



Année : 2017

Faculté des sciences de l'ingénierat  
Département de Génie Civil

## THÈSE

Présentée en vue de l'obtention du diplôme de DOCTORAT

---

**Contribution à l'étude du comportement à haute température des  
bétons à hautes performances**  
**« Effet des additions minérales et fibres de polypropylène »**

---

Option

Matériaux innovants et durabilité

Par

**SAADI IMENE**

DEVANT LE JURY

Président	REDJEL Bachir	Pr	Université Badji Mokhtar - ANNABA
Rapporteur	BENMARCE Abdelaziz	Pr	Université 8 Mai 1945- GUELMA
Examineur	ARABI Nouredine	Pr	Université Badji Mokhtar - ANNABA
Examineur	ACHOURA Djamel	Pr	Université Badji Mokhtar - ANNABA
Examineur	BENOUIS Halim	Pr	Université 8 Mai 1945- GUELMA

***A La mémoire de mon Père***

## REMERCIEMENTS

Tout d'abord, je tiens à exprimer ma gratitude et mes vifs remerciements à Monsieur le professeur **Abdelaziz Benmarce** pour avoir proposé et dirigé ce travail et pour sa totale disponibilité. Ses remarques pertinentes, ses conseils instructifs et avisés à la hauteur de ses compétences et de ses réelles qualités humaines.

Je tiens à exprimer toute ma gratitude aux membres du jury. Tout d'abord, à Pr. **Bachir REDJEL** pour avoir accepté de présider mon jury de soutenance, mes remerciements s'adressent également à Pr. **Djamel ACHOURA**, Pr. **Nourredine ARABI** et Pr. **Halim BENOUIS** pour avoir acceptés de rapporter cette thèse.

Je voudrais remercier Pr. **Mourad BEHIM** pour les nombreuses qualités qui le caractérisent, ses compétences scientifiques, ses valeurs humaines et sa disponibilité.

Ce travail a été réalisé au Laboratoire Matériaux, Géo-Matériaux et Environnement (LMGE) de l'université d'Annaba sous la direction du Pr. Djamel ACHOURA et au Laboratoire Matériaux et Durabilité des Constructions (LMDC) UPS/INSA de Toulouse sous la direction du Pr. Gilles ESCADEILLAS, dans le cadre de l'accord programme Algéro- Français de partenariat HUBERT CURIEN TASSILI (Code : 12 MDU874), soutenu financièrement par EGIDE. L'accord programme est codirigé par Pr. Mourad BEHIM pour la partie Algérienne et Dr. Michel MOURET pour la partie Française. Merci à pour l'accueil, l'aide et la contribution des différents intervenants.

Je remercie également Dr. **Michel MOURET** et Dr. **Franck CASSAGNABERE** au laboratoire (LMDC) de l'INSA de Toulouse qui nous ont aidés à la réalisation d'une des parties expérimentales.

Je remercie également Monsieur **Redjem BELOUTTAR** Professeur au département de Génie Civil. Je souhaite remercier aussi, Pr. **Mohammed GUENFOUD** le directeur du laboratoire de Génie Civil et Hydraulique (LGCH) de l'université de Guelma pour leur aide.

Je tiens à exprimer toute ma gratitude à ma **mère** pour son encouragement et soutien indéfectible. Et je dédie ce travail à toute ma famille, qui m'ont toujours soutenu et encouragé dans mes différents choix d'études et personnels. Un grand merci à mon mari **Billel**, mes **beaux parents**, ma grande mère **Biya**, mon oncle **Nacer**, mes frères **Sabri**, **Souhaib** et mon petit **Yakoub**, mes sœurs **Asma**, **Sara**, **Manel**, **Chaina**, **Maroi**, et **Meryouma**, mes belles soeurs.

Je remercie tous mes collègues doctorants que j'ai côtoyés au département Génie Civil d'Annaba, au département de Génie Civil et d'Hydraulique de l'université de Guelma et au LMDC Toulouse, pendant ces années de thèse. Un grand merci à mes amis : **Yasmina Biskri**, **Fatma Zohra Melais**, **Asma Selami**, **Houria Meftah**, **Meriem Boutarfa**, **Ghania Mirouzi**, **Amina Houda**, **Taher Ali boucetta**, **Oussama Kebail**, **Adel Keikia**, **Walid Laifa**, **Walid Khlifi**, **Kawthar**, **Mohamed benzerara** et **Mehdi Benzaid**.

Je souhaite remercier aussi, le personnel technique de: département du GC, LGC et LMGE de l'université d'Annaba Messieurs **Khair-Eddine KHOUALDI**, **Kamel AKROUM** pour leur aide.

# Résumé

À température ambiante, les bétons à hautes performances présentent des caractéristiques mécaniques intrinsèques très satisfaisantes. Cependant, plusieurs questions restent encore posées notamment en ce qui concerne leur comportement lorsqu'ils sont soumis à des conditions extrêmes de hautes températures tels que les incendies. L'objectif de ce travail de recherche est d'étudier et mieux comprendre le comportement à haute température des bétons à haute performance à base de deux types d'additions minérales. La première partie de ce travail porte sur l'effet de la substitution de la fumée de silice par le laitier granulé Algérien et l'effet de l'évolution de la température sur les comportements physiques et mécaniques du béton à haute performance, par évaluation de la perte de masse résiduelle, la porosité, la résistance résiduelle en compression et en traction et enfin étudier le phénomène d'écaillage. Les bétons sont soumis à des différents cycles de chauffage- refroidissement jusqu'à une température maximale de 100°C, 300°C, 500°C, 700°C aux différents âges de 7, 28 et 90 jours. La deuxième partie met en évidence des analyses complémentaires de MEB, DRX et ATG. Ces analyses permettent de confirmer et mieux éclaircir les phénomènes physico-chimiques qui influent sur le comportement des bétons à haute performance sous l'effet de l'élévation de la température. Les résultats obtenus de cette étude indiquent que la résistance résiduelle est diminuée avec la montée en température pour tous les bétons d'étude, à l'exception dans la gamme de températures 300°C, une légère amélioration de résistance est remarquée. L'ajout des fibres de polypropylène n'améliore pas le comportement résiduel des bétons d'étude. Mais l'addition de ces fibres est généralement une solution efficace permettant de réduire la sensibilité à l'écaillage des bétons à haute performance.

**Mots-clés:** Béton à haute performance- fillers- haute température- fibre polypropylène- laitier granulé- fumée de silice.

# Abstract

At normal temperature, the high performance concretes have very satisfactory inherent mechanical properties. However, several questions still posed particular their behavior when subjected to extreme conditions of high temperature such as fires. The objective of this research is to study and better understand the high temperature behaviour of high performance concrete (HPC) based on two types of mineral additions. The first part of this work focuses on the effect of the substitution of silica fume by the Algerian ground granulated blast furnace slag (GGBFS) and the effect of temperature evolution on the physical and mechanical behaviour of HPC, by evaluation of residual mass loss, porosity, residual compressive and tensile strength and finally the peeling phenomenon. The concretes are subjected to different heating-cooling cycles up to a maximum temperature of 100 ° C, 300 ° C, 500 ° C, 700 ° C at different ages of 7, 28 and 90 days. The second part highlights complementary analyzes of SEM, XRD and TGA. These analyzes make it possible to confirm and better explain the physical and chemical phenomena that influence the behavior of HPC under the effect of the elevation in temperature. The results obtained from this study indicate that the residual resistance is reduced with the elevation in temperature for all HPC, except in the temperature range 300 ° C, a slight improvement of resistance is noticed. The addition of polypropylene fibers does not improve the residual behaviour of the study concretes. But the addition of these fibers is generally an effective solution to reduce the chipping sensitivity of high performance concretes.

**Key words:** high performance Concrete - fillers - high temperature- polypropylene fiber granulated slag- silica fume

## ملخص

في درجة الحرارة العادية، الخرسانة عالية الجودة لها خصائص ميكانيكية جوهرية مرضية للغاية. ومع ذلك لا تزال هناك عدة أسئلة، لا سيما فيما يتعلق بسلوكها عندما تتعرض لظروف قاسية من ارتفاع درجة الحرارة مثل تعرضها للحرائق. الهدف من هذا البحث هو دراسة وفهم أفضل لسلوك الخرسانة عالية الجودة المبنية على نوعين من الإضافات المعدنية تحت تأثير درجات حرارة عالية. يتناول الجزء الأول من هذا العمل تأثير استبدال دخان السيليكا بالخبث المحبب الجزائري وتأثير ارتفاع درجة الحرارة على السلوك الفيزيائي والميكانيكي لخرسانة عالية الجودة لتقييم فقدان الكتلة المتبقية، المسامية، مقاومة الضغط المتبقية و مقاومة قوة الشد، وأخيرا ظاهرة التشقق. خضعت الخرسانة إلى دورات تبريد و تدفئة مختلفة تصل إلى درجة حرارة قصوى من 100 درجة مئوية، 300 درجة مئوية، 500 درجة مئوية، 700 درجة مئوية في مختلف الأعمار من 7 و 28 و 90 يوما. ويبرز الجزء الثاني تحليلات تكميلية للخصائص المجهرية MEB, DXR, GTA. هذه التحليلات تجعل من الممكن تأكيد وتوضيح أفضل للظواهر الفيزيائية التي تؤثر على سلوك خرسانة عالية الجودة تحت تأثير ارتفاع درجة الحرارة. أظهرت النتائج التي تم الحصول عليها من هذه الدراسة أن المقاومة المتبقية تتناقص مع ارتفاع درجة الحرارة لجميع الخرسانات المدروسة، إلا في درجة حرارة 300 درجة مئوية، لوحظ تحسن طفيف في المقاومة. إضافة ألياف البولي بروبيلين لا يحسن السلوك المتبقي للخرسانة المدروسة. ولكن إضافة هذه الألياف هو عموما حل فعال للحد من حساسية التشقق في الخرسانة عالية الجودة.

**الكلمات المفتاحية:** الخرسانة عالية المقاومة - الدقائق - الحرارة العالية - ألياف البولي بروبيلين - الخبث الحبيبي - غبار السيليكا.

## SOMMAIRE

<i>Remerciements</i>	2
<i>Résumé</i>	4
<i>Abstract</i>	5
<i>ملخص</i>	6
<i>Sommaire</i>	7
<i>Liste des figures</i>	11
<i>Liste des tableaux</i>	16
<b>INTRODUCTION GENERALE</b>	18
<b>Chapitre I : Etude bibliographique</b>	
<b>I.1. INTRODUCTION</b>	21
<b>I.2. MICROSTRUCTURE DU BETON DURCI</b>	21
I.2.1. Microstructure du ciment.....	21
I.2.2. L'eau dans la pâte du ciment durcie.....	25
I.2.3. Granulats.....	27
I.2.4. L'interface pâte-granulats.....	29
I.2.5. Structure poreuse du béton.....	31
<b>I.3. LES BETONS EN SITUATION ACCIDENTELLE – HAUTES TEMPERATURES</b>	32
<b>I.4. EFFETS DE LA TEMPERATURE SUR LA STRUCTURE ET LES PROPRIETES THERMIQUES ET PHYSIQUES DU BETON</b>	34
I.4.1. Evolution des composants et de la structure du béton .....	34
I.4.1.1. Evolution de la pâte de ciment.....	34
I.4.1.2. Evolution des granulats.....	35
I.4.1.3. Evolution de l'interface pâte granulats .....	37
I.4.2. Evolution des propriétés physiques du béton au cours de l'échauffement.....	37
I.4.2.1. Densité apparente .....	37
I.4.2.2. Perméabilité .....	38
I.4.2.3. Perte de masse .....	40
I.4.2.4. Evolution de la porosité .....	41
<b>I.5. EFFET DE LA TEMPERATURE SUR LE COMPORTEMENT</b>	42

**MECANIQUE DES BETONS**

I.5.1. Résistance en compression à hautes températures.....	42
I.5.2. Résistance en traction à hautes températures.....	43
I.5.3. Module d'élasticité à hautes températures.....	46

**I.6. COMPORTEMENT AU FEU DU BETON A HAUTE PERFORMANCE :****ECLATEMENT DU BETON**

I.6.1. Phénomène d'éclatement et d'écaillage du béton .....	48
I.6.2. Mécanisme du phénomène .....	50
I.6.3. Moyens de prévention de l'éclatement .....	51
I.6.3.1. fibres polypropylène.....	51
I.6.3.2. Protection thermique .....	54

**I.7. CONCLUSION**

55

**Chapitre II : Caractérisation des matériaux et formulation des bétons  
à haute performance**

**II.1. INTRODUCTION**

57

**II.2. CARACTERISATION DES MATERIAUX UTILISE**

57

II.2.1. Le ciment .....	57
II.2.2. Additions minérales.....	58
II.2.2.1. Fillers de laitiers granulé.....	58
II.2.3.2. Fumée de silice.....	59
II.2.3. Granulats .....	61
II.2.4. Fibres de polypropylène .....	64
II.2.5. Superplastifiant.....	66
II.2.6. Eau de gâchage.....	66

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

66

**II.4. CONFECTION ET CONSERVATION DES EPROUVETTES**

68

**II.5. CYCLE DE TRAITEMENT THERMIQUE DES BETONS**

69

**II.6. PROCEDURES DE LA DETERMINATION DES PROPRIETES DU  
BETON A L'ETAT FRAIS**

71

II.6.1. Maniabilité.....	71
II.6.2. Masse volumique.....	72
II.6.3. Air occlus.....	72



<b>II.7. RESULTATS ET INTERPRETATION DES PROPRIETES DU BETON</b>	
<b>A L'ETAT FRAIS</b>	73
II.7.1. La maniabilité.....	73
II.7.2. Masse volumique.....	74
II.7.3. Air occlus .....	75
<b>II.8. CONCLUSION</b>	76
<b>Chapitre III : Comportement physique et mécanique des bétons à haute performance sous l'effet de la température</b>	
<b>III.1. INTRODUCTION</b>	78
<b>III.2. PROTOCOLE EXPERIMENTAL</b>	78
III.2.1. Propriétés physique .....	78
III.2.1.1. Perte de masse résiduelle.....	78
III.2.1.2. Porosité accessible à l'eau .....	79
III.2.2. Propriétés mécanique.....	80
III.2.2.1. Résistance résiduelle en compression .....	80
III.2.2.2. Résistance résiduelle à la traction par flexion .....	81
II.2.3. Module de déformation dynamique (Essai non destructif).....	82
II.2.2.4. Essai de mesure de l'ouverture de fissure (la lunette micrométrique)....	84
<b>III.3. RESULTATS ET DISCUSSION</b>	85
III.3.1. Propriétés physique .....	85
III.3.1.1. la perte de masse résiduelle .....	85
III.3.1.2. Porosité accessible à l'eau .....	89
III.3.2. Propriétés mécanique.....	92
III.3.2.1. Résistance résiduelle en compression .....	92
III.3.2.2. Résistance résiduelle de la traction par flexion.....	97
III.3.2.3. Module de déformation dynamique résiduelle (Essai non destructif).....	101
III.3.3. Phénomène d'écaillage ou fissuration.....	106
<b>III.4. CONCLUSION</b>	108

**Chapitre IV : Microstructure des bétons à haute performance**

<b>IV.1. INTRODUCTION</b>	111
<b>IV.2. PROTOCOLE EXPERIMENTAL</b>	111
IV.2.1. Observation au microscope électronique à balayage.....	111
IV.2.2. Analyse par Diffraction des Rayons X (DRX).....	112
IV.2.3. Analyse Thermogravimétrique (ATG).....	113
<b>IV.3. RESULTATS ET INTERPRETATION</b>	116
IV.3.1. Observation au microscope électronique à balayage.....	116
IV.3.2. Analyse par Diffraction des Rayons X (DRX).....	119
IV.3.3. Analyse Thermogravimétrique (ATG).....	123
<b>IV.4. CONCLUSION</b>	125
<b>CONCLUSION GENERALE</b>	127
<b>REFERENCE BIBLIOGRAPHIQUE</b>	133
<b>ANNEXE</b>	143

## LISTE DES FIGURES

<i>Figure I.1. Vue au Microscope électronique à balayage d'une pâte de ciment.....</i>	22
<i>Figure I.2. La diversité des formes du gel CSH. ....</i>	24
<i>Figure I.3. Modèle des particules de CSH avec les particules d'eau présentes sous forme libre ou absorbée.....</i>	24
<i>Figure I.4. Etat de l'eau dans les CSH.....</i>	26
<i>Figure I.5. Modèle de la morphologie de l'auréole de transition d'un BO. ....</i>	29
<i>Figure I.6. Microstructure de la zone de contact entre la pâte et le granulat .....</i>	30
<i>Figure I.7. Evolution de la zone de transition dans un BHP pendant l'hydratation .....</i>	30
<i>Figure I.8. Illustrations de dégradation d'ouvrages en béton à la suite d'une sollicitation thermique.....</i>	32
<i>Figure I.9. Courbes d'échauffement de la température des gaz dans le volume considéré.....</i>	33
<i>Figure I.10. Analyse ATD de 4 granulats généralement utilisés pour la confection des bétons .....</i>	36
<i>Figure I.11. Etudes de la stabilité thermique et des transformations physico-chimiques de quelques granulats en fonction de la température .....</i>	36
<i>Figure I.12. Effet de la température sur la masse volumique de bétons confectionnés avec des granulats de type a– argile expansé (granulats léger), b– silico- calcaire, c– quartzite et d– basalte.....</i>	38
<i>Figure I.13. Perméabilité intrinsèque résiduelle en fonction du traitement thermique.....</i>	39
<i>Figure I.14. Perméabilité apparente au gaz en fonction de la température de conditionnement .....</i>	39
<i>Figure I.15. Perte de masse des bétons de différents types de granulats en fonction de la température.....</i>	40
<i>Figure I.16. Évolution de la porosité totale d'un béton ordinaire et d'un béton à haute performance .....</i>	41

<i>Figure I.17. Evolution de la résistance en compression relative des bétons avec la température.</i> .....	43
<i>Figure I.18. Résultats des essais de résistance en traction relative comparés à ceux de la DTU et EUROCODE 2.</i> .....	44
<i>Figure I.19. Evolution de la résistance à la traction à chaud d'un béton à hautes performances</i> .....	45
<i>Figure I.20. Evolution de la résistance résiduelle à la traction des pâtes de ciment avec la température</i> .....	45
<i>Figure I.21. Evolution du module d'élasticité relatif pour les bétons M30C, M75C, M75SC, M100C</i> .....	46
<i>Figure I.22. Modules d'élasticité en fonction de la température d'exposition</i> .....	47
<i>Figure I.23. Mécanisme d'écaillage du béton</i> .....	49
<i>Figure I.24. Ecaillage lors de l'incendie du tunnel mont blanc</i> .....	49
<i>Figure I.25. Eclatement d'un poteau durant l'essai au feu</i> .....	50
<i>Figure I.26. Observation au MEB d'une fibre de polypropylène dans un échantillon de béton à 20 °C puis après chauffage à 200 °C</i> .....	52
<i>Figure I.27. Représentation simplifiée du passage de la pression de vapeur autour d'une fibre de polypropylène du fait de sa faible adhérence avec le squelette solide</i> .....	52
<i>Figure I.28. Les courbes ATD et DTG pour les fibres polypropylène</i> .....	53
<i>Figure I.29. Observation en épifluorescence d'un béton fibré et non fibré après chauffage à 400 °C</i> .....	53
<i>Figure I.30. Deux illustrations expérimentales de l'efficacité de fibres de polypropylène vis-à-vis du risque d'instabilité thermique du béton</i> .....	54
<i>Figure I.31. Installation d'une protection thermique rapportée sur la dalle d'un tunnel</i> .....	54
<i>Figure II.1. Fillers du laitier granulé</i> .....	59
<i>Figure II.2. Diffractogramme du laitier granulé</i> .....	59
<i>Figure II.3. Fumée de silice</i> .....	61
<i>Figure II.4. Diffractogramme de la fumée de silice</i> .....	61

<i>Figure II.5. Analyse granulométrique de l'ensemble des granulats.....</i>	63
<i>Figure II.6. Diagramme de diffraction X du Calcaire .....</i>	64
<i>Figure II.7. Fibres de polypropylène .....</i>	65
<i>Figure II.8. Courbe ATG des Fibres de polypropylène.....</i>	65
<i>Figure II.9. Organigramme de la méthode proposée pour formuler des BHP.....</i>	67
<i>Figure II.10. Four à moufle.....</i>	70
<i>Figure II.11. Courbe de chauffage des bétons.....</i>	70
<i>Figure II.12. Essai d'affaissement au cône d'Abrams.....</i>	71
<i>Figure II.13. Aéromètre à béton.....</i>	73
<i>Figure II.14. Variation de l'affaissement des différents types de béton.....</i>	73
<i>Figure II.15. Variation de la masse volumique des différents types de béton.....</i>	74
<i>Figure II.16. Variation du volume d'air occlus des différents types de béton.....</i>	75
<i>Figure III.1. Mesure de la perte de masse .....</i>	79
<i>Figure III.2. Mesure de la masse volumique apparente et de la porosité accessible à l'eau.</i>	80
<i>Figure III.3. Essai de compression .....</i>	81
<i>Figure III.4. Essai de traction par flexion.....</i>	82
<i>Figure III.5. La mesure de la vitesse de son.....</i>	83
<i>Figure III.6. Essai de mesure l'ouverture de fissure.....</i>	84
<i>Figure III.7. Perte de masse des BHPL et BHPFs en fonction de la température de chauffage .....</i>	86
<i>Figure III.8. Perte de masse des bétons fibrés a base du fillers de laitier en fonction de la température de chauffage.....</i>	88
<i>Figure III.9. Perte de masse des bétons fibrés à base de la fumée de silice en fonction de la température de chauffage.....</i>	89
<i>Figure III.10. Evolution de la porosité des BHPL et BHPFs en fonction de la température de chauffage.....</i>	90
<i>Figure III.11. Evolution de la porosité des bétons fibrés à base du fillers de laitier en</i>	

<i>fonction de la température de chauffage.....</i>	91
<i>Figure III.12. Evolution de la porosité des bétons fibrés à base de fillers de fumée de silice en fonction de la température de chauffage.....</i>	91
<i>Figure III.13. Résistance résiduelle en compression des BHPL et BHPFs en fonction de la température de chauffage.....</i>	93
<i>Figure III.14. Résistance résiduelle en compression des bétons fibrés à base du fillers de laitier en fonction de la température de chauffage. ....</i>	95
<i>Figure III.15. Résistance résiduelle en compression des bétons fibrés à base de la fumée de silice en fonction de la température de chauffage.....</i>	96
<i>Figure III.16. Résistance relative en compression des bétons âgés de 90 jours en fonction de la température de chauffage .....</i>	97
<i>Figure III.17. Résistances résiduelle à la traction des bétons en fonction de la température de chauffage.....</i>	98
<i>Figure III.18. Résistances résiduelle à la traction des bétons fibrés à base du fillers de laitier en fonction de la température de chauffage.....</i>	100
<i>Figure III.19. Résistances résiduelle à la traction des bétons fibrés à base de la fumée de silice en fonction de la température de chauffage.....</i>	101
<i>Figure III.20. Évolution du module d'élasticité résiduelle des BHPL et BHPFs en fonction de la température de chauffage. ....</i>	103
<i>Figure III.21. Évolution du module d'élasticité résiduelle des bétons fibrés à base du fillers de laitier en fonction de la température de chauffage.....</i>	104
<i>Figure III.22. Évolution du module d'élasticité résiduelle des bétons fibrés à base du fillers de la fumée de silice en fonction de la température.....</i>	105
<i>Figure III.23. Vue visuelle des éprouvettes avec et sans fibre polypropylène soumis à différente température .....</i>	106
<i>Figure III.24. Essai de mesure de l'ouverture des fissures des surfaces de béton.....</i>	107
<i>Figure III.25. Taille des fissures dans les bétons à base de laitiers granulée en fonction de la température.....</i>	108
<i>Figure III.26. Taille des fissures dans les bétons à base de la fumée de silice en fonction</i>	

<i>de la température</i> .....	108
<i>Figure IV.1. Microscope électronique à balayage</i> .....	112
<i>Figure IV.2. Dispositif utilisé pour l'analyse par Diffraction des Rayons X</i> .....	113
<i>Figure IV.3. Dispositif utilisé pour l'analyse thermogravimétrique</i> .....	114
<i>Figure IV.4. Courbes issues d'une analyse thermique et exploitations associées</i> .....	115
<i>Figure IV.5. Microstructure des bétons à température ambiante (A et B sont des bétons non fibrés, C et D sont des bétons fibrés)</i> .....	117
<i>Figure IV.6. Microstructure des bétons après un chauffage à 700°C (A et B sont des bétons non fibrés, C et D sont des bétons fibrés)</i> .....	118
<i>Figure IV.7. Diagrammes de diffraction des rayons X des BHPL 20 °C</i> .....	120
<i>Figure IV.8. Diagrammes de diffraction des rayons X des BHPL 700 °C</i> .....	120
<i>Figure IV.9. Diagrammes de diffraction des rayons X des BHPFS 20 °C</i> .....	121
<i>Figure IV.10. Diagrammes de diffraction des rayons X des BHPFS 700 °C</i> .....	121
<i>Figure IV.11. Diagrammes de diffraction des rayons X des BHPLpp 20 °C</i> .....	122
<i>Figure IV.12. Diagrammes de diffraction des rayons X des BHPLpp 700 °C</i> .....	122
<i>Figure IV.13. Analyse thermogravimétrique des échantillons du BHPL</i> .....	123
<i>Figure IV.14. Analyse thermogravimétrique des échantillons du BHPL pp</i> .....	123
<i>Figure IV.15. Analyse thermogravimétrique des échantillons du BHPFs</i> .....	124
<i>Figure IV.16. Analyse thermogravimétrique des échantillons du BHPFs pp</i> .....	124

## LISTE DES TABLEAUX

<i>Tableau I.1. Principaux constituants d'un ciment ordinaire.....</i>	21
<i>Tableau I.2. Les principales réactions physico-chimiques dans le béton à haute température...</i>	34
<i>Tableau II.1. Composition chimique du ciment.....</i>	57
<i>Tableau II.2. Caractéristiques physiques et mécaniques du ciment .....</i>	58
<i>Tableau II.3. Composition chimique du fillers du laitier.....</i>	59
<i>Tableau II.4. Caractéristiques physiques du fillers du laitier.....</i>	59
<i>Tableau II.5. Composition chimique de la fumée de silice.....</i>	60
<i>Tableau II.6. Caractéristiques physiques de la fumée de silice.....</i>	60
<i>Tableau II.7. Propriétés physique des granulats.....</i>	62
<i>Tableau II.8. Composition chimique des granulats .....</i>	63
<i>Tableau II.9. Composition des mélanges de béton.....</i>	68
<i>Tableau II.10. Types et formes d'éprouvettes avec les essais réalisés.....</i>	69
<i>Tableau II.11. Durées des paliers de chauffage .....</i>	70





**INTRODUCTION GENERALE**

## **INTRODUCTION GÉNÉRALE**

Les bétons à hautes performances permettent d'optimiser les structures, de réaliser des ouvrages soumis à des contraintes élevées ou subissant un environnement sévère du fait de leur porosité extrêmement réduite, plus résistants aux agents agressifs, et, de façon générale, présentent une durabilité accrue. Cette utilisation croissante du béton à haute performance suscite des interrogations concernant sa tenue au feu. C'est le cas des trois incendies dans les tunnels: sous la Manche, en 18 novembre 1996, le Mont Blanc, en 24 mars 1999 et enfin le Tauern, en Autriche le 30 mai 1999, qui ont mis en évidence des lacunes sur la compréhension complète des phénomènes thermo-physiques qui interviennent lorsque le béton est soumis à des hautes températures et qui provoquent sa dégradation. Ceci a motivé la communauté scientifique à étudier plus en profondeur le comportement à haute température du béton. Cette étude expérimentale contribue humblement à ces travaux de recherches.

Quand le béton est exposé à de hautes températures, des transferts de chaleur et des transports de masses fluides ont lieu dans le matériau, modifiant ainsi sa microstructure et ses propriétés mécaniques causant des expansions thermiques et le développement de pressions dans les pores ou espaces interstitiels. En conséquence, une dégradation par écaillage ou éclatement. Plusieurs auteurs ont étudiés ce phénomène et ont remarqués que l'ajout des fibres polypropylène est plus efficace vis-à-vis de l'écaillage de bétons. Ils peuvent largement améliorer les performances à haute température par une augmentation de la microporosité ouverte du BHP parce que les fibres de polypropylène fondent à 170°C, tandis que l'écaillage se produit entre 190°C et 250°C. Ce qui permet la migration vers l'extérieur des gaz et donc une réduction de la pression interstitielle.

L'objectif de ce travail est d'étudier et mieux comprendre le comportement à haute température des bétons à haute performance. Cette étude présente l'effet de l'évolution de la température sur le comportement du béton à haute performance qui sont préparés avec les fillers de laitier granulé en substitution totale de la fumée de silice, avec et sans ajout de fibres polypropylène (BHPL pp, BHPFs pp). Les échantillons sont soumis à des différents cycles de chauffage- refroidissement (20°C, 100°C, 300°C, 500°C, 700°C).

L'ensemble de notre travail est scindé comme suit:

- Le premier chapitre de ce document présente une synthèse des travaux réalisés sur l'évolution des propriétés physiques et mécaniques des bétons soumis à haute température. Les résultats présents dans la littérature sont variés, parfois contradictoires et confus. Tout d'abord, nous exposons les hypothèses concernant la structure du béton et décrivons l'évolution de la composition chimique et de la microstructure du béton sous l'effet de la température. Ensuite, les déformations thermiques du béton et de ces constituants sont analysées. Et enfin, l'évolution des propriétés physiques et mécaniques au cours de l'échauffement est analysée. Les évolutions de la résistance en compression, résistance en traction et module d'élasticité sont présentées en fonction des différents paramètres influençant ces comportements. L'influence des conditions de réalisation des essais est notamment discutée. En outre, le comportement au feu est abordé sous l'angle du phénomène de l'écaillage. Nous présentons ainsi le rôle des fibres polypropylène, un moyen efficace de réduire les risques d'apparition le phénomène d'écaillage ou éclatement.

- Le deuxième chapitre a pour objectif de définir et de justifier nos choix de base en ce qui concerne les compositions des matériaux étudiés. Une optimisation de la formulation des BHP sans et avec fibres a été faite. Ce chapitre se termine par une présentation des résultats d'essais expérimentaux qui caractérisent l'influence de la nature de l'addition minérale et de l'ajout des fibres polypropylène sur les propriétés des BHP à l'état frais.

- Le troisième chapitre, présente les protocoles expérimentaux et l'analyse des résultats de la perte de masse, de la porosité accessible à l'eau, de résistance résiduelle à la compression, de résistance résiduelle à la traction et le module d'élasticité (Essai non destructif) à différents cycle de chauffage- refroidissement en utilisant des paliers de température de 20°C, 100°C, 300°C, 500°C et 700°C et aux différents âges (7, 28 et 90 jours).

- Afin de confirmer les résultats obtenus dans le chapitre précédent, une étude microstructurale est abordée dans le quatrième chapitre. Des analyses complémentaires thermogravimétriques (ATG) et une analyse par Diffraction des Rayons X (DRX) sont réalisées.

Le manuscrit s'achève par une conclusion générale rappelant les principaux acquis et résultats obtenus sur le comportement à haute température des BHP et BHP fibrés.



**CHAPITRE I**

**ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE**

## I.1. INTRODUCTION

L'exposition du béton à une température élevée provoque une dégradation physico-chimique progressive du béton qui modifie sa microstructure. Pour comprendre le comportement de ce matériau à haute température, il est nécessaire de connaître les principales modifications que subissent ses composants (la matrice cimentaire et les granulats). L'interface pâte-granulats est plus ou moins affectée selon la nature du ciment et des granulats. Ce chapitre décrit les principaux éléments du comportement thermique et mécanique du béton à haute température.

## I.2. MICROSTRUCTURE DU BETON DURCI

### I.2.1. Microstructure du ciment

Le ciment est un liant hydraulique qui, mélangé avec l'eau, donne des produits avec une résistance mécanique et chimiquement stables même dans l'eau. Le ciment Portland, le plus répandu parmi les liants hydrauliques, c'est un mélange de gypse et clinker [1]. La préparation du clinker consiste à cuire un mélange de calcaire (80%) et de (20%) d'argile dans un four porté à une température d'environ 1450°C [2]. La fonction du gypse ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) dans le ciment Portland est d'éviter le phénomène de "fausse prise" grâce à la formation d'un écran momentané de cristaux d'ettringite à la surface des grains de  $\text{C}_3\text{A}$  très réactifs à l'eau [3]. Ceci ralentit l'hydratation de  $\text{C}_3\text{A}$  et évite ainsi le phénomène de prise rapide (raidissement très rapide de la pâte, résultat d'un manque d'ion  $\text{SO}_4^{2-}$  dans la solution de gâchage) [4]. La composition minéralogique des principaux composants anhydres du ciment portland sont rassemblés dans le Tableau I.1 [3] :

**Tableau I.1.** Principaux constituants d'un ciment ordinaire.

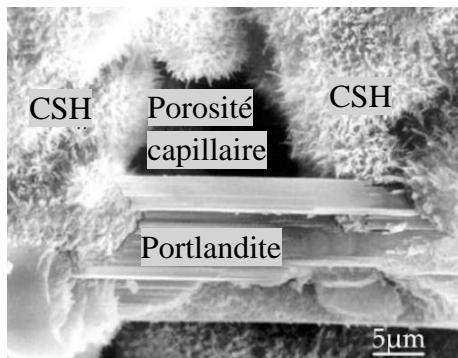
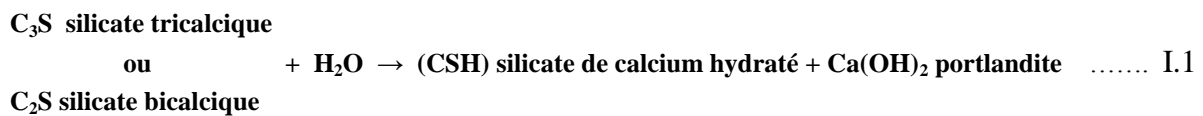
Désignation	Formule chimique exacte	Formule chimique simplifiée	Proportion dans un ciment ordinaire
Silicate tricalcique (ou alite)	$3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	$\text{C}_3\text{S}$	60 à 65%
Silicate bicalcique (ou bélite)	$2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	$\text{C}_2\text{S}$	20 à 25%
Aluminate tricalcique (ou célite)	$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{C}_3\text{A}$	8 à 12%
Alumino-ferrite tétracalcique	$4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{C}_4\text{AF}$	8 à 10%

### I.2.1.1. Hydratation du ciment

Le mélange d'eau et de ciment entraîne des réactions d'hydratation complexes dès la mise en contact des deux espèces. Les grains de ciment initialement anhydres causent la précipitation d'hydrates qui vont progressivement s'organiser en structure résistante. On appelle hydratation l'ensemble des réactions chimiques qui se produisent entre l'eau et ciment. La prise est un passage entre l'état de suspension à celui du solide. Les principaux hydrates formés sont :

- le silicate de calcium hydraté ou gel CSH.
- l'hydroxyde de calcium (Ca(OH)<sub>2</sub>) ou Portlandite.
- aluminates de calcium hydraté, et l'ettringite.

Ces hydrates sont principalement formés à partir des silicates bicalciques et tricalciques du ciment selon la réaction simplifiée (I.1)



**Figure I.1.** Vue au Microscope électronique à balayage d'une pâte de ciment [5].

Pour un ciment donné, les quantités de CSH et de Portlandite formés dépendent du rapport E/C et du temps de réaction. Dans une pâte de ciment ordinaire durcie, on trouve en moyenne, 50 à 70 % de CSH et 25 à 27 % de Ca(OH)<sub>2</sub>. Le CSH est l'hydrate qui participe le plus aux performances mécaniques. De par sa grande solubilité dans l'eau et sa faible participation à la résistance mécanique de la pâte de ciment durcie (pcd), on cherche à éliminer la Portlandite dans les bétons à hautes performances. Pour ceci, on peut par exemple incorporer de la fumée de silice (environ 10 % de la quantité de ciment [7]) pour transformer la Portlandite en CSH selon la réaction pouzzolanique suivante [6], [3] :



Ceci permet ainsi d'augmenter les performances (résistance, durabilité...) du béton.

### I.2.1.2. Les CSH

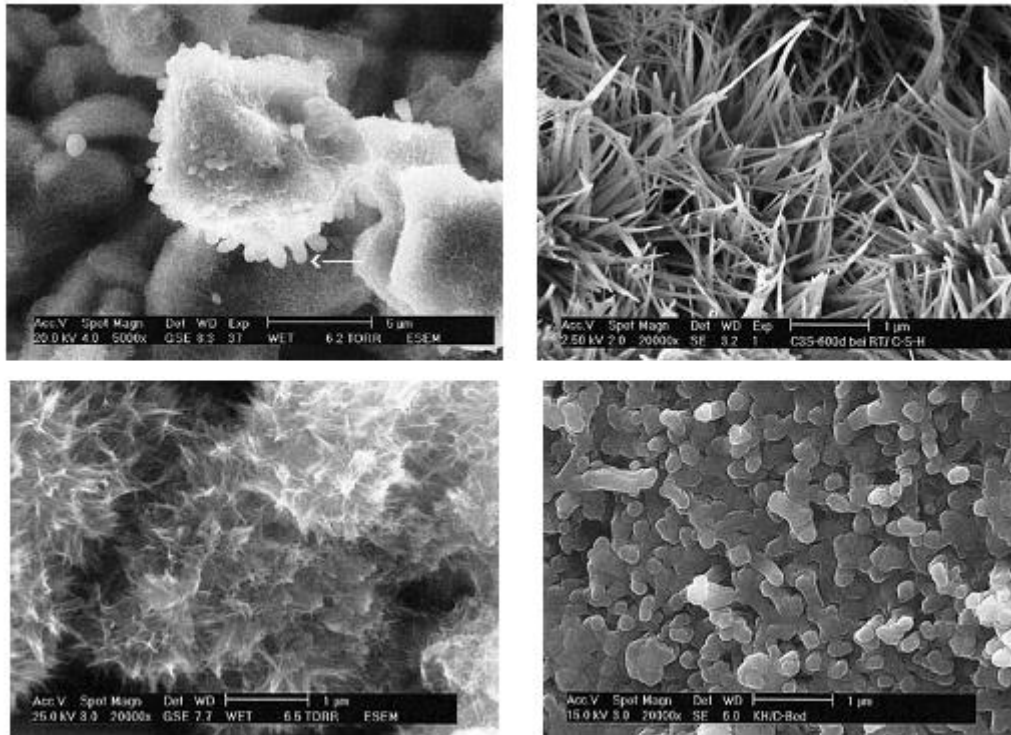
Le gel CSH c'est le principal constituant du ciment portland hydraté (50% à 70% de la masse du ciment). C'est lui qui confère au ciment sa résistance.

Actuellement, la structure des CSH est encore mal décrite et détaillée. Généralement, on qualifie les CSH de « gel CSH », faisant référence à son faible degré de cristallinité et à la présence d'eau dans les molécules [9].

Les observations microscopiques des particules de CSH ont permis de les classer en quatre types morphologiques (classification de Diamond, [10]) :

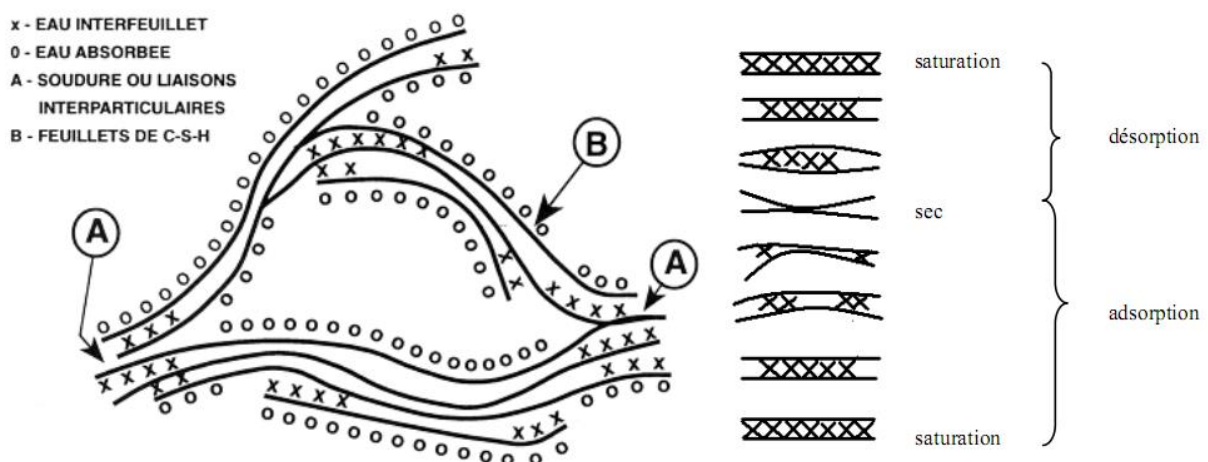
- **Type I** : ils se présentent en feuillets très minces qui s'enroulent sur eux-mêmes en formant des tubes creux rayonnant autour des grains de ciment ; cette forme est visible pendant les premiers âges de l'hydratation.
- **Type II** : ils se présentent sous forme alvéolaire (nids d'abeilles)
- **Type III** : il apparaît sous une forme de petits disques ou de sphères assemblées pour former des particules plus massives.
- **Type IV** : il s'agit d'une structure dense et amorphe.

Les CSH de type I et II cristallisent au début de la prise, dans l'espace disponible entre les grains anhydres. Les types III et IV sont les hydrates tardifs (appelés les hydrates internes) qui peuvent occuper la place des grains anhydres d'origine. Les différentes formes du gel CSH sont présentes sur la Figure I.2 [10].



**Figure I.2.** La diversité des formes du gel CSH [10].

Il existe plusieurs modèles qui détaillent la structure des CSH [11]. On peut citer celui de Feldman et Sereda (repris par [9 ; 12]). Dans ce modèle, la molécule de CSH se compose d'un assemblage structural de plusieurs feuillets lamellaires dans lesquels l'eau y est retenue par des liaisons hydrogène.



**Figure I.3.** Modèle des particules de CSH avec les particules d'eau présentes sous forme libre ou absorbée, Feldman et Sereda [10], [9], [12].

Les particules (les feuillets) sont liées entre elles par des forces superficielles ou parfois par des liaisons ioniques covalentes rigides. Ces liaisons entre les feuillets se renforcent au cours de séchage, mais seraient détruites lors de l'humidification [9], ce qui explique que la



résistance mécanique du béton à l'état humide soit plus faible que celle du matériau sec. Des forces physiques qui s'exercent entre les feuillets de nature hydrophile, séparés par une mince couche d'eau, sont les suivantes :

- les forces de Van Der Waals – (attractives),
- les forces électrostatiques – (répulsives),
- les interactions stériques et les forces dues à la structuration de l'eau – (répulsives).

### I.2.1.3. La portlandite

La portlandite est la seule phase solide dans la pâte de ciment qui est présentée sous une forme relativement pure. Elle cristallise en plaquettes hexagonales, parfois massives et empilées entre les grains de ciment partiellement hydratés. Etant donné la grande taille des cristaux, la portlandite a une faible surface spécifique et les forces de liaisons avec ces cristaux sont faibles. Ces cristaux se trouvent en forte concentration sous forme de couches dans l'auréole de transition (interface entre la pâte de ciment et les granulats) ou en bordure des bulles d'air. Par ailleurs, si elle ne trouve pas assez d'espace pour cristalliser, la portlandite peut aussi se trouver à l'état amorphe [13].

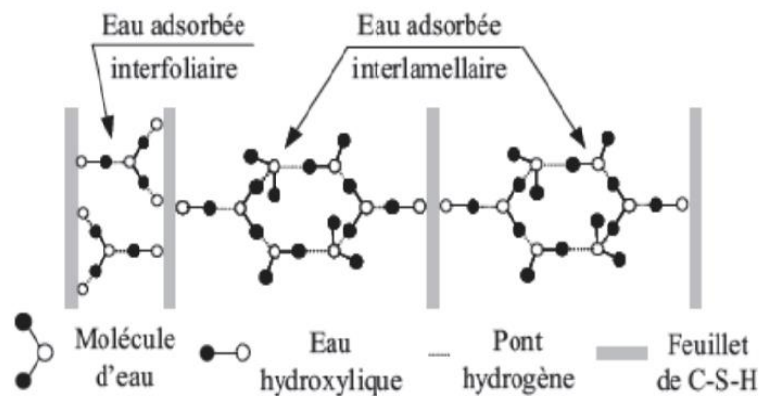
### I.2.2. L'eau dans la pâte du ciment durcie

L'eau est un élément essentiel dans la pâte de ciment. Elle permet d'une part, lors du gâchage, d'accroître la fluidité et la maniabilité facilitant une mise en place plus aisée du matériau et d'autre part de favoriser, lors de la prise, la liaison entre les éléments solides présents dans le matériau. Mais elle est responsable aussi de ses principaux défauts (augmentation de la porosité et diminution de la résistance mécanique, présence d'agents agressifs, retrait et fluage). Cette eau est généralement classifiée selon la nature de sa liaison avec la pâte de ciment. Elle existe sous plusieurs formes dans le béton [2] [14] :

- **L'eau libre** : elle n'est pas soumise aux forces d'attraction des surfaces solides. Elle se trouve principalement dans les pores capillaires de dimension supérieure à 10  $\mu$  m.
- **L'eau capillaire** est constituée de la phase condensée remplissant par condensation capillaire le volume poreux au-delà de la couche adsorbée (elle obéit aux lois de la capillarité) dans les pores de dimensions  $< 10 \mu$  m.

L'évaporation de l'eau libre et capillaire s'effectue entre 30 et 120°C.

- **L'eau absorbée** : qui est contenue au niveau des granulats ouverts. Il s'agit de l'eau qui remplit des pores qui ne forment pas un espace poreux connectée.
- **L'eau adsorbée** : l'existence de liaisons libres en surface entraîne la création d'une tension superficielle du solide et d'un effet de champ électrique. L'adsorption est le phénomène qui, par fixation de molécules ou d'ions du milieu extérieur, liquide ou gazeux, tend à réduire cette énergie libre superficielle. Suivant l'importance des énergies mises en jeu, on distingue l'adsorption physique et la chimisorption :
  - **L'adsorption physique** met en jeu des énergies de type Van der Waals de faible intensité (énergie de l'ordre d'une dizaine de  $\text{kJ mol}^{-1}$ ). Elle se traduit par une condensation instantanée d'atomes, de molécules ou d'ions à la surface du solide.
  - **La chimisorption** correspond à la formation d'une liaison chimique entre les atomes de la surface du solide et les molécules de l'adsorbat. L'énergie mise en jeu est plus importante que dans la physisorption car la structure de la molécule est modifiée.
- **L'eau chimiquement liée**, consommée au cours des réactions d'hydratation du ciment est associée à chaque type d'hydrate. il peut apparaître sous trois formes (interfeuillet, interlamellaire et hydroxylique) [14].



**Figure I.4.** Etat de l'eau dans les CSH [6].

L'eau inter-feuillet (l'eau dans les nanopores) s'évapore entre 30 et 120°C, alors que l'eau absorbée à l'intérieur ou à l'extérieur des feuillets CSH qui est fortement liée au matériau peut s'évacuer à des températures beaucoup plus élevées d'environ 120°C – 300°C.

L'augmentation de la température provoque la libération de l'eau chimiquement liée qui se traduit par la déshydratation de la pâte de ciment. Tous les processus d'évacuation de l'eau

libre, liée et adsorbé sont difficiles à dissocier ce qui ne facilite pas les observations scientifiques [7].

### I.2.3. Granulats

Les granulats constituent le squelette du béton et occupent une grande partie de son volume (60 à 75%). ils sont la source de sa résistance mécanique [15]. Les granulats utilisés doivent avoir une bonne résistance mécanique et leur courbe granulométrique doit être optimisée afin de remplir le plus possible des vides dans le béton. C'est la raison pour laquelle on utilise plusieurs classes granulaires dans un même béton qui sont les sables, les gravillons et les graviers.

Au contact avec la pâte de ciment, on distingue des granulats réactifs et des granulats neutres. Les granulats réactifs (calcaire) présentent de fortes liaisons avec la pâte de ciment du fait des réactions chimiques qui se produisent au cours du temps. En ce qui concerne les granulats neutres (siliceux), ils ne réagissent pas avec la pâte de ciment et présentent de faibles liaisons. [6] [16].

On peut classer les différents types d'agrégats selon :

- leur origine
  - *naturelles* : d'origine minérale sans transformation autre que mécanique,
  - *artificielles* : d'origine minérale et transformés, exemple du schiste, laitier granulé de haut fourneau,
  - *recyclés* : exemple du béton concassé.
- leur forme : peuvent être alluvionnaires (dits granulats roulés) ou de carrière (dits granulats concassé).
- leur rugosité et bien entendu leur dimension.

Les granulats utilisés pour la fabrication du béton sont généralement des granulats naturels. Ces granulats proviennent de roches sédimentaires siliceuses ou calcaires, de roches métamorphiques comme le quartz ou de roches éruptives comme le basalte et le granite [6]. La présence de substances organiques ou argileuses sur la surface des agrégats s'avère importante : dans ce cas on peut avoir des effets nocifs sur la réaction d'hydratation et à l'interface pâte-granat. On peut avoir une mauvaise adhésion de l'agrégat à la pâte de ciment.

L'origine minéralogique, la forme et la granulométrie sont des paramètres très importants dans le choix des granulats pour la confection d'un béton.

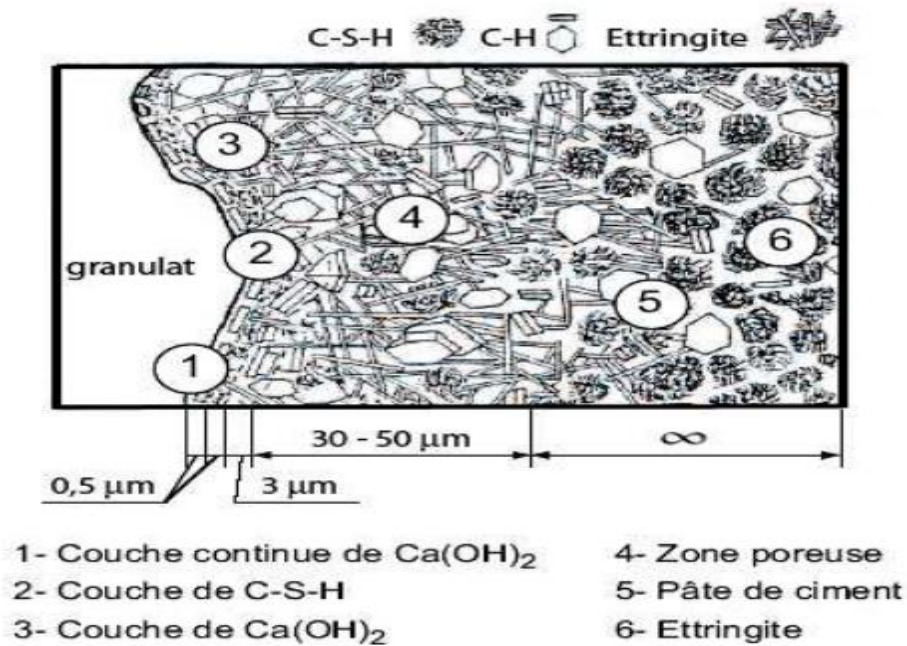
En ce qui concerne les propriétés thermiques de l'agrégat, il faut remarquer qu'ils n'ont pas tous un bon comportement à haute température. En général on cherche des agrégats avec un faible coefficient d'expansion thermique. Dans le cas contraire, on peut générer des contraintes et donc des fissurations. De plus, les agrégats ont la capacité d'absorber de la chaleur, spécialement lorsque les agrégats en question sont sujets à des transformations endothermiques à haute température : par exemple, les agrégats d'origine calcaire absorbent, entre 700°C et 900°C, 1420 kJ/kg pour la décomposition du carbonate de magnésium et 1800 kJ/kg pour la décomposition du carbonate de calcium.

Les agrégats peuvent donc interagir avec le processus de chauffage en ralentissant l'élévation de température dans le béton [1].

#### **I.2.4. L'interface pâte-granulats**

Les propriétés mécanique et la durabilité des matériaux cimentaires dépendent non seulement de la qualité de la pâte de ciment (nature du ciment utilisé, rapport E/C, adjuvants, etc.), de la nature et la granulométrie des agrégats et de la proportion de chacun deux, mais elles sont également liées à la qualité de la liaison qui s'établit Lors de l'hydratation entre la pâte de ciment et les particules granulaires [17]. Cette liaison donne naissance à une zone appelée « auréole de transition » ou « zone de transition interfaciale ».

Nous présentons le modèle de Diamond [10] sur la Figure I.5. On observe, autour des granulats, une zone de pâte hydratée particulière. Sa première couche, plus proche de la surface des granulats, très compacte est composée de cristaux de portlandite orientés perpendiculairement aux granulats. La deuxième couche d'épaisseur 0,5  $\mu\text{m}$ , est composée de feuillets de CSH. Après la deuxième couche de  $\text{Ca(OH)}_2$ , nous passons dans la zone de forte porosité avec des grains de grande dimension et de faible cohésion et par conséquent de moindre résistance mécanique que la matrice. Cette zone représente le point faible des bétons soumis aux sollicitations mécaniques et les premières fissures contournent les granulats et passent à travers la matrice.

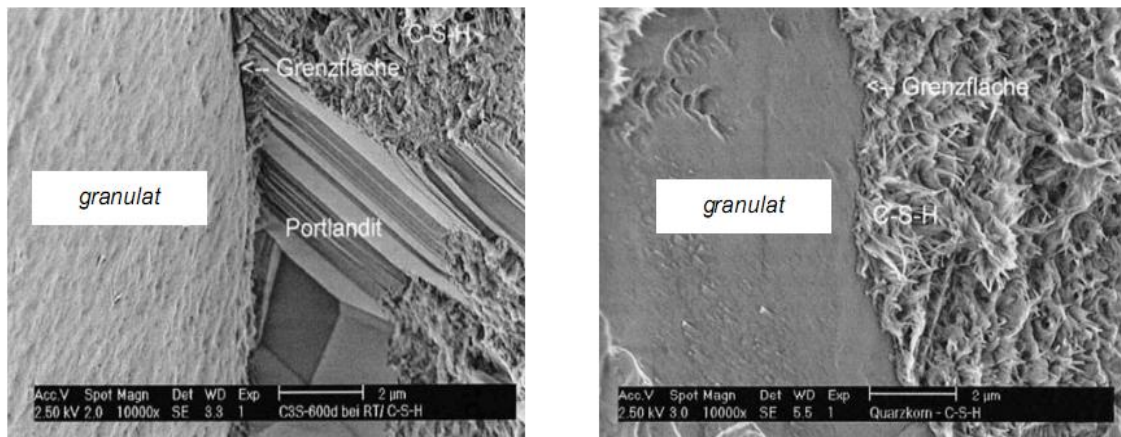


**Figure I.5.** Modèle de la morphologie de l'auréole de transition d'un BO [10].

La qualité de l'auréole de transition est fortement liée à la nature des granulats [18]. Nous distinguons les granulats réactifs et neutres en contact avec la pâte de ciment. Pour les granulats calcaires (dit : réactifs), on observe une amélioration de la liaison pâte – granulats du fait de leur réaction continue avec les éléments de la pâte de ciment. En effet le carbonate de calcium ( $\text{CaCO}_3$ ) présent dans les granulats calcaires réagit avec l'aluminate tricalcique et les alumino - ferrites tétracalcique pour former des monocarbo- aluminates de calcium  $\text{C}_3\text{A} \cdot \text{CaCO}_3 \cdot \text{H}_{11}$ . Ainsi, la zone de transition entre les granulats calcaires et la pâte de ciment est plus résistante et de perméabilité plus faible. L'augmentation de la résistance du matériau béton réalisée avec les granulats de cette nature a été observée contrairement aux granulats du type siliceux, qui sont neutres par rapport à la pâte de ciment [19] et l'interface qu'il forme avec la pâte présente une résistance mécanique plus faible et une perméabilité aux gaz accrue. Il est à souligner également que la forme des granulats joue un rôle très important car on observe des liaisons plus rigides, au niveau de l'auréole de transition, pour des granulats concassés que pour des granulats roulés [20].

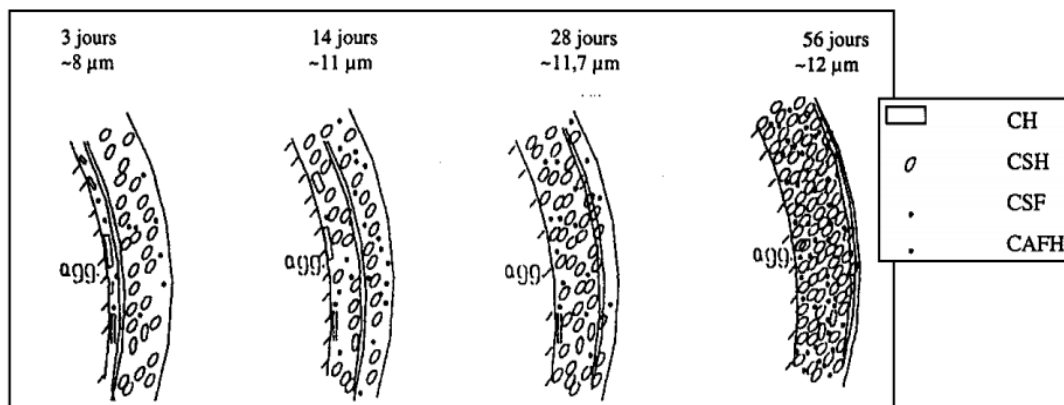
Dans les bétons ordinaires, cette interface pâte/granulat est mécaniquement plus faible et présente une porosité plus importante que le reste de la pâte, les pores plus grossiers dans cette zone, deviennent un réseau de cheminement privilégié pour les transports de masse [21], [18]. Pour les bétons à haute performance, modifiés par l'ajout de fumée de silice, nous pouvons obtenir une réduction de la porosité et de l'épaisseur de cette zone. En comparant

avec le BO, où l'auréole de transition est d'environ 50  $\mu\text{m}$ , son épaisseur pour les BHP est limitée à 12  $\mu\text{m}$ . La source [22], signale absence de la zone de contact dans les bétons à haute performance (Figure I.6) où l'ajout de la fumée de silice permet la consommation de la portlandite, en densifiant la structure du matériau, tout en améliorant ses performances mécaniques. Lorsque le rapport E/C (eau/ciment) augmente, cette zone devient plus épaisse, plus poreuse et par conséquent moins résistante.



**Figure I.6.** Microstructure de la zone de contact entre la pâte et le granulat : **a)** béton sans fumée de silice ; les cristaux de portlandite dans la zone de transition sont orientés perpendiculairement aux granulats, **b)** béton avec fumée de silice, absence de la zone de transition, homogénéité du gel CSH [10].

Chaussadent [23] et ses collaborateurs ont étudié l'influence du rapport E/C sur l'hydratation des pâtes. Ils montrent que la porosité de l'auréole de transition et la quantité totale de la portlandite diminuent avec l'augmentation de l'âge du béton. Ils attribuent ce phénomène à la formation de gel de C-S-H par la réaction pouzzolanique entre la fumée de silice et la portlandite. Le mécanisme de développement de la zone de transition est montré sur la figure I.7.



**Figure I.7.** Evolution de la zone de transition dans un BHP (e/c=0,23 et s/c=0,15) pendant l'hydratation [24].

### I.2.5. Structure poreuse du béton

L'hydratation des composants que ce soit dans une pâte, un mortier ou un béton, donne un matériau poreux à l'état durci. La porosité varie d'un béton à l'autre de façon significative quantitative et qualitative (dimension des pores et répartition de rayon des pores). Elle est de l'ordre de 10% dans un béton ordinaire durci [25]. cette porosité est issue d'une part de la microstructure même des hydrates, en particulier des CSH, et d'autre part, des vides laissés par l'eau lors de l'hydratation alors que le système avait déjà commencé à se figer physiquement, ainsi que des bulles d'air piégées durant le malaxage. La porosité peut ainsi être connectée ou occluse et d'une distribution de taille de pores très variable. Certains paramètres physiques sont utilisés pour décrire la porosité : le volume total poreux, le diamètre des pores mais aussi la tortuosité et la constrictivité, décrivant le caractère aléatoire des formes du réseau poreux [8].

La structure poreuse et la distribution des pores au sein du béton jouent un rôle très important non seulement sur la résistance mécanique, mais aussi sur les phénomènes de transport et par conséquent sur la durabilité [4].

Deux familles de pores sont distinguées : les pores relatifs aux capillaires et les pores relatifs aux hydrates.

- **Les pores capillaires** : ce sont les vestiges des espaces intergranulaires de la pâte fraîche. Ils peuvent être ou non remplis d'eau et leur volume décroît au cours de l'hydratation pour un rapport eau/ciment donné [26]. Leur dimension caractéristique se situe dans la plage 0.01-50 $\mu$ m [27].
- **La porosité intrinsèque aux CSH** : cette porosité concerne une échelle encore plus petite. Sa dimension caractéristique, de l'ordre du nanomètre, est beaucoup plus faible que celle de la porosité capillaire. Les représentations qui en sont faites distinguent, en général, deux types de pores [4].
  - **Les pores inter-cristallites** (espace inter-lamellaires) qui sont situés entre les particules de gel.
  - **Les pores intra-cristallites** (espace inter-feuillets) qui sont situés à l'intérieur même des particules de gel, il s'agit d'espaces extrêmement petits de quelques Angströms de largeur.

Une différenciation supplémentaire s'avère nécessaire pour la description du réseau poreux : il faut donc distinguer entre porosité ouverte et porosité fermée. La porosité ouverte désigne l'ensemble des pores qui sont connectés l'un à l'autre et qui permettent le transport du

liquide/gaz (ex. pores capillaires). Au contraire, les pores fermés ne sont pas connectés (ex. pores d'air) et clairement n'ont aucune influence sur les phénomènes des transports [1].

### I.3. LES BETONS EN SITUATION ACCIDENTELLE - HAUTES TEMPERATURES.

Les incendies d'ouvrages en béton ont mis en avant l'impact des températures élevées sur l'endommagement du béton. Les effets de la température élevée sur les propriétés du béton ont été rapportés dès les années 1940. L'actualité fournit aussi des exemples dramatiques : incendie de bâtiments (Tour Windsor, Madrid, 2005) et de tunnels (Tunnel Sous la Manche, 1996-2008; Tunnel Mont Blanc, 1999; Tunnel Gothard, 2001; Howard Street Tunnel, 2001; Tunnel Fréjus, 2005). Ces différents exemples montrent d'importantes dégradations caractérisées par un détachement de matière, une perte de résistance mécanique voire la mise hors service de l'ouvrage. Les mécanismes de dégradation du béton à haute température ne sont pas encore bien compris [28].

La figure I.8 illustre quelques dégradations d'ouvrages en béton à la suite d'un incendie.



Tunnel sous la Manche [28].



Tour Windsor (Madrid) 2005 [6].

**Figure I.8.** Illustrations de dégradation d'ouvrages en béton à la suite d'une sollicitation thermique.

#### I.3.1. Courbes températures-temps normalisées

Au cours des dernières années, de nombreuses recherches [29-32] ont été effectuées à travers le monde pour définir les différents types d'incendie pouvant se déclarer dans les tunnels et dans les ouvrages. Elles ont été réalisées dans des tunnels existants, désaffectés et en



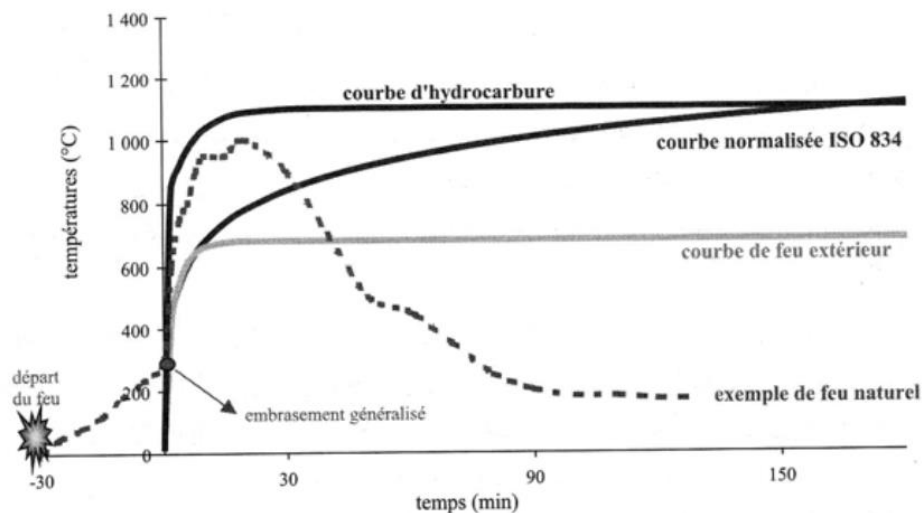
laboratoire.

On peut distinguer trois phases au cours d'un incendie [28].

- Première phase dite de « développement » : le combustible commence à brûler. On appelle cela un "feu localisé".
- Deuxième phase dite d' « incendie généralisé » : Tout le combustible présent dans la zone du sinistre participe au feu. On parle aussi d'embrasement généralisé.
- Troisième phase dite de « refroidissement » : Le combustible diminue et donc la température des gaz baisse également.

La sévérité du feu ainsi que la durée de ces phases dépendent de plusieurs paramètres :

- Quantité et répartition des matériaux combustibles (charge d'incendie) ;
- Vitesse de combustion de ces matériaux ;
- Conditions de ventilation (ouvertures) ;
- Géométrie du compartiment ;
- Propriétés thermiques des parois du compartiment.



**Figure I.9.** Courbes d'échauffement de la température des gaz dans le volume considéré [28].

Il existe différents types de feu (Voir figure I.9). Le feu le plus connu est le feu appelé « ISO » qui répond à la courbe normalisée ISO 834. Ce feu a pour but d'approcher les conditions d'un incendie dans une construction et il est défini par l'équation (I.3) :

$$T_{\text{iso}}(t) = 345 \log (8t + 1) + T_0 \quad \dots\dots\dots \text{I.3}$$

Avec  $T_{\text{iso}}(t)$  : est la température des gaz dans le four en °C,

$T_0$  : La température initiale dans le four en °C

$t$  : Le temps en minutes.

Bien entendu, il existe d'autres types de feu plus ou moins sévères, représentant différents cas de feux dans les situations les plus extrêmes comme les feux d'hydrocarbures.

Le feu normalise ISO-834 sert en général à dimensionner les ouvrages et les bâtiments. Mais, les tunnels par exemple peuvent faire l'objet d'un dimensionnement spécifique selon la courbe hydrocarbure, plus critique vis-à-vis de la température. Cette courbe est surtout utilisée dans le cas particulier d'élévation rapide de la température.

Il est aussi intéressant d'étudier le cas des chauffages lents. Ces chauffages permettent de caractériser mécaniquement les bétons après traitement thermique, alors que les chauffages de type feu sont surtout employés pour étudier les risques d'instabilité thermique et d'écaillage des bétons.

## I.4. EFFETS DE LA TEMPERATURE SUR LA STRUCTURE ET LES PROPRIETES THERMIQUES ET PHYSIQUES DU BETON

### I.4.1. Evolution des composants et de la structure du béton

#### I.4.1.1. Evolution de la pâte de ciment

Au cours de l'échauffement du béton, on observe de nombreux phénomènes physico-chimiques et des transformations qui modifient sa microstructure. Ces modifications ont un effet sur les propriétés thermiques, hydrique, et mécaniques du béton [33].

L'eau joue un rôle prépondérant dans le comportement de la matrice cimentaire. Sous l'effet de la température, elle se dilate puis s'évapore en entraînant une déshydratation des hydrates formés. Les principales transformations de la matrice cimentaire décrite par Schneider et Noumowé avec une élévation en température sont présentées dans le tableau I.2.

**Tableau I.2.** Les principales réactions physico-chimiques dans le béton à haute température [34] [10] [35] [7].

Entre 30 et 120°C	L'eau libre et une partie de l'eau adsorbée s'échappent du béton. L'eau non liée est complètement éliminée à 120°C.
Entre 130 et 170°C	Une double réaction endothermique peut avoir lieu correspondant à la décomposition du gypse $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ . Fusion des fibres polypropylène à 171°C
Autour de 180°C et jusqu'à environ 300°C :	On a la première étape de la déshydratation. Il y a rupture du gel de ciment la chaleur brise le gel de ciment et arrache des molécules d'eau aux silicates hydratés. L'eau liée chimiquement commence à s'échapper du béton.
A environ 250 et 370°C :	On peut avoir de petits pics endothermiques indiquant des effets de décomposition et d'oxydation d'éléments métalliques (ferriques).

	Clivage des granulats silico-calcaires à 300°C.
Entre 450 et 550°C	Il y a une décomposition de la portlandite en chaux libre : $\text{Ca(OH)}_2 \longrightarrow \text{CaO} + \text{H}_2\text{O}$
Autour de 570°C (573°C)	Transformation de structures de quartz $\alpha$ en quartz $\beta$ , accompagnée d'un gonflement
Entre 600 et 700 °C	Décomposition des phases de C-S-H et formation de $\beta$ -C <sub>2</sub> S. c'est la seconde étape de la déshydratation des silicates de calcium hydratés qui produit une nouvelle forme de silicates bicalciques.
Entre 700 et 900°C	Décomposition du carbonate de calcium. Le calcaire se décompose autour de 800°C en $\text{CaCO}_3 \longrightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$ , réaction fortement endothermique qui libère du gaz carbonique
Au dessus de 1300 et 1400°C	Début de la fusion des agrégats et de la pâte de ciment.

L'étude des résultats d'analyses thermiques différentielles (ATD) et d'analyses thermogravimétriques (ATG) permet de détecter l'apparition de transformations chimiques se produisant au sein du béton porté à des températures élevées, et de suivre leurs progressions. Plusieurs auteurs ont présenté les résultats de ce type d'analyses réalisées sous diverses conditions

#### I.4.1.2. Evolution des granulats

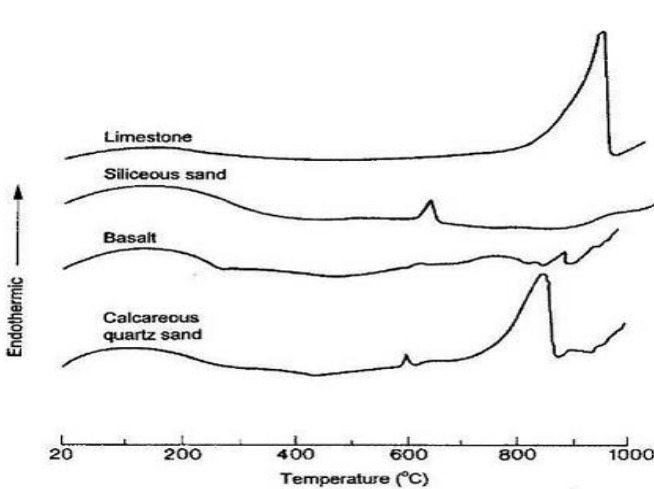
Les granulats jouent un rôle important dans le béton car ils en constituent le squelette par lequel sont transmis les efforts. Les granulats sont en principe inertes dans le béton à la température ambiante sauf cas de pathologie comme les réactions alcali-granulats, sous l'effet de la température, des modifications physico-chimiques se produisent également dans le granulats en fonction de leur nature minéralogique. Le facteur important du comportement du béton chauffé est la stabilité chimique et physique des granulats. Il est donc nécessaire de connaître le comportement des granulats à haute température. Les granulats les plus utilisées pour les ouvrages en béton sont les granulats siliceux et les granulats calcaires [6].

Comme le montre les figures I.10 et I.11 La majorité des granulats est généralement stable jusqu' à 600°C [36]. Les granulats siliceux sont constitués de minéraux tels que le quartz, la calcédoine, l'opale, le silex. Dans la structure de ces minéraux contiennent de l'ordre de 20% d'eau combinée [37]. Cette eau, entre 120 - 600°C est capable de se libérer partiellement en réduisant la résistance de ce matériau. Ce départ de l'eau peut entraîner un clivage des granulats. Un autre phénomène concerne le quartz à 575°C. Un changement de phases avec

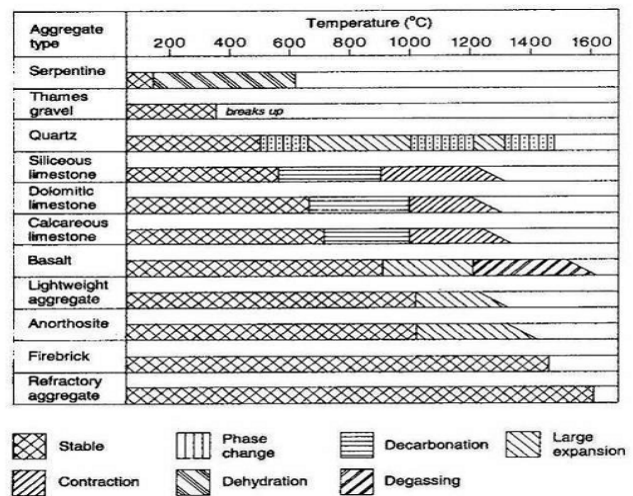
un changement de volume de 1 à 5,7 %. Le quartz présent dans les granulats siliceux  $\text{SiO}_2$  est un édifice de tétraèdres (un atome de silicium entouré de 4 atomes d'oxygène) soudés par les sommets, en chaînes. C'est une forme stable à basse température de la silice. Au-dessus de  $573^\circ\text{C}$  à la pression ambiante une légère rotation de liaisons entre tétraèdres, conduit à une forme cristalline de symétrie hexagonale; le quartz  $\beta$ . La température de transition du quartz  $\alpha$ - $\beta$  peut augmenter avec la pression [38].

Ainsi ces deux phénomènes qui apparaissent dans les granulats à base de quartz, peuvent provoquer l'endommagement de la structure du béton.

Les granulats calcaires présentent un bon comportement thermique jusqu'à  $700^\circ\text{C}$ . Cette température est le début de la décarbonation ( $\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CO}_2 + \text{CaO}$ ) qui se produit entre  $600$  et  $900^\circ\text{C}$ . Le CaO libre présent dans les bétons chauffés puis refroidis réagit avec l'humidité et se transforme en  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  en multipliant son volume par 2,5. Cette réaction peut expliquer la diminution de la résistance résiduelle (résistance mesurée après refroidissement) par rapport à la résistance à chaud des bétons à granulats calcaires chauffés au-delà de  $700^\circ\text{C}$ .



**Figure I.10.** Analyse ATD de 4 granulats généralement utilisés pour la confection des bétons [39].



**Figure I.11.** Études de la stabilité thermique et des transformations physico-chimiques de quelques granulats en fonction de la température [39].

D'après les recherches menées par Schneider [40] et Khoury [41] et bien d'autres chercheurs Les propriétés d'un bon granulat du point vu de l'utilisation à haute température sont :

- Un faible coefficient de déformation thermique,
- L'absence de déformations résiduelles après refroidissement,
- Une stabilité thermique, c'est à dire, un faible nombre de pics sur les courbes d'analyse thermique différentielle et d'analyse thermo gravimétrique ; soit peu ou pas de changements des phases,
- Une structure mono minérale de la roche composante du granulats.

#### **I.4.1.3. Evolution de l'interface pâte granulats**

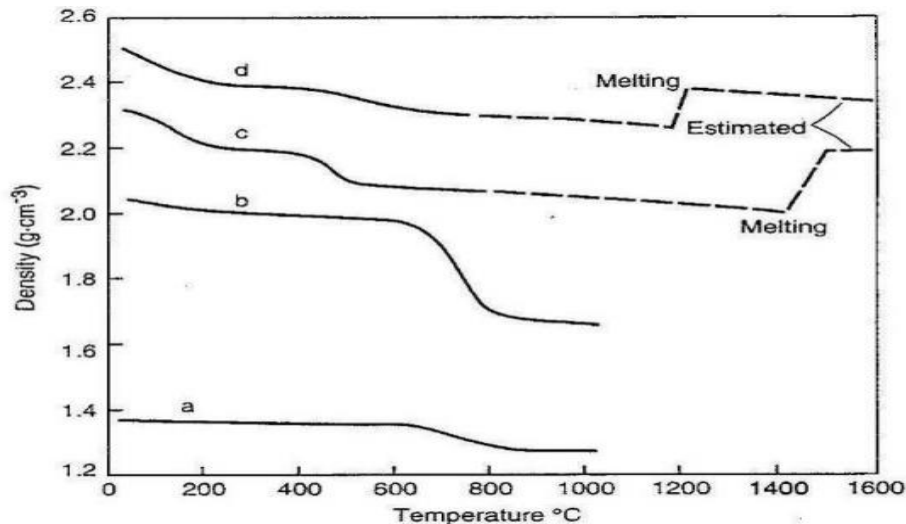
Dans les bétons, l'interface pâte-grulats est la partie la plus fragile, la plus poreuse et la mieux cristallisée. La présence de la fumée de silice réduit sa porosité et permet ainsi une bonne adhérence entre la matrice cimentaire et les granulats. Par contre cette zone est moins riche en gel de CSH.

A haute température cette partie, appelée aussi l'auréole de transition, se dégrade progressivement en montant en température. Ceci est dû au départ de l'eau piégée dans les pores et liée chimiquement. Le retrait de dessiccation favorise le développement des fissures et au delà de 120 °C, les phénomènes de déshydratation engendrent une détérioration rapide au niveau de cette zone à cause de la dilatation différentielle entre la pâte de ciment (retrait) et les granulats (expansion). Plus le matériau est hétérogène plus la différence entre les coefficients de dilatation thermiques des constituants est importante. Ces coefficients varient en fonction de la température, et dépendent du type granulats et de ciment utilisés. Ceci a été confirmé par Diederichs et al [42] en effectuant des essais de mesure du coefficient de dilatation thermique avec différentes natures de granulats.

### **I.4.2. Evolution des propriétés physiques du béton au cours de l'échauffement**

#### **I.4.2.1. Densité apparente**

D'après les travaux de Bazant and Kaplan [43], on observe une légère diminution de la masse volumique Pour tous les bétons entre la température ambiante et la température 400 °C à cause de l'expansion thermique du matériau et du départ de l'eau.



**Figure I.12.** Effet de la température sur la masse volumique de bétons confectionnés avec des granulats de type a– argile expansé (granulats léger), b– silico- calcaire, c– quartzite et d– basalte.

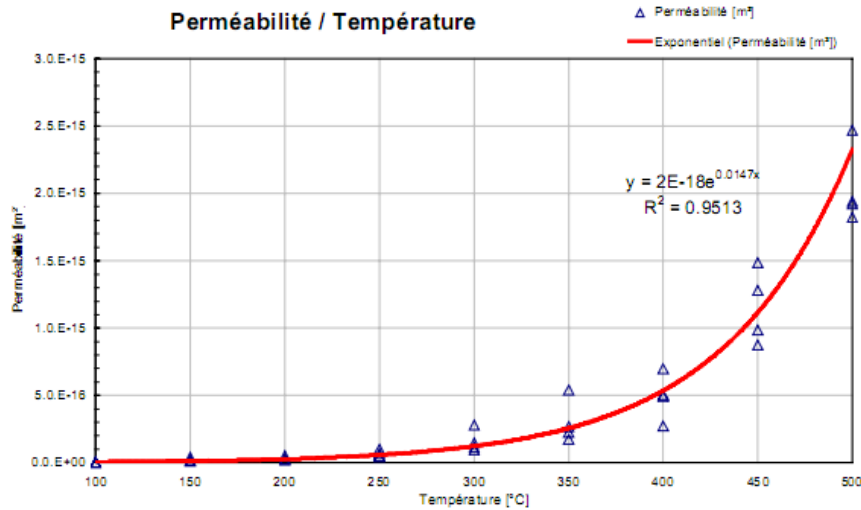
Les roches d et c contenant du quartz, leur expansion à 573 °C provoque une diminution de la masse volumique des bétons. La forte baisse de la masse volumique dans le béton b est attribuée à la présence de granulats calcaires dans sa composition, ce qui peut entraîner un fort dégagement de CO<sub>2</sub> à partir de 600 °C [43].

D'après ces résultats on peut conclure que :

- ✓ L'expansion thermique du béton et le départ d'eau par séchage et déshydratation des CSH et portlandite diminue la densité du matériau,
- ✓ La forte expansion à 573 °C des granulats contenant du quartz diminue la densité du béton,
- ✓ Le fort dégagement de CO<sub>2</sub> qui accompagne la décomposition du carbonate de calcium à partir de 700 °C diminue fortement la densité du béton,
- ✓ La fusion du béton densifie le matériau, augmentant par conséquent sa masse volumique [43].

#### I.4.2.2. Perméabilité

Dans les travaux de Sliwinski et al. [44], il a été montré que la perméabilité du béton augmente avec la température de manière exponentielle. Les valeurs de la perméabilité ont été obtenues pour un béton de granulats basalte chauffé à 1°C/min et refroidi à la température ambiante (Figure I.13).

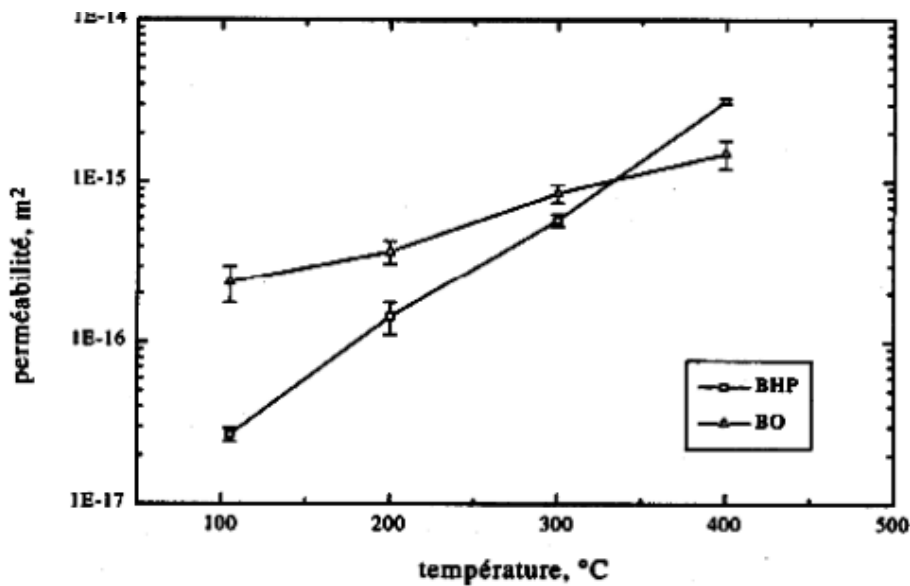


**Figure I.13.** Perméabilité intrinsèque résiduelle en fonction du traitement thermique [44].

L'évolution de la perméabilité avec la température a été aussi étudiée dans le cadre du Projet National BHP 2000 [45]. La détermination de la perméabilité intrinsèque (k) a été réalisée à partir de la mesure de la perméabilité à l'azote ( $K_a$ ) selon la méthode de Klinkenberg en utilisant la relation :  $K_a = K \left(1 + \frac{b}{P}\right)$

Où  $P$  est la pression moyenne et  $b$  un coefficient déterminé expérimentalement.

La figure montre qu'à 105°C la perméabilité intrinsèque du BHP est nettement inférieure à celle d'un BO. Par contre, elle augmente plus rapidement avec la température pour le BHP que pour BO. A 350°C, le BHP a une perméabilité équivalente à celle du béton ordinaire.

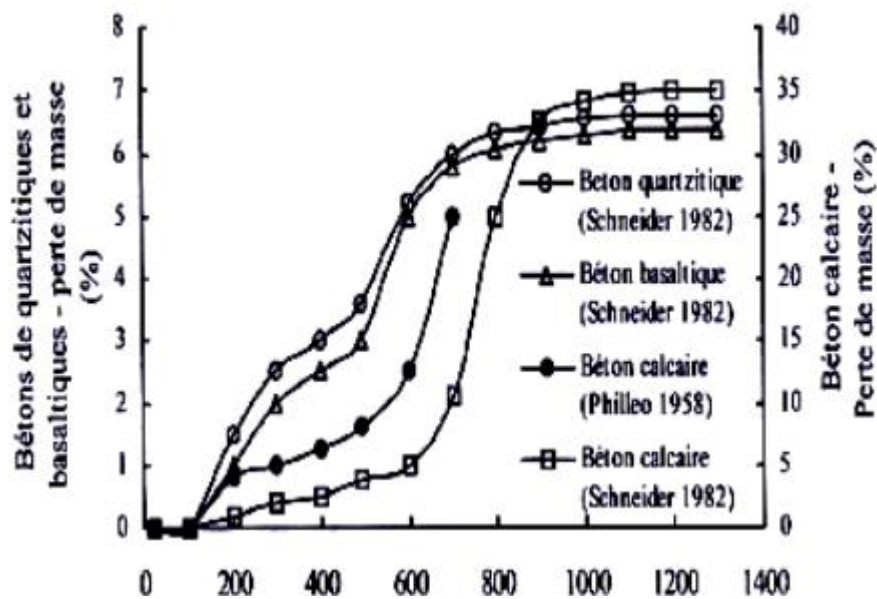


**Figure I.14.** Perméabilité apparente au gaz en fonction de la température de conditionnement [46].

### I.4.2.3. Perte de masse

Durant l'échauffement du béton, sa masse est soumise à une variation due à l'évaporation de l'eau et la déshydratation progressive du gel CSH.

La figure I.15 regroupe les résultats d'analyses thermogravimétriques (ATG), menées par différents auteurs sur des bétons comprenant différents granulats. Globalement on observe entre 20°C et 200°C une perte de masse due à l'eau libre, entre 200 et 500°C une perte de l'eau liée chimiquement et au-delà de 500°C une perte liée aux dégradations chimiques des différents types de granulats [7].



**Figure I.15.** Perte de masse des bétons de différents types de granulats en fonction de la température [7].

La perte de masse est plus importante dans un béton ordinaire (BO) que dans un béton à haute performance (BHP). En effet, le ratio E/C est de l'ordre de 0.5 pour un BO contre 0.3 pour un BHP.

La perte de masse d'un béton se résume en trois domaines dont les limites varient suivant les auteurs :

- de la température ambiante à 120°C (150°C) : une faible variation de masse s'observe. Ce premier domaine marque le départ de l'eau libre des capillaires, [47],
- de 120°C (150°C) à 300°C : l'augmentation de la perte de masse est beaucoup plus rapide. Ce domaine est caractérisé par le départ de l'eau liée dans les hydrates et principalement du gel de C-S-H. C'est dans ce domaine que le taux



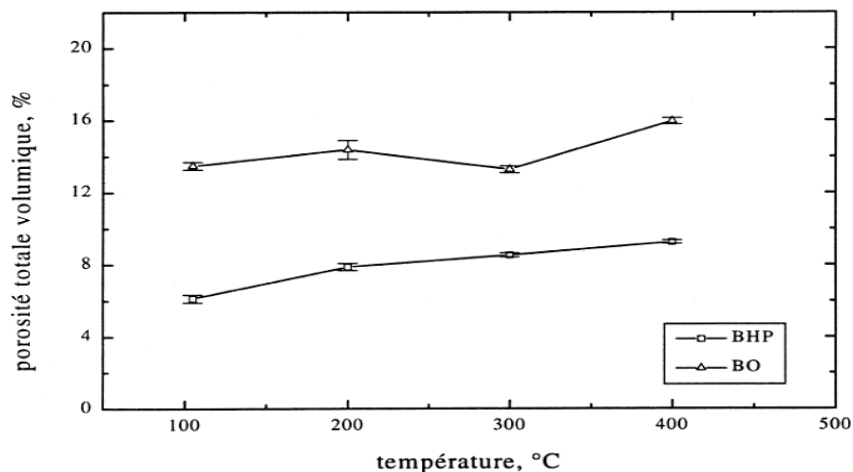
de séchage passe par un maximum correspondant à la fin de la migration de l'eau évaporable [47], [10],

- au-delà de 300°C : la vitesse de perte de masse diminue. La diminution de la masse continue à cause de la déshydroxylation de la portlandite et de la décarbonatation du carbonate de calcium [47], [42], [10].

#### I.3.2.4. Evolution de la porosité

La déshydratation reste un de phénomènes majeurs durant l'échauffement de la pâte de ciment. Elle change les hydrates en anhydres. Le volume des anhydres qui se créent est inférieur à celui des hydrates de départ. Ceci entraîne une augmentation de la porosité du système. La porosité totale augmente et la taille caractéristique des pores change [10].

Noumowé et al. [48] ont montré une augmentation de la porosité au mercure à 300°C avec un accroissement de la taille des pores. Pour Ye et al. [49], la porosité totale et la distribution des pores évoluent plus sur les pâtes de ciment des bétons à haute performances que celles des bétons ordinaires. Les travaux de Gaweska [10] confirment l'augmentation de la porosité en fonction de la température. Cependant, Gaweska note une croissance rapide avant 180°C puis une évolution progressive jusqu'à la température de 600°C. A 180°C, la porosité relative du BO augmente de 57% et celle du BHP de 98%. A l'inverse pour Kalifa et al. [50], la valeur de la porosité à l'eau évolue très peu entre 105°C et 400°C. Elle augmente de 2.3% pour le BO et de 0.9% pour le BHP. Tsymbrovska observe l'évolution de la porosité totale à l'eau avec la température. Quel que soit le béton considéré, la tendance est identique, la porosité augmente régulièrement jusqu'à 450°C, puis de façon plus importante à partir de cette température. Cette évolution est attribuée à la détérioration de la pâte et de l'interface granulats/pâte, puis à la déshydratation de la Portlandite [51].



**Figure I.16.** Évolution de la porosité totale d'un béton ordinaire ( $R_c=36$  MPa) et d'un béton à haute performance ( $R_c=110$  MPa), d'après [51].

## **I.5. EFFET DE LA TEMPERATURE SUR LE COMPORTEMENT MECANIQUE DES BETONS**

Le béton subit de fortes modifications physico-chimiques qui influencent l'évolution de ses propriétés mécaniques avec la température. Les résultats obtenus de différentes investigations sur le comportement du béton chauffé, interprètent différemment les évolutions de ces paramètres.

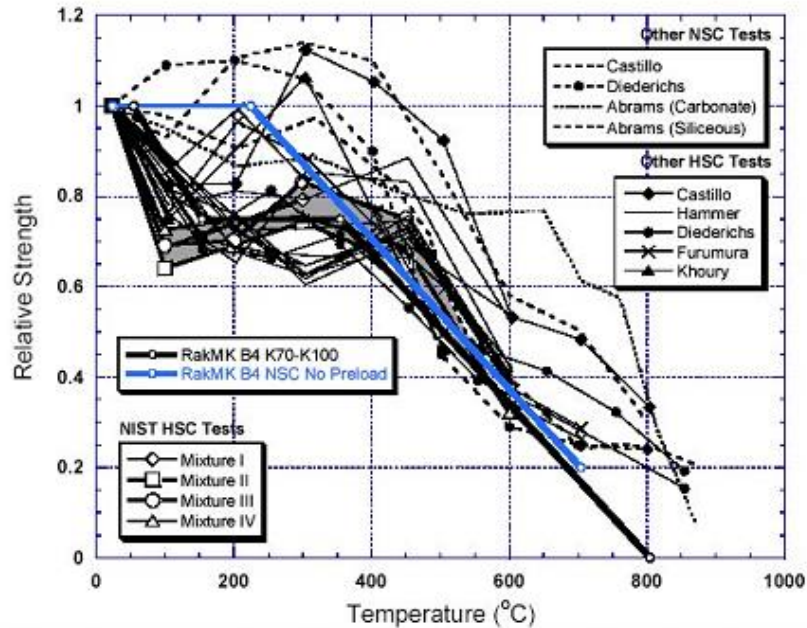
Ces différences ne sont pas dues seulement à la nature et au type du béton mais aussi aux conditions expérimentales comme : la durée et le taux de chauffage et de refroidissement, la géométrie des éprouvettes.....

Les recherches menées jusqu'à présent sur les bétons à haute température ont visé principalement, l'amélioration de ses performances mécaniques à l'état durci aussi bien qu'à l'état frais. En revanche l'amélioration de ses performances vis-à-vis du comportement au feu reste un champ d'investigation assez peu développé.

### **I.5.1. Résistance en compression à hautes températures**

L'évolution de la résistance en compression en fonction de la température a été le sujet de plusieurs investigations expérimentales. Cette évolution est affectée par de nombreux paramètres : nature du liant et des granulats, rapport agrégat/ciment, rapport E/C [40].

Phan [52] dans ses travaux, rassemble les résistances en compression résiduelles obtenues au cours de ses essais et une partie des résultats obtenus par d'autres chercheurs. L'allure générale des courbes débute par une chute de résistance au voisinage de 100 à 150°C, suivi d'un accroissement de résistance entre 300 et 350°C, puis d'une chute de résistance continue avec la température au-delà de 350°C.



**Figure I.17.** Evolution de la résistance en compression relative des bétons avec la température [52].

Khoury [41] attribue la baisse de résistance enregistrée entre 100-150°C à un gain de fluidité de l'eau qui à ces températures a pour conséquence de réduire les forces de liaison entre les couches de C-S-H. Cette réduction d'énergie de surface entre gels développe éventuellement des groupes silanols (Si-OH HO-Si) qui ont la particularité de présenter des forces de liaison faibles.

D'après Dias [53] et Cast [54], le gain de résistance vers 300-350°C est dû à une augmentation des forces de liaisons entre hydrates et à un accroissement des énergies de surface. Les bétons à hautes performances (BHP) présentent un gain plus marqué et décalé vers les hautes températures par rapport aux bétons ordinaires (BO).

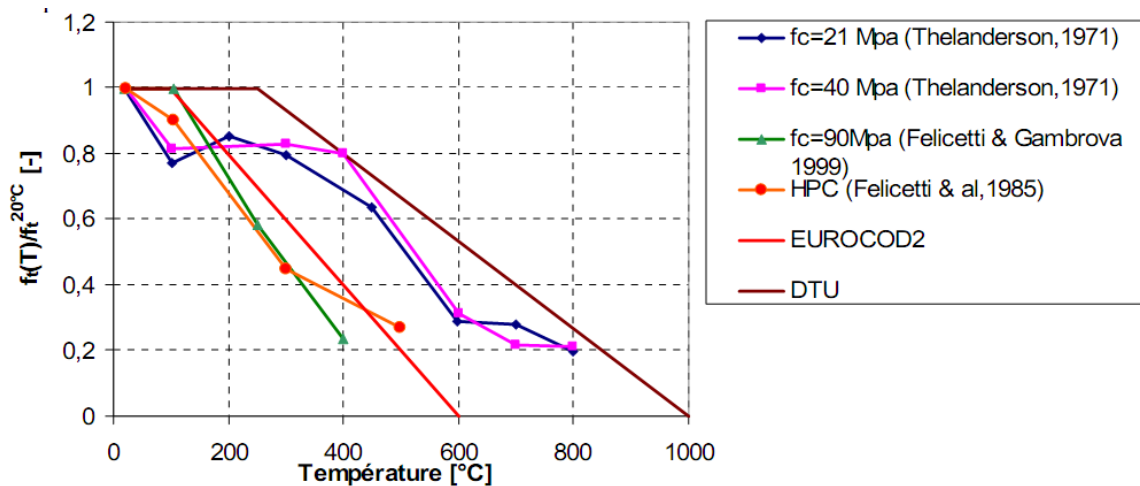
La raison de la baisse de résistance du béton est souvent attribuée à une modification de la microstructure de la pâte de ciment par déshydratation. Cette réaction de déshydratation étant chimiquement irréversible, la chute de résistance du béton est liée au degré d'hydratation de la matrice cimentaire. Cette explication est à nuancer dans la mesure où le clivage qui transforme le quartz  $\alpha$  en quartz  $\beta$  dans des granulats siliceux à 573°C fragilise le granulat et peut entraîner également une chute des résistances mécaniques du béton [55].

### I.5.2. Résistance en traction à hautes températures

Peu de recherches ont été faites pour déterminer la résistance à la traction à hautes températures, vu la complexité de la réalisation des essais. La plupart des observations, de

l'évolution de la résistance en traction en fonction de la température, sont réalisées après le refroidissement par fendage (Thelandersson [56], Noumowé [47].).

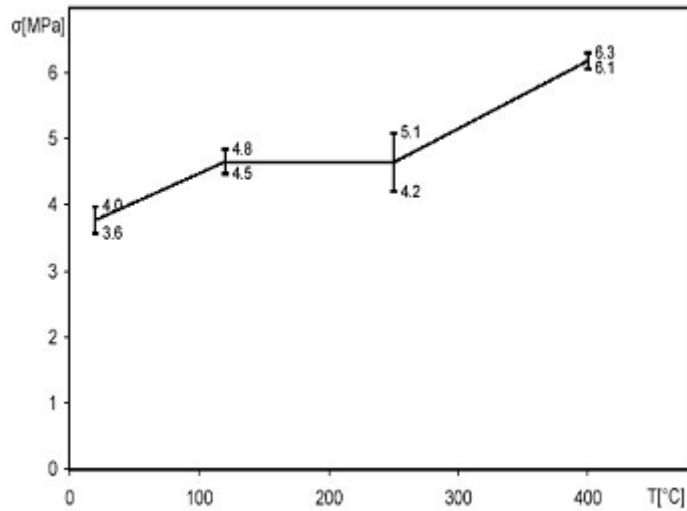
Sur la Figure I-18, on présente les résultats de traction directe à chaud obtenus par Thelandersson [56], Felicetti & al [58] et Felicetti & Gambarova [59]. Comparés avec les valeurs proposées par l'EUROCODE 2 et le DTU Feu-Béton.



**Figure I.18.** Résultats des essais de résistance en traction relative obtenus par [56], [57] et [58] comparés à ceux de la DTU et EUROCODE 2.

Toutes les valeurs déterminées se situent au dessous de celle du DTU. A partir de ce graphe, comme pour la variation de la résistance en compression, la résistance en traction chute avec l'élévation de la température. En effet, la résistance en traction du béton avec la température est affectée par les mêmes paramètres que pour la résistance en compression (nature du liant et des granulats, teneur en eau, vitesse de chauffage...). Par ailleurs, Harada & al. [59] affirment que, par rapport à la résistance en compression, la diminution de la résistance en traction est très marquée.

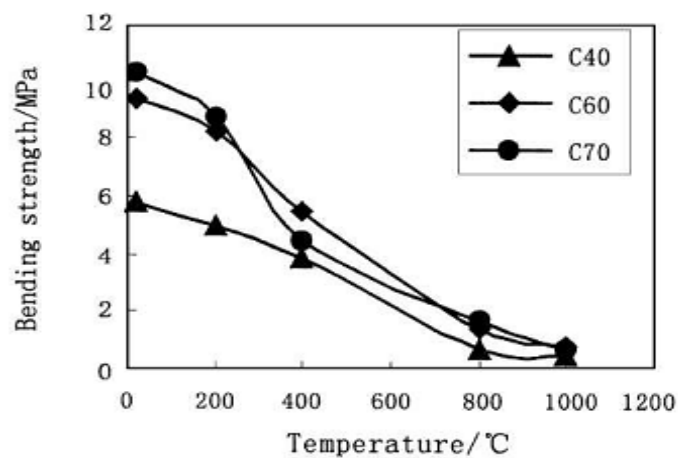
Gaweska [10] a effectué des essais de traction directe durant le cycle thermique à la fin de la période de stabilisation du palier de température sur un BHP (100 MPa). Elle observe que la résistance à la traction obtenue « à chaud » à 120°C, 250°C et 400°C est supérieure à celle déterminée à 20°C (figure I-19). Ces résultats semblent corroborer ceux de Khoury [60] obtenus par des essais de flexion à haute température.



**Figure I.19.** Evolution de la résistance à la traction à chaud d'un béton à hautes performances [10].

Les essais menés par Chang [61] sur la résistance résiduelle à la traction normalisée montrent une diminution de cette dernière avec la température. Ils soulignent que la baisse de résistance en traction est beaucoup plus rapide que celle de la résistance en compression, pour des températures supérieures à 400°C. Il apparaît, au vu de ses résultats, que la résistance en traction initiale des bétons n'a aucune incidence sur l'évolution de la résistance avec la température.

Min Li [62] note que sur la résistance résiduelle à la traction par fendage est plus sensible aux effets de la fissuration que la résistance résiduelle à la compression. Il indique également que la baisse de résistance des pâtes à hautes performances est beaucoup plus rapide que celles des pâtes ordinaires dans la plage de température comprise entre 200 et 400°C (figure I.20).



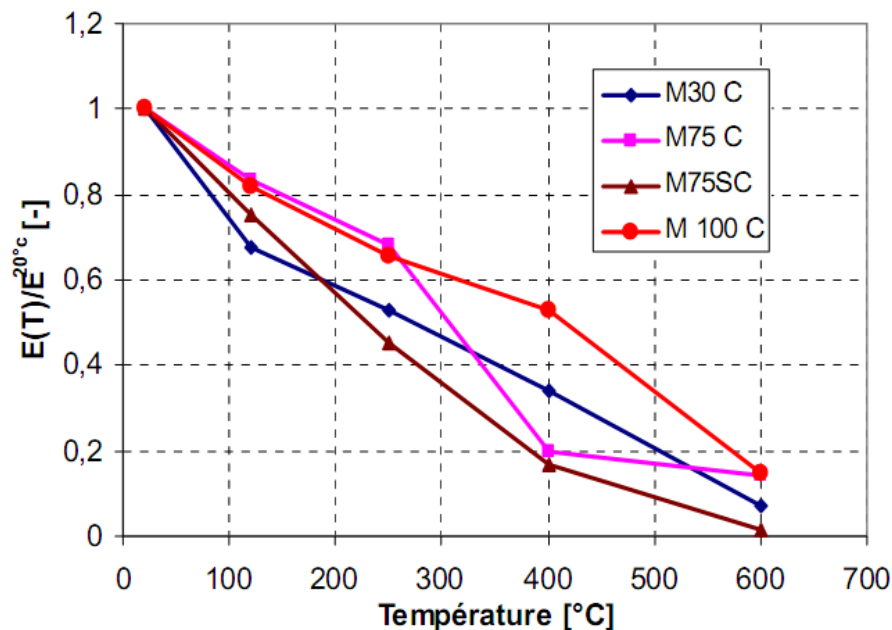
**Figure I.20.** Evolution de la résistance résiduelle à la traction des pâtes de ciment avec la température [62].

### I.5.3. Module d'élasticité à hautes températures

Ce module traduit l'évolution de la rigidité du béton avec la température. La perte de l'eau évaporable au dessous de 100°C du béton a tendance à faire augmenter la résistance en compression et diminuer le module d'élasticité. La chaleur affecte similairement le module d'élasticité et la résistance du béton au dessus de 100°C. De nombreuses études expérimentales montrent une diminution graduelle du module élastique en compression avec la température (Noumowé [47], Tolentino [63], Gaweska [10]).

Noumowé [47] a effectué des essais de module d'élasticité résiduel, après un chauffage à 150°C, 300°C, 450°C et 600°C sur un béton ordinaire (38,1 MPa) et sur un béton à hautes performances (61,1 MPa). Il constate que la baisse du module d'élasticité des deux bétons s'effectue de manière linéaire avec l'augmentation de la température et que la courbe d'évolution du module élastique résiduel du BHP reste très proche et semble similaire à celle du béton traditionnel. Sabeur [64] aboutit à la même constatation pour des mesures de module d'élasticité réalisé à chaud

Gaweska [10] a noté une décroissance du module d'élasticité relatif entre 20°C et 600°C sur trois BHP M100C, M75C, M75SC et un BO M30C comme montre la figure I.21. Les valeurs du module d'élasticité à 600°C sont inférieures à 15%. La plus faible valeur est celle du M75SC (moins de 2 %). Gaweska conclut aussi que le rapport E/C n'a aucune influence sur l'évolution du module d'élasticité avec la température



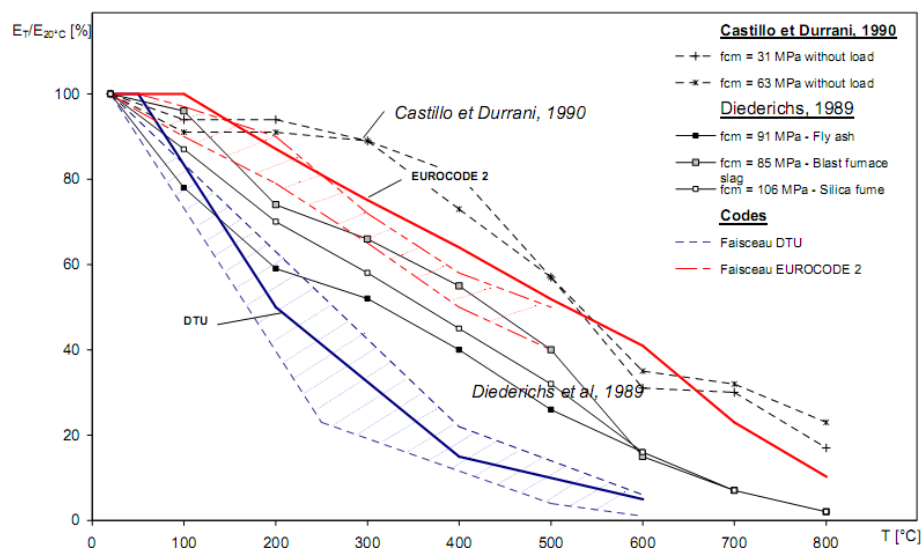
**Figure I.21.** Evolution du module d'élasticité relatif pour les bétons M30C, M75C, M75SC, M100C [10].

La comparaison du module d'élasticité mesuré à chaud et en résiduel effectuée par Gaweska [10] indique une diminution plus importante du module d'élasticité résiduel au-delà de 120°C. La différence entre les deux types d'essais semble croître avec l'augmentation de la température. Le gradient thermique additionnel induit durant la période de refroidissement et la réaction de réhydratation expansive de la chaux CaO semblent être à l'origine d'une fissuration additionnelle du matériau.

Les variations du module d'élasticité avec l'augmentation de la température dépendent principalement de la microstructure de la pâte de ciment (augmentation de l'endommagement du matériau par la déshydratation et la fissuration de la matrice) et traduit l'évolution de la rigidité du béton avec la température. Ainsi, avec l'élévation de la température, on assiste à la rupture de liaisons internes qui entraînent une diminution du module d'élasticité avec un matériau de plus en plus déformable [28].

Pour Kanéma le module d'élasticité diminue de manière continue à partir du cycle de 150°C. L'auteur obtient une baisse de plus de 98% de la rigidité initiale à un chauffage de 600°C. Il conclut donc qu'après 600°C, les éprouvettes de bétons testées ne présentent plus une rigidité significative. Tolentino [63] explique la baisse de rigidité des bétons portés à une température élevée par l'augmentation des volumes poreux dans le béton.

Les modules d'élasticité déterminés par Diederichs et al [65] sur les trois BHP et par Castillo et Durrani [54] sur le BHP et le béton ordinaire sont portés sur la figure I.22. Les valeurs du DTU sont également données sur la même figure.



**Figure I.22.** Modules d'élasticité en fonction de la température d'exposition; la zone grisée indique les valeurs expérimentales prises en compte pour l'établissement du DTU (les courbes extrêmes représentant déjà des moyennes d'après leurs auteurs).

Il est clair, qu'au-delà de 200°C, les modules d'élasticité déterminés sont supérieurs à ceux obtenus par Diederichs. Les deux séries de courbes restent cependant supérieures à celles du DTU. Les différences sont importantes sur une grande plage de température. Elles sont maximales à T = 400 °C et comprises entre 20 et 70 %. Seule une valeur déterminée à T = 100°C sur le BHP de cendres volantes se situe environ 5 % au-dessous de la courbe du DTU

## **I.6.COMPORTEMENT AU FEU DU BETON A HAUTE PERFORMANCE : ECLATEMENT ET ECAILLAGE DU BETON**

### **I.6.1. Phénomène d'éclatement et d'écaillage du béton**

Quand un béton est chauffé, deux phénomènes proches peuvent conduire à la perte de matière: l'écaillage et l'éclatement. Ces deux termes peuvent être définis assez précisément.

**1. L'écaillage :** c'est la rupture des couches ou des pièces proches de la surface d'un élément de structure en béton lorsqu'il est soumis à une haute et rapide augmentation de la température. Harmathy [66] est le premier à avoir tenté d'expliquer le phénomène d'écaillage du béton. Il considère la présence des forts gradients thermiques et le développement de pression de vapeur d'eau comme les deux principales causes de l'écaillage du béton. En effet lorsque le béton est sollicité thermiquement à haute température, la vapeur d'eau se déplace vers les surfaces froides et se condense. Les pores se remplissent alors d'eau sous forme liquide qui migre vers les régions froides. La migration est rendue difficile par la condensation alors que de plus en plus de vapeur essaie de se déplacer. Ces pressions de vapeur associées aux fortes contraintes thermiques aboutissent à l'apparition du phénomène d'écaillage. La figure I.23 illustre ce mécanisme d'écaillage.



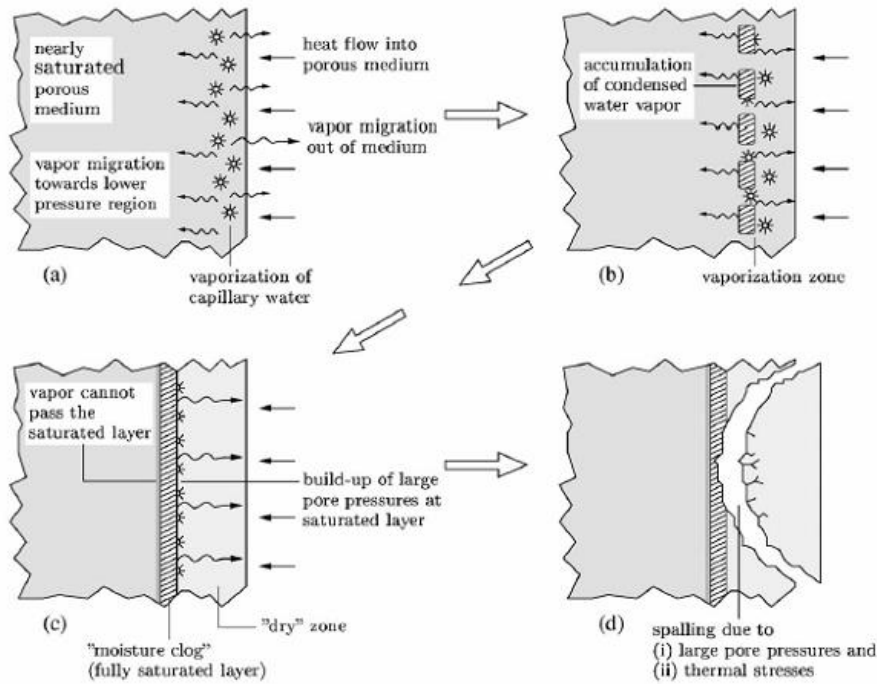


Figure I.23. Mécanisme d'écaillage du béton [67].



Figure I.24. Ecaillage lors de l'incendie du tunnel mont blanc.

**2. L'éclatement :** c'est la soudaine désintégration de l'élément de structure en béton qui s'accompagne d'une libération d'une grande quantité d'énergie en projetant des morceaux de béton à grande vitesse dans toutes les directions [68]. L'éclatement est la résultante de processus thermiques, hydriques et mécaniques couplés et éventuellement concurrents, impliquant un grand nombre de paramètres, tant à l'échelle du matériau qu'à celle de l'élément de structure. De ce fait le comportement à l'éclatement présente un caractère stochastique, comme en témoignent les essais au feu : dans des conditions expérimentales identiques, seulement une partie des éléments de structures testées présentent de l'éclatement.

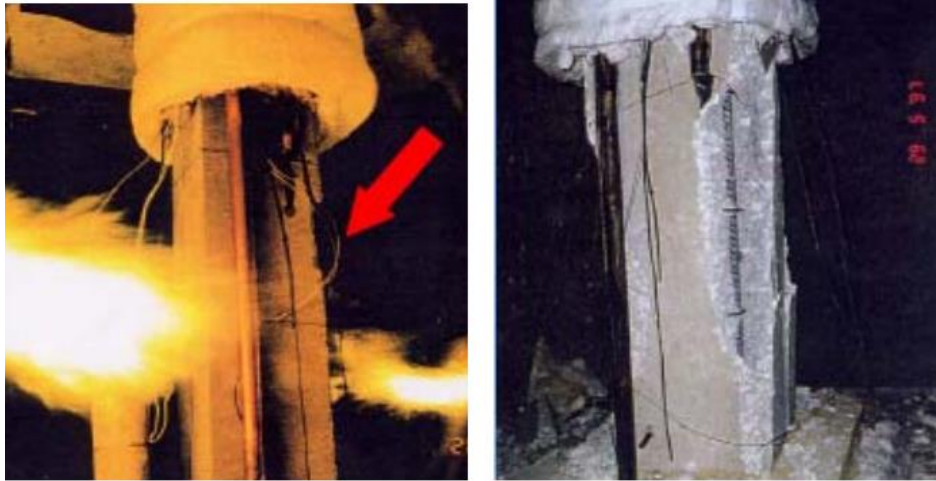


Figure I.25. Eclatement d'un poteau durant l'essai au feu.

### I.6.2. Mécanisme du phénomène

Les premières mentions concernant l'éclatement des bétons datent des années soixante. Les observations du comportement des bétons à haute température menées par Harmathy (1965) [69] ont montré que les matériaux chauffés pouvaient présenter, dans certains cas, un comportement explosif. Deux principales raisons de l'éclatement ont été attribuées premièrement aux effets du gradient thermique et la formation de pressions de vapeur d'eau dans le matériau. Ce n'est qu'en 1984 que Hertz [70], en étudiant les propriétés de bétons à haute performance (120 MPa et 170 MPa) soumis aux températures élevées a observé une forte sensibilité de ces bétons à l'éclatement.

Plusieurs études menées sur ce sujet, notamment, par [71], [72], [73] ont permis de recenser cinq principaux paramètres augmentant la probabilité d'apparition du phénomène. Ces paramètres sont :

1. **faible porosité** : cette caractéristique a été citée comme un paramètre principal d'éclatement. La porosité faible (caractéristique principale des BHP), entraîne une faible perméabilité et par conséquent un transfert de masse plus difficile.
2. **contrainte thermique** : notamment dues aux gradients thermiques provoqués notamment par l'échauffement rapide avec les vitesses de montée en température très importantes, ou l'échauffement des éléments asymétriques. Ces facteurs entraînent les gradients thermiques et hydriques plus importants ainsi que des états de contraintes qui favorisent l'éclatement.

**3. présence de l'eau et apparition des pressions internes:** l'eau présente dans le matériau est considérée comme la raison principale de l'éclatement. Les travaux de Harmathy ont montré que le comportement explosif commence à partir d'une certaine teneur en eau du matériau. Les sources [71] et [74] citent 3-4% de la teneur en eau (massique) comme une valeur au-dessus laquelle la possibilité d'éclatement est très forte. Il a été observé que l'éclatement n'apparaît pas si le matériau est sec, même en condition de présence d'un fort gradient thermique. L'eau libre contribue fortement à l'apparition des pressions internes de vapeur d'eau. L'augmentation des pressions de vapeur d'eau dans le matériau est l'une des principales raisons de l'éclatement. Dans le travail de Hertz, 1984 [70] le mécanisme de l'éclatement due à l'apparition des pressions de vapeur d'eau est comparé au mécanisme de travail du canon à vapeur « Architrone » de Léonard de Vinci.

**4. présence de la charge mécanique** notamment de la précontrainte qui favorise, dans certains cas, l'éclatement.

**5. déformations thermiques empêchées :** Ulm et al. [75] a montré que la dilatation thermique empêchée, génère des contraintes internes en compression dans la direction parallèle à la surface soumise au feu. Selon ces auteurs, c'est cette compression qui provoque la fissuration, tandis que les pressions internes dans la structure ne jouent qu'un rôle secondaire en influençant l'éclatement après localisation des déformations. Cette hypothèse est cohérente dans le sens où les BHP présentent un risque d'écaillage plus élevé que le béton ordinaire à cause de leur faible ductilité en compression.

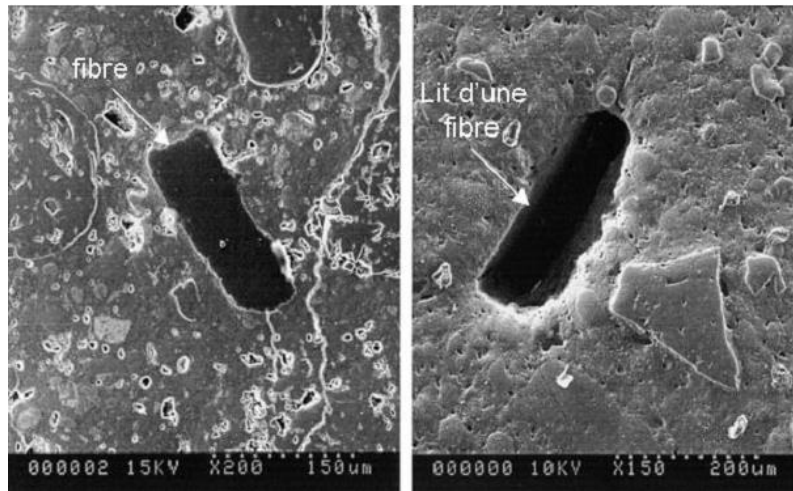
### **I.6.3. Moyens de prévention de l'éclatement**

#### **I.6.3.1. Fibres de polypropylène**

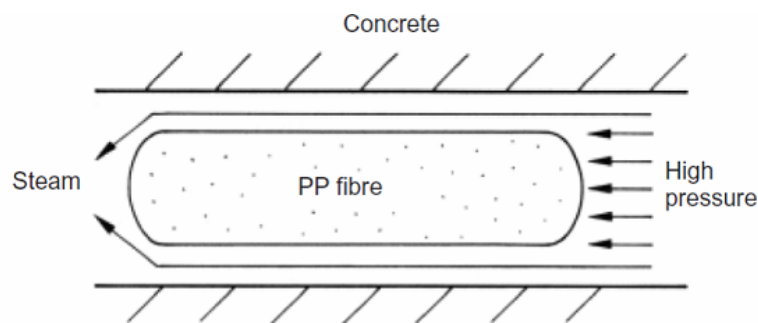
L'addition de fibres polypropylène est recommandée par l'EUROCODE 2 comme moyen permettant la réduction des risques d'éclatement des BHP, lorsqu'ils sont soumis au feu.

Les fibres de polypropylène utilisées fondent durant le chauffage à une température d'environ 170 °C [76; 77], soit une température inférieure à celles généralement rencontrées au moment de l'éclatement. Des expériences ont montré [78] que les fibres ainsi fondues étaient absorbées par la pâte de ciment durcie (Figure I.26). Un vide est par conséquent créé à l'endroit initial de la fibre, offrant un volume supplémentaire à la vapeur d'eau pour circuler. D'après [79], la fibre n'a pas besoin d'être entièrement fondue pour procurer un nouveau chemin aux gaz du fait de la mauvaise adhésion entre la fibre et la matrice cimentaire (Figure I.27)

Les fibres sont employées en quantité de 0.1% à 0.2% du volume du béton. Ceci correspond à une quantité couramment employée dans le but de la prévention de l'écaillage.

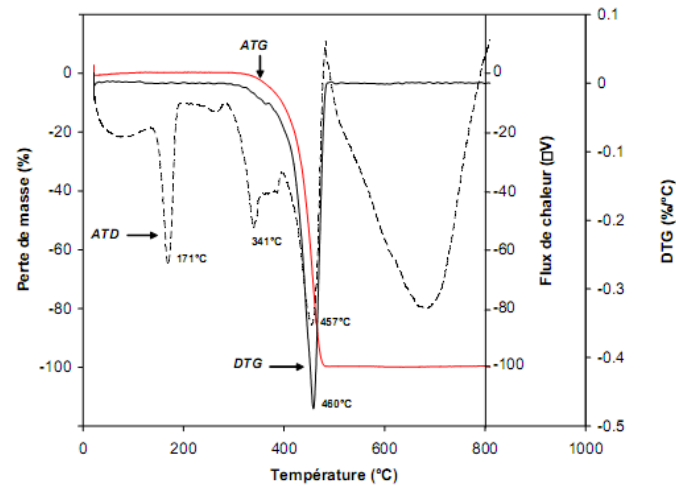


**Figure I.26.** Observation au MEB d'une fibre de polypropylène dans un échantillon de béton à 20 °C (cliché de gauche) puis après chauffage à 200 °C (cliché de droite). La fibre n'apparaît plus après le cycle de chauffage [78].



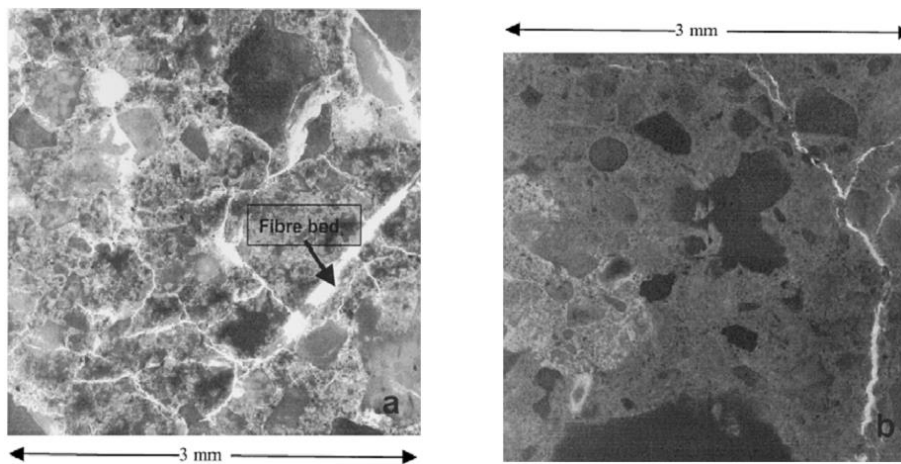
**Figure I.27.** Représentation simplifiée du passage de la pression de vapeur autour d'une fibre de polypropylène du fait de sa faible adhérence avec le squelette solide [79].

Sur la figure I.28, représentant l'analyse thermique différentielle des fibres polypropylène, les pics sur la courbe correspondent au: point de la fusion (171°C), à la température d'évaporation (341°C), et de carbonatation (457°C). Les fibres fondent à 171°C et sont absorbées totalement ou partiellement par le réseau poreux de la matrice cimentaire. A 341°C le polypropylène se vaporise. Rappelons que les éclatements se produisent à des températures comprises entre 190-260°C. L'incorporation des fibres diminue significativement les valeurs des pressions et diminuent la température de l'apparition des pics de la pression (180-200°C).



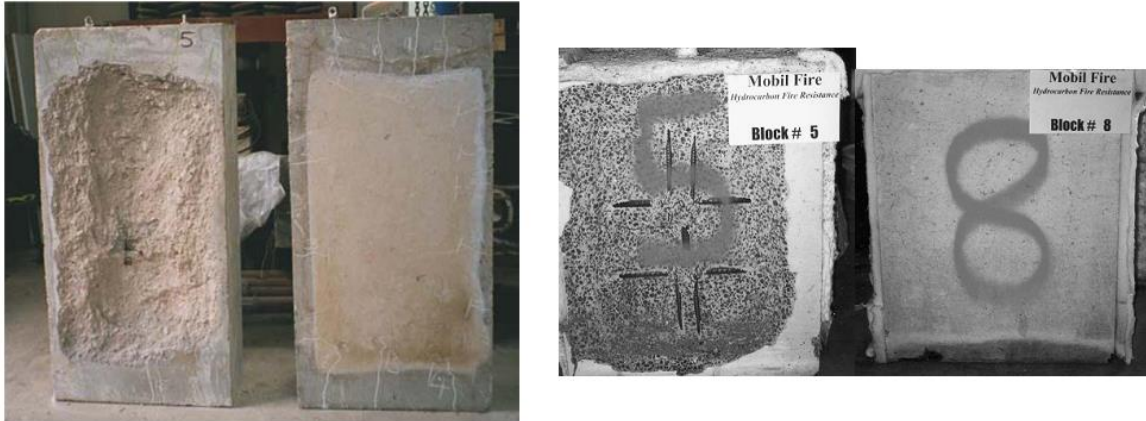
**Figure I.28.** Les courbes ATD et DTG pour les fibres polypropylène [80].

La fonte des fibres s'accompagne également de fissures (observations au MEB, Figure I.29). Ceci peut s'expliquer par le fait que les fibres se dilatent de 10% en fondant, ce qui peut générer des contraintes et par la suite une formation de fissures [78].



**Figure I.29.** Observation en épifluorescence d'un béton fibré (à gauche) et non fibré (à droite) après chauffage à 400 °C selon Kalifa et al. [78]. Les zones les plus claires correspondent aux fissures.

L'étude [81] a montré que l'utilisation des fibres en quantité d'environ 0.2 % du volume permet de réduire efficacement les pressions internes. L'ajout de 1.75 kg/m<sup>2</sup> entraîne une réduction de 70% de la valeur de la pression maximale observée au cours d'essais sur un béton de référence sans fibres. Il a été noté que l'effet des fibres n'augmente pas significativement lorsque le taux des fibres est supérieur à 1.75 kg/m<sup>3</sup> [80], [81] et [82]. La Figure I.30 met en évidence le rôle favorable de l'ajout de fibres de polypropylène.



**Figure I.30.** Deux illustrations expérimentales de l'efficacité de fibres de polypropylène vis-à-vis du risque d'instabilité thermique du béton (pour chaque photo, à gauche formulation sans fibres, à droite formulation avec fibres) [83] et de [84].

### I.6.3.2. Protection thermique

La protection thermique est une protection rapportée sur l'ouvrage, dont le rôle est de limiter la température et les gradients thermiques au sein du béton. Il s'agit généralement de plaques d'isolant performant, fixées sur les parties de la structure potentiellement exposées au feu [85]. Nous pouvons citer par exemple l'emploi de silicate de calcium sous forme de plaques fixées au béton (Figure I.31). Une telle solution nécessite du temps pour son installation et peut s'avérer onéreuse si la structure à protéger est très longue.



**Figure I.31.** Installation d'une protection thermique rapportée sur la dalle d'un tunnel.

## **I.7. CONCLUSION**

L'objectif de ce premier chapitre a été de faire la synthèse des résultats expérimentaux et des connaissances existantes mettant en scène l'évolution du comportement du béton à haute température. Ainsi nous avons pu voir que lorsque le béton est soumis à une haute température, il se produit une déstructuration de la pâte de ciment et des granulats qui affecte directement les propriétés mécaniques et de transfert du matériau. La perte des propriétés mécaniques est fortement liée au départ de l'eau et aux réactions de déshydratation source de l'évolution de la microstructure. Cette transformation structurelle de la matrice cimentaire se traduit par une augmentation de la taille caractéristique, par une évolution du volume poreux et par un accroissement de la perméabilité. Parmi les paramètres influençant significativement le comportement thermique et hydrique du béton à haute température figure l'eau. Sa quantité dans le matériau dépend du rapport E/C initial et du degré d'humidité relative. Cette eau est présente dans la matrice cimentaire sous forme d'eau libre, d'eau adsorbée et d'eau chimiquement liée aux hydrates de ciment. Durant l'augmentation de la température, cette eau s'échappe du matériau en commençant par l'eau libre faiblement liée, puis progressivement à la déshydratation du gel de C-S-H. L'eau présente sous forme liquide et celle présente sous forme vapeur modifient significativement les propriétés thermiques du matériau, notamment dans le cas des bétons à hautes performances où l'augmentation de la pression de vapeur semble contribuer à l'apparition du phénomène d'écaillage et /ou d'éclatement.

Ainsi, lors de la montée en température, l'eau présente dans les pores et dans les hydrates s'échappe du béton, et entraîne la déstructuration de la matrice. Celle-ci se traduit sur le plan macroscopique par une modification de la résistance en compression, de la résistance en traction, du module d'élasticité, une perte de densité et une augmentation de la perméabilité. En observant le paramètre de confection tel que le rapport eau sur ciment, il apparaît à la vue des résultats qu'il n'a que peu d'importance sur l'évolution des propriétés mécaniques des bétons à haute température, alors qu'il intervient de manière très sensible dans l'évolution de la perméabilité et l'apparition du phénomène d'éclatement.



## **CHAPITRE II**

# **CARACTÉRISATION DES MATÉRIAUX ET FORMULATION DES BÉTONS À HAUTE PERFORMANCE**



## II.1. INTRODUCTION

Nous présentons dans ce deuxième chapitre, les caractéristiques physiques et chimiques des matériaux utilisés pour la fabrication du béton à hautes performances (gravier, sable naturel et concassé, ciment, fillers de laitier granulé...).

Nous allons présenter par la suite la méthode de formulations des bétons à hautes performances et les résultats de l'influence de la nature des additions minérales et l'ajout de fibres de polypropylène sur les caractéristiques des BHP à l'état frais.

## II.2. CARACTERISATION DES MATERIAUX UTILISE

### II.2.1. Ciment

Le ciment que nous avons utilisé pour l'exécution de tous les travaux expérimentaux est un ciment Portland composé de classe CEM II/A 42.5 avec ajout de laitier granulé de haut fourneau et du 5% du gypse. Il est fabriqué par la cimenterie de Hdjar-Soud conforme à la norme européenne EN 197-1 [86] et la norme Algérienne NA 442 [87].

Les différentes caractéristiques chimiques, physiques et mécaniques du ciment utilisé sont établies aux laboratoires de l'usine et de département du génie civil. Les différents résultats obtenus sont présentés respectivement aux tableaux II.1 et II.2.

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

Minéraux	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	MnO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	Cl	CaOI
Ciment CPJ (%)	23.45	4.86	3.2	60.8	1	2.2	-	0.1	0.45	0.05	0.9

**Tableau II.2.** Caractéristiques physiques et mécaniques du ciment.

Caractéristiques physiques	unités	Ciment CPJ
Masse volumique apparente	g /cm <sup>3</sup>	1.06
Masse volumique absolue	g /cm <sup>3</sup>	3.10
Surface de Blaine	cm <sup>2</sup> /g	3480
Consistance normale	%	29
Début de prise	H /min	2/34
Résistance à la traction	MPa	7
Résistance à la compression	MPa	42.5

## II.2.2. Additions minérales

### II.2.2.1.Fillers de laitiers granulé

Le laitier granulé utilisé dans cette étude est produit par le complexe sidérurgique d'El-Hadjar conforme à la norme NF EN 15167-1 [88]. Après séchage, le laitier granulé est broyé finement à une finesse supérieure à celle du ciment dans un broyeur à boulets d'une capacité de 10 kg, la procédure est effectuée au niveau du laboratoire de Matériaux Géomatériaux et Environnement du département de génie civil.

La composition chimique et les propriétés physiques du laitier granulé sont données respectivement aux tableaux II.3.et II.4.

**Tableau II.3.** Composition chimique du fillers du laitier.

Minéraux	CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>	CL <sup>-</sup>	P.A.F
Fillers de laitier (%)	40.69	38.90	8.17	4.15	4.56	0.89	0.10	0.36	0.01	-

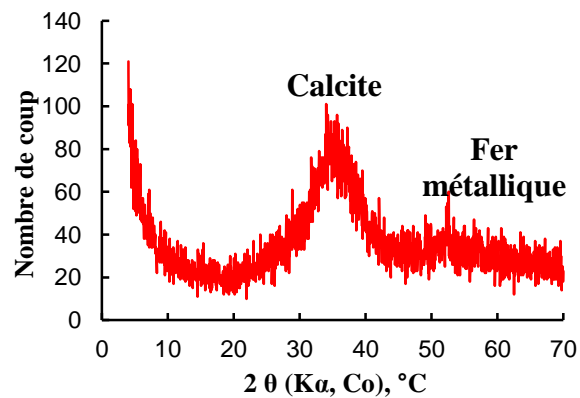
**Tableau II.4.** Caractéristiques physiques du fillers du laitier.

Caractéristiques	Unité	Fillers du laitier
Masse volumique absolue	g/cm <sup>3</sup>	2.86
Masse volumique apparente	g /cm <sup>3</sup>	1.03
Surface spécifique	cm <sup>2</sup> /g	3650

La figure II.2 illustre le diffractogrammes aux rayons X du laitier granulé qui est typique d'un matériau essentiellement vitreux. Le laitier granulé analysé présente de faibles quantités de phases cristallisées sous forme de calcite et de fer métallique.



**Figure II.1.** Filler de laitier granulé.



**Figure II.2.** Diffractogramme du laitier granulé [89].

### II.2.2.2. Fumée de silice

La fumée de silice est une addition minérale utilisée dans les bétons hydraulique conformément à la norme NF EN 13263- 1 [90]. Elle présente un matériau pouzzolanique qui joue un rôle très important durant l'évolution de la résistance mécanique et l'amélioration de la durabilité des bétons. La fumée de silice utilisée dans cette étude est le SIKACRETE HD commercialisée par la

société algérienne Sika El-Djazair, elle est fournie sous forme de poudre fine de couleur grise (Figure II.3).

La composition chimique et les propriétés physiques de la fumée de silice sont présentées respectivement aux tableaux II.5 et II.6.

**Tableau II.5.** Composition chimique de la fumée de silice.

<b>Minéraux</b>	<i>CaO</i>	<i>SiO<sub>2</sub></i>	<i>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></i>	<i>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></i>	<i>MgO</i>	<i>K<sub>2</sub>O</i>	<i>Na<sub>2</sub>O</i>	<i>SO<sub>3</sub></i>	<i>CL<sup>-</sup></i>	<i>P.A.F</i>
<b>Fumée de silice (%)</b>	<b>0.02</b>	99.01	0.03	0.05	0.01	0.15	0.04	0.001	0.009	-

**Tableau II.6.** Caractéristiques physiques de la fumée de silice.

<b>Caractéristiques</b>	<b>Unité</b>	<b>fumée de silice</b>
<b>Masse volumique absolue</b>	g/cm <sup>3</sup>	2.24
<b>Masse volumique apparente</b>	g /cm <sup>3</sup>	0.49
<b>Surface spécifique</b>	cm <sup>2</sup> /g	5000

L'analyse aux rayons X par diffraction de la fumée de silice présentée par la figure II.4 montre un matériau essentiellement vitreux, contenant de faibles quantités de minéraux cristallisés sous forme de tridymite et de cristobalite.



Figure II.3. Fumée de silice.

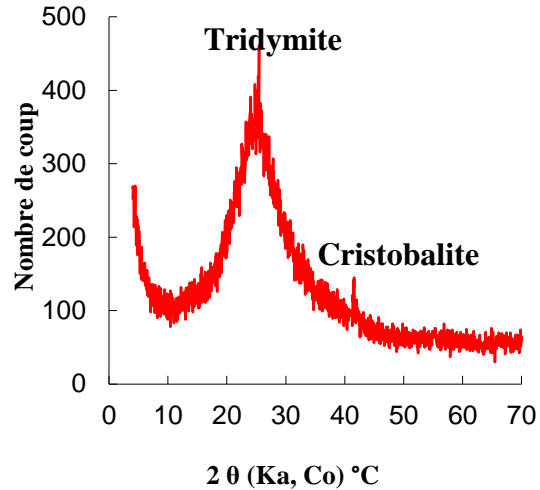


Figure II.4. Diffractogramme de la fumée de silice [89].

### II.2.3. Granulats

#### II.2.3.1. Propriétés physiques

Trois fractions granulaires sont utilisées dans cette étude, les granulats choisis sont des granulats calcaires qui présentent un bon comportement thermique jusqu'à 700°C [10] [16], à l'exception du sable roulé qui est un sable siliceux.

- Le gravier utilisé est un gravier de nature calcaire de la région d'Annaba. Il se caractérise par une granulométrie comprise entre 5 et 12.5 mm.
- Le sable de carrière utilisé est de nature calcaire, provenant de la région d'Annaba. Il est caractérisé par un module de finesse de 3.59 et de dimension (0/4) mm.
- Le sable roulé de nature siliceuse provenant de la région de Tébessa. Il se caractérise par un module de finesse de 2.31 et de dimension (0/2) mm.

Les principales caractéristiques physiques et mécaniques des granulats utilisés sont présentées dans le tableau II.7.

**Tableau II.7.** Propriétés physique des granulats.

Propriétés physiques		unité	Sable siliceux	Sable de carrière	Gravier
Dimensions d/D		mm/mm	0/2	0/4	5/12.5
Masse volumique absolue		g/m <sup>3</sup>	2.67	2.54	2.73
Masse volumique apparente		g/m <sup>3</sup>	1.48	1.40	1.38
Porosité inter granulaire		%	44.48	44.87	49.25
Equivalent de sable	Esv	%	86.54	83.69	-
	Esp		79.35	82.62	
Module de finesse		-	2.31	3.59	-
Essai Los-Angles		%	-	-	24.50

D'après le tableau II.7 on peut constater que :

- Le sable siliceux utilisé est un sable moyen avec un module de finesse de l'ordre de 2.31.
- L'essai de l'équivalent de sable montre que les sables utilisés sont des sables propres.
- Les trois fractions granulaires utilisées dans cette étude donnent un squelette granulaire continu avec un maximum de compacité.

❖ **Analyse granulométriques**

L'essai de l'analyse granulométrique est effectué selon les normes [91], [92]. Il permet de déterminer les proportions massiques des passants cumulés, à travers les tamis de différents diamètres de maille, d'un échantillon de sable ou de gravillon. Les pourcentages de passant cumulé sont représentés sous la forme de courbe granulométriques dans la figure II.5.

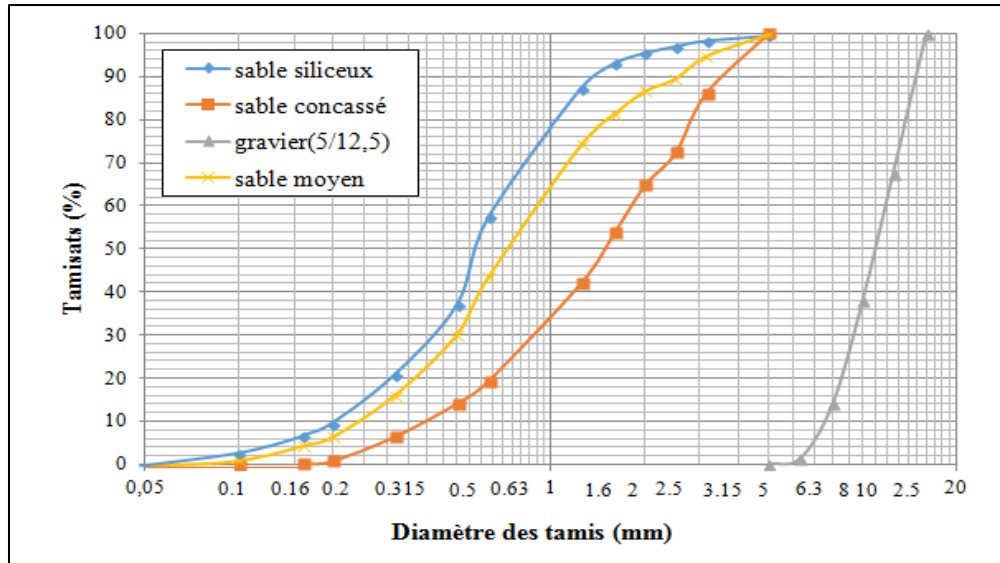


Figure II.5. Analyse granulométrique de l'ensemble des granulats.

D'après les résultats de l'analyse granulométriques on peut constater que :

- Les trois fractions granulaires utilisées dans cette étude donnent un squelette granulaire continu avec un maximum de compacité.

### II.2.3.2. Propriétés chimiques et minéralogiques

La composition chimique et minéralogique des granulats a été déterminée respectivement par une analyse chimique globale et une analyse diffractométrique aux rayons X (DRX).

#### ❖ Compositions chimiques

L'analyse chimique est effectuée sur un échantillon finement broyés (taille des grains inférieure à 63  $\mu\text{m}$ ). Les résultats sont présentés sous forme d'oxydes au tableau II.8.

Tableau II.8. Composition chimique des granulats.

Type de granulats	$SiO_2$	$Al_2O_3$	$Fe_2O_3$	$CaO$	$MgO$	$SO_3$	$K_2O$	$Na_2O$	$P_2O_5$	$TiO_2$	P.A.F
Calcaire	0.40	0.11	0.06	55.91	0.18	0.04	0	0.05	-	-	42.3
Sable siliceux	93.88	2.13	1.60	0.43	0.12	0.39	0.38	0.24	0.03	0.13	0.67

- Les résultats traduisent la domination de CaO dans le granulat de calcaire et le SiO<sub>2</sub> dans le sable siliceux.

#### ❖ Compositions minéralogiques

La diffraction aux rayons X (DRX) a été réalisée avec un diffractomètre du type Philips PW 3710 est muni d'une anticathode au *Cu* avec un filtre *Ni*, L'enregistrement pas à pas est réalisé entre 2θ de 5 et 70° et ceci pour une durée de 1h30. Les diffractogrammes ont été obtenus à partir des matériaux préalablement broyés en poudre fine.

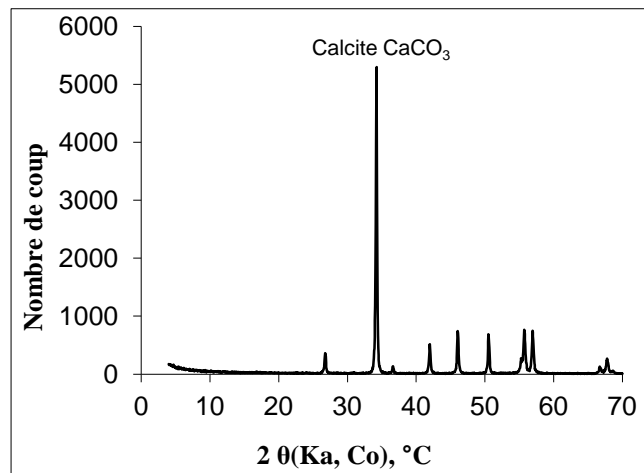


Figure II.6. Diagramme de diffraction X du Calcaire.

D'après la figure II.6 on peut constater que le calcaire pur est constitué de carbonate de calcium.

#### II.2.4. Fibres de polypropylène

Les fibres utilisées sont des fibres de polypropylène (figure II.7) commercialisées par la société algérienne *GRANITEX*. Elles sont employées dans les bétons à haute performance pour améliorer la résistance au feu de ces structures. Leurs caractéristiques techniques sont données par le fabriquant

- Longueur de la fibre ..... 12 mm
- Densité ..... 0.9
- Point de fusion ..... 150°C

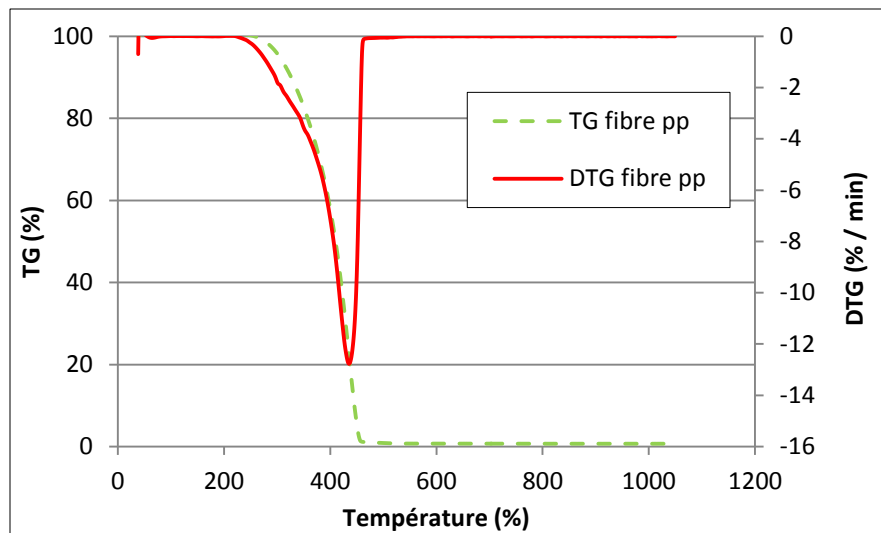


- Module de Young ..... 3KN/mm<sup>2</sup>
- Section de la fibre ..... 30 microns



**Figure II.7.** Fibres de polypropylène.

L'analyse thermogravimétrique des fibres de polypropylène (ATG) a été réalisée avec un dispositif Netzsch STA 499 F3 couplé au logiciel Netzsch Proteus Software pour le dépouillement et l'analyse en déconvolution de la courbe dérivée. Les courbes de l'ATG et DTG sont présentés dans la figure II.8.



**Figure II.8.** Courbe ATG des Fibres de polypropylène.

D'après la figure ci-dessus on peut constater un pic en alentours de la température 460 °C relatif à la perte de masse du matériau, qui est due à la combustion des fibres polypropylène [82].

### **II.2.5. Superplastifiant**

Le superplastifiant utilisé est du type VISCOCRETE TEMPO 12 haut réducteur d'eau, commercialisé par la société algérienne Sika El- Djazair, et conforme à la norme NF EN 934-2 [93]. Ses propriétés essentielles sont données par le fabricant:

- Forme..... Liquide.
- Couleur ..... Brun clair.
- PH .....  $6 \pm 1$ .
- Densité .....  $1,06 \pm 0,01$ .
- Teneur en chlore .....  $\leq 0,1 \%$ .

### **II.2.6. Eau de gâchage**

Les conditions imposées à l'eau de gâchage sont précisées par la norme NF EN 1008 [94]. Cette eau doit être propre et sans matières organiques. L'eau utilisée dans notre étude est une eau potable de robinet du laboratoire (ville de Annaba).

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

Après une caractérisation détaillée des différents constituants, nous présenterons ensuite la méthode de formulation choisie pour déterminer la composition optimale des Bétons à Hautes Performances (BHP) de notre étude. La méthode de formulation adoptée pour le mélange des constituants entrant dans la composition du béton à hautes performances est celle de l'Université de Sherbrooke élaborée par Aïtcin [95].

Cette méthode pratique et simple, il s'agit d'une combinaison des résultats empiriques et de calcul basé sur la méthode des volumes absolus. La quantité d'eau contenue dans le superplastifiant est considérée comme faisant partie de la quantité d'eau de gâchage. La procédure de formulation est illustrée sur l'organigramme ci-dessous :

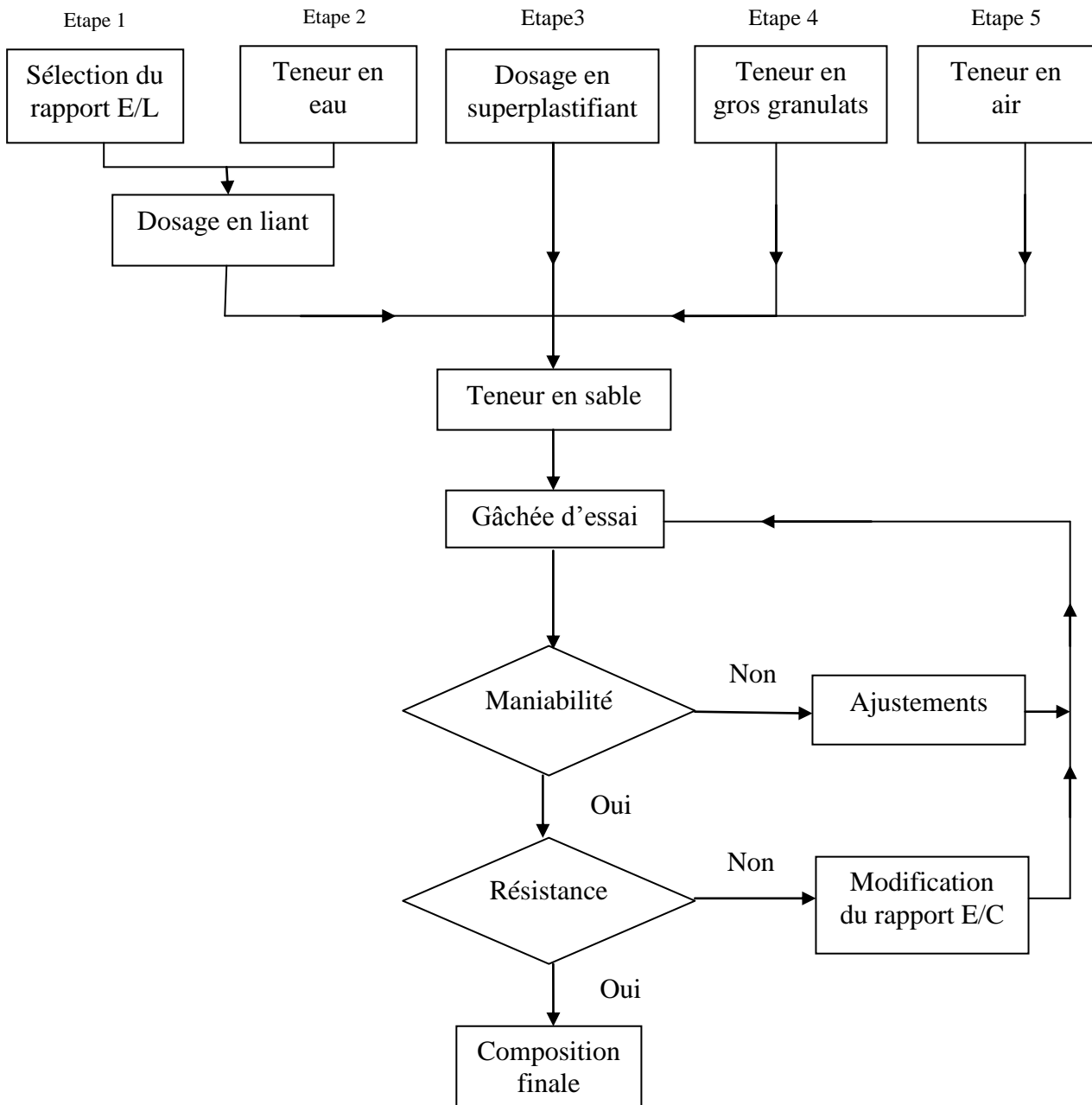


Figure II.9. Organigramme de la méthode proposée pour formuler des BHP.

Les compositions des mélanges pour un mètre cube de béton sont présentées dans le tableau II.9.

**Tableau II.9.**Composition des mélanges de béton.

Matériaux	Dosages (kg/m <sup>3</sup> )			
	BHPL	BHPLpp	BHPfs	BHPfspp
<b>Eau</b>	155	155	155	155
<b>Ciment</b>	459,26	459,26	516.67	516.67
<b>Laitier granulée</b>	114,81	114,81	-	-
<b>Fumée de silice</b>	-	-	57.41	57.41
<b>Gravier 5/12.5</b>	1050	1050	1050	1050
<b>Sable fin</b>	498,68	498,68	491.2	491.2
<b>Sable de carrière</b>	203,31	203,31	200.26	200.26
<b>Super plastifiant</b>	11,48	11,48	11.48	11.48
<b>Fibre polypropylène</b>	-	1.80	-	1,8
<b>E/L</b>	0.27	0.27	0.27	0.27

➤ **Désignation des bétons utilisés:**

**BHPL** : Béton à haute performance à base de filler de laitier granulé.

**BHPLpp** : Béton à haute performance à base de filler de laitier avec l'ajout des fibres polypropylène.

**BHPfs** : Béton à haute performance à base de la fumée de silice.

**BHPfspp** : Béton à haute performance à base de la fumée de silice avec l'ajout des Fibres polypropylène.

#### II.4. CONFECTION ET CONSERVATION DES EPROUVETTES

Le malaxage des bétons a été effectué à l'aide d'une bétonnière d'une capacité de 30 litres tout en respectant les références normatives [96] et [97]. La durée totale de malaxage est de 5 min.

Les séquences de malaxage sont décrites comme suit :

- 1 minute de malaxage à sec : introduction du gravier, sable, ciment et fillers.  
Dans le cas des bétons fibrés, les fibres de polypropylène sont ajoutées; dispersées à la main pour assuré une bonne répartition dans le mélange.
- 2 minutes de malaxage : introduction de 75% de l'eau de gâchage.
- 2 minutes de malaxage avec le reste d'eau (25%) dans lequel le superplastifiant est dissout.

La vibration a été réalisée sur une table vibrante à amplitude de vibration réglable. La durée de vibration est 30 + 30 secondes. Les éprouvettes sont démoulées après 24 heures et conservées en humidité saturante (une température avoisinant les 20 °C et un taux d'humidité qui était presque égal à 100 %) jusqu'au jour de l'essai.

Les éprouvettes étaient âgées de 7 ; 28 ; 90 jours au moment des essais. L'étude expérimentale a été menée sur des différentes formes des éprouvettes qui sont regroupée dans le tableau II.10.

**Tableau II.10.** Types et formes d'éprouvettes avec les essais réalisés.

Types d'éprouvettes	Essais réalisés
Cubiques (10x10x10) cm	– La perte de masse – résistance mécanique en compression
Prismatiques (7x7x28) cm	– Résistance mécanique en traction par flexion
Cylindriques (11x22) cm	– Module d'élasticité dynamique (essai non destructif)
Cylindriques (11x5) cm	– Porosité accessible à l'eau

## II.5. CYCLE DE TRAITEMENT THERMIQUE DES BETONS

Le traitement thermique des éprouvettes a été fait dans un four à moufle de marque *Nabertherm (P330)* (Figure II.10) avec un programmateur de température et une température maximum de 3000°C. Le volume de la chambre interne (L x H x P) est de (24.5 x 18.5 x 34.5) cm<sup>3</sup>.

La montée en température est assurée de façon proche à la courbe normalisée ISO 834 (correspondant à un feu réel) (Figure II.11). Les échantillons sont soumis à des différentes températures (20°C, 100°C, 300°C, 500°C, 700°C), une stabilité d'une heure est appliquée afin d'homogénéiser la température au sein des éprouvettes [6], [7], puis un refroidissement jusqu'à la température ambiante.

Le choix de ces températures est fait par rapport au comportement des différents composants de la matrice cimentaire:

- Entre 30 et 120°C : L'eau libre et une partie de l'eau adsorbée s'échappent du béton.
- A 300°C : La première étape de la déshydratation des CSH.
- Entre 450 et 550°C : La décomposition de la portlandite.
- Entre 600 et 700 °C : La seconde étape de la déshydratation des silicates de calcium hydratés



Figure II.10. Four à moufle (LMGE Université d'Annaba).

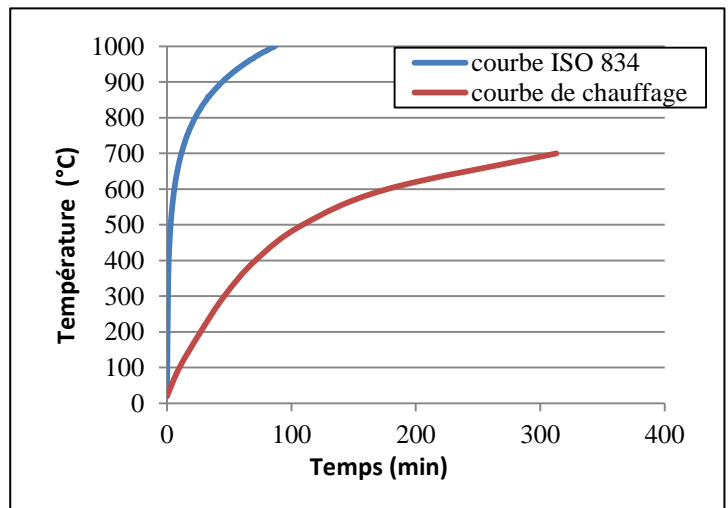


Figure II.11. Courbe de chauffage des bétons.

Tableau II.11. Durées des paliers de chauffage

Chauffage expérimental	Les paliers de température (°C)		La durée (min)
	20-100		10
	20-300		46
	20-500		109
	20-700		313

## II.6. PROCEDURES DE LA DETERMINATION DES PROPRIETES DU BETON A L'ETAT FRAIS

La caractérisation des bétons à l'état frais est obtenue en exploitant la mesure de la maniabilité, caractérisée par l'affaissement au cône d'Abrams, la masse volumique et l'air occlus.

### II.6.1. Maniabilité

L'essai d'affaissement au cône d'Abrams est l'essai le plus utilisé pour mesurer la maniabilité du béton. Cet essai est réalisé selon les prescriptions de la norme NF EN 12350-2 [98].

Il permet de déterminer la consistance d'un béton frais en mesurant l'affaissement qui n'est autre que la différence entre la hauteur du moule conique utilisé et le point le plus haut du corps d'épreuve affaissé.

Le cône utilisé est de dimensions ( $D=20\text{ cm}$ ,  $d=10\text{ cm}$  et  $h=30\text{ cm}$ ). Le cône doit être posé sur un plateau métallique horizontal légèrement humidifié au préalable comme le montre la Figure II.12. Le remplissage du cône se fait en trois couches de même hauteur, chaque couche étant piquée par 25 coups à l'aide d'une tige de piquage normalisée. Une fois rempli, le moule doit être retiré verticalement. L'affaissement  $h$  est mesuré après stabilisation de l'affaissement par l'intermédiaire d'une règle.



**Figure II.12.** Essai d'affaissement au cône d'Abrams (LMGE Université d'Annaba).

### **II.6.2. Masse volumique**

La masse volumique des bétons frais réelle a été réalisée suivant la norme NF EN 12350-6 [99]. Cette mesure consiste à peser un récipient vide et rempli de béton vibré, la différence des deux pesées divisées par le volume du récipient nous donne la masse volumique comme il est indiqué dans l'expression suivante :

$$M_v = \frac{M_{\text{rempli}} - M_{\text{vide}}}{V_{\text{récipient}}} \quad (\text{g/cm}^3) \quad \dots\dots\dots \text{II.1}$$

Où :

$M_v$  : la masse volumique du béton en  $\text{g/cm}^3$

$M_{\text{rempli}}$  : la masse du récipient rempli de béton en g

$M_{\text{vide}}$  : la masse du récipient en g

$V_{\text{récipient}}$  : volume du récipient en  $\text{cm}^3$

### **II.6.3. Air occlus**

Pour la mesure de l'air occlus dans le béton frais, on utilise la méthode de la compressibilité. Comme le seul élément compressible dans le béton frais est l'air occlus, la compression de l'air fait chuter la pression appliquée au béton frais. Cette diminution est proportionnelle à la quantité d'air présente dans le béton. Cet essai est effectué selon la norme française EN 12350-7 [100], à l'aide d'un aéromètre à béton de 8 litres de capacité comme le montre la figure II.13.

Après avoir rempli la chambre inférieure de l'aéromètre avec du béton, la chambre supérieure étant soigneusement fixée par un mécanisme étanche, on applique une pression à l'aide d'une pompe à air installée en partie supérieure du couvercle. Cette pression provoque une baisse du niveau d'eau proportionnelle à la diminution des vides d'air. L'appareil est calibré de façon à donner la teneur en air totale en % par lecture directe du niveau d'eau sur l'échelle graduée.





Figure II.13. Aéromètre à béton (LMGE Université d'Annaba).

## II.7. RESULTATS ET INTERPRETATIONS DES PROPRIETES DU BETON A L'ETAT FRAIS

### II.7.1. La maniabilité

Les valeurs de mesure de l'affaissement au cône d'Abrams sont représentées par la figure II.14.

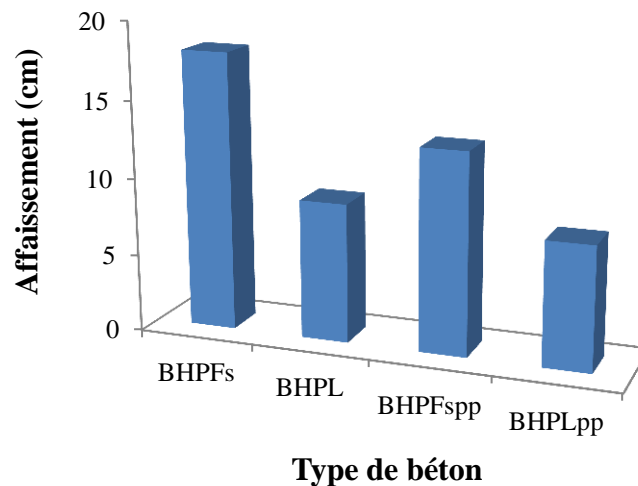


Figure II.14. Variation de l'affaissement des différents types de béton.

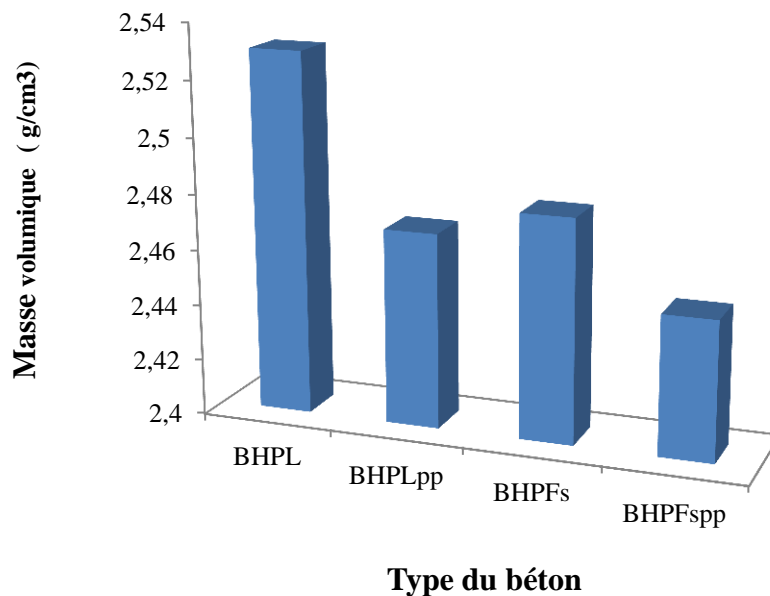
La figure II.14 montre que l'incorporation des fibres polypropylène donne une diminution de la maniabilité des bétons ( BHP Fibré) par apport au béton témoin (BHP sans fibres). Cela s'explique par l'amélioration de la cohésion du béton frais avec l'ajout des fibres de

polypropylène. Ces fibres sont caractérisées par une faible densité et des dimensions très petites, donc l'introduction des fibres de polypropylène dans les bétons ne soulève aucune difficulté et leurs répartitions se faisant facilement et ne nécessitant pas de précaution particulière lors du malaxage.

On constate aussi que les BHP à base de fumée de silice présentent une maniabilité légèrement supérieure à celle des BHP à base de laitier granulé, ceci est due à la morphologie sphériques des particules de la fumée de silice qui offre au BHP une certaine viscosité et un écoulement supérieur à celui des BHP à base de filler de laitier granulé qui présentent des formes plus au moins angulaires et une microporosité plus élevée. Cela confirme les résultats trouvés par [101] et [102].

### II.7.2. Masse volumique

Les résultats de la variation de la masse volumique des différents BHP à l'état frais sont illustrés par la figure II.15.



**Figure II.15.** Variation de la masse volumique des différents types de béton.

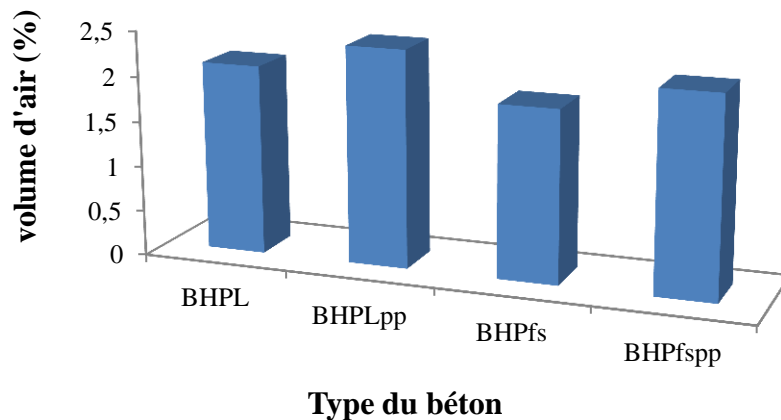
D'après la figure II.15 on constate que la masse volumique est légèrement affectée par l'addition des additions minérales et des fibres avec des valeurs relativement proches pour les différentes formulations de béton. La masse volumique des BHP avec l'addition du laitier granulé est généralement supérieure à celle des BHP à base de la fumée de silice. Cela est dû

essentiellement à la différence des masses volumiques intrinsèques des deux additions minérales, qui sont  $2860 \text{ kg/m}^3$  pour le laitier granulé et  $2240 \text{ kg/m}^3$  pour la fumée de silice.

Pour la masse volumique des BHP avec fibres de polypropylène, on constate que l'ajout de ces fibres donne des valeurs inférieures à celle des BHP témoins. Cela s'explique par la faible masse volumique intrinsèque des fibres utilisées.

### II.7.3. Air occlus

Les mesures de la quantité d'air occlus dans les différents BHP sont présentées par la figure II.16.



**Figure II.16.** Variation du volume d'air occlus des différents types de béton.

D'après les résultats obtenus on peut constater que l'introduction des fibres polypropylènes entraîne une augmentation du volume d'air. Cette augmentation est peut être dû à la forme du contour de la fibre (lisse) qui facilitent la formation de réseaux de capillaires remplis d'air.

Les BHP à base de fumée de silice présentent un faible teneur en air occlus par rapport à celle des BHP à base de laitier granulé. Ceci est justifié par l'effet de remplissage de la fumée de silice qui réduit la porosité grâce à sa finesse plus élevée comparant avec le filler de laitier granulé.

## **II.8.CONCLUSION**

Dans ce chapitre, nous avons présenté la caractérisation des matériaux utilisés, la formulation des bétons d'étude, et les résultats de l'influence de la nature des additions minérales et l'ajout des fibres polypropylène sur les propriétés du béton à l'état frais. A l'issue de cette première étude les constatations suivantes peuvent être dégagées:

- La nature des additions minérales influe sur les propriétés des bétons à l'état frais par la morphologie des particules de ces additions. Les BHP à base de la fumée de silice présentent un faible volume d'air et une faible maniabilité par rapport aux BHP avec le filler de laitier granulé. Ce qui concerne les masses volumiques sont relativement proches pour les différents bétons. cela dû aux propriétés intrinsèques des additions minérales.
- l'ajout des fibres de polypropylène diminue la masse volumique des BHP par rapport aux BHP sans fibres. Cela est dû à ces faibles masses volumiques. Les fibres de polypropylène entraînent aussi une augmentation de teneur en air occlus dans les BHP

Le chapitre suivant va consister à une caractérisation approfondie de l'influence des additions minérales et l'ajout des fibres polypropylène sur les propriétés physiques et mécaniques des BHP à haute température.



## **CHAPITRE III**

# **COMPORTEMENT PHYSIQUE ET MÉCANIQUE DES BÉTONS À HAUTE PERFORMANCE SOUS L'EFFET DE LA TEMPÉRATURE**

### **III.1. INTRODUCTION**

Ce chapitre présente les protocoles expérimentaux et l'analyse des résultats résiduels qui concernent la perte de masse, la résistance en compression, la résistance en traction et le module d'élasticité aux différentes températures (20°C, 100°C, 300°C, 500°C et 700°C) et aux différents âges (7, 28 et 90 jours). Ce chapitre permet une meilleure compréhension de l'effet de la température sur l'évolution des propriétés physiques et mécaniques du béton étudié.

### **III.2. PROTOCOLE EXPERIMENTAL**

#### **III.2.1. Propriétés physique**

##### **III.2.1.1. Perte de masse résiduelle**

Pour la détermination de l'évolution de la perte de masse en fonction du cycle de chauffage-refroidissement, les éprouvettes sont pesées avant et après chaque cycle de chauffage-refroidissement [103] [104]. Les éprouvettes issues du chauffage sont pesées directement afin d'éviter tout phénomène de réhydratation avec le milieu ambiant.

L'essai consiste donc à déterminer la perte de matière qu'ont subit les éprouvettes lors du chauffage par rapport à leur état initial (état avant le chauffage). La perte de masse exprimée en pourcentage est obtenue de la façon suivante :

$$\text{Perte de masse} = \frac{M_0 - M_t}{M_0} \times 100 (\%) \dots \dots \dots \text{III.1}$$

Avec :

$M_0$  : la masse de l'éprouvette à la température ambiante (avant le chauffage),

$M_t$  : la masse de l'éprouvette refroidie après le cycle de chauffage-refroidissement.

Les éprouvettes utilisées sont de forme cubique de dimensions (10x10x10) cm<sup>3</sup>. Elles sont pesées à l'aide d'une balance électronique ayant une précision de 0.1g comme montre la figure III.1.



**Figure III.1.** Mesure de la perte de masse (LMGE Université d'Annaba).

### III.2.1.2. Porosité accessible à l'eau

La porosité est un paramètre de premier ordre qui influence directement la résistance mécanique et la durabilité des bétons. Elle est définie comme le rapport du volume total des vides et pores ouverts au volume apparent d'un matériau. Cette méthode consiste à effectuer une pesée du matériau dans l'air puis dans un liquide de masse volumique connue. L'essai est conduit dans une ambiance contrôlée (20°C).

Pour chaque type du béton trois échantillons cylindriques de dimensions (Ø11xh5) cm ont été testées suivant les recommandations de l'AFPC-AFREM [105]. Il s'agit en réalité de peser les échantillons sous différents états. Dans un premier temps il faut s'assurer que les échantillons sont saturés en eau. Pour cela, on les place dans un dessiccateur à vide, sous une dépression de 25 mbar pendant 4 heures (Figure III.2.a), puis on les immerge dans l'eau, toujours sous vide, pendant 20 heures  $\pm$  1 heure. Après quoi on pèse les éprouvettes avec une balance hydrostatique (Figure III.2.b). Grâce à cette pesée on obtient la masse du corps d'épreuve immergée  $M_{\text{eau}}$ . Toujours saturée, les éprouvettes sont ensuite pesées à l'air libre, on obtient alors  $M_{\text{air}}$ , la masse du corps d'épreuve imbibée pesé à l'air libre. La troisième pesée nécessite un passage dans une étuve de séchage à 105°C  $\pm$  5°C, jusqu'à stabilisation de la masse de l'échantillon qui sera alors supposé sèche qu'on désignera par  $M_{\text{sec}}$ . La dernière pesée nous fournit  $M_{\text{sec}}$ , la masse sèche du corps d'épreuve. On détermine finalement grâce à ces trois masses la porosité accessible à l'eau  $\mathcal{E}$  en % (Voir l'équation III.2).

$$\mathcal{E} = \frac{M_{\text{air}} - M_{\text{sec}}}{M_{\text{air}} - M_{\text{eau}}} \times 100 \quad (\%) \dots\dots\dots \text{III.2}$$

Avec :

$M_{\text{eau}}$  : la masse en gramme du corps d'épreuve immergé dans l'eau,

$M_{\text{air}}$  : la masse en gramme du corps d'épreuve imbibé pesé dans l'air,

$M_{\text{sec}}$  : la masse en gramme du corps d'épreuve sec.



a- Dessiccateur à vide pour le dégazage des échantillons (Ø11xh5) cm



b- Pesée hydrostatique

**Figure III.2.** Mesure de la masse volumique apparente et de la porosité accessible à l'eau (LMDC- INSA Toulouse).

### III.2.2. Propriétés mécaniques

#### III.2.2.1. Résistance résiduelle en compression

L'essai de la résistance mécanique en compression a été réalisé sur des éprouvettes de forme cubique de dimensions  $(10 \times 10 \times 10) \text{ cm}^3$  conformément à la norme européenne NF EN 12390-3 [106]. Les éprouvettes utilisées sont des éprouvettes des températures ambiantes et des éprouvettes à refroidies c'est-à-dire après le cycle de chauffage. Les éprouvettes sont conservées dans l'eau jusqu'aux échéances des essais qui sont de 7, 28, 90 jours. Pour chaque béton et chaque cycle de chauffage la résistance en compression obtenue est la moyenne issue de trois éprouvettes.

L'écrasement des éprouvettes a été réalisé à l'aide d'une presse hydraulique de capacité maximale de 2000 kN avec une vitesse de chargement de  $2,4 \pm 0,2 \text{ kN/Sec}$ , (Figure III.3).



La charge de rupture correspond à la charge maximale enregistrée au cours de l'essai. La résistance à la compression à "j" jours  $f_{cj}$  est le rapport entre la charge de rupture et la section transversale de l'éprouvette (Equation III.3) :

$$f_{cj} = \frac{P}{S} \quad (\text{MPa}) \quad \dots\dots\dots \text{III.3}$$

Où

P : Charge de rupture en N,

S : Section transversale de l'éprouvette en  $\text{mm}^2$ .



**Figure III.3.** Essai de compression (LMGE Université d'Annaba).

### III.2.2.2. Résistance résiduelle en traction par flexion

La résistance en traction par flexion 3 points a été déterminée sur des éprouvettes prismatiques de dimensions  $(7 \times 7 \times 28) \text{ cm}^3$  à l'aide d'une presse hydraulique d'une capacité maximale de 150 KN. L'essai a été réalisé conformément à la norme NF EN P-407 [107].

Les éprouvettes ont été disposées dans la machine d'essai comme indiqué sur la figure III.4 Après un bon centrage, la mise en charge a été effectuée avec une vitesse de montée de charge constante.

La résistance à la traction par flexion est calculée selon la formule suivante :

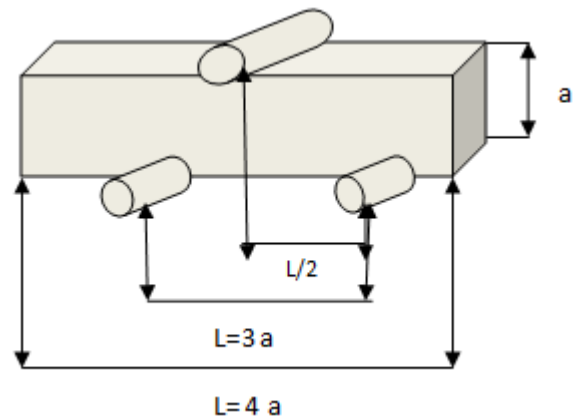
$$R_{tf} = \frac{3PL}{2bh^2} \quad (\text{MPa}) \quad \dots\dots\dots \text{III.4}$$

Avec :

P : l'effort de rupture en N.

L: la distance ente les appuis en mm.

b, h : dimension d'éprouvette en mm.



**Figure III.4.** Essai de traction par flexion (LMGE Université d'Annaba).

### II.2.2.3. Module de déformation dynamique (Essai non destructif)

La détermination du module d'élasticