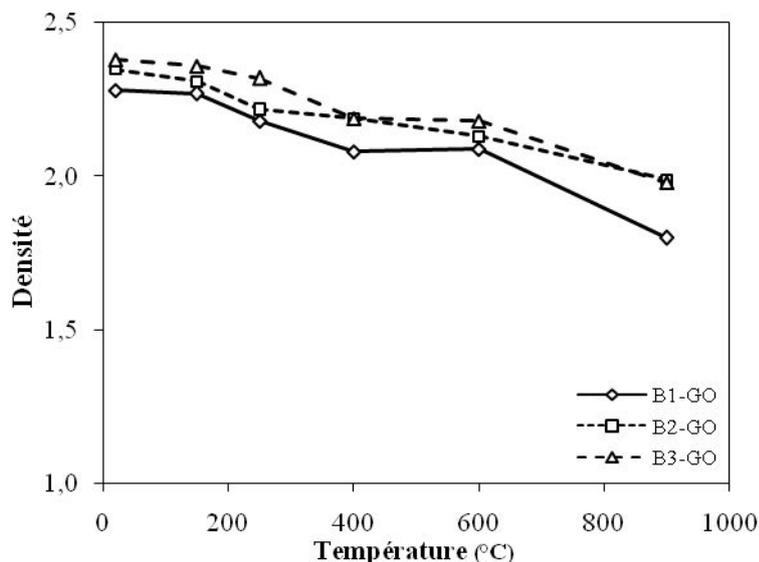


Figure III.9. Évolution de densité des bétons de granulats ordinaires en fonction de la température.

La variation de la densité est faible, n'excédant pas 2%, dans la gamme de température de 20 à 150°C. Cette diminution est attribuée au départ de l'eau libre et capillaire. Au-delà de 150°C, on note une faible diminution de la densité pour le béton le moins compact (B1-GO) par rapport aux bétons les plus compacts (B2-GO et B3-GO). Ces diminutions de la densité sont dues au départ de l'eau liée suite à la déshydratation des CSH et la Portlandite [Mindeguia, 2009].

III.3.4 Volume des éprouvettes

Comme la majorité des matériaux, lorsqu'il est soumis à un changement de température, le béton subit une déformation thermique [Hager, 2004]. De nombreux travaux montrent que, sous l'effet de la température, la pâte de ciment subit dans un premier temps une dilatation jusqu'à 150°C puis une contraction importante jusqu'au-delà de 800°C, due essentiellement au départ de l'eau libre puis l'eau liée chimiquement. Les granulats subissent une importante expansion volumétrique au-delà de 550°C.

La variation des volumes des éprouvettes est présentée sur la figure III.10.

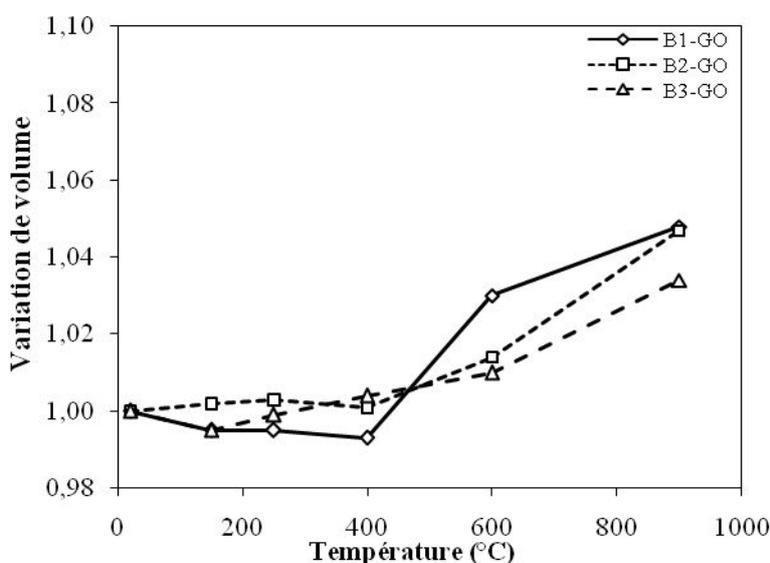


Figure III.10. Variation du volume des bétons de granulats ordinaires avec la température.

La variation du volume des éprouvettes est inférieure à 1% dans la gamme de température de 20°C jusqu'à 400°C pour tous les bétons. Au-delà de 400°C, tous les bétons subissent une augmentation du volume des éprouvettes. Cela est attribué à la présence de sable siliceux qui a un coefficient de dilatation thermique élevé [Mindeguia, 2009]. À 900°C, le pourcentage de l'augmentation du volume varie entre 3.4% à 4.8%. Cette augmentation du volume est généralement attribuée à la génération des macro-fissures provoquant un gonflement de l'éprouvette.

III.3.5 Vitesse des ondes soniques

La mesure de la vitesse de propagation des ondes soniques est une des diverses méthodes d'essai non destructif utilisées pour obtenir le maximum d'informations sur la qualité des bétons soumis à une élévation de température.



Il est bien connu que la vitesse du son dans le béton dépend fortement de sa teneur en eau. Au cours du chauffage, l'eau est progressivement expulsée du béton. L'eau libre s'évapore en premier lieu, suivie par l'eau capillaire, l'eau physiquement liée et l'eau liée chimiquement. Donc, l'expulsion de l'eau au cours du chauffage affecte fortement la vitesse du son [Hager et al., 2012].

La qualité du béton peut être estimée en mesurant la vitesse des ondes soniques selon la classification de Whitehurst [Whitehurst, 1966] énumérée dans le tableau III.5.

Tableau III.5. Classification de la qualité du béton selon la vitesse des ondes soniques [Whitehurst, 1966].

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

Les valeurs de la vitesse des ondes soniques et la qualité du béton sont présentées dans le tableau III.6. La figure III.11 montre également l'évolution de la vitesse des ondes soniques avec la température.

Tableau III.6. Valeurs de la vitesse de propagation des ondes soniques et qualité des bétons de granulats ordinaires.

T (°C)	B1-GO		B2-GO		B3-GO	
	Vitesse	Qualité	Vitesse	Qualité	Vitesse	Qualité
20	4459 m/s	Bonne	4524 m/s	Excellente	4554 m/s	Excellente
150	4100 m/s	Bonne	4241 m/s	Bonne	4426 m/s	Bonne
250	3752 m/s	Bonne	3984 m/s	Bonne	4066 m/s	Bonne
400	3037 m/s	Médiocre	3486 m/s	Médiocre	3575 m/s	Bonne
600	2180 m/s	Faible	2496 m/s	Faible	2447 m/s	Faible
900	830 m/s	Très faible	409 m/s	Très faible	1617 m/s	Très faible

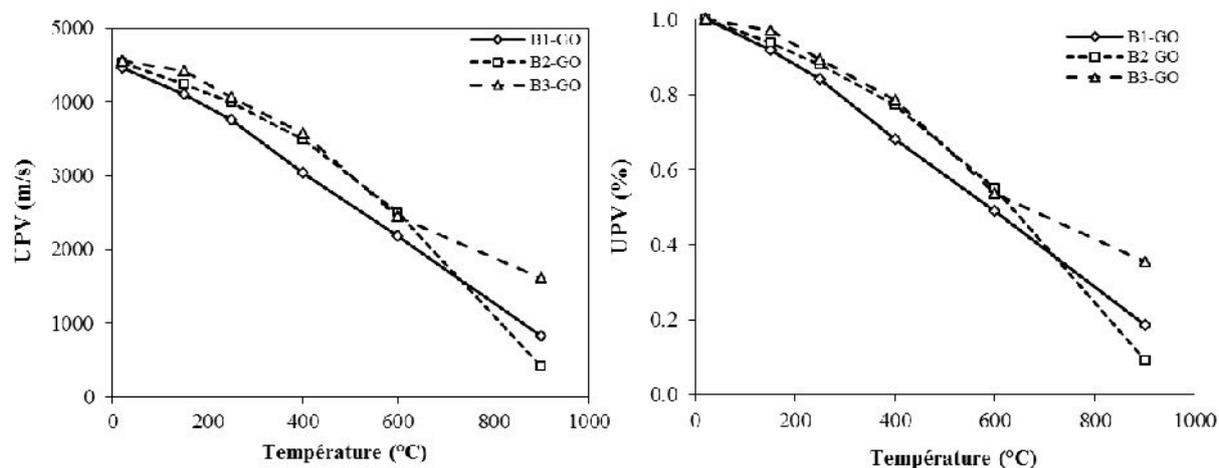


Figure III.11. Effet de la température sur la vitesse des ondes soniques des bétons de granulats ordinaires.

La figure III.11 montre que la vitesse des ondes soniques diminue avec l'augmentation de la température. Les trois bétons présentent une bonne qualité après l'exposition à 250°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.

III.3.6 Résistance en compression

Plusieurs chercheurs ont étudié l'évolution de la résistance en compression des bétons avec la température. Mais, les résultats étaient très divers à cause de la différence de la composition du béton (type de granulats utilisés, proportions des composants du béton et rapport E/C) et des cycles de chauffage appliqués.

La résistance en compression des différents bétons est déterminée à température ambiante et aussi après les cycles de chauffage-refroidissement. La figure III.12 présente les résultats de la résistance en compression résiduelle et relative (normalisée par rapport à la valeur initiale obtenue à la température ambiante) de quatre bétons de granulats naturels. Chaque valeur de la résistance résiduelle est la moyenne obtenue sur trois éprouvettes.

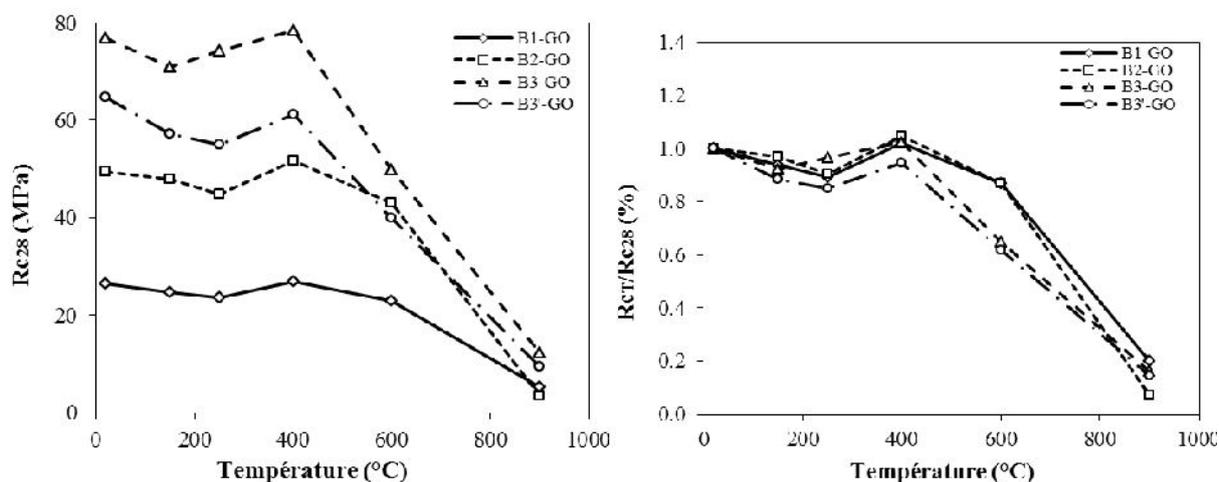


Figure III.12. Evolution de la résistance résiduelle et relative en compression des bétons de granulats ordinaires en fonction de la température.

On observe sur cette figure trois zones d'évolution différentes de la résistance en compression selon la température de chauffage. Une légère diminution de la résistance jusqu'à 250°C, puis une ré-augmentation à 400°C et ensuite une diminution continue avec l'augmentation de la température. Ceci rejoint les observations faites par d'autres chercheurs comme Hager [Hager, 2004], Kanema [Kanema, 2007], Fares [Fares, 2009], Mindeguia [Mindeguia, 2009]. A toutes les températures, la résistance de BHP (B3-GO) reste supérieure à celle du BO (B1-GO).

Dans la première zone qui varie de la température ambiante à 250°C, on constate une baisse de résistance de faible ampleur. Pour le BO (B1-GO), la perte de la résistance en compression est entre 6% et 10%, tandis que pour le BHR (B2-GO) la perte est entre 3% et 9% et pour le BHP (B3-GO) la perte est entre 3% et 7%. Cet affaiblissement peut s'expliquer par la dilatation thermique de l'eau qui provoque un écartement des feuilles du gel CSH. Cet écartement entraîne une diminution des forces d'attraction entre les feuilles et engendre l'apparition de micro-défauts facilitant le glissement [Hager, 2004], [Mindeguia, 2009].

Dans la deuxième zone, entre 250°C et 400°C, la résistance en compression augmente par rapport à la valeur obtenue à température ambiante. Le gain de résistance à 400°C est d'environ 2% pour le BO (B1-GO) et le BHP (B3-GO) et d'environ 4% pour le BHR (B2-GO). 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 réaugmente les forces d'attraction par le rapprochement des feuilles de CSH.

Au-delà de 400°C, la résistance résiduelle en compression décroît plus rapidement. La perte de la résistance varie suivant le type de béton, 13% pour le BO (B1-GO) et le BHR (B2-GO) et 35% pour le BHP (B3-GO) après un chauffage à 600°C. On remarque que le BHP perd plus de résistance que le BO. A 900°C, le BO (B1-GO) conserve 20% de sa résistance initiale. Cependant, le BHP (B3-GO) présente la plus grande perte de résistance en compression (environ 84% à 900°C).

Cette perte de résistance plus rapide pour le BHP est aussi relevée par d'autres auteurs comme Noumowé [Noumowe, 1995], Pliya [Pliya, 2010] et Xing [Xing, 2011].

Cette dernière phase est attribuée à l'endommagement du matériau. Nous pensons que cette diminution de résistance est due à une dégradation conjuguée de la matrice cimentaire et à une dégradation des granulats causant une fissuration importante du béton. L'exposition à une température élevée entraîne un affaiblissement de la matrice cimentaire due à la dégradation du gel CSH [Pliya, 2010] et la décomposition de la portlandite [Hager, 2004]. Nous observons également l'endommagement du béton par la fissuration de la pâte de ciment due à la déformation différentielle entre les granulats qui se dilatent et la pâte de ciment qui se rétracte.

Le BHP étant caractérisé par un grand dosage en ciment donc un important volume de pâte de ciment, ce qui assure une bonne résistance en compression à température ambiante. L'augmentation de la température engendre un endommagement de ce béton par la détérioration de la pâte de ciment (déshydratation du gel de CSH) plus importante par rapport aux autres bétons, ce qui conduit à une diminution de la résistance en compression plus rapide.

III.3.7 Résistance à la flexion

Les effets des hautes températures sur la résistance à la flexion ont été étudiés sur les bétons B1-GO, B2-GO et B3'-GO. Des essais de flexion 3 points ont été réalisés sur trois éprouvettes pour chaque formulation avant et après chauffage à différentes températures.

La figure III.13 présente l'évolution de la résistance à la flexion résiduelle et relative en fonction de la température de chauffage.

Nous observons que les valeurs de la résistance à la flexion diminuent de manière contenue avec l'augmentation de la température. Les bétons B2-GO et B3'-GO montrent une

accélération de la perte de résistance. L'évolution de la résistance à la flexion peut être scindée en trois domaines.

De 20°C à 150°C, on observe une baisse de la résistance à la flexion d'environ 38% pour le B2-GO, tandis que le B3'-GO perd environ 47% de sa résistance initiale. Entre 150°C et 250°C, les trois bétons ont une résistance quasiment constante. Au-delà de 250°C, la baisse de résistance en flexion devient plus forte. A 600°C, tous les bétons perdent plus de 60% de leur résistance initiale. Cette perte de résistance à la flexion s'explique par l'augmentation de la porosité due à la déshydratation du gel de CSH et la propagation des microfissures engendrées par la détérioration des liaisons créées entre les granulats et la pâte de ciment [Fares, 2009].

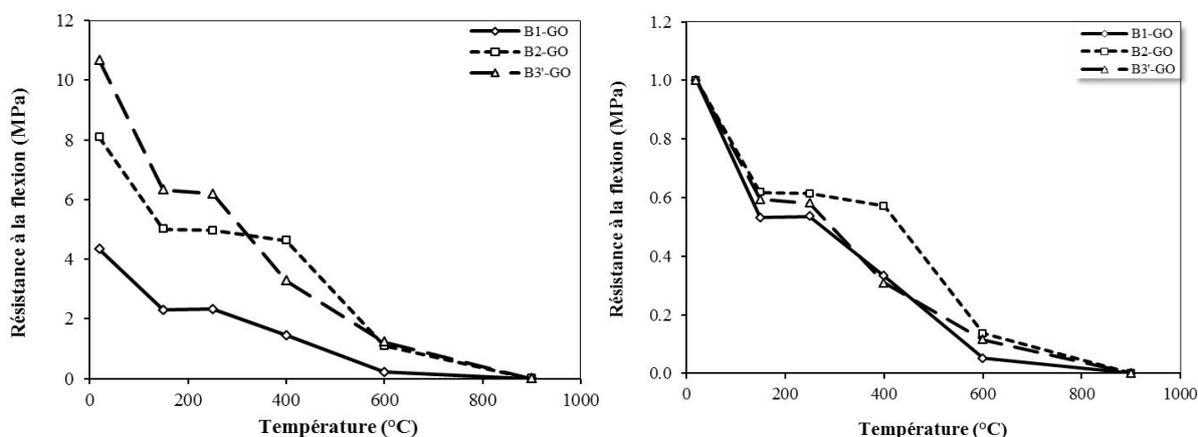


Figure III.13. Évolution de la résistance à la flexion des bétons de granulats ordinaires en fonction de la température.

III.4 CARACTERISATION DU COMPORTEMENT DES BETONS A BASE DE SABLE CALCAIRE A HAUTE TEMPERATURE

Le but de cette partie est d'étudier le comportement des bétons à base de sable calcaire. Ce dernier a été utilisé pour limiter l'augmentation de la perte de masse du béton avec la température. Comme il a été mentionné précédemment (paragraphe III.2.2. perte de masse des granulats), le sable concassé (calcaire) perd moins de masse que le sable siliceux. Trois formulations de bétons sont fabriquées, ces formulations de bétons sont issues des compositions des bétons B1-GO, B2-GO et B3-GO auxquelles l'on remplace le sable siliceux par le sable calcaire.

III.4.1 Perte de masse

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 à base de sable concassé en fonction de la température (figure III.14).

Les trois domaines observés pour les bétons confectionnés par des granulats ordinaires (B1-GO, B2-GO et B3-GO) se retrouvent pour les bétons à base de sable concassé.

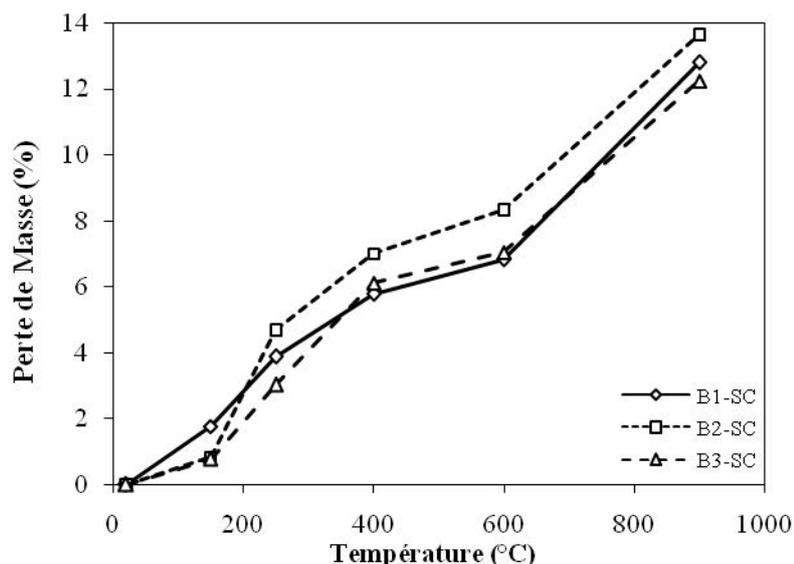


Figure III.14. Évolution de la perte de masse en fonction de la température pour les bétons B1-SC, B2-SC et B3-SC.

La perte de masse augmente entre 150°C et 400°C. Dans cet intervalle de 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 [Noumowe, 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 900°C. La perte de masse moyenne est de 12.8% pour B1-SC, 13.6% pour B2-SC et 12.2% pour B3-SC.

III.4.2 Porosité à l'eau

La figure III.15 récapitule l'évolution de la porosité à l'eau des bétons contenant du sable calcaire en fonction de la température.

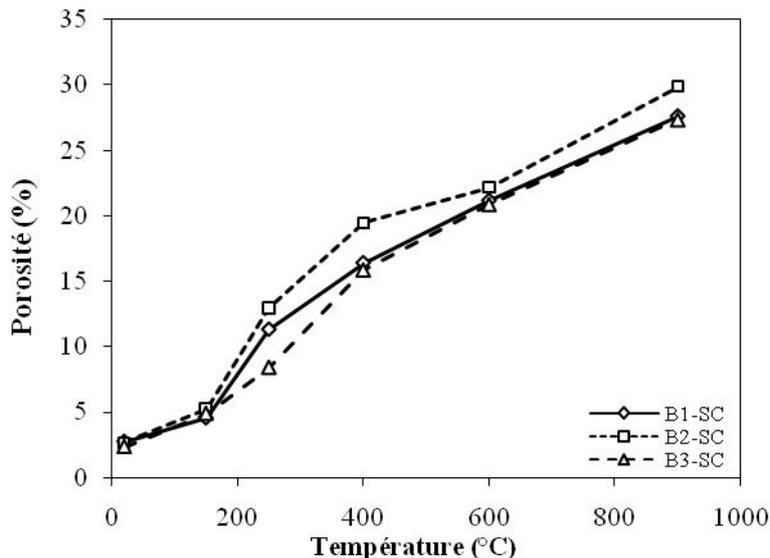


Figure III.15. Évolution de la porosité à l'eau des bétons à base de sable concassé en fonction de la température.

Les résultats montrent que les bétons sont fortement sensibles à la température et que la porosité à l'eau augmente avec l'augmentation de la température. À 150°C, la porosité des trois bétons est d'environ 5%. Ensuite, elle augmente avec la température jusqu'à atteindre des valeurs comprises entre 27.4% et 29.9% après le chauffage à 900°C.

III.4.3 Densité

L'évolution de la densité en fonction de la température d'exposition des bétons à base de sable concassé est illustrée sur la figure III.16.

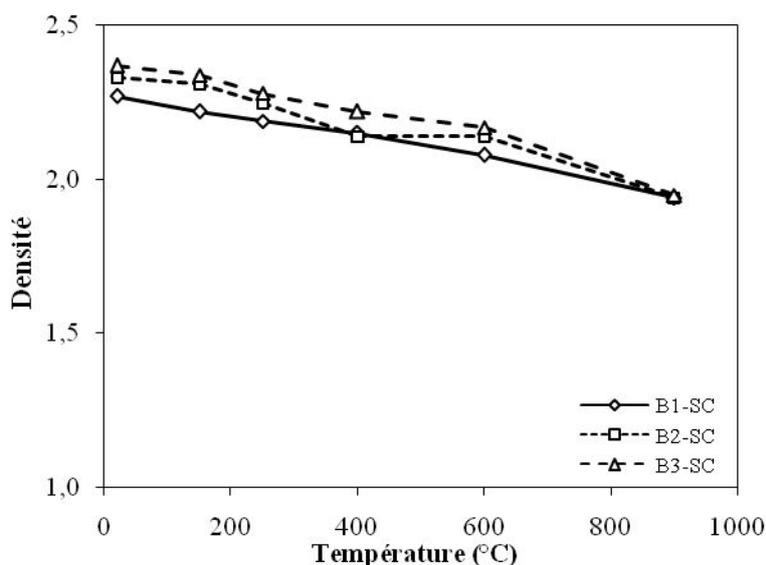


Figure III.16. Évolution de densité des bétons à base de sable concassé en fonction de la température.

La densité diminue en générale durant l'échauffement du béton. La figure III.16 montre, qu'après le chauffage à 900°C, une diminution de la densité par rapport à celle mesurée à la température ambiante, de 14.5% pour B1-SC, 16.7% pour B2-SC et 17.7% pour B3-SC.

III.4.4 Volume des éprouvettes

La figure III.17 présente la variation du volume des éprouvettes de béton en fonction de la température.

Les bétons à base de sable calcaire présentent une variation très faible du volume. Cette variation augmente à partir de 600°C, nous attribuons cette augmentation à la fissuration importante des éprouvettes engendrée par les incompatibilités de déformation entre la pâte de ciment et les granulats. Les échantillons chauffés à 900°C présentent une augmentation de volume entre 3.1% et 5.3%.

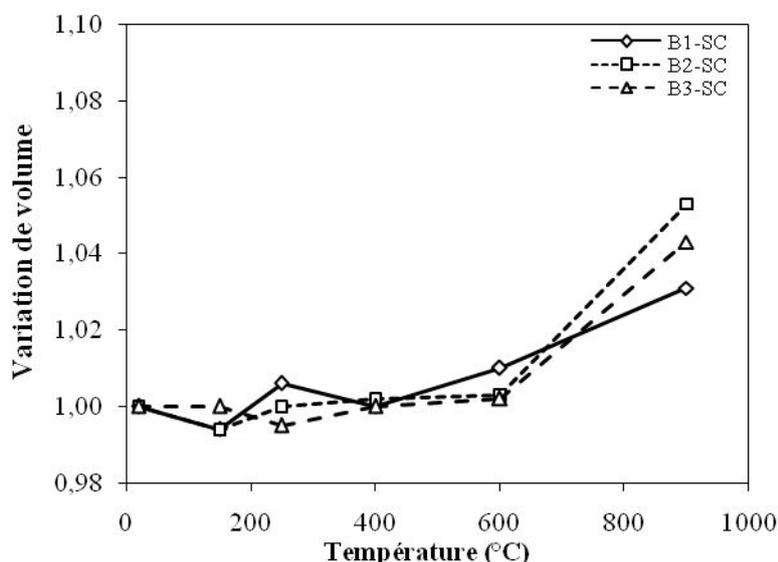


Figure III.17. Variation du volume apparent des bétons à base de sable concassé avec la température.

III.4.5 Vitesse des ondes soniques

La variation de la vitesse des ondes traduit l'endommagement de la microstructure du béton par la fissuration de la matrice. Le tableau III.7 regroupe les résultats des vitesses des ondes soniques obtenues et la qualité des bétons à base de sable calcaire après les cycles de chauffage-refroidissement, ces résultats sont présentés sur la figure III.18.

Tableau III.7. Valeurs de la vitesse de propagation des ondes soniques et qualité des bétons à base de sable concassé.

T (°C)	B1-SC		B2-SC		B3-SC	
	Vitesse	Qualité	Vitesse	Qualité	Vitesse	Qualité
20	4508 m/s	Excellente	4432 m/s	Bonne	4561 m/s	Excellente
150	4191 m/s	Bonne	4176 m/s	Bonne	4297 m/s	Bonne
250	4018 m/s	Bonne	4017 m/s	Bonne	4146 m/s	Bonne
400	3724 m/s	Bonne	3750 m/s	Bonne	3740 m/s	Bonne
600	3097 m/s	Médiocre	2836 m/s	Faible	2915 m/s	Faible
900	1797 m/s	Très faible	1750 m/s	Très faible	1698 m/s	Très faible

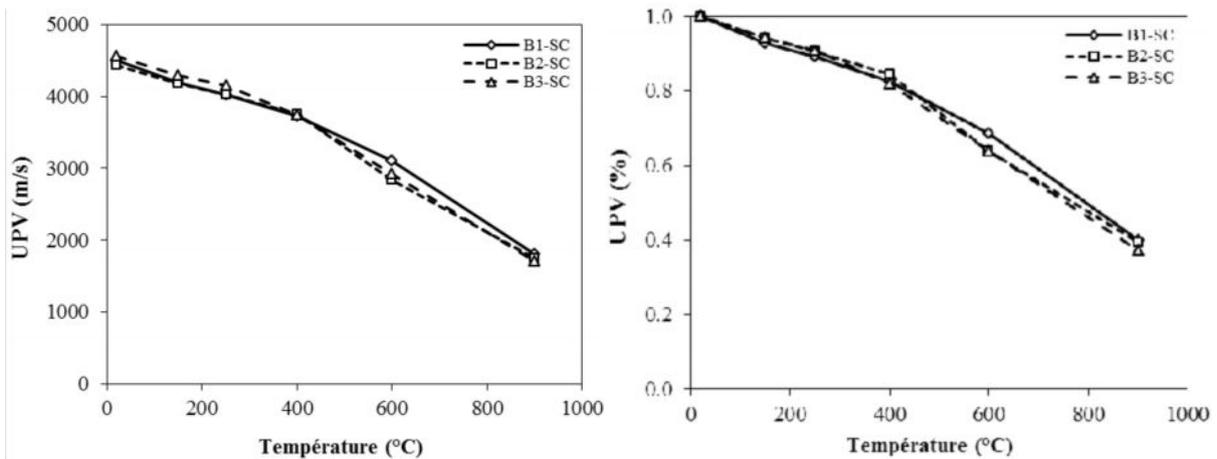


Figure III.18. Effet de la température sur la vitesse des ondes soniques des bétons à base de sable concassé.

Les valeurs des vitesses des ondes soniques restent supérieures à 3500 m/s après le chauffage à 400°C et le pourcentage de diminution est inférieur à 20%. Cette diminution est la conséquence de la décomposition du gel de CSH et l'évaporation de l'eau liée. A 900°C, les valeurs de la vitesse présentent environ 39% de la valeur obtenue à température ambiante que l'on peut imputer à l'incompatibilité thermique entre les granulats (qui se dilatent) et la pâte de ciment (qui se rétracte) [Hager et al., 2012].

III.4.6 Résistance en compression

L'évolution de la résistance et la résistance relative (par rapport à la valeur mesurée à 20°C) en compression du béton à base de sable calcaire en fonction de la température est présentée sur la figure III.19. La résistance en compression des bétons B1-SC, B2-SC et B3-SC diminue avec la température selon la même cinétique que pour les bétons B1-GO, B2-GO et B3-GO.

Nous observons les trois domaines de température qui caractérise le comportement du béton en compression.

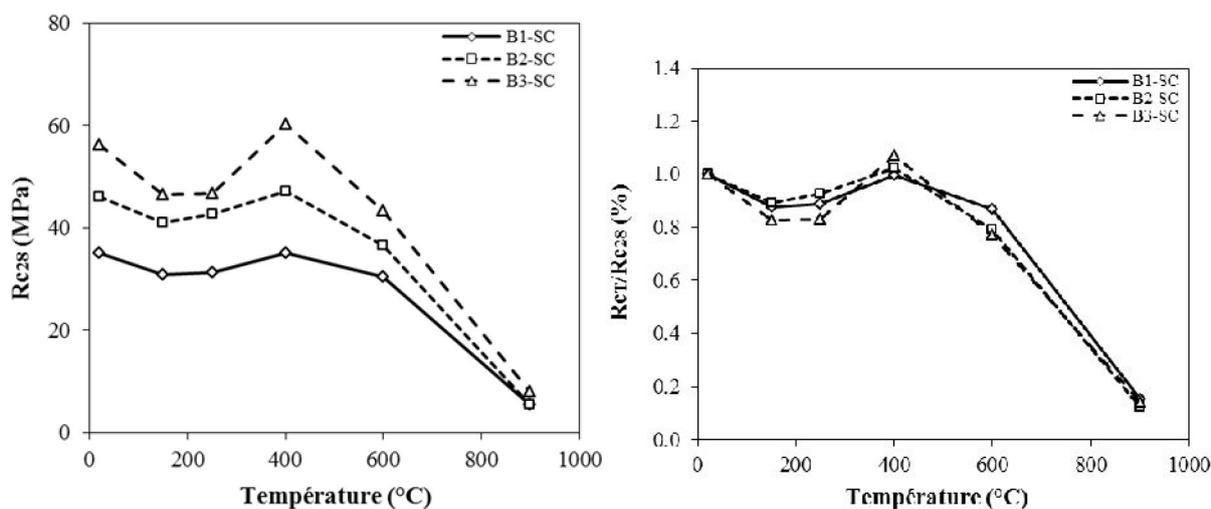


Figure III.19. Evolution de la résistance résiduelle et relative en compression des bétons à base de sable concassé en fonction de la température.

A partir de la figure III.19, on peut noter que pour des températures allant jusqu'à 250°C, la résistance en compression est entre 8% et 17% plus faible que celle obtenue à 20°C. Autour de 400°C, une légère augmentation de la résistance, entre 2% et 7%, est constatée.

Au-delà de 400°C, la résistance baisse considérablement. Nous pouvons noter une diminution de 13% à 22% de la résistance en compression à 600°C. Ce qui est couramment rencontré dans la littérature. A une température de 900°C, les valeurs de la résistance sont très faibles, les bétons ont des résistances inférieures à 10 MPa. Cette baisse de résistance est expliquée par l'endommagement du matériau (déshydratation, fissuration, incompatibilité de déformation entre la pâte et les granulats).

III.5 CARACTERISATION DU COMPORTEMENT DES BETONS AVEC 30% DE BRIQUE CONCASSÉE A HAUTE TEMPERATURE

L'étude de l'influence de substitution de 30% du gravier et gravillon calcaire par des granulats de brique concassée 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 B1-BC, B2-BC et B3-BC.

III.5.1 Perte de masse

La figure III.20 présente l'évolution de la perte de masse avec la température des éprouvettes des bétons confectionnés par le remplacement d'une partie de granulats naturels (30%) par des granulats de brique concassée.

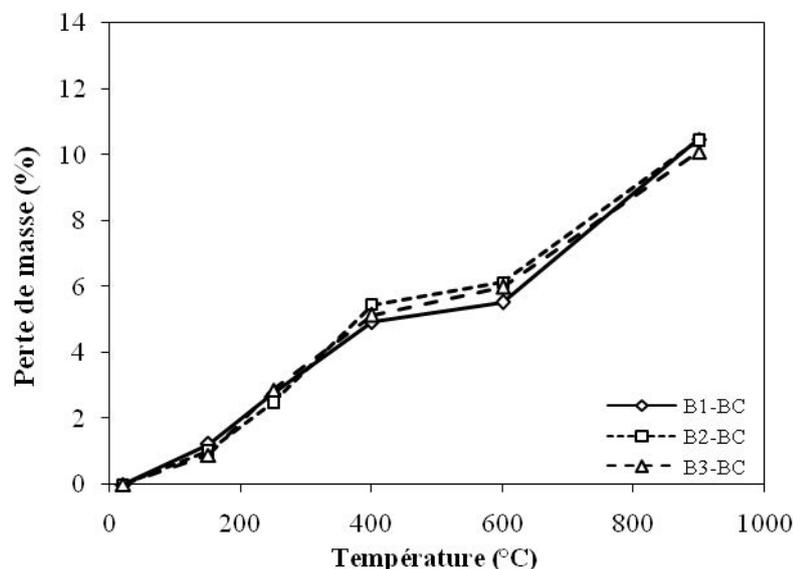


Figure III.20. Évolution de la perte de masse en fonction de la température pour les bétons B1-BC, B2-BC et B3-BC.

Nous observons que la variation de la perte de masse des éprouvettes du béton B1-BC est similaire et très proche à celles des éprouvettes du béton B2-BC et B3-BC. On constate une importante perte de masse pour tous les bétons après le chauffage à 400°C. La diminution de la masse est d'environ 5.2% de la masse initiale, ce qui peut être expliqué par le départ de l'eau adsorbée et liée. Entre 400°C et 600°C, la variation de la masse est assez faible. Chacun des bétons perd entre 5.5% et 6.1% de sa masse initiale. Sachant que la quantité d'eau totale dans les bétons est de 6.6% à 8.7% de la masse de béton, nous pouvons constater que l'essentiel de l'eau contenue dans chaque béton s'échappe au cours du chauffage entre 150°C et 600°C. Une faible partie de l'eau (entre 1.1% et 2.6% de la masse du béton) est aussi évacuée à des températures supérieures à 600°C. Au-delà de cette température, la perte de masse continue à augmenter jusqu'à 900°C. La perte de masse moyenne est de 10.5% pour B1-BC et B2-BC et 10% pour B3-BC.

III.5.2 Porosité à l'eau

La figure III.21 présente l'évolution de la porosité à l'eau des bétons testés en fonction du cycle de chauffage. Comme attendu, la porosité des bétons augmente en fonction de la température de chauffage.

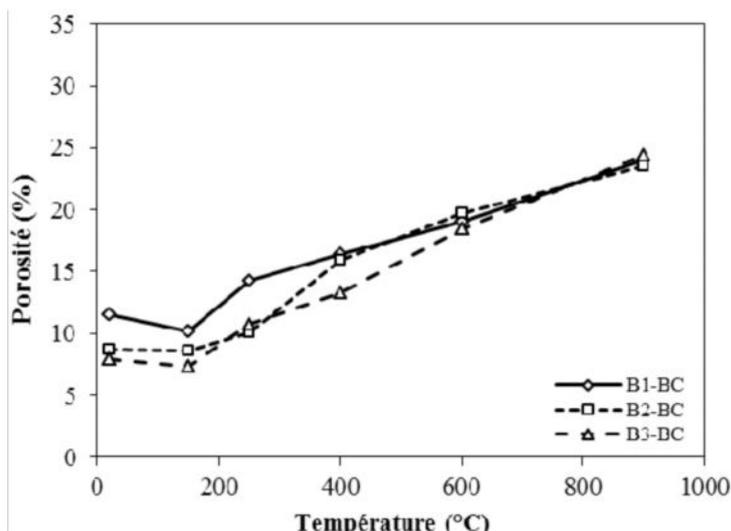


Figure III.21. Évolution de la porosité à l'eau des bétons de granulats de brique concassée en fonction de la température.

A la température 150°C, une légère baisse de porosité des bétons est constatée. Au-delà de cette température, on observe, pour les trois bétons, une augmentation assez régulière de la porosité avec la température, cette augmentation est plus importante pour les bétons B2-BC et B3-BC. Il semble que la microstructure des bétons les plus compacts soit plus affectée par le chauffage [Mindeguia, 2009].

III.5.3 Densité

L'évolution de la densité apparente est présentée sur la figure III.22.

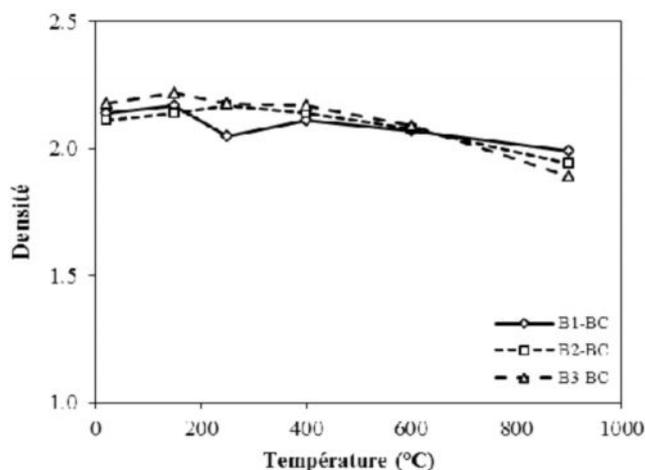


Figure III.22. Évolution de la densité apparente des bétons de granulats de brique concassée en fonction de la température.

L'évolution de la densité apparente est corrélée à celle de la porosité car les deux phénomènes sont liés [Fares, 2009]. La diminution de la densité apparente est due au départ de l'eau durant le chauffage et à l'augmentation de porosité. La densité du béton B1-BC diminue de 7% après le chauffage à 900°C. Pour les bétons B2-BC et B3-BC, la diminution de la densité est de 8% et 13%, respectivement. Donc, nous pouvons conclure que le pourcentage de diminution de la densité apparente augmente lorsque le dosage en ciment est important.

III.5.4 Volume des éprouvettes

Les variations dimensionnelles affectent directement le volume du matériau. La variation du volume des éprouvettes est mesurée jusqu'à 900°C. La figure III.23 présente les courbes de variation relative du volume des éprouvettes en fonction de la température.

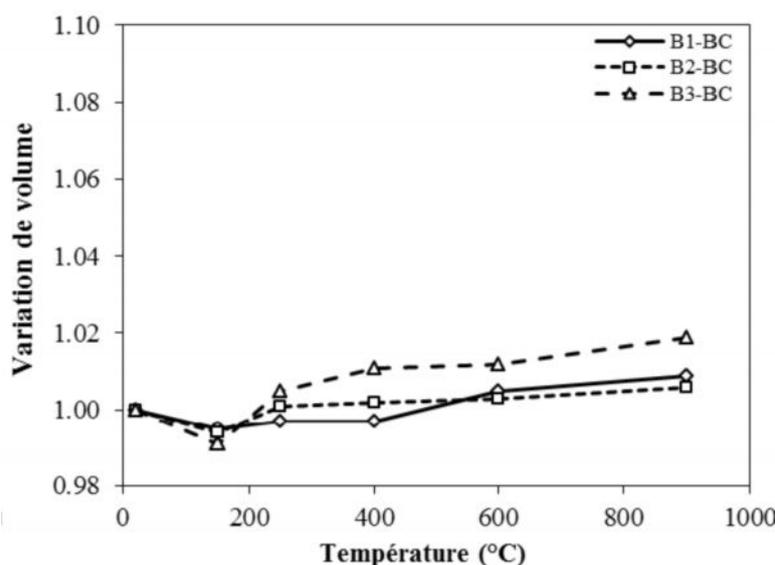


Figure III.23. Variation du volume apparent des bétons de granulats de brique concassée avec la température.

Nous observons que les valeurs de la variation du volume des trois bétons sont très proches. Deux phases ont été constatées : une première phase de contraction suivie d'une phase de dilatation. Sur l'ensemble des courbes, nous pouvons observer que les valeurs de variation du volume sont inférieures à 2%. Les valeurs de l'augmentation du volume enregistrées après le chauffage à 900°C varient entre 0.6% et 1.9%. Cette augmentation du volume est généralement attribuée à la génération de microfissures.

III.5.5 Vitesse des ondes soniques

Le tableau III.8 et la figure III.24 présentent les valeurs des vitesses des ondes soniques avant et après l'exposition des bétons aux hautes températures.



Tableau III.8. Valeurs des vitesses des ondes soniques et qualité des bétons des bétons de granulats de brique concassée.

T (°C)	B1-BC		B2-BC		B3-BC	
	Vitesse	Qualité	Vitesse	Qualité	Vitesse	Qualité
20	4513 m/s	Excellente	4560 m/s	Excellente	4798 m/s	Excellente
150	4279 m/s	Bonne	4346 m/s	Bonne	4619 m/s	Excellente
250	3960 m/s	Bonne	4159 m/s	Bonne	4259 m/s	Bonne
400	3549 m/s	Bonne	3711 m/s	Bonne	3869 m/s	Bonne
600	2515 m/s	Faible	2750 m/s	Faible	2839 m/s	Faible
900	1217 m/s	Très faible	1557 m/s	Très faible	1793 m/s	Très faible

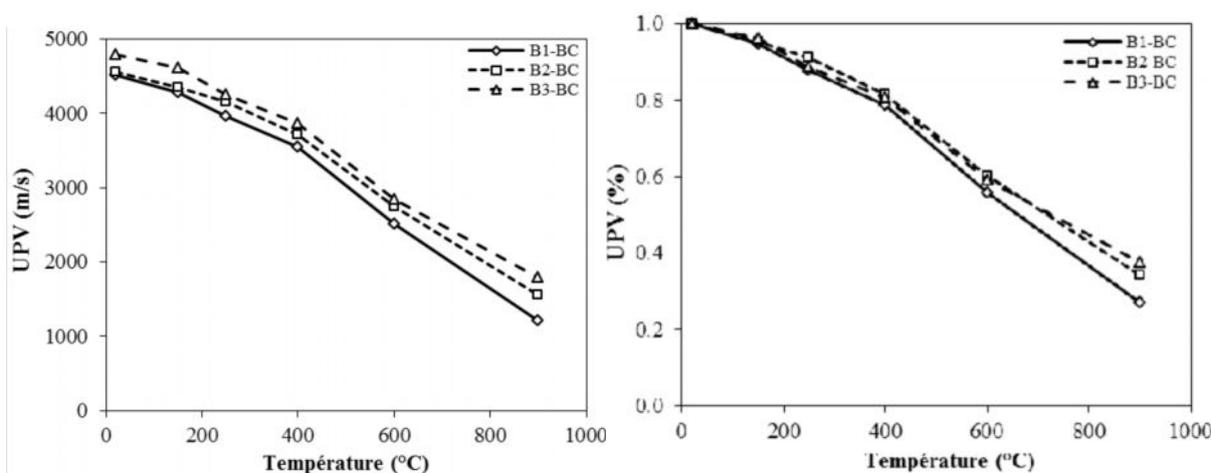


Figure III.24. Effet de la température sur la vitesse des ondes soniques des bétons de granulats de brique concassée.

D’après le tableau III.9, les bétons B1-BC et B2-BC montrent une excellente qualité à 20°C, alors que le B3-BC montre une excellente qualité à 20°C et après le chauffage à 150°C. A partir de cette température et jusqu’à 400°C, les valeurs de la vitesse des ondes sont supérieures à 3500 m/s. Au-delà de 400°C, la vitesse des ondes décroît d’une manière quasi linéaire. Les pourcentages de diminution sont d’environ 73% pour B1-BC, 66% pour B2-BC et 63% pour B3-BC. La baisse des valeurs de la vitesse des ondes est expliquée par l’augmentation des volumes poreux et l’endommagement de la microstructure par propagation des fissures.

III.5.6 Résistance en compression

La figure III.25 présente la variation de la résistance en compression des bétons contenant des briques concassées en fonction de la température. De plus, ces résultats sont normalisés par rapport à la valeur initiale mesurée à 20°C.

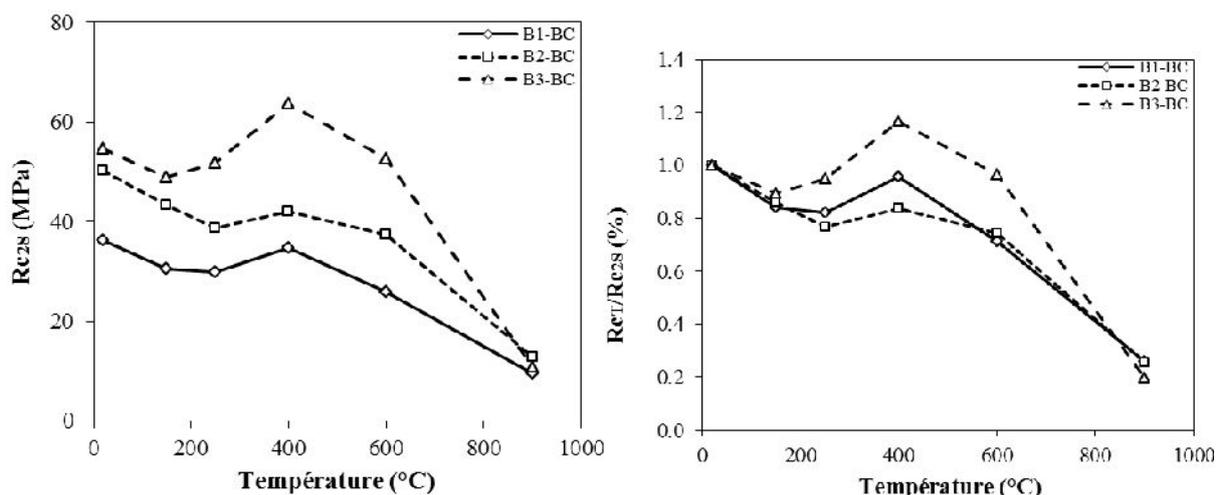


Figure III.25. Evolution de la résistance résiduelle et relative en compression des bétons de granulats de brique concassée en fonction de la température.

De la température ambiante à 250°C, une légère diminution de la résistance en compression est remarquée, entre 10% et 16% à 150°C et entre 5% et 23% à 250°C. En effet, la plupart des dommages à cette étape viennent de l'élimination de l'eau libre et de la déshydratation des CSH de la pâte de ciment. A la température de 400°C, on constate un gain de résistance pour les trois bétons. L'augmentation de la résistance en compression du béton B3-BC, environ 17%, est plus marquée que celle des deux autres bétons (B1-BC et B2-BC).

Après le chauffage à 900°C, une baisse de la résistance en compression de 74% pour le B1-BC, de 76% pour le B2-BC et de 80% pour le B3-BC a été constatée.

III.6 OBSERVATIONS DE L'ENDOMMAGEMENT DES BETONS SOUMIS À HAUTES TEMPERATURES

Dans cette partie, on visera à présenter une analyse des dégradations des bétons étudiés après les différentes sollicitations thermiques. Quand le béton est soumis à des sollicitations thermiques et au-delà d'une certaine température, des fissures peuvent apparaître dans le matériau. Le refroidissement du béton après exposition à haute température peut entraîner l'apparition d'une fissuration supplémentaire et une ré-humidification provoquant la réhydratation du gel CSH mais aussi la réaction de la CaO avec l'eau présente dans l'environnement endommageant d'avantage la structure du béton [Hager, 2004].

III.6.1 Observations macroscopiques des dégradations des différents bétons après le refroidissement

Sous l'effet d'un chauffage, l'endommagement apparaît dans le béton sous différentes formes et à différentes échelles: du micro (fissuration de la matrice du fait de la déshydratation des CSH et Portlandite), en passant par le méso (incompatibilité de déformation pâte/granulat) jusqu'au macro (endommagement thermomécanique dû au gradient thermique) [Mindeguia, 2009].

L'une des conséquences de l'endommagement thermique du béton est l'apparition des fissures dans la matrice comme nous pouvons le voir sur la figure III.26.

Les observations ont montré que les éprouvettes ne présentent pas de fissuration visible à l'œil nu à la surface après le chauffage à 150°C et 250°C. Les premières fissurations ont été observées à l'œil nu à la surface des éprouvettes après le cycle de chauffage-refroidissement de 400°C sans présence d'événement d'éclatement des éprouvettes.

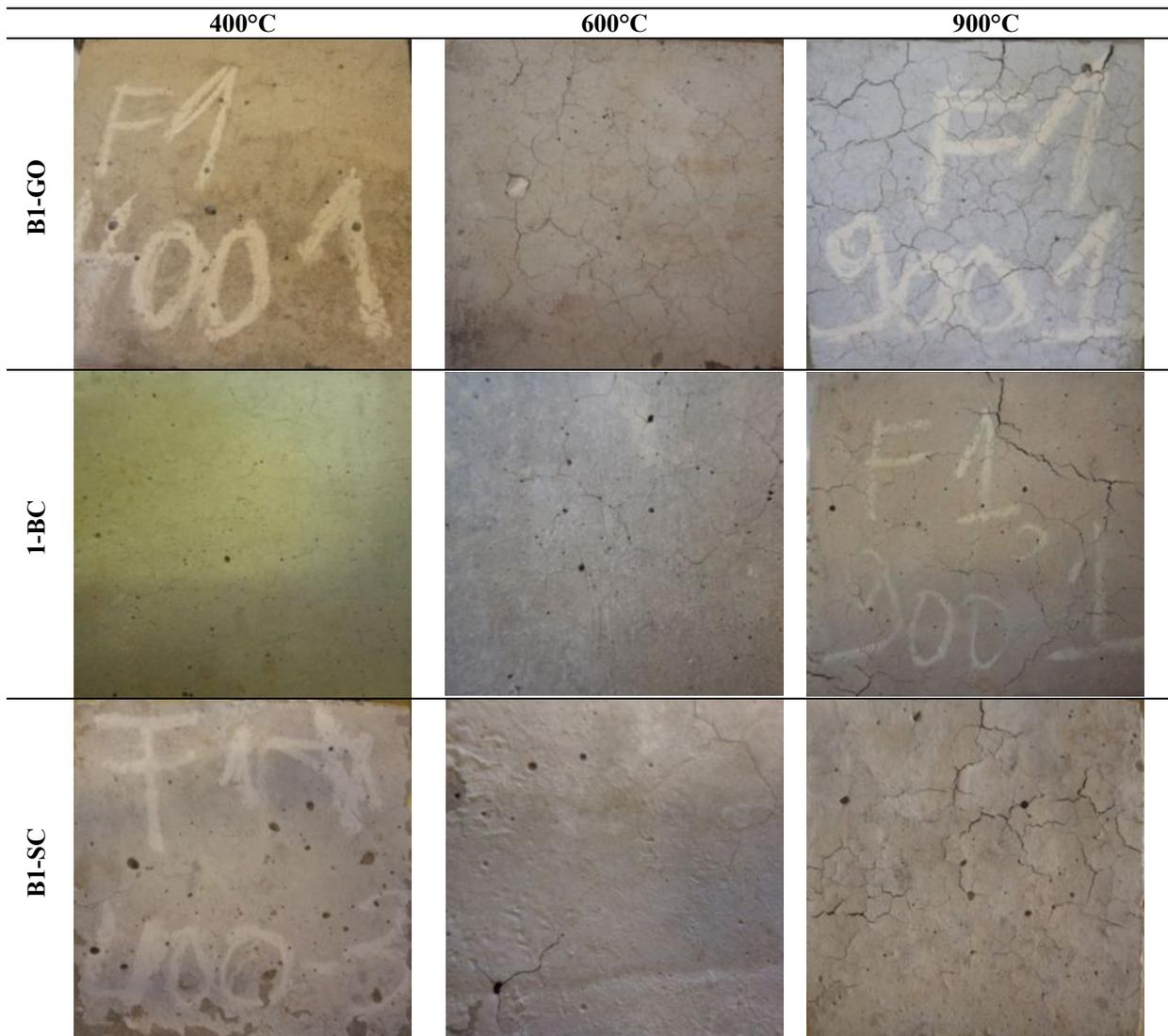


Figure III.26. Observations à l'œil nu de l'évolution de la dégradation des bétons B1-GO, B1-BC et B1-SC après les cycles de chauffage de 400°C, 600°C et 900°C.

Après le refroidissement des éprouvettes qui ont subi l'échauffement jusqu'à 900°C, nous avons noté un endommagement très important des éprouvettes, ce qui explique les valeurs élevées de la porosité des bétons déterminée à cette température et la diminution importante de la résistance en compression. Les microfissures deviennent des macro-fissures et conduisant à la rupture du matériau, les éprouvettes pouvant être entièrement rompue d'un léger coup de marteau. A cette température, on observe aussi un blanchiment des granulats calcaires comme nous pouvons le voir sur la figure III.27.

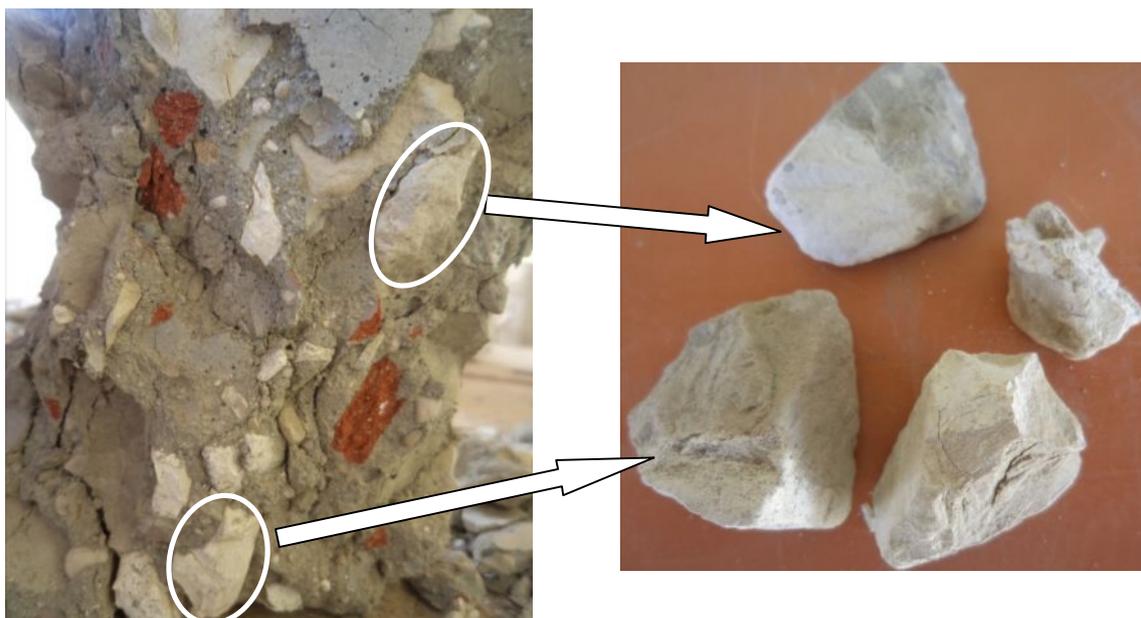


Figure III.27. Décarbonation des granulats calcaires après le cycle de 900°C.

Les bétons contenant des granulats de brique concassée sont les bétons les moins fissurés en surface et les moins endommagés par rapport aux autres bétons. Dans le cas du béton de granulats ordinaires (granulats calcaire et sable siliceux), nous observons une densité de fissure très importante (figure III.26), plus particulièrement après le chauffage à 900°C.

Au cours de traitement thermiques des éprouvettes, nous allons constater que la dégradation du béton commence par la création des microfissures, de faible ouverture et de faible longueur, à partir des grands pores (figure III.28-a). Avec l'augmentation de la température, les pores de différentes dimensions facilitent le développement et le passage des microfissures (figure III.28-b). Autour de 600°C, les microfissures s'interconnectent entre elles pour former des macro-fissures (figure III.28-c).

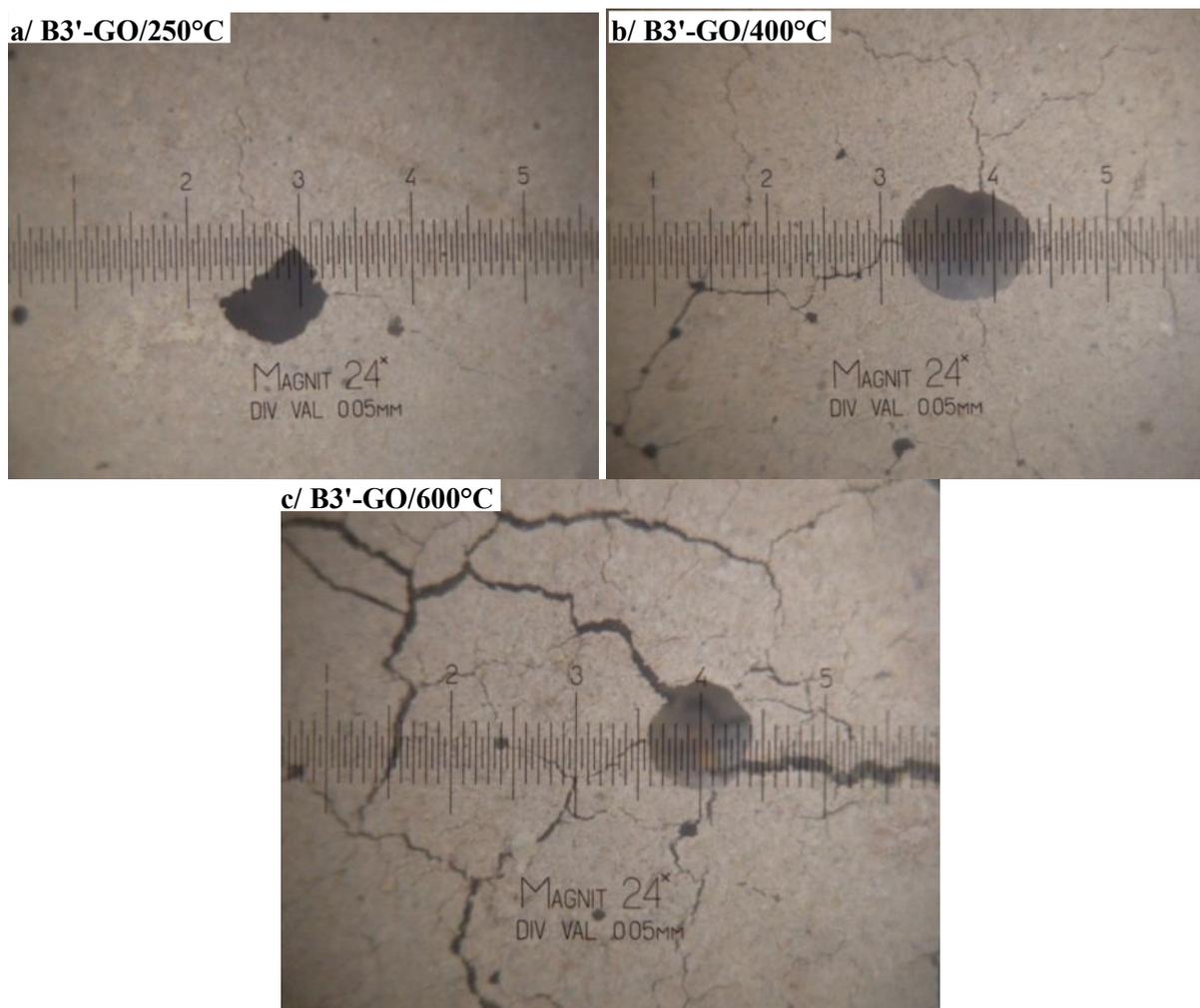


Figure III.28. Fissuration à la surface des éprouvettes de B3'-GO après traitement thermique à 250°C, 400°C et 600°C.

Il est intéressant de noter qu'aucun éclatement n'a été observé lors des traitements thermiques appliqués aux différents bétons. Cependant, un détachement de la matière a été constaté. Ce type d'instabilité thermique est couramment appelé "Ecaillage", il s'agit d'un détachement de petites écailles de béton qui sont expulsées avec force du parement exposé à hautes températures.

Les observations réalisées montrent que les fissures progressent dans les éprouvettes avec l'augmentation de la température et conduisent, après chauffage à 900°C, au détachement de matière (petit morceaux) de la surface du béton (figure III.29).

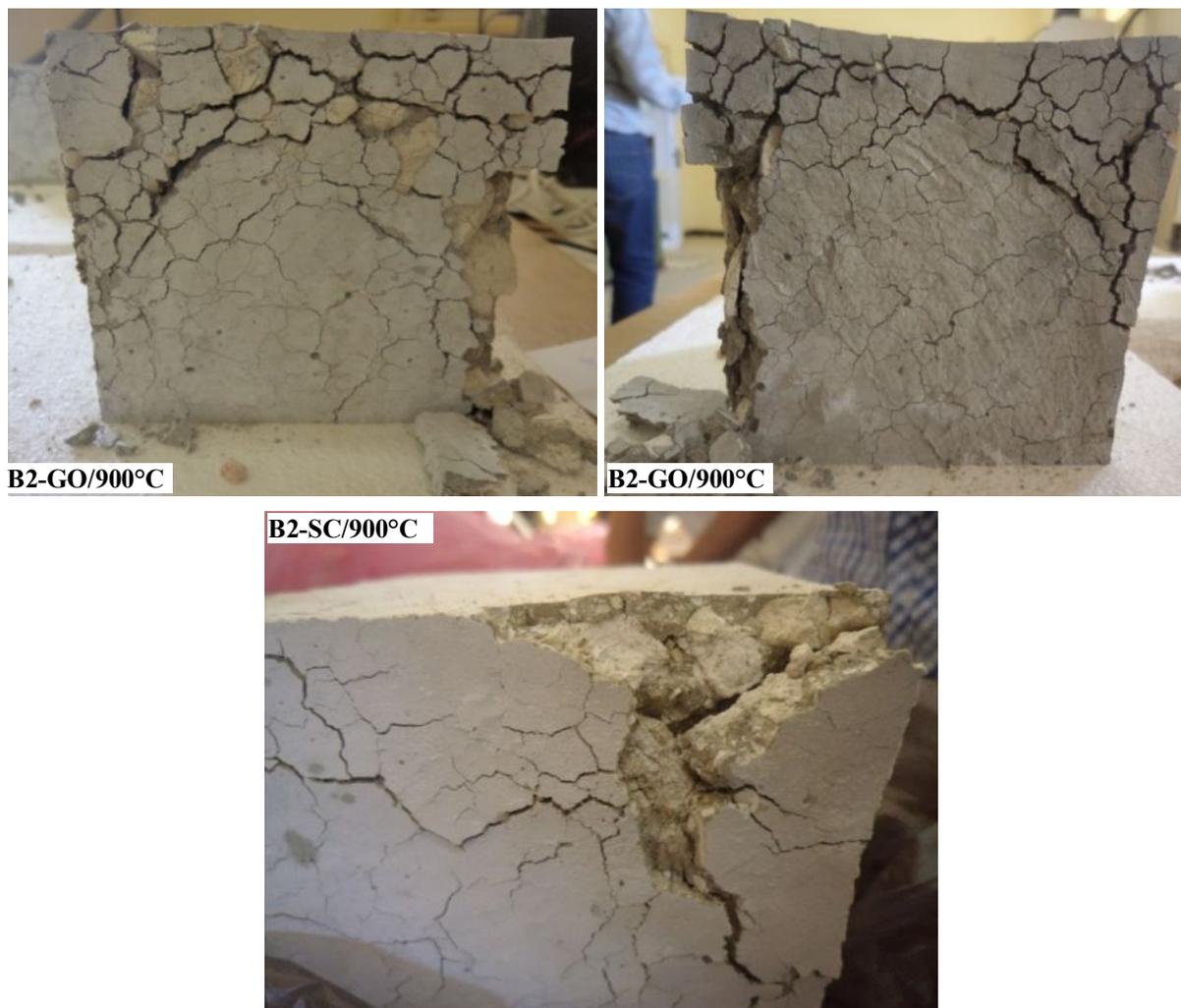


Figure III.29. Ecaillage de quelques éprouvettes après chauffage à 900°C.

D'autres observations ont été réalisées après le chargement mécanique en compression des éprouvettes (essai de compression). Ces observations nous permettent de comparer l'aspect de la fissuration et de rupture des éprouvettes testées en compression. La figure III.31 montre la différence des caractéristiques de la fissuration par rupture des bétons aux différentes températures de chauffage.

Une meilleure liaison entre la pâte de ciment et les différents granulats, granulats siliceux (figure III.30-a), granulats calcaires (figure III.30-b) et granulats de brique concassée (figure III.30-c), a été observée à 20°C à l'aide du microscope optique.

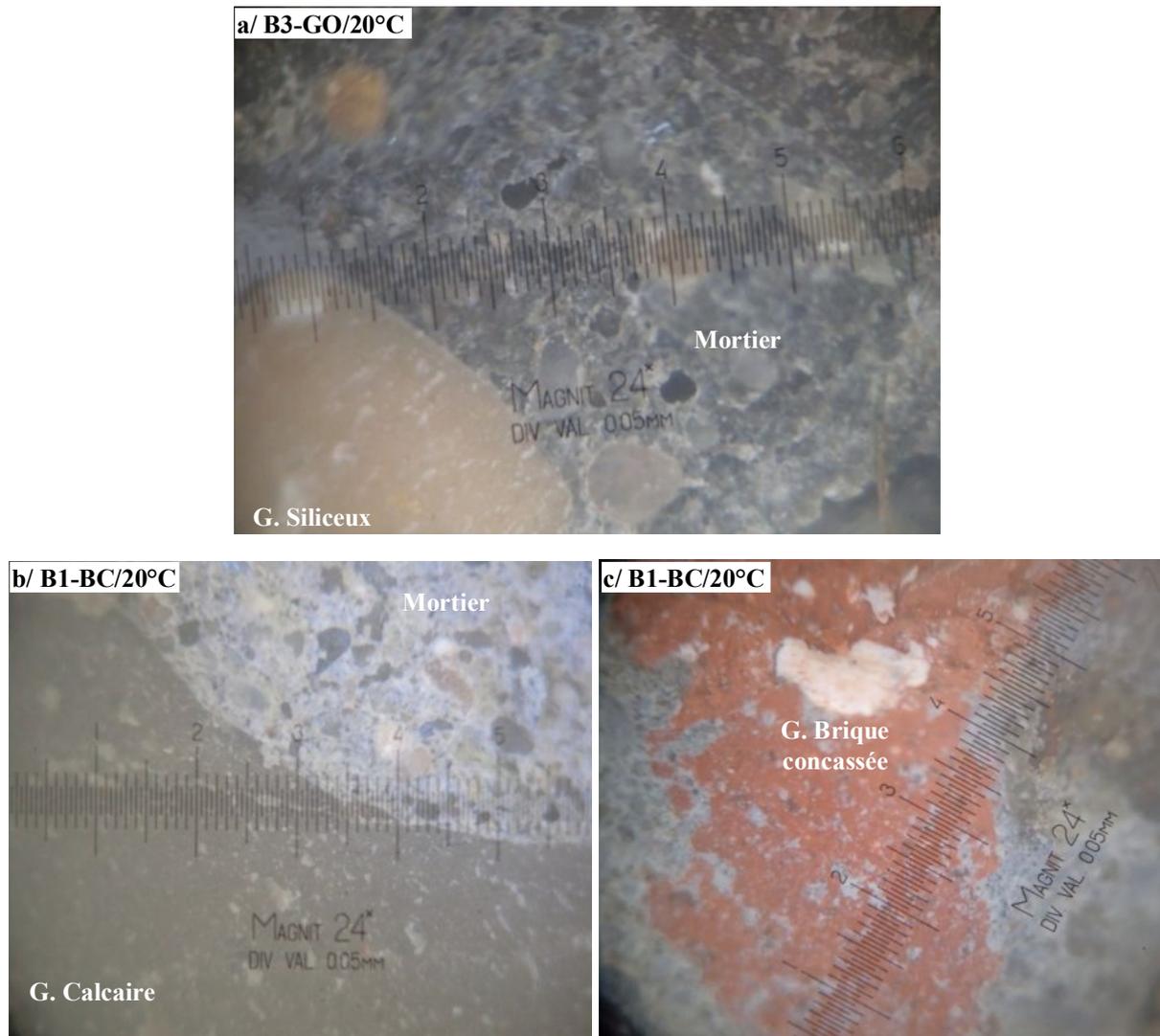


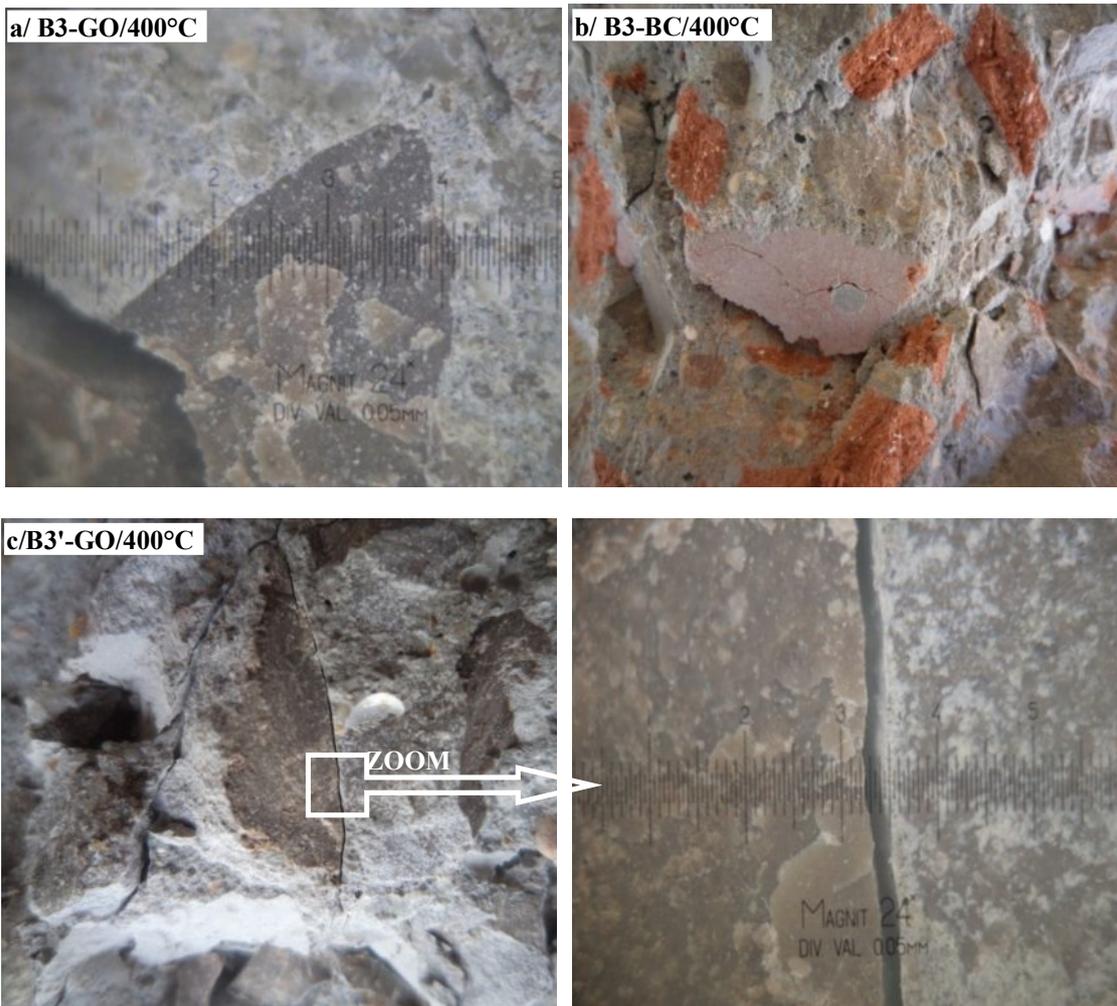
Figure III.30. Liaison entre les différents granulats et la pâte de ciment.

Les sollicitations mécaniques endommagent le matériau en provoquant une augmentation de la porosité et une baisse de module d'élasticité par la fissuration. Deux types de fissuration sont généralement mis en évidence [Haniche, 2011]:

- Fissuration au niveau de l'interface de la pâte de ciment-granulat (auréole de transition),
- Fissuration à travers le mortier.

Les images présentées sur la figure III.31 montrent les fissurations provoquées par les sollicitations mécaniques au sein des éprouvettes qui ont subi un chauffage à 400°C, 600°C et 900°C. Des fissures ont été générées au sein du matériau à cause de fragilisation de la matrice cimentaire par perte d'eau structurelle et déshydratation du gel de CSH et de la portlandite. Ces microfissures connectent les pores initiaux, puis s'interconnectent entre elles pour former des macrofissures.

Sur les figure III.31-a et III.31-b, nous pouvons observer des fissures de rupture qui passent à travers les granulats calcaires et les granulats de brique concassée après chauffage à 400°C. Ces fissures sont appelées des fissures transgranulaires, c'est à dire les fissures qui traversent les granulats. Un autre type de fissuration a été aussi observé au sein du béton chauffé à 400°C, qu'on appelle les fissures intergranulaires. Sur la figure III.31-c, nous présentons un agrandissement de 25x de la partie désignée sur laquelle la fissure intergranulaire est visible. Ce type de fissuration est caractérisé par la rupture qui contourne les granulats et se propage dans la zone de transition entre la pâte de ciment et les granulats. Cette zone, appelée aussi interface pâte-granat, est la zone la moins riche en CSH. Elle peut être également affectée par l'augmentation de la température vue sa fragilité. Les phénomènes de déshydratation et le départ de l'eau liée chimiquement pendant le chauffage entraîne des dégradations progressives dans cette zone et favorise le développement des fissures et une détérioration rapide au niveau de cette zone [Haniche, 2011].



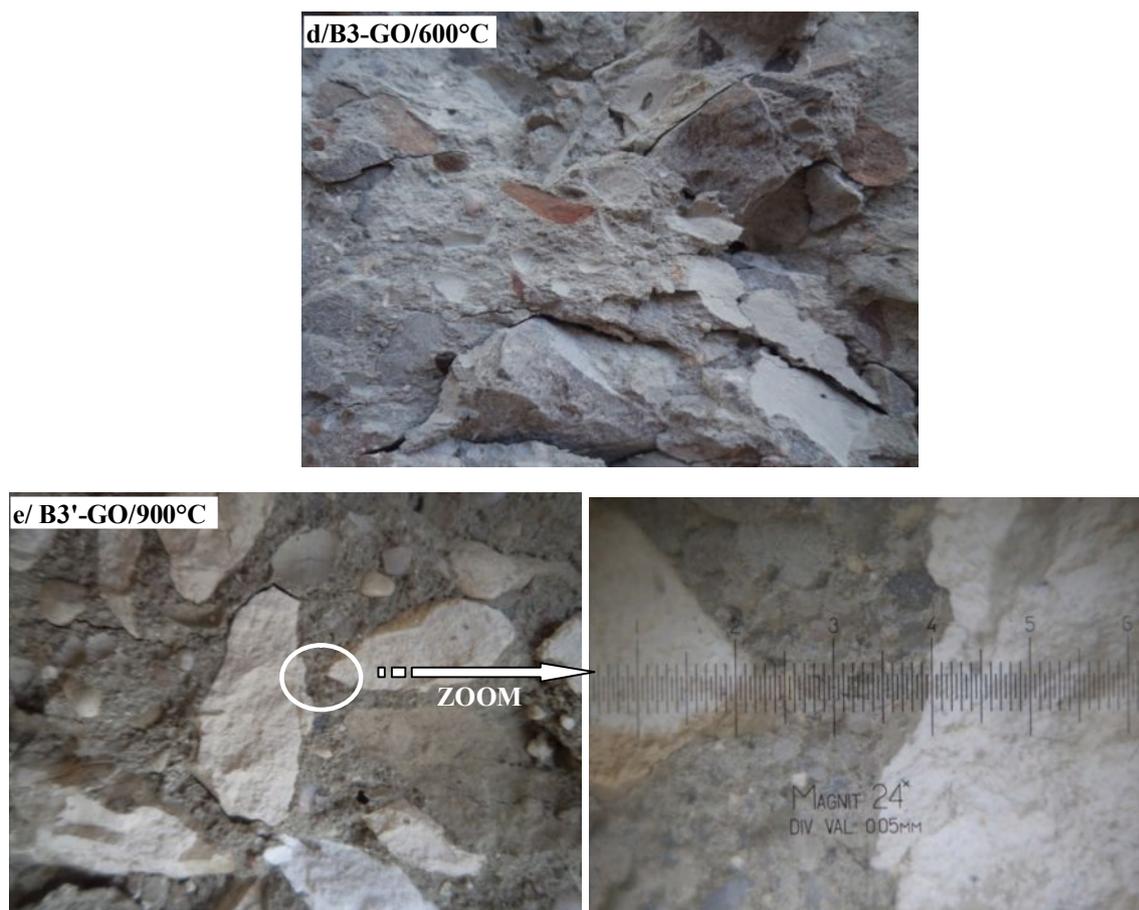


Figure III.31. L'aspect des fissurations après l'essai de compression des éprouvettes chauffées à 400°C, 600°C et 900°C.

Après le cycle de chauffage à 900°C, nous observons la décomposition des granulats calcaires. Il se forme une couche poudreuse friable à leurs surfaces à cause de la décarbonatation de calcite (CaCO_3) qui se transforme en chaux vive (CaO) suite au départ de CO_2 . Le CaO réagit avec l'humidité ambiante et se transforme en portlandite [Xing, 2011], [Nyry et al., 2012], [Xing et al., 2013]. Cette réaction est accompagnée par une augmentation de volume (figure III.31-e) qui engendre une fissuration à l'interface pâte-granulats et par conséquent la décohésion des granulats avec la pâte.

III.6.2 Évolution de la fissuration du béton avec la température

Nous avons suivi l'évolution des fissurations des éprouvettes de différent béton après leur refroidissement. L'ouverture des fissures a été déterminée à l'aide d'un microscope optique, elles sont regroupées dans le tableau III.9.

Avant 400°C, nous n'avons pas vu de fissures à l'œil nu sur les éprouvettes, mais des fissures de faible ouverture (inférieure à 0,05 mm), comme l'illustre la figure III.32, sont visibles à

l'aide du microscope optique. Cet endommagement peut être causé par la forte dilatation thermique de l'eau (matériau de plus quasi-incompressible) au sein des pores, pouvant induire de fortes contraintes de traction dans le squelette solide et de possibles fissures [Mindegua, 2009]. Ensuite, la fissuration du béton se développe de manière progressive avec l'augmentation de la température.

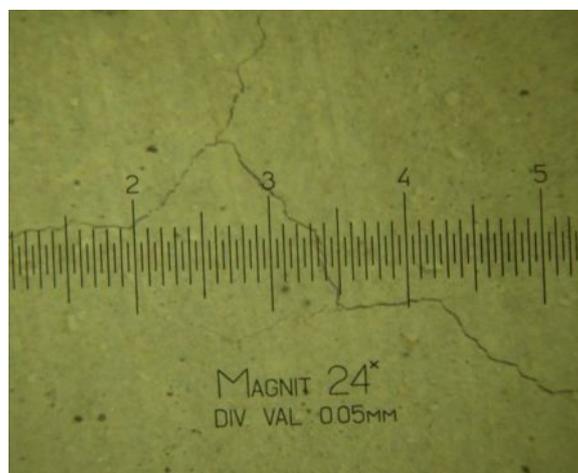


Figure III.32. Observation au microscope optique des fissures de faible ouverture du B3-GO après chauffage à 150°C.

Les éprouvettes de bétons traités thermiquement à 400°C se caractérisent par la présence des fissures ouvertes. L'ouverture des fissures varie de 0,04 mm à 0,08 mm selon le type de béton. Au-delà de cette température, la quantité et l'ouverture des fissures deviennent plus importantes et visibles à l'œil nu. Ces fissures sont situées à la surface des éprouvettes et se prolongent dans la pâte de ciment vers l'intérieure des éprouvettes. La fissuration du béton qui se manifeste à partir de la température de 400°C est principalement due à la différence des directions de la déformation thermique de la pâte de ciment (retrait) et les granulats (dilatation) [Hager, 2004]. L'évolution opposée de la pâte et des granulats génère à l'interface pâte-granulats des incompatibilités de déformations qui génèrent des contraintes de traction au sein de la pâte de ciment et des contraintes de compression au niveau des granulats. Ce comportement opposé granulats-pâte de ciment pourrait donc engendrer des microfissurations dans le matériau [Pliya, 2010].

Après le chauffage à 600°C, nous observons de nombreuses fissures connectées en réseau qui apparaissent au sein de la pâte de ciment. L'ouverture de ces fissures est d'environ 0,05 mm à 0,10 mm. Après le cycle de chauffage à 900°C, l'ouverture et la profondeur des fissures deviennent plus importantes. Une plus forte fissuration est observée avec une ouverture allant

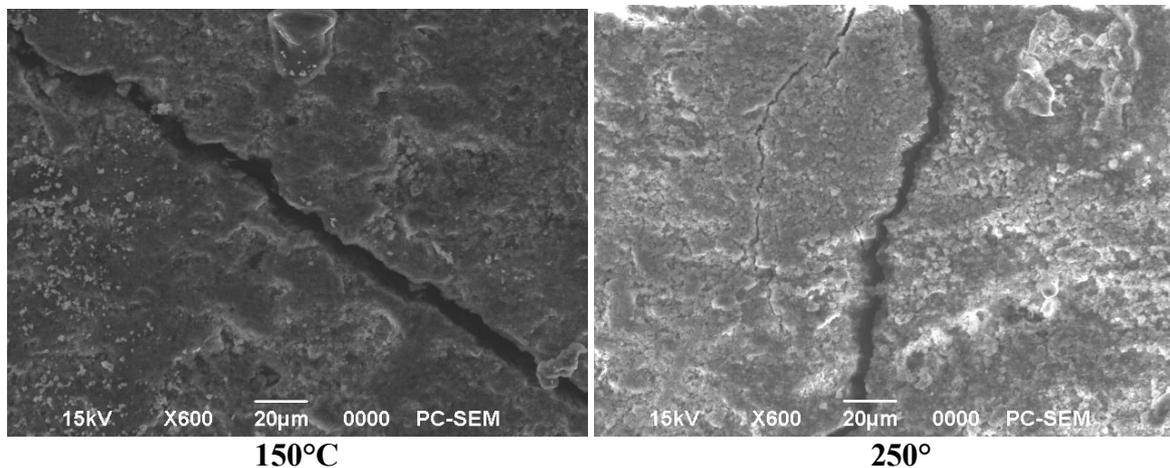
jusqu'à 0,70 mm. Ces ouvertures de fissures pourraient en effet s'accompagner de perte de matière qui influencerait sur la perte de masse totale des éprouvettes traitées à cette température. Les éprouvettes du béton contenant des granulats de brique concassée présentent des ouvertures des fissures les plus faibles. Nous remarquons que les bétons contenant du sable siliceux sont moins résistants à la propagation des fissures. On observe aussi que plus le rapport E/C est faible plus l'ouverture des fissures est moins importante.

Tableau III.9. Largeurs des macro-fissures après chauffage à 400, 600 et 900°C.

Compositions	Largeur des fissures (mm)					
	400°C		600°C		900°C	
	min	max	min	max	min	max
B1-GO	< 0,05	0,08	< 0,05	0,25	< 0,05	0,70
B2-GO	< 0,05	0,05	< 0,05	0,10	< 0,05	0,50
B3-GO	< 0,05	0,05	< 0,05	0,08	< 0,05	0,35
B1-BC	< 0,05	0,05	< 0,05	0,10	< 0,05	0,50
B2-BC	< 0,05	0,04	< 0,05	0,05	< 0,05	0,30
B3-BC	< 0,05	0,04	< 0,05	0,10	< 0,05	0,20
B1-SC	< 0,05	0,05	< 0,05	0,10	< 0,05	0,60
B2-SC	< 0,05	0,05	< 0,05	0,10	< 0,05	0,50
B3-SC	< 0,05	0,05	< 0,05	0,10	< 0,05	-

III.6.3 Observations au Microscope Électronique à Balayage

Des observations au Microscope Electronique à Balayage MEB de fissures dans les bétons constitués avec des granulats calcaires et des granulats de brique concassée chauffés à différentes températures ont été réalisées avec un grossissement de 600. La figure III.33 présente les micrographies obtenues au MEB sur des échantillons du béton B3-BC après exposition à 150°C, 250°C, 400°C et 600°C.



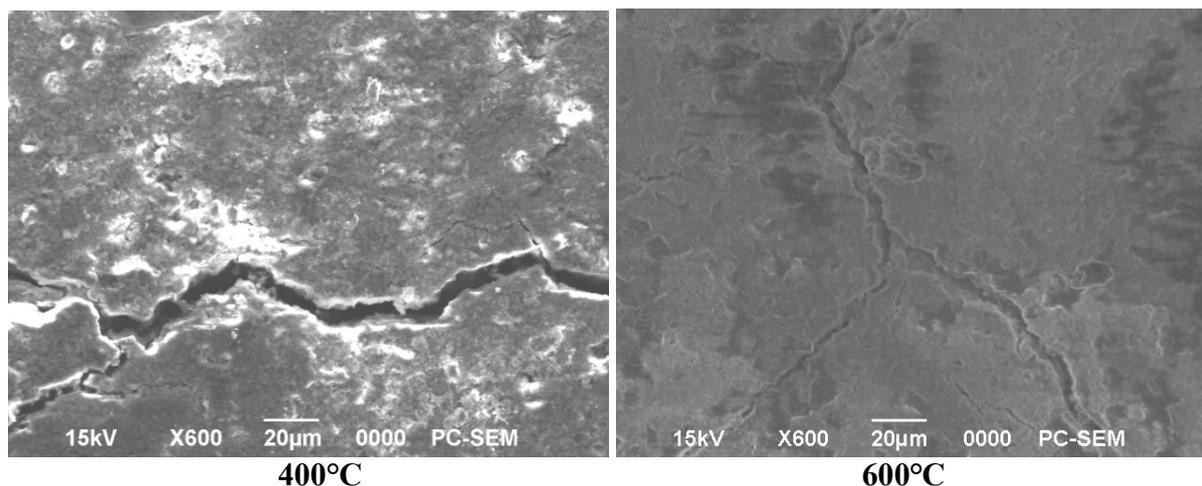


Figure III.33. Observations au MEB d'échantillons de B3-BC chauffés à 150°C, 250°C, 400°C et 600°C.

L'observation microscopique réalisée sur l'échantillon issu du cycle 150°C confirme et met en évidence l'existence des microfissures qui traversent la matrice cimentaire. La largeur de ces fissures est de l'ordre de 10 µm. A 250°C, nous constatons que la microfissuration est plus prononcée. Les échantillons chauffés à 400°C et 600°C montrent une densité de fissures beaucoup plus importante.

III.7 CONCLUSION

Ce chapitre présente, dans un premier temps, une analyse comparée des propriétés physiques des différents types de granulats utilisés après leur exposition à différents cycles de chauffage-refroidissement. Les résultats obtenus permettent de constater des dégradations des granulats à partir de 600°C. Quatre types de granulats sont testés : un granulat calcaire concassé, un sable siliceux, un sable calcaire concassé et un granulat de brique concassée. Les granulats calcaires montrent une perte de masse plus importante (deux fois plus importante que celle du sable siliceux), et subissent des endommagements liés à la décarbonatation à partir de 700°C. Trois groupes de bétons, confectionnés avec les différents granulats, ont fait l'objet de cette étude. Le premier groupe du béton contient des granulats calcaires et un sable siliceux (B-GO), le deuxième groupe contient des granulats calcaires et un sable calcaire (B-SC) et le troisième groupe a été fabriqué par 70% de granulats calcaires, 30% de granulats de brique concassée et du sable siliceux (B-BC). Pour chaque groupe, trois compositions ont été préparées avec différents rapport E/C. Les éprouvettes issues de ces compositions ont été soumises à différents cycles de chauffage- refroidissement.



La deuxième 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 900°C.

La mesure de la perte de masse des bétons a permis de distinguer trois zones de départ d'eau du béton. La première zone, commençant de 20°C à 400°C, présente une importante perte de poids due au départ de l'eau puis l'eau liée aux hydrates. Entre 400°C et 600°C, la cinétique de perte de masse ralentit. Au-delà de 600°C, la perte de masse est attribuée au départ de l'eau fortement liée.

L'évolution de la porosité, l'une des importantes propriétés caractérisant la durabilité du béton, est associée aux modifications physico-chimiques et aux microfissures qui se produisent au niveau de la pâte de ciment. L'évolution de la porosité est liée à celle de la densité apparente. L'augmentation de la température provoque une augmentation de la porosité et une diminution de la densité apparente.

L'augmentation de la porosité s'accompagne aussi d'une baisse des valeurs de la vitesse des ondes soniques. La mesure des dimensions des éprouvettes avant et après exposition à haute température a permis de quantifier la variation du volume apparent des bétons. Le retrait de la pâte de ciment provoque une diminution du volume apparent. Cependant, la dilatation des granulats et la fissuration de la pâte engendrent une augmentation du volume apparent du béton.

La résistance en compression résiduelle a été aussi déterminée. Nous constatons une faible baisse de la résistance dans un premier lieu, puis, elle s'améliore autour de 400°C. Au-delà de cette température, nous observons une importante perte de résistance pour tous les bétons.

L'évolution des endommagements des différents bétons est décrite par une série d'observations de la fissuration de l'échelle macroscopique à l'échelle microscopique. De nombreuses fissures sont observées, des fissures traversent la pâte de ciment et d'autres contournent les granulats et passent à travers l'interface de la pâte de ciment-granat (auréole de transition). Nous avons constaté que les fissures apparaissent moins vite au sein des bétons contenant des granulats de brique concassée.



Chapitre **IV**

**ANALYSE COMPARATIVE
ET RELATION DES
PROPRIETES PHYSIQUES
ET MECANQUES DES
DIFFERENTS BETONS**

IV.1 INTRODUCTION

Le but du présent chapitre est de comparer le comportement à haute température du béton contenant des granulats ordinaires (granulats calcaires concassés et sable siliceux) à ceux des bétons à base de sable calcaire concassé et ceux des bétons contenant 30% de granulats de brique concassée. Cette étude comparative permet de caractériser l'influence du sable calcaire et la brique concassée sur l'évolution des propriétés physiques et mécaniques du béton avec la température.

Dans le but de mieux comprendre le comportement du béton à haute température, nous allons essayer de faire un lien entre les propriétés physiques et mécaniques des différents bétons de l'étude afin d'estimer la relation entre ces propriétés.

IV.2 ANALYSE COMPARATIVE DES PROPRIETES PHYSIQUES ET MECANIQUES DES DIFFERENTS BETONS

IV.2.1 Perte de masse

La figure IV.1 illustre l'évolution de la perte de masse des différents bétons étudiés en fonction de la température de chauffage.

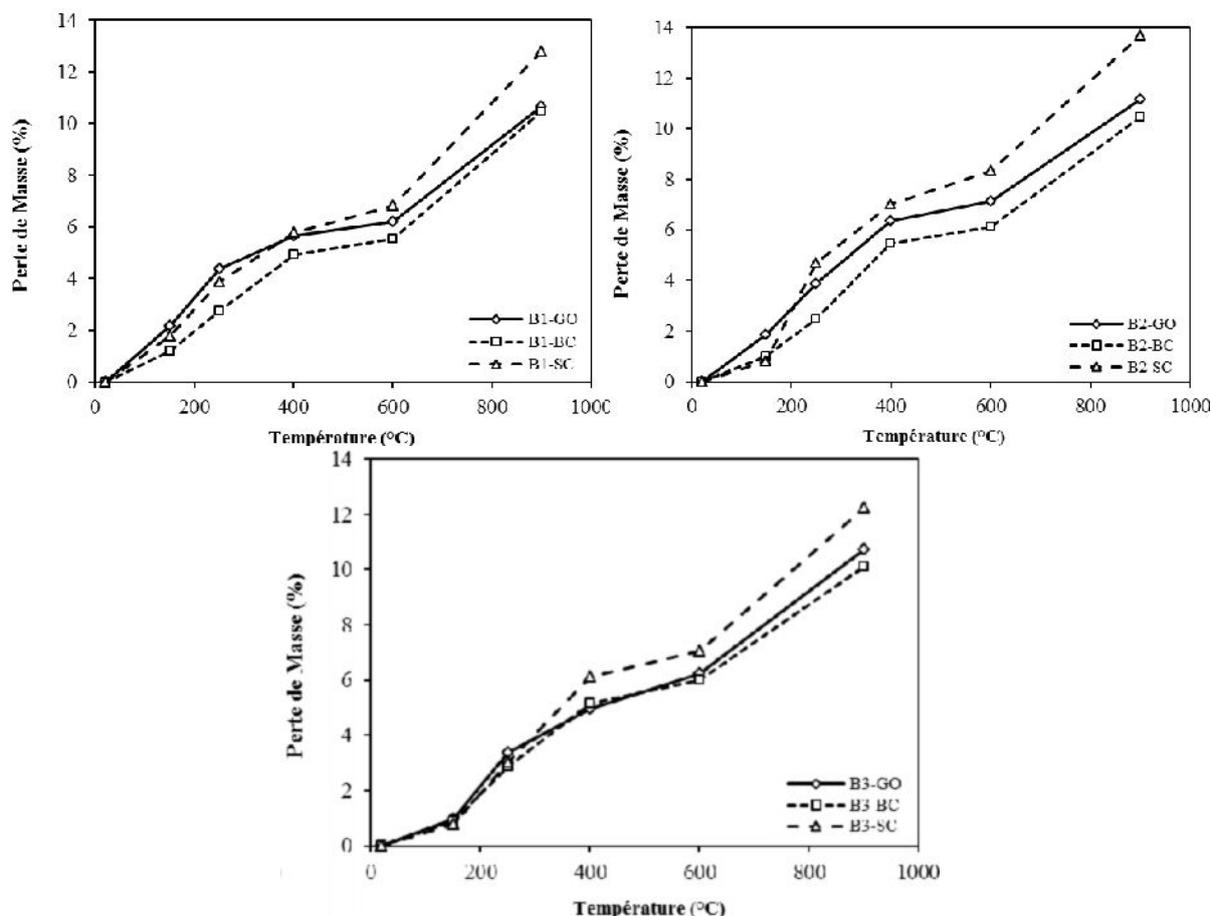


Figure IV.1. Évolution de la perte de masse des bétons en fonction de la température.

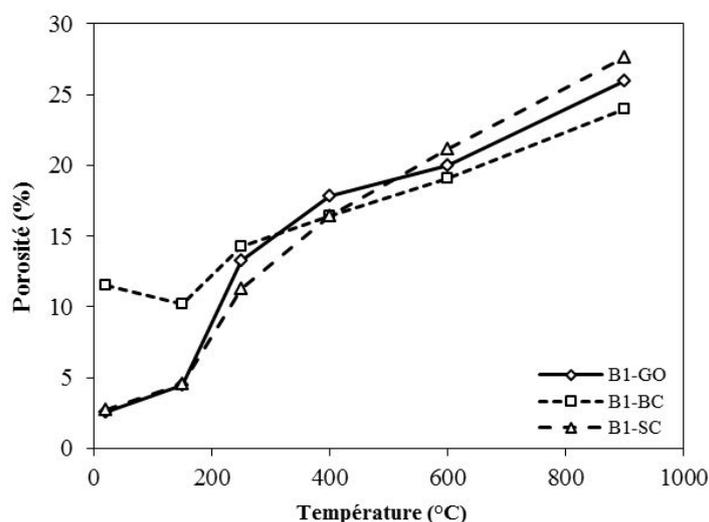
Entre la température ambiante et 250°C. Les bétons à rapport E/C élevé (B1-GO, B1-SC et B1-BC) perdent plus de masse que les bétons à faible rapport E/C. Les bétons à E/C élevé contiennent plus d'eau et ont une perméabilité plus grande que les bétons à E/C faible qui facilite l'évaporation de l'eau.

Au-delà de 250°C, l'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 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 (voir paragraphe III.2.2).

La plus grande perte de masse des bétons à base de sable calcaire peut s'expliquer par le départ de CO₂ provenant des carbonates de calcium qui entraîne une augmentation de la perte de masse supplémentaire à partir de 600°C.

IV.2.2 Porosité à l'eau

La figure IV.2 présente l'évolution de la porosité à l'eau des bétons de granulats ordinaires (B1-GO, B2-GO et B3-GO) comparée à celle des bétons à base de sable calcaire (B1-SC, B2-SC et B3-SC) et celle des bétons confectionnés par le remplacement de 30% de granulats calcaire par des granulats de brique concassée (B1-BC, B2-BC et B3-BC).



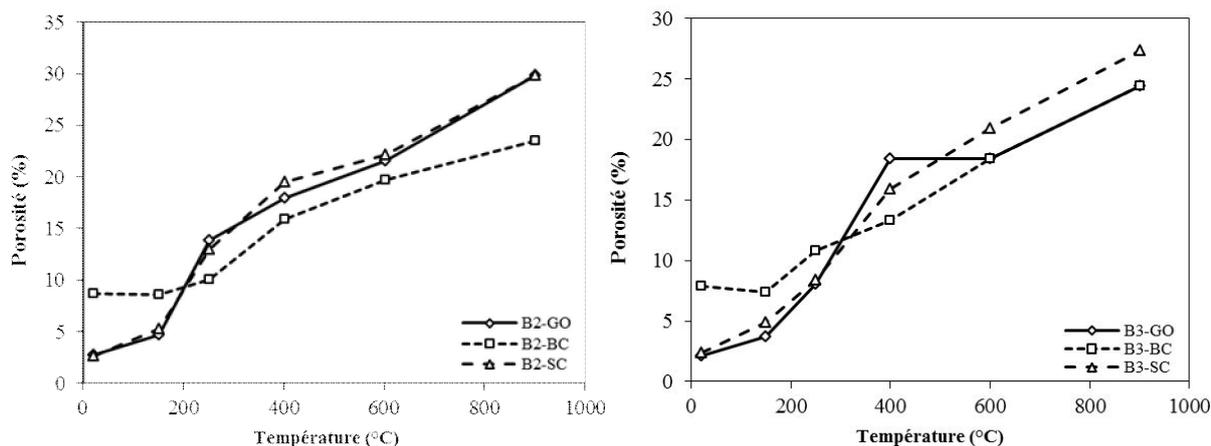


Figure IV.2. Évolution de la porosité à l'eau des différents types de bétons.

La figure IV.2 montre que l'utilisation des granulats de brique concassée entraîne une augmentation de la porosité dans la gamme de température de 20°C à 150°C. La porosité du béton B1-BC est 4 fois supérieure à celle du béton B1-GO et B1-SC à 20°C et 2 fois supérieure après un chauffage à 150°C. Pour les bétons B2-BC et B3-BC, la porosité est 3 fois supérieure à celle des bétons B2-GO, B2-SC et B3-GO et B3-SC à 20°C, respectivement. Elle est environ 1,7 fois supérieure après le chauffage à 150°C. Cela peut être expliqué par la porosité importante des granulats de brique concassée qui est supérieure à celle des granulats naturels.

À partir de 400°C, la porosité des bétons contenant des granulats de brique concassée croît moins vite que les autres bétons. Ce qui peut être expliqué par la diminution de la porosité des granulats de brique concassée dans la gamme de température de 250°C à 600°C puis une faible augmentation de la porosité de ces granulats (environ 32%) à 700°C par rapport au granulats calcaires (environ 174%). La présence des granulats de brique concassée dans le béton limite la propagation des microfissures à l'interface pâte-granulats. Ceci est en accord avec les résultats de Rekha et Potharaju [Rekha et Potharaju, 2015] qui montrent par des essais qu'il existe une bonne adhérence entre les granulats de brique concassée et la pâte de ciment, après exposition à des températures élevées, mieux que les granulats naturels.

Au-delà de 400°C, la porosité des bétons à base de sable concassé est supérieure à celles des autres bétons. Ceci est dû à la décarbonatation de la calcite (CaCO_3) qui se transforme en chaux (CaO) suite au départ de CO_2 . La réhydratation du CaO par la présence de l'eau s'accompagne par un gonflement important. Cette augmentation de volume est le responsable de la fissuration supplémentaire et la décohésion des granulats avec la pâte [Xing, 2011].

IV.2.3 Densité

La figure III.3 rassemble l'évolution de la densité obtenue sur tous les bétons étudiés en fonction du traitement thermique.

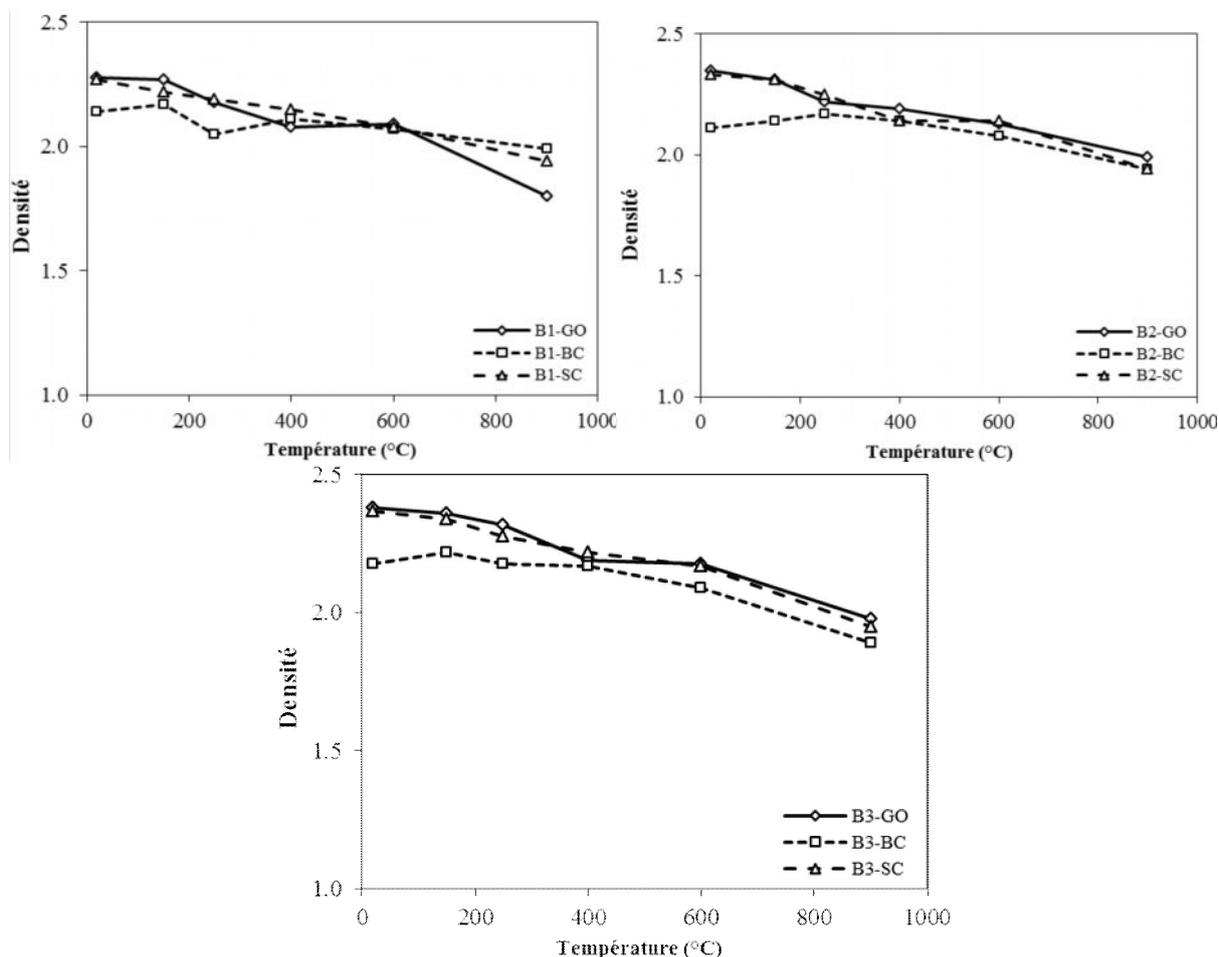


Figure IV.3. Évolution de la densité des différents bétons en fonction de la température.

La figure IV.3 montre que la diminution de la densité des bétons de granulats ordinaires (B1-GO, B2-GO et B3-GO) est similaire à celle des bétons à base de sable calcaire (B1-SC, B2-SC et B3-SC), environ 8% à 600°C et entre 16% et 17% à 900°C. Les bétons contenant des granulats de brique concassée (B1-BC, B2-BC et B3-BC) sont considérés comme les bétons les plus légers par rapport aux autres bétons, ce qui peut être expliqué par la faible densité des granulats de brique concassée par rapport aux autres types de granulats. On peut noter également que la diminution de la densité du béton contenant des granulats de brique concassée est moins importante que celle des deux autres bétons, elle est d'environ 3% à 600°C et 9% à 900°C. Ce qui correspond à une augmentation de la masse volumique des granulats de brique concassée de 16% dans la gamme de température de 100°C jusqu'à 700°C.

IV.2.4 Volume des éprouvettes

L'analyse des différentes courbes de variation de volume présentées sur la figure IV.4 montre que la variation du volume des bétons est influencée par la nature des granulats.

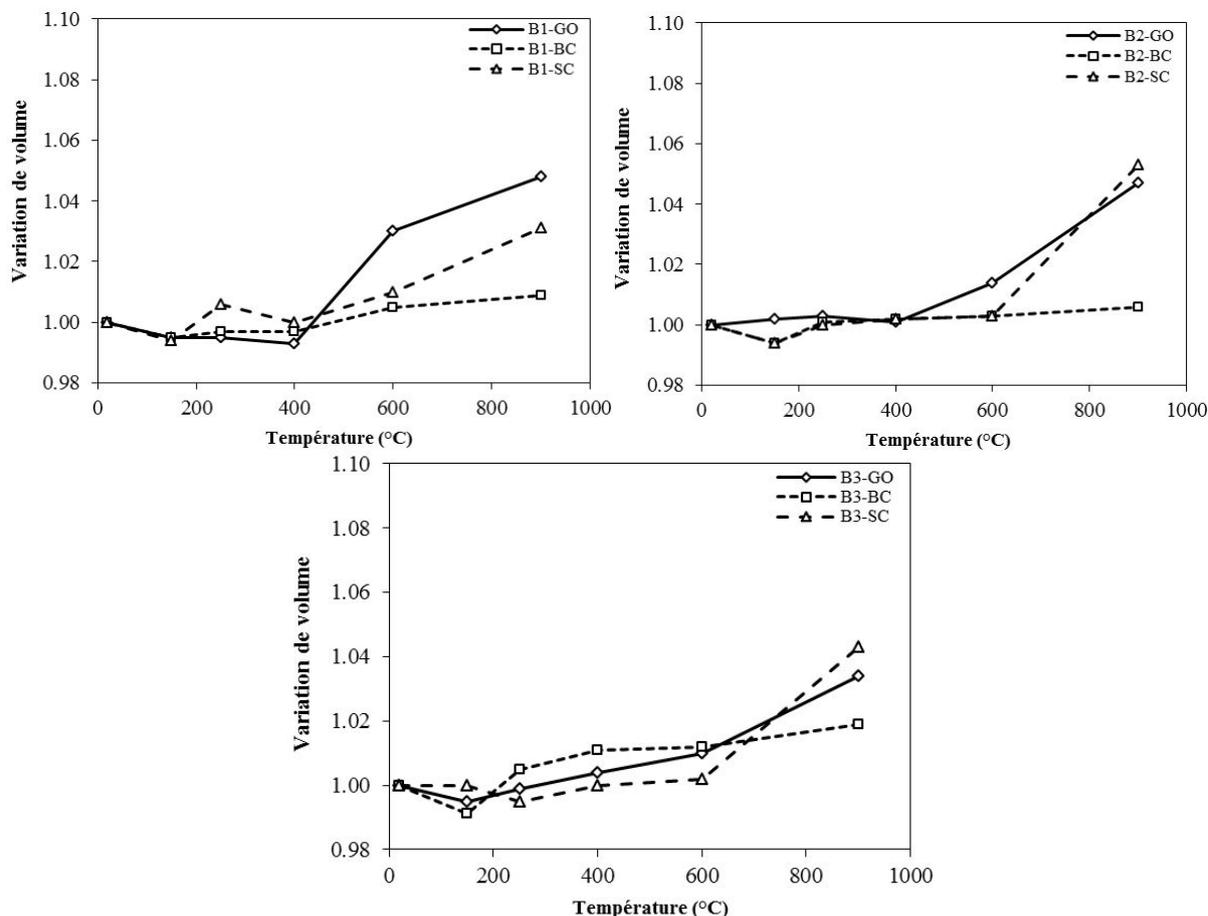


Figure IV.4. Variation du volume des différents bétons.

Dans la gamme de température de 20°C à 250°C, nous observons une légère diminution des volumes apparents, ce qui se traduit par le retrait de la pâte de ciment. Au début du cycle d'échauffement, la pâte de ciment se dilate puis elle se rétracte d'où la phase de retrait commence à une température plus basse de 125°C [Hager, 2004].

Les bétons contenant du sable naturel (siliceux) présentent des variations du volume apparent supérieures à celles des bétons contenant du sable calcaire dans la gamme de température de 400°C à 600°C. Cette variation est liée à la nature du sable siliceux qui subit une augmentation de volume de l'ordre de 1% lors du changement de quartz à 575°C ce qui contribue à la fissuration significative du matériau [Hager, 2004].

Le volume apparent des bétons contenant des granulats de brique concassée varie d'une façon moins importante par rapport aux autres bétons. Cette variation est toujours inférieure à 2%, quelle que soit la température de chauffage. Ce comportement peut être expliqué par la bonne



performance des granulats de brique concassée qui ont un faible coefficient de dilation thermique lorsqu'ils sont soumis aux hautes températures [Kesegic et al., 2008].

IV.2.5 Vitesse des ondes soniques

La vitesse des ondes soniques est un paramètre qui permet d'obtenir une information qualitative sur le matériau et sur la structure. La figure IV.5 présente l'évolution de la vitesse des ondes soniques des bétons testés avec la température. Les mesures ont été répétées 3 fois pour chaque éprouvette ce qui a donné 9 mesures pour chaque point représenté sur la figure.

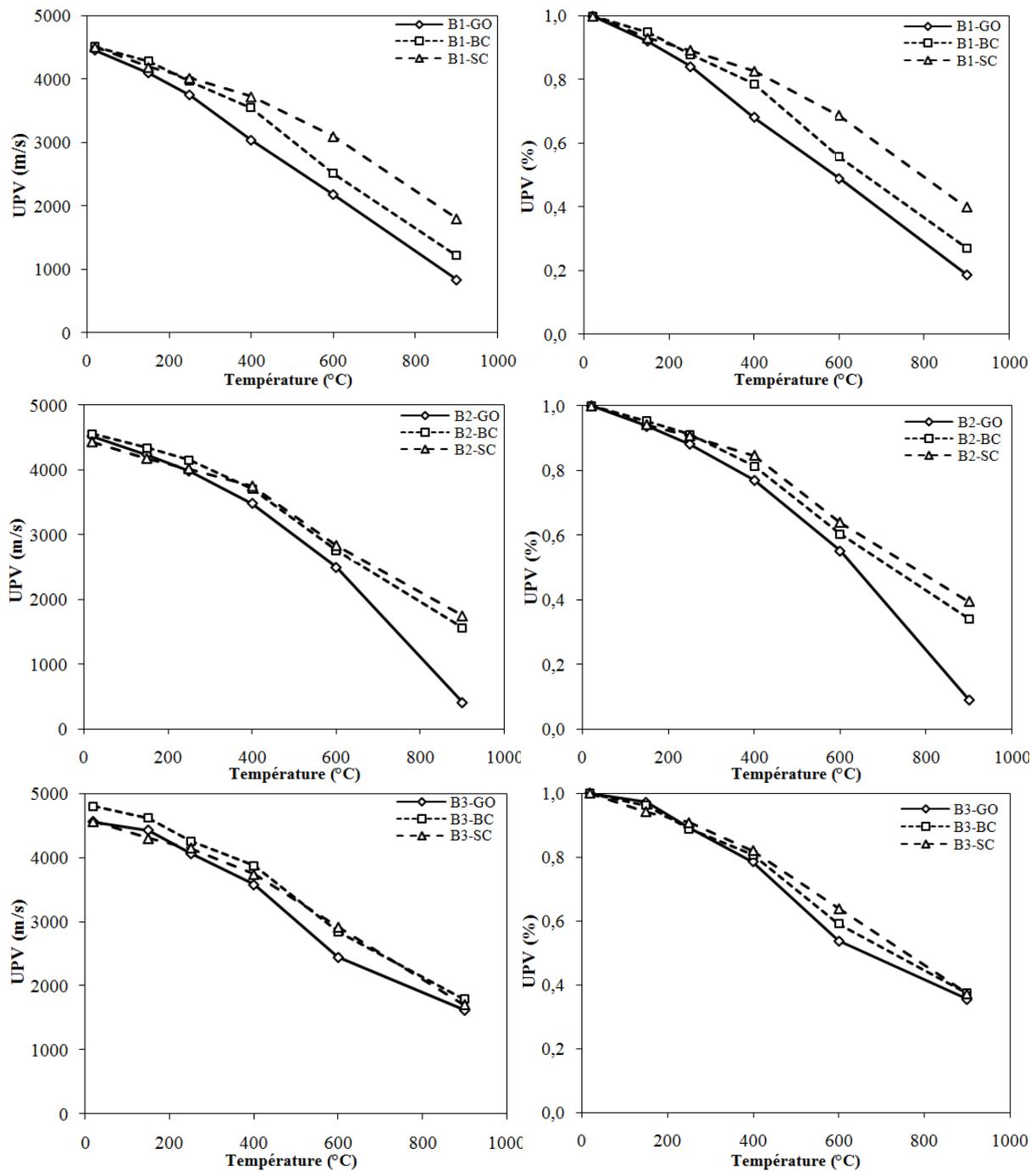


Figure IV.5. Effet de la température sur la vitesse des ondes soniques.



La figure IV.5 montre que la vitesse des ondes soniques des bétons confectionnés avec des granulats ordinaires (granulats calcaires et sable siliceux) est la plus affectée par l'élévation de la température que la vitesse des autres types de bétons. Cependant, les valeurs de la vitesse des ondes des bétons à base de sable concassé diffèrent peu de celles des bétons contenant des briques concassées. Ces derniers possèdent les meilleures valeurs de la vitesse des ondes soniques. La forme angulaire des granulats de brique concassée et sa rugosité de surface offrent une meilleure liaison entre ces granulats et la pâte de ciment [Kesegic et al., 2008].

IV.2.6 Résistance en compression

Outre la composition des bétons, la résistance en compression à 28 jours est la principale caractéristique utilisée pour faire la distinction entre les différents types de bétons. Elle permet de comprendre le processus de dégradation des bétons soumis à hautes températures.

La résistance en compression résiduelle du béton de granulats ordinaires est comparée aux résistances en compression résiduelles du béton à base de sable concassé et du béton contenant 30% de granulats de brique concassée. La figure IV.6 regroupe l'évolution de la résistance en compression résiduelle et relative en fonction de la température de chauffage.

L'évolution de la résistance en compression des différents bétons avec la température présente trois phases bien distinctes. De 20°C à 250°C, les bétons montrent une faible diminution de la résistance en compression. Cette première phase peut s'expliquer par la dilatation thermique de l'eau. Cette dilatation affaiblit les liaisons entre les feuilles des CSH et les écarte. Autour de 400°C, la résistance augmente. Cette phase est attribuée au départ de l'eau permettant une ré-augmentation des forces d'attraction et le rapprochement des feuilles de CSH. Au-delà de 400°C, la résistance de compression décroît plus rapidement. Cette dernière phase est attribuée à l'endommagement du matériau dû à la dégradation de la matrice cimentaire et l'incompatibilité de déformation entre la pâte et les granulats.

Pour les bétons B1-SC et B1-BC, une amélioration de la résistance en compression résiduelle par rapport au B1-GO est notée dans le domaine de température de 20°C jusqu'au 600°C. Dans ce domaine, nous observons une amélioration de la résistance en compression d'environ 30% pour le béton à base de sable calcaire B1-SC et d'environ 29% pour le béton contenant des granulats de brique concassée B1-BC par rapport au béton de granulats ordinaires B1-GO.

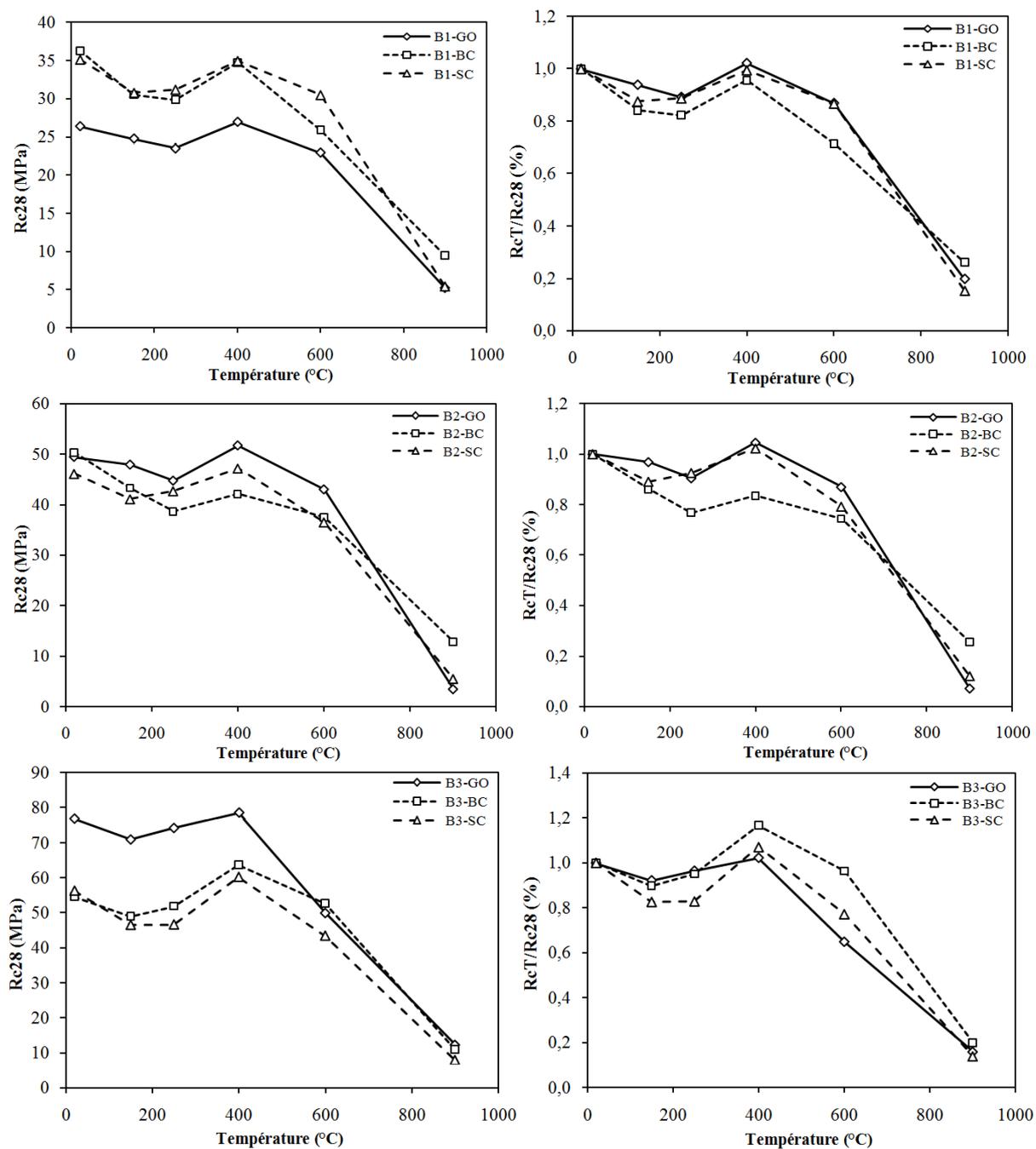


Figure IV.6. Evolution de la résistance en compression avec la température.

L'influence de la présence du sable calcaire et la brique concassée dans le béton porté à haute température dépend du rapport E/C. Ces granulats améliorent la résistance en compression résiduelle des bétons B1 de rapport E/C = 0.6 et diminuent celles des bétons B2 et B3 dont le rapport E/C est de 0.42 et 0.27, respectivement. L'amélioration du comportement en compression des bétons B1-SC et B1-BC semble liée au coefficient d'absorption des granulats utilisés (sable calcaire pour le B1-SC et granulats de brique concassée pour le B1-BC). Ces granulats ont un coefficient d'absorption plus élevé que le sable siliceux et les

granulats calcaires, 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 IV.6, que le béton B3-GO confectionné avec des granulats ordinaires présente une meilleure résistance à température ambiante par rapport aux bétons B3-SC et B3-BC. Après chauffage, on peut noter une meilleure évolution de la résistance résiduelle du béton B3-GO jusqu'à 400°C et une moins bonne évolution pour les bétons B3-SC et B3-BC. Ce qui peut être expliqué par la plus forte densité et la meilleure résistance à l'abrasion des granulats ordinaires qui conduit à un béton plus résistant.

Les granulats de brique concassée possèdent des propriétés mécaniques faibles et sont caractérisés par leur faible densité par rapport aux granulats naturels. L'utilisation de ce type de granulats dans la confection d'un béton de haute performance engendre une perte de compression d'environ 29%. Cette baisse de résistance est due à la fissuration et le cisaillement des granulats de brique concassée lors de l'application de force de compression (l'essai de compression). La figure IV.7 montre l'apparition des fissures dans la matrice cimentaire du béton B3-BC et la fissuration transgranulaire des granulats de brique concassée.



Figure IV.7. Faciès de rupture au sein du béton B3-BC.

A la température ambiante, la présence du sable calcaire modifie peu la résistance en compression du béton B3-SC. La résistance en compression de ce béton est inférieure de 27% environ à celle du béton B3-GO. L'utilisation du sable calcaire pour la préparation d'un béton haute performance n'améliore pas la résistance en compression du béton. La diminution de la résistance résiduelle était plus importante après chauffage à 150°C et 250°C, la baisse de résistance à ces températures est de 34% et 37%, respectivement. Les éprouvettes du béton B3-SC traitées à 250°C présentent un endommagement par fissuration plus important par

rapport aux autres bétons (B3-GO et B3-BC). Les photos de la figure IV.8 présentent l'état des surfaces des trois bétons B3-SC, B3-GO et B3-BC après chauffage à 250°C. La figure IV.8 montre que les fissures sont visibles à l'aide d'un microscope optique et l'ouverture des fissures du B3-SC est plus importante que les autres bétons (B3-GO et B3-BC).

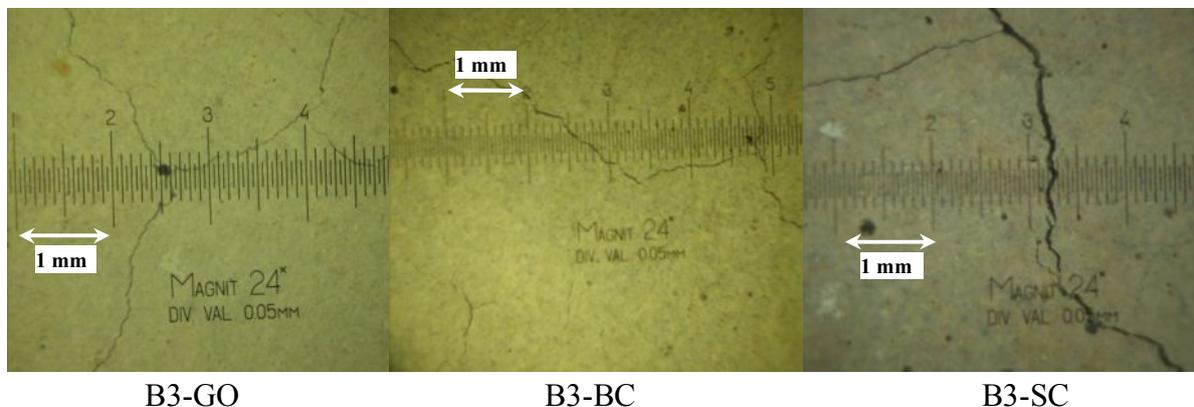


Figure IV.8. Clichés au microscope optique des bétons B3-GO, B3-BC et B3-SC après le chauffage à 250°C.

IV.3 RELATION ENTRE LES PROPRIETES PHYSIQUES ET MECANIQUES DES DIFFERENTS BETONS

Nous allons essayer dans ce paragraphe de chercher un lien entre les résultats des propriétés physiques et mécaniques de différentes formulations des bétons obtenus dans le chapitre III pour pouvoir estimer la relation entre ces paramètres.

IV.3.1 Relation entre la résistance en compression et la perte de masse

Le lien entre la résistance à la compression et la perte de masse est présenté sur la figure IV.9. Nous constatons une légère variation de la résistance à la compression pour une perte de masse inférieure à 5%. Au-delà de cette valeur, l'augmentation de la perte de masse est accompagnée par une diminution significative de la résistance à la compression.

Lorsque le béton est soumis à des températures supérieures à 400°C, l'eau liée chimiquement dans les CSH et $\text{Ca}(\text{OH})_2$ passe à l'état libre et peut s'échapper. La dégradation de la matrice cimentaire par l'évaporation de l'eau liée chimiquement pourrait contribuer à expliquer la diminution de la résistance à la compression.

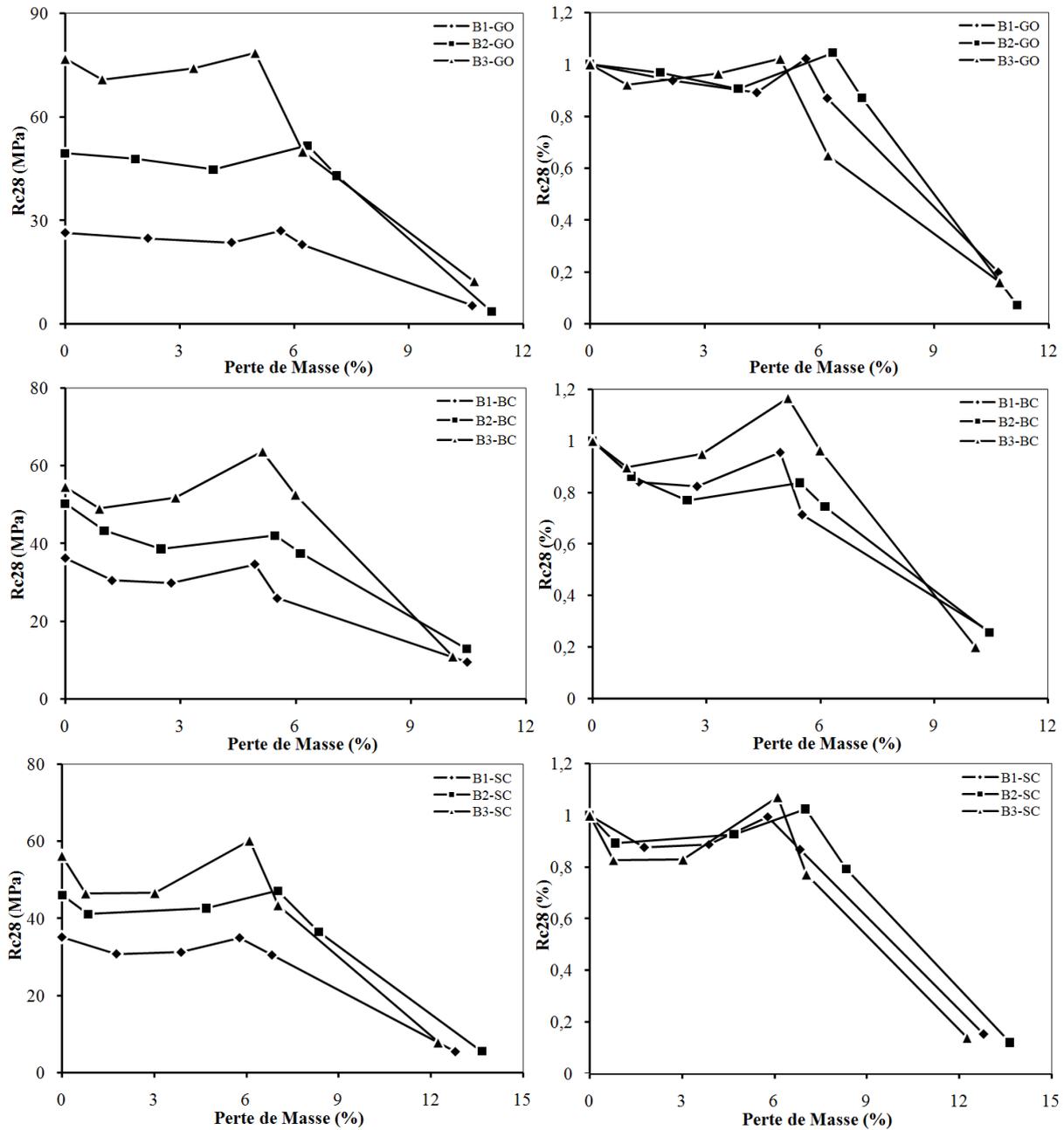


Figure IV.9. Evolution de la résistance en compression en fonction de la perte de masse.

IV.3.2 Relation entre la résistance en compression et la porosité

Sur la figure IV.10, nous avons comparé la variation de la résistance en compression en fonction de la température à celle de la porosité. La figure montre qu'il existe une dépendance entre la porosité et la résistance en compression, ce qui a été confirmé par Hager [Hager, 2004]. La variation de la résistance relative est faible (environ 20%) pour une porosité inférieure à 15%. Au-delà de cette valeur, l'augmentation de la porosité a une influence

significative sur la diminution de la résistance en compression. Plus le béton est poreux, moins il est résistant.

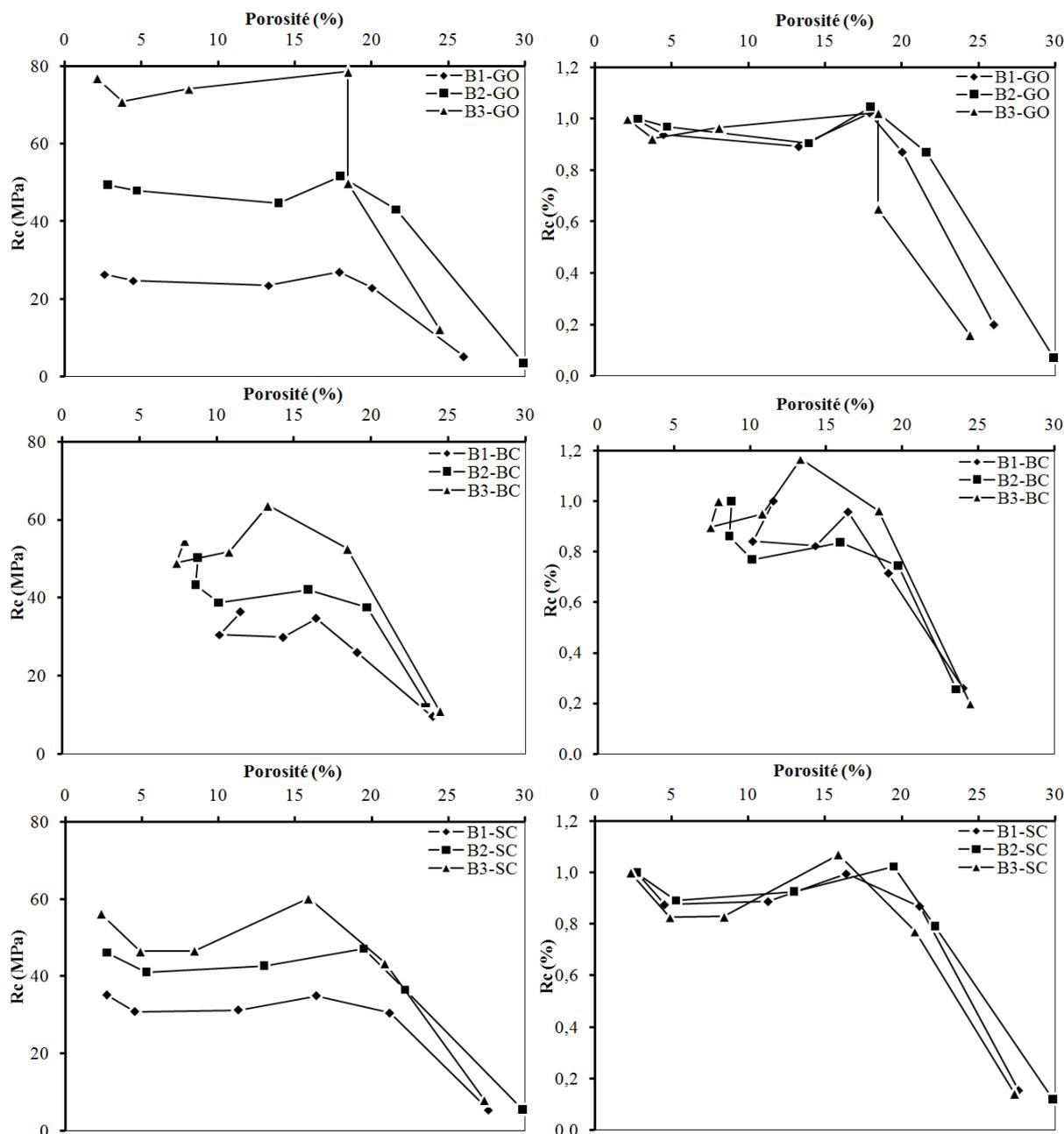


Figure IV.10. Evolution de la résistance en compression en fonction de la porosité.

L'augmentation de la porosité signifie l'apparition des fissures dans la pâte du ciment, pour des températures dépassant 400°C, et la création de nouveaux pores de dimensions de plus en plus grandes. Ce changement dans la microstructure est provoqué par les contraintes thermiques surtout au niveau de la matrice et par la différence entre les dilatations thermiques de la pâte de ciment et des granulats [Elalaoui, 2012].



IV.3.3 Relation entre la résistance en compression et la densité apparente

La relation entre la résistance à la compression et la densité a été également tracée sur la figure IV.11.

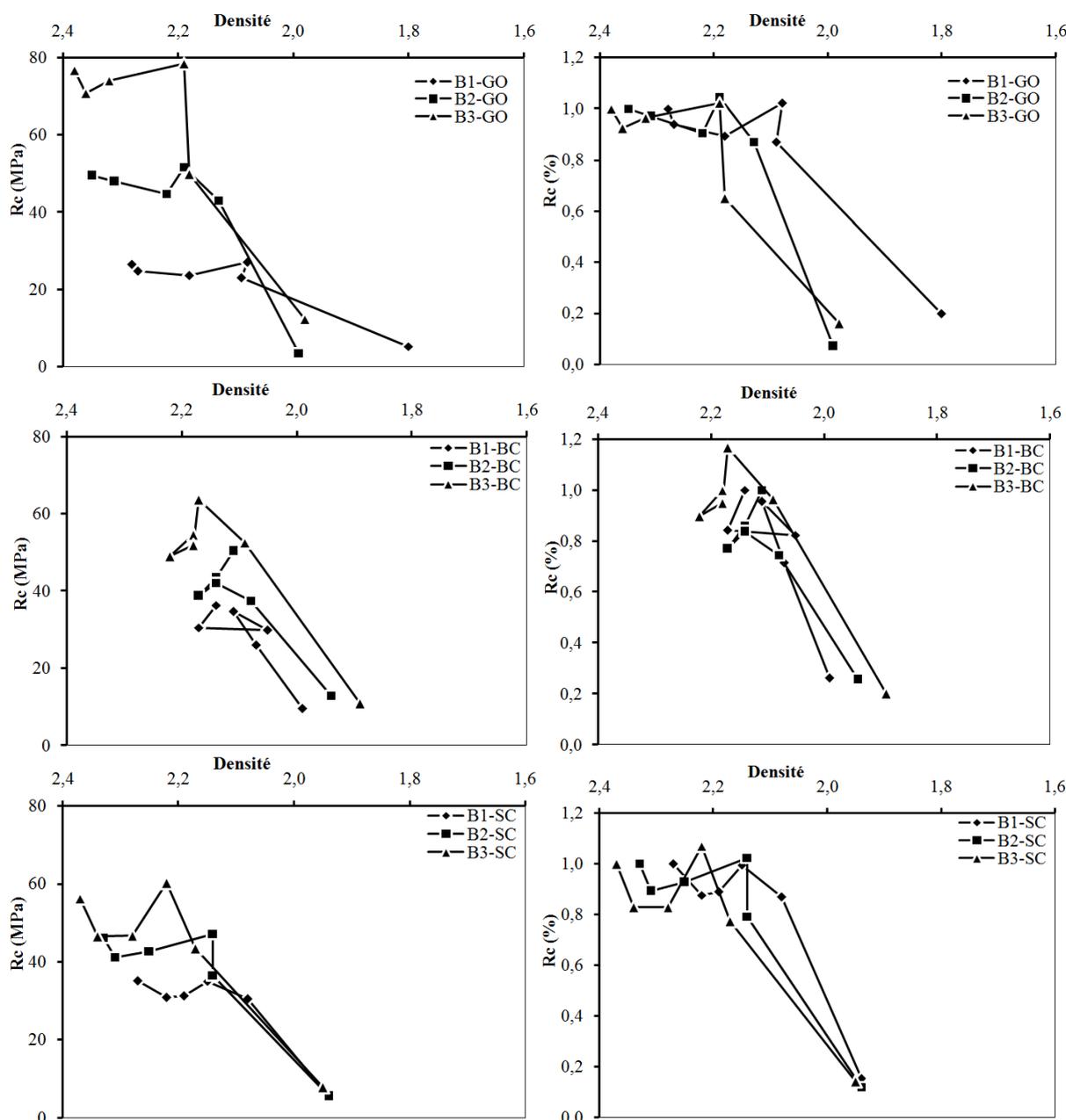
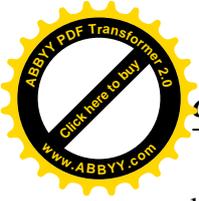


Figure IV.11. Evolution de la résistance en compression en fonction de la densité.

Nous n'observons pas de grandes variations de la résistance en compression pour une densité comprise entre 2,4 et 2,2. La résistance en compression des différents bétons n'est influencée de façon significative par la densité qu'à partir d'un traitement thermique à 400°C. Une chute très importante de la résistance en compression pour tous les bétons est observée lorsque la densité est inférieure à 2,2. Cette diminution est interprétée comme une conséquence de

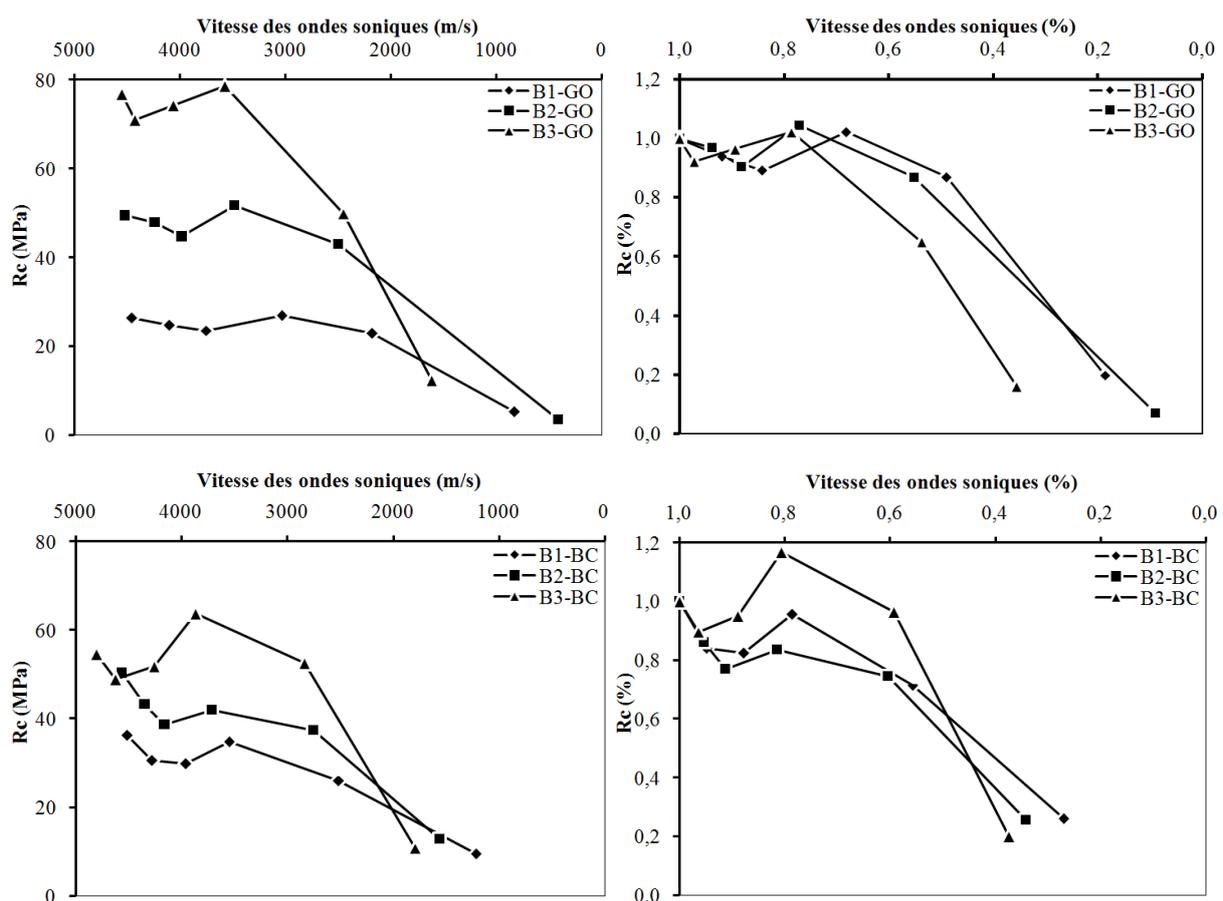


l'évaporation de l'eau liée chimiquement par la décomposition des hydrates (CSH) et de la Portlandite.

IV.3.4 Relation entre la résistance en compression et la vitesse des ondes soniques

La résistance en compression et la vitesse des ondes soniques enregistrées sur les mêmes éprouvettes sont reportées sur la figure IV.12. Elle permet de mettre en évidence la relation entre la résistance en compression et la vitesse des ondes soniques.

On constate que la diminution de la vitesse des ondes soniques de 20% correspond à une variation de la résistance en compression inférieure à 20% pour des températures inférieures à 400°C. Ceci semble indiquer que la diminution de la vitesse des ondes soniques est due à un élargissement des pores. Au-delà de 400°C, la diminution progressive de la vitesse des ondes soniques entraîne une diminution rapide de la résistance en compression. Ceci se justifie par l'apparition des fissures visibles sur les éprouvettes des bétons.



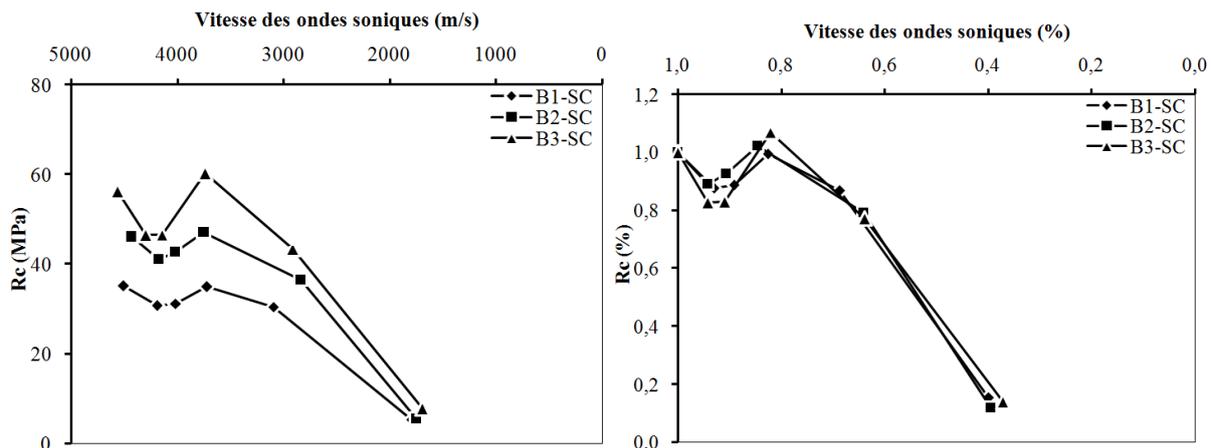
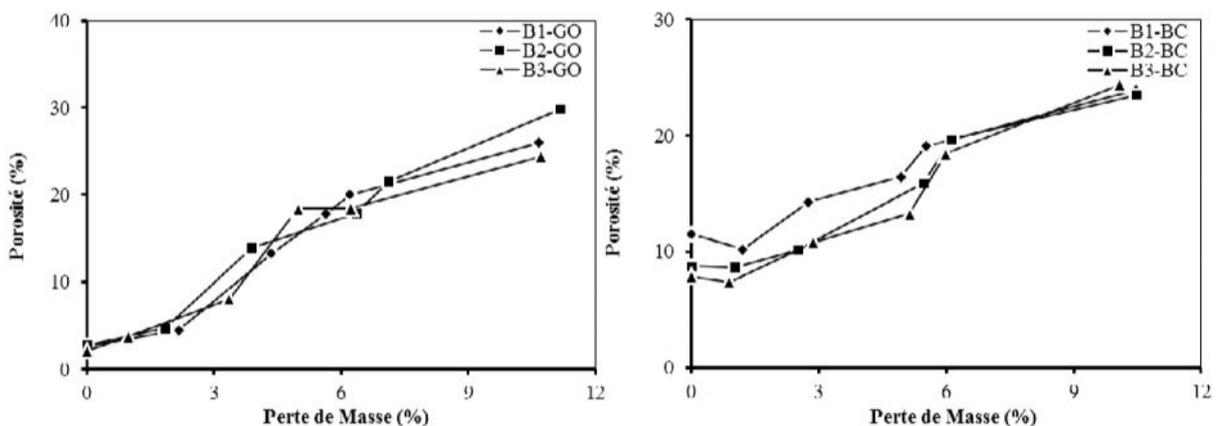


Figure IV.12. Evolution de la résistance en compression en fonction de la vitesse des ondes soniques.

IV.3.5 Relation entre la porosité et la perte de masse

La figure IV.13 présente la relation entre la porosité et la perte de masse des bétons chauffés et refroidis. L'évolution de la porosité en fonction de la perte de masse montre une bonne corrélation entre ces deux paramètres. L'augmentation de la porosité s'accompagne d'une grande perte de masse des bétons. Cette perte de masse correspond au départ de l'eau libre et l'eau liée chimiquement. La déshydratation du gel de CSH semble laisser beaucoup de vides capillaires dans la pâte de ciment et provoque l'apparition des microfissures ce qui détermine l'évolution de la porosité.



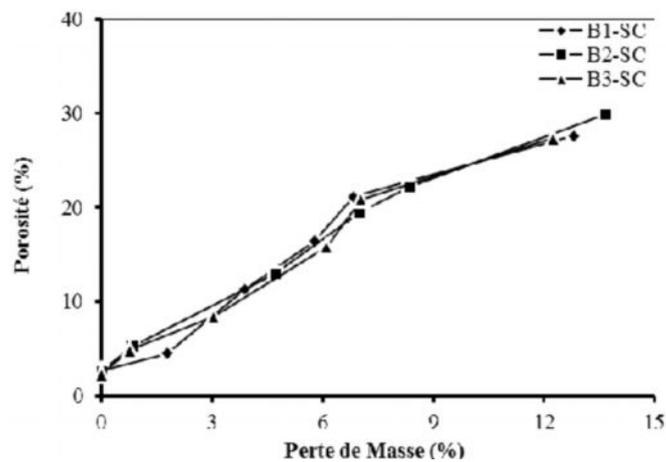
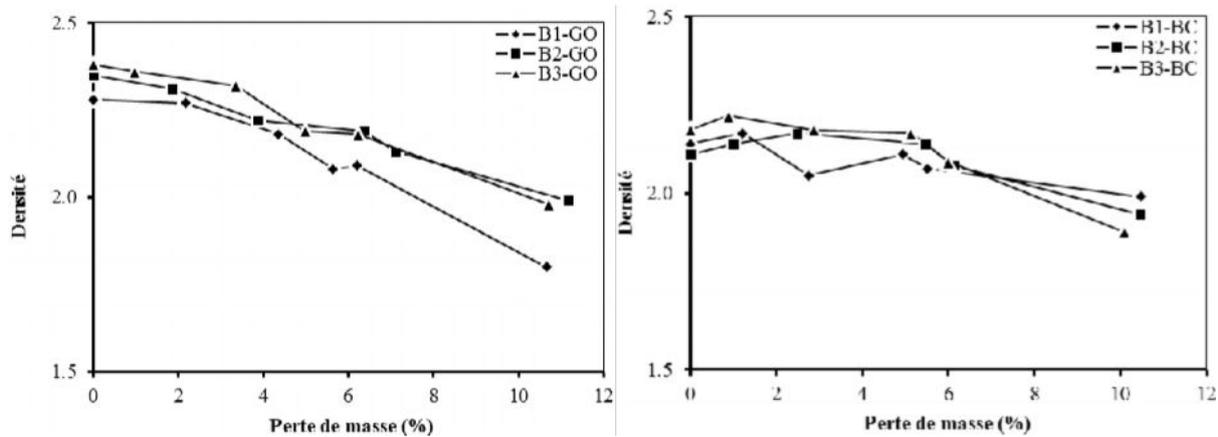


Figure IV.13. Evolution de la porosité en fonction de la perte de masse.

IV.3.6 Relation entre la densité et la perte de masse

Nous avons essayé aussi de vérifier s'il existe une relation entre la perte de masse et la densité des bétons chauffés (figure IV.14). La densité du béton diminue en général durant l'augmentation de la température. Cette propriété varie d'une manière presque inverse à perte de masse [Elalaoui, 2012]. Le tracé de la densité en fonction de la perte de masse montre qu'une augmentation de la perte de masse conduit à une diminution de la densité du béton.



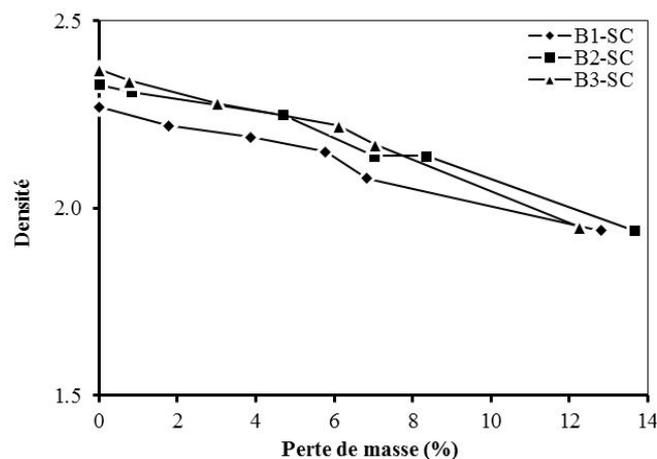
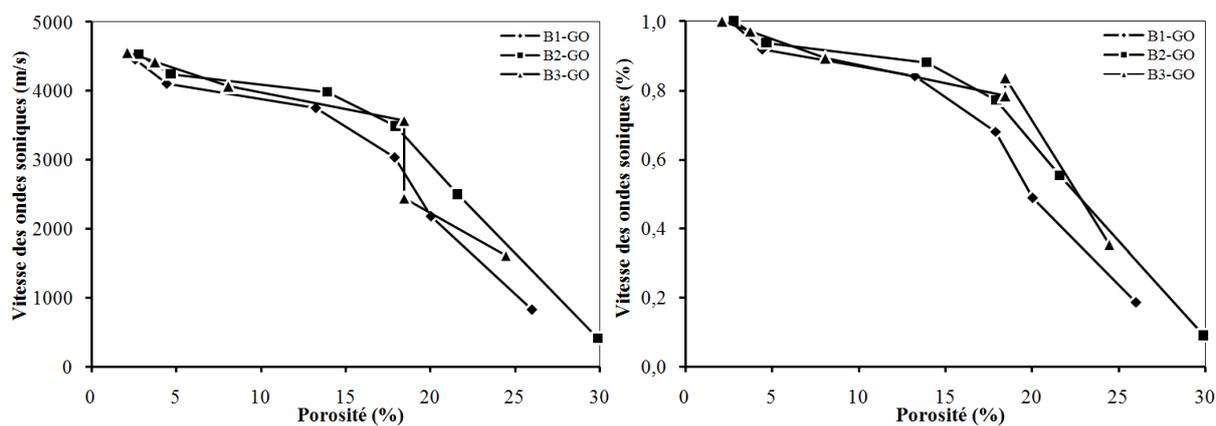


Figure IV.14. Evolution de la densité en fonction de la perte de masse.

IV.3.7 Relation entre la vitesse des ondes soniques et la porosité

L'évolution de la vitesse des ondes soniques en fonction de la porosité est présentée sur la figure IV.15. Nous pouvons observer que la vitesse des ondes soniques des différents bétons diminue de façon continue avec l'augmentation de la porosité.

La porosité du béton augmente avec l'augmentation de la température, ceci est la conséquence de l'endommagement de la microstructure du béton par propagation de fissures et la décohésion entre la pâte de ciment et les granulats. Ces facteurs traduisent la diminution de la vitesse des ondes soniques.



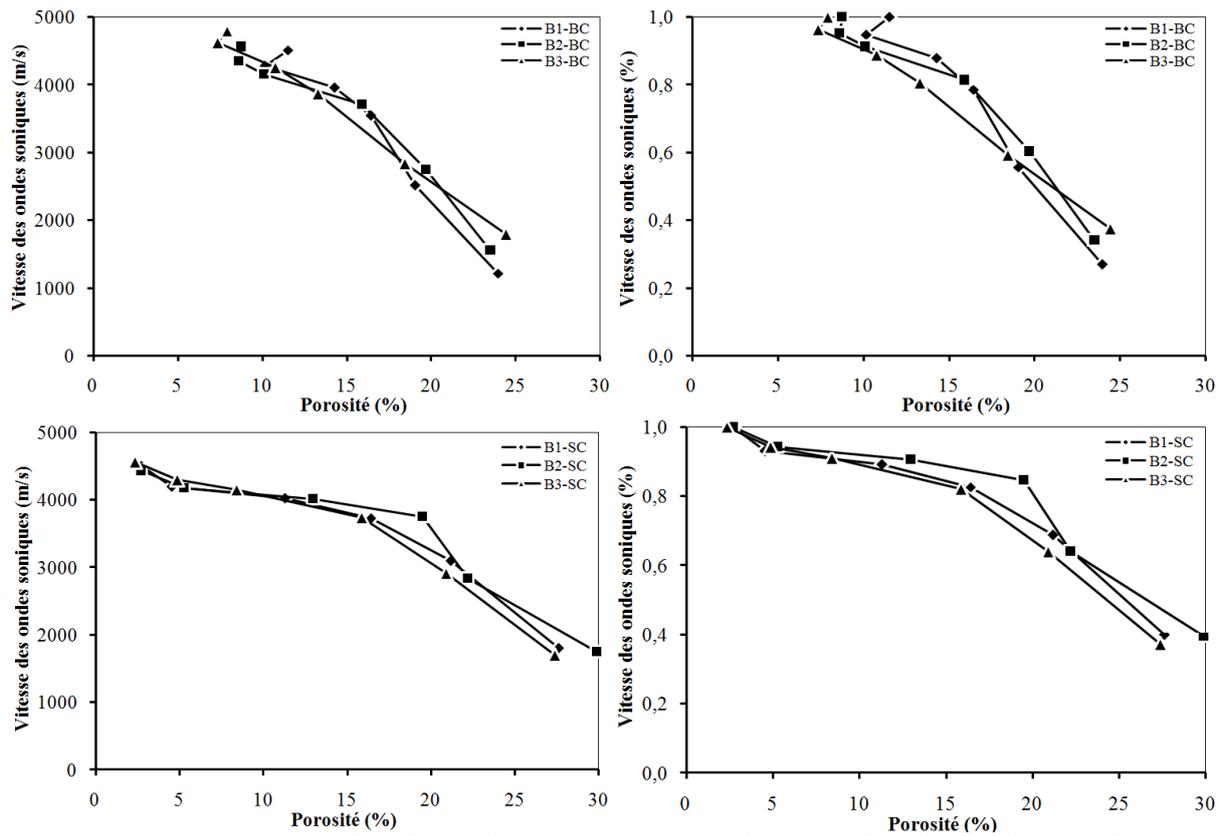


Figure IV.15. Evolution de la vitesse des ondes soniques en fonction de la porosité.

IV.4 CONCLUSION

La première partie de ce chapitre présente une analyse comparée des propriétés physiques et mécaniques de 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 900°C.

Les résultats de pesée des éprouvettes avant et après le chauffage à différentes températures montrent une diminution de la masse des différents bétons avec l'augmentation de la température. La perte de masse des bétons de granulats ordinaires est inférieure à celle du béton à base de sable concassé mais supérieure à celle du béton contenant des granulats de brique concassée.

La porosité à l'eau des bétons augmente avec l'augmentation de la température. De 20°C à 150°C, les bétons contenant des granulats de brique concassée présentent une porosité plus forte que celles des autres bétons. Ceci peut être expliqué par la porosité plus importante des granulats de brique concassée. Au-delà de 400°C, la porosité des bétons à base de sable concassé augmente plus rapidement que les autres bétons.



L'évolution de la porosité est liée à celle de la densité apparente. Les bétons de granulats de brique concassée ont présenté des densités apparentes et variation de volume apparent les plus faibles que les autres bétons à température ambiante et après exposition aux différentes températures.

L'augmentation de la température dégrade les propriétés mécaniques des bétons. Le suivi de la résistance résiduelle en compression montre une perte progressive en fonction de la température. L'influence de sable concassé et des granulats de brique concassée sur la résistance résiduelle en compression du béton dépend du rapport E/C. L'utilisation du sable concassé ou des granulats de brique concassée dans le béton de rapport E/C = 0.6 entraîne une amélioration de la résistance en compression par rapport aux bétons de granulats ordinaires. Cependant, la présence de ces granulats dans le béton de rapport E/C inférieur à 0.6 entraîne une diminution de la résistance résiduelle en compression par rapport aux bétons de granulats ordinaires.

La deuxième partie de ce chapitre a pour but de chercher le lien entre les propriétés physiques et mécaniques des différents bétons, présentées au chapitre III. Elle permet de mettre en évidence la relation expérimentale entre ces propriétés.

Nous avons constaté que la résistance à la compression est fortement influencée par l'augmentation de la perte de masse et de la porosité. Elle est influencée aussi par la diminution de la densité et de la vitesse des ondes soniques. Ces constatations sont remarquées suite à une exposition des bétons à des températures supérieures à 400°C.

Une relation proportionnelle est constatée entre la porosité et la perte de masse.

L'augmentation de la perte de masse provoque une augmentation de la porosité. Nous avons vu aussi que la densité du béton est influencée par l'augmentation de la perte de masse. Une relation inversement proportionnelle est montrée entre la vitesse des ondes soniques et la porosité. La vitesse des ondes soniques diminue significativement avec l'augmentation de la porosité.



CONCLUSIONS



CONCLUSION GENERALE

Le premier objectif de la présente étude était d'apporter, de façon expérimentale, une contribution aux nombreuses recherches entreprises pour une meilleure compréhension du comportement des bétons ordinaires et à hautes performances portés à une température élevée. Le deuxième but de ce travail était d'analyser l'influence des granulats sur le comportement des bétons soumis à haute température.

L'étude bibliographique a permis d'avoir une vision sur les principaux phénomènes physiques et chimiques intervenant dans le béton lors d'exposition à haute température. La dégradation des propriétés physiques et mécaniques du béton est étroitement associée à la déshydratation de la pâte de ciment et les transformations cristallines et la décarbonatation des granulats ce qui justifie les objectifs de cette étude.

L'analyse du comportement des granulats à haute température a été réalisée sur quatre granulats : granulats calcaires, sable siliceux, sables calcaires et granulats de brique concassée. Ces granulats ont été soumis à plusieurs cycles de chauffage-refroidissement de la température ambiante 20°C jusqu'à 900°C. Les résultats obtenus nous ont montré que les granulats calcaires restent intacts jusqu'à 600°C. Au-delà de 700°C, ces granulats commencent à présenter des désordres. Ils se décomposent et se fissurent et leur surface a blanchi. Les granulats de brique concassée ne montrent aucun endommagement visible à l'œil nu ou changement de couleur, tandis que le sable siliceux montre un rougissement léger et progressif à partir de 400°C.

La perte de masse des granulats calcaires est deux fois plus importante que celle du sable siliceux après chauffage à 900°C. Par contre, après traitement thermique à cette température, le sable calcaire présente une perte de masse deux fois plus faible que celle du sable siliceux. Le comportement des granulats portés à haute température ne dépend pas seulement de la porosité des granulats ou de la quantité d'eau présente dans leur structure, mais aussi il dépend de la taille de leur grain.

Les granulats de brique concassée présentent une porosité et un coefficient d'absorption les plus grands mais des évolutions moins importantes en fonction de la température. Par contre, les granulats calcaires présentent une porosité et un coefficient d'absorption les moins faibles mais des évolutions plus importantes pour des températures supérieures à 250°C. Le traitement thermique des granulats engendre une faible diminution de la masse volumique des



Conclusion

granulats calcaires. La masse volumique des granulats de brique concassée augmente après le chauffage à 100°C.

Ces évolutions des propriétés physiques (perte de masse, porosité et masse volumique) des différents granulats avec la température de chauffage influencent fortement le comportement des bétons confectionnés avec ces granulats lorsqu'ils sont soumis à hautes températures.

Trois formulations de béton à base des différents granulats étudiés précédemment ont été fabriquées afin de couvrir la gamme des bétons ordinaires à celle des bétons à hautes performances. Ces bétons ont été confectionnés en gardant le squelette granulaire constant et en faisant varier simultanément la quantité d'eau et de ciment. Les propriétés physiques telles que la perte de masse, la porosité, la densité et la variation de volume ainsi que d'autres propriétés telles que la résistance en compression et la vitesse des ondes soniques ont été étudiées. Ces propriétés ont été établies à l'état de référence à 20°C et comparées avec celles déterminées après le chauffage aux températures de 150°C, 250°C, 400°C, 600°C et 900°C. Une comparaison a été, par la suite, établie entre les bétons de différents granulats.

Parallèlement à ces essais macrostructuraux, d'autres essais d'observation à différentes échelles ont été menés. Des observations mésoscopiques et d'autres observations microscopiques avec un Microscope Electronique à Balayage ont été également effectuées.

Cette étude montre qu'il y a non seulement influence de la compacité de la matrice cimentaire sur l'évolution des propriétés physiques et mécaniques du béton avec la température, mais que le type de granulats joue également un rôle important.

Le suivi de la perte de masse a permis de distinguer trois zones de départ d'eau du béton. Entre 20°C et 400°C, nous observons une augmentation de la perte de masse des bétons 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, une faible perte de masse est enregistrée correspondant à la décomposition de la protlandite. 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.

Nous avons observé que la perte de masse est plus importante pour le béton ordinaire que pour le béton à haute performance. De plus, la mesure de la perte de masse des bétons contenant des granulats de brique concassée est plus faible que les autres bétons.

Les résultats de mesure de porosité confirment que la porosité du béton augmente avec la température. Cette augmentation est liée à la détérioration de la matrice cimentaire et à



l'apparition de microfissuration. La porosité des bétons contenant des granulats de brique concassée est plus forte que celle des autres bétons à température ambiante et après chauffage à 150°C. Cependant, au-delà de 250°C, ces bétons présentent la porosité la plus faible par rapport aux autres bétons, ce qui confirme que les bétons de granulats naturels et les bétons à base de sable concassé sont les bétons les plus endommagés que les bétons contenant des granulats de brique concassée.

Concernant la densité apparente, nous avons constaté que l'augmentation de la température provoque la diminution de la densité apparente du béton.

L'augmentation de la température entraîne aussi une variation du volume apparent des éprouvettes. Une légère variation du volume pour les températures inférieures à 400°C est remarquée. Néanmoins, une augmentation du volume apparent est observée au-delà de 400°C qui peut être attribuée à la dilatation des granulats et la fissuration de la pâte de ciment.

La valeur de la vitesse des ondes soniques diminue de manière contenue avec l'élévation de la température pour tous les bétons. Cette diminution ne dépend pas fortement du type de granulats utilisés, mais paraît plus influencée par la porosité et la fissuration de la pâte de ciment.

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 250°C, les bétons perdent 3% à 23% de leur résistance initiale. Dans le deuxième domaine, entre 250°C et 400°C, la résistance en compression ré-augmente partiellement. Le troisième domaine est caractérisé par une forte baisse de la résistance en compression. Nous avons constaté que la diminution de cette résistance dans le troisième domaine est plus importante pour les bétons de rapport E/C faible.

L'influence de type de granulats sur l'évolution de la résistance en compression en fonction de la température dépend essentiellement du rapport E/C du béton. Pour les bétons de rapport E/C élevé, la résistance en compression des bétons à base de sable calcaire et des bétons contenant des granulats de brique concassée est meilleure que celle des bétons de granulats ordinaires. Le sable calcaire et les granulats de brique concassée en raison de leur coefficient d'absorption d'eau élevé explique ce gain de résistance. Cependant, pour un rapport E/C plus faible, la résistance des bétons contenant ces granulats est plus faible par rapport aux bétons de granulats ordinaires. Les résultats de la résistance en compression obtenus montrent que



l'utilisation du sable calcaire ou des granulats de brique concassée dans le béton à haute performance diminue la résistance en compression de ce dernier.

A l'issue de chaque cycle de chauffage-refroidissement, des observations sont faites à différentes échelles pour permettre l'évaluation de l'état de dégradation des différents bétons. Deux catégories de fissurations se distinguent, des microfissures visibles à l'œil nu qui apparaissent à partir de 400°C et des microfissures qui apparaissent à des températures de chauffage inférieures à 400°C et qui ne sont visibles qu'à l'aide d'un microscope optique ou le MEB.

Pour les bétons de granulats ordinaires, les fissures sont très nombreuses, longues et ouvertes. Cependant, les fissures des bétons contenant des granulats de brique concassée sont les moins nombreuses et les moins ouvertes. Ces fissures sont majoritairement situées dans la pâte de ciment, ceci est dû à la déshydratation du CSH. Avec l'augmentation de la température, ces fissures se développent et se rejoignent formant un réseau connecté et facilite la rupture du matériau.



Références

- [Abrams, 1971] Abrams M.S., Compressive strength of concrete at temperatures to 1600°F, American Concrete Institute (ACI) SP 25, Temperature and Concrete, Detroit, Michigan, 1971.
- [AFREM, 1997] AFREM, Durabilité des bétons – Méthodes recommandées pour la mesure des grandeurs associées à la durabilité des bétons INSA-LMDC, Toulouse, 11-12 décembre 1997.
- [Alarcon-Ruiz et al., 2002] Alarcon-Ruiz L., Galle C., Massieu E., Analyse de l'évolution de la porosité des pâtes de ciment à haute température, Matériaux 2002.
- [ALONSO et al., 2003-a] Alonso C., Andrade C., Castellote M., Khoury G.A., Microstructure – Solid Phases, Course on Effect of Heat on Concrete, International Centre for Mechanical Sciences (CISM), Udine, Italy, 9-13 June 2003.
- [Alonso et al., 2003-b] 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.
- [Andrade et al., 2003] Andrade C., Alonso C., Khoury G.A., Microstructure & Moisture, Course on Effect of Heat on Concrete, International Centre for Mechanical Sciences (CISM), Udine, Italy, 9-13 June 2003.
- [Arioz, 2007] Arioz O., Effects of elevated temperatures on properties of concrete, Fire Safety Journal, Vol. 42, pp. 516–522, 2007.
- [Bazant et Kaplan, 1996] Bazant Z.P., Kaplan M.F., Concrete at High temperatures, Material properties and mathematical models, Concrete Design & Construction Series, Longman Group Limited, 1996.
- [Behnood et Ziari, 2008] Behnood A., Ziari H., Effects of silica fume addition and water to cement ratio on the properties of high-strength concrete after exposure to high temperatures, Cement & Concrete Composites, Vol. 30, pp. 106–112, 2008.
- [Castellote et al., 2004] Castellote M., Alonso C., Andrade C., Turillas X., Campo J., Composition and microstructural changes of cement pastes upon heating, as studied by neutron diffraction, Cement and Concrete Research, Vol 34(9), pp. 1633-1644, 2004.
- [Chan et al., 1996] 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 et Liu, 2004] Chen B., Liu J., Residual strength of hybrid-fiber-reinforced high-strength concrete after exposure to high temperatures, Cement and Concrete Research, Vol. 34, pp. 1065–1069, 2004.
- [Cheng et al., 2004] Cheng F-P., Kodur V.K.R., Wang T-C, Stress-strain curves for high strength concrete at elevated temperatures, Journal of Materials in Civil Engineering, Vol. 16, No. 1, pp. 84-94, 2004.
- [Choinska, 2006] Choinska M., Effets de la température, du chargement mécanique et de leurs interactions sur la perméabilité du béton de structure, Thèse de DOCTORAT, L'École Centrale de Nantes et l'Université de Nantes, 2006.
- [De Sa, 2007] De Sa C., Etude hydro-mécanique et thermo-mécanique du béton - Influence des gradients et des incompatibilités de déformation, Thèse de Doctorat de l'Ecole Normale Supérieure de CACHAN, 2007.
- [Denoël, 2007] Denoël I.J.-F., Sécurité incendie et constructions en béton, FEBELCEM Fédération de l'industrie cimentière belge, Rue Volta 8, 1050 Bruxelles, 2007.
- [Dias, 1990] Dias W.P.S., Khoury G.A., Sullivan P.J.E., Mechanical properties of hardened cement paste exposed to temperature up to 700°C, ACI, Material journal, Vol. 87, pp. 160-166, 1990.



- [Divet et al., 2005] Divet L., Arnaud S., Derobert X., Fasseu P., Faure R.-M., Larive C., Naquin B., Olivier G., Présentation des techniques de diagnostic de l'état d'un béton soumis à un incendie - Méthodes d'essai n° 62, techniques et méthodes des laboratoires des ponts et chaussées, 2005.
- [Dreux et Festa, 1998] Dreux G., Festa J., Nouveau guide de béton et de ses constituants, Huitième édition, Eyrolles, 1998.
- [Elalaoui, 2012] Elalaoui O., Optimisation de la formulation et de la tenue aux hautes températures d'un béton à base d'époxyde, Thèse de Doctorat, Université de Cergy-Pontoise, France et l'Université de Tunis El Manar, 2012.
- [Faerber, 2004] Faerber J., Microscopie électronique à balayage : Microanalyse X par sonde électronique, Institut de Physique et Chimie des Matériaux de Strasbourg IPCMS, 2004.
- [Fares, 2009] Fares H., Propriétés mécaniques et physico-chimiques de bétons auto-plaçants exposés à une température élevée, Thèse de Doctorat, Université de Cergy-Pontoise, 2009.
- [Fares et al., 2009] Fares H., Noumowe A., Remond S., Self-consolidating concrete subjected to high temperature – Mechanical and physicochemical properties, Cement and Concrete Research, Vol. 39, pp. 1230–1238, 2009.
- [Felicetti et Gambarova, 1999] Felicetti R., Gambarova P.G., On the Residual Tensile Properties of High-Performance Siliceous Concrete Exposed to High Temperature, Proc. Int. Workshop on Mechanics of Quasi-Brittle Materials and Structures, Prague, Czech Rep., pp. 167-186, 1999.
- [Felicetti et Gambarova, 2008] Felicetti R., Gambarova P. G., Expertise and assessment of materials and structures after fire, fib bulletin 46: fire design of concrete structures-structural behaviour and assessment, pp. 63-114, 2008.
- [Fiche de qualité, 2013] Fiche technique: Caractéristiques physico-mécaniques et composition chimiques, Société des ciments de Ain Touta, 2013.
- [Gallé et al., 2003] Gallé C., Pin M., Ranc G., Rodrigues S., Effect of the heating rate on residual thermo-hydro-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.
- [Goldstein, 1992] Goldstein J., Newbury D. E., Echlin P., Lyman C. E., Joy D. C., Lifshin E., Sawyer L. C., Michael J. R., Scanning Electron Microscopy and X-ray Microanalysis, Springer Verlag, 1992 (ISBN 978-0306472923).
- [Hachana, 2008] Hachana A., Etude des bétons à base des agrégats de démolition, Mémoire de magistère, Université de Biskra, 2008.
- [Hager, 2004] Hager G. I., Comportement à haute température des bétons à haute performance – Evolution des principales propriétés mécaniques, Thèse de Doctorat, l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées et l'Ecole Polytechnique de Cracovie, 2004.
- [Hager et al., 2012] Hager I., Carré H., Krzemień K., Damage assessment of concrete subjected to high temperature by means of the ultrasonic pulse velocity – UPV method, Studies and Researches, V. 32, Graduate School in Concrete Structures – Fratelli Pesenti, Politecnico di Milano, Italy, 2012.
- [Hager et Pimienta, 2004] Hager I., Pimienta P., Etude de la déformation thermique transitoire des bétons à haute performance (BHP), XXII^{èmes} Rencontres Universitaires de Génie Civil, Ville & Génie Civil, 2004.
- [Hanche, 2011] Hanche 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.



- [Hettema, 1996] Hettema M.H.H., The thermo-mechanical behaviour of sedimentary rock: an experimental study, Thèse de Doctorat, Université de Delft, 1996.
- [Ingham, 2009] Ingham J. P., Application of petrographic examination techniques to the assessment of fire-damaged concrete and masonry structures, *Materials Characterization*, Vol. 60, pp. 700–709, 2009.
- [Kanema, 2007] 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 et al., 2005] 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^{èmes} Rencontres Universitaires de Génie Civil – Risque & Environnement, 2005.
- [Kalifa et Tsimbrovska, 1998] Kalifa P., Tsimbrovska M., Comportement des BHP à hautes températures, État de la question et résultats expérimentaux. *Cahier de CSTB*, N° 3078, 1998.
- [Kesegic et al., 2008] Kesegic I., Netinger I., Bjegović D., Recycled clay brick as an aggregate for concrete: overview, *Technical Gazette*, Vol. 15(3), pp. 35-40, 2008.
- [Khoury, 1992] Khoury G. A., Compressive strength of concrete at high temperatures: a reassessment, *Magazine of Concrete Research*, Vol. 44, pp. 291-309, 1992.
- [Khoury et Majorana, 2003] Khoury G., Majorana C., Thermo-Hydral behaviour, Course on Effect of Heat on Concrete, International Centre for Mechanical Sciences (CISM), Udine, Italy, 9-13 June 2003.
- [Kodur et Sultan, 2003] Kodur V. K. R., Sultan M. A., Effect of Temperature on Thermal Properties of High-Strength Concrete, *Journal of Materials in Civil Engineering ASCE*, Vol. 15, No. 2, pp. 101–107, 2003.
- [Lawson et al., 2000] Lawson R. J., Phan T. L., Davis F., Mechanical properties of high performance concrete after exposure to elevated temperatures, National Institute of Standards and Technology NISTIR 6475, 2000.
- [Lie et Kodur, 1995] Lie T.T., Kodur V.K.R., Thermal Properties of Fibre-Reinforced Concrete at Elevated Temperatures, Conseil national de recherches Canada, Internal Report No. 683, 1995.
- [Mahdy et al., 2002] Mahdy M., Speare P. R. S., Abdel-Reheem A. H., Effect of transient high temperature on heavyweight, high strength concrete, 15th ASCE Engineering Mechanics Conference, Columbia University, New York, June 2-5, 2002.
- [Malier, 1992] Malier Y., Les Bétons à hautes performances: caractérisation, durabilité, applications : compte-rendu des travaux scientifiques du Projet national Voies nouvelles du matériau béton, Presses de l'Ecole nationale des ponts et chaussées, 1992.
- [Mehta et Monteiro, 2006] Mehta K. P., Monteiro J. M. P., *Concrete: Microstructure, Properties, and Materials*, Third edition, The McGraw-Hill Companies, United States of America, 2006.
- [Mindeguia, 2009] 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.
- [Nechnech, 2000] Nechnech W., Contribution à l'étude numérique du comportement du béton et des structures en béton armé soumises à des sollicitations thermiques et mécaniques couplés : Une approche thermo-élasto-plastique endommageable, Thèse de Doctorat, l'Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, 2000.
- [NF EN 12390-5] Norme Européenne Norme Française NF EN 12390-5, Essai pour béton durci Partie 5 : Résistance à la flexion sur éprouvettes, ISSN 0335-3931, l'Association



- Française de Normalisation (AFNOR) - 11, avenue Francis de Pressensé - 93571 Saint-Denis La Plaine Cedex, 2001.
- [NF P 18-418] Normalisation française P 18-418, Béton, Auscultation sonore – mesure du temps de propagation d’ondes soniques dans le béton, Association Française de Normalisation (AFNOR), tour Europe cedex 7 92049, Paris, 1989.
- [NF P 18-554] 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.
- [NF P 18-560] Normalisation française P 18-560, Analyse granulométrique par tamisage, Association Française de Normalisation (AFNOR), tour Europe cedex 7 92049, Paris, 1990.
- [Noumowe, 1995] 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.
- [Noumowe et al., 1996] 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/High-Performance Concrete, Paris France, 1996.
- [Noumowé et al., 2003] Noumowé A., Ranc G., Hochet C., Moisture Migration and Thermo-mechanical 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.
- [Noumowe et al., 2009] Noumowe A. N., Siddique R., Debicki G., Permeability of high-performance concrete subjected to elevated temperature (600°C), Construction and Building Materials, Vol. 23, pp. 1855–1861, 2009.
- [Nyry et al., 2012] Niry R., Beaucour A-L, Hebert R., Noumowe A., Ledesert B., Xing Z., Bodet R., Influence de la composition chimique et minéralogique des granulats sur leurs comportement à température élevée, Colloque « Performances du béton soumis à haute température », 2012.
- [Nyry et al., 2013] Niry R., Beaucour A-L, Hebert R., Noumowe A., Ledesert B., Bodet R., Thermal stability of different siliceous and calcareous aggregates subjected to high temperature, MATEC Web of Conferences 6, 07001, 2013.
- [Nyry et al., 2014] 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, 32^{èmes} Rencontres de l’AUGC, Polytech Orléans, 4-6 juin 2014.
- [Phan et CARINO, 2003] 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.
- [Pimienta et Hager, 2002] Pimienta P., Hager I., Mechanical behaviour of HPC at high temperature, 6th International Symposium on High Strength / High Performance Concrete, Leipzig, Germany, 2002.
- [Pliya, 2010] Piya P., Contribution des fibres polypropylène et métalliques à l’amélioration du comportement du béton soumis à une température élevée, Thèse de Doctorat, Université de Cergy-Pontoise, France, 2010.
- [Poon et al., 2001] Poon C.-S., Azhar S., Anson M., Wong Y.-L., Comparison of the strength and durability performance of normal- and high-strength pozzolanic concretes at elevated temperatures, Cement and Concrete Research, Vol. 31, pp. 1291–1300, 2001.



- [Rekha et Potharaju, 2015] Rekha K., Potharaju M., Residual compressive strength of recycled brick aggregate concrete at High Temperature, *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, Vol. 5 (1), pp. 159-164, 2015.
- [RILEM, 2004] RILEM TC 129-MHT. Test methods for mechanical properties of concrete at high temperatures : Modulus of elasticity for service and accident conditions. *Materials and Structures*, Vol. 37, pp 139-144, 2004.
- [Sarshar et Houry, 1993] Sarshar R., Houry G.A., Material and environmental factors influencing the compressive strength of unsealed cement paste and concrete at high temperatures., *Magazine of Concrete Research*, Vol. 45, No. 162, pp. 51-61, 1993.
- [Schrefler et al., 2003] Schrefler B.A., Gawin D., Houry G.A., Majorana C.E., Physical, Mathematical & numerical modelling, Course on Effect of Heat on Concrete, International Centre for Mechanical Sciences (CISM), Udine, Italy, 9-13 June 2003.
- [Sevón, 2005] Sevón T., Molten Core – Concrete Interactions in Nuclear Accidents: Theory and Design of an Experimental Facility, Thèse de Master, Université de la technologie Helsinki, FINLAND, 2005.
- [Sliwinski et Ehrenfeld, 1998] Sliwinski J., Ehrenfeld W., Déformation thermiques des pâtes et des mortiers avec ajout de fumée de silice à haute température, *Concrete and Concrete Structures*, University of Zilina, Slovaquie, pp. 83–88, 1998.
- [Stark et Wicht, 2001] Stark J., Wicht B., Dauerhaftigkeit von Beton Der Baustoff als Werkstoff. *Bau Praxis*, Weimar, 2001.
- [Touidjine, 2011] Touidjine K., Le béton sous haute température - Avis d'expert, <http://www.batiactu.com/edito/le-beton-sous-haute-temperature--28201.php>, 2011.
- [Tsimbrovska, 1998] 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.
- [Wetzig, 2001] Wetzig V., Destruction mechanisms in concrete material in case of fire, and protection systems, 4th Int. Conf. on Safety in Road & Rail Tunnels (SIRRT), Madrid, Spain, 2-6 April 2001, pp. 281-290.
- [Whitehurst, 1966] Whitehurst E.A., Evaluation of concrete properties from sonic Tests, ACI Monograph No. 2, ACT, Detroit (Michigan, USA), 1966.
- [Willam et al., 2009] Willam K., Xi Y., Lee K., Kim B., Thermal response of reinforced concrete structures in nuclear power plants, University of Colorado at Boulder, SESM No. 02, 2009.
- [Xiao et König, 2004] Xiao J., König G., Study on concrete at high temperature in China – an overview, *Fire Safety Journal*, Vol. 39, pp. 89–103, 2004.
- [Xing, 2011] Xing Z., Influence de la nature minéralogique des granulats sur leur comportement et celui du béton à haute température, Thèse de Doctorat, Université de Cergy-Pontoise, 2011.
- [Xing et al., 2011] Xing Z., Beaucour A.-L., Hebert R., Noumowe A., Ledesert B., Influence of the nature of aggregates on the behaviour of concrete subjected to elevated temperature, *Cement and Concrete Research*, Vol. 41, pp. 392–402, 2011.
- [Xing et al., 2013] Xing Z., Hébert R., Beaucour A.-L., Ledésert B., Noumowe A., Influence of chemical and mineralogical composition of concrete aggregates on their behaviour at elevated temperature, *Materials and Structures*, DOI 10.1617/s11527-013-0161-y, RILEM, 2013.
- [Zong et al., 2014] Zong L., Fei Z., Zhang S., Permeability of recycled aggregate concrete containing fly ash and clay brick waste, *Journal of Cleaner Production*, Vol. 70, pp. 175-182, 2014.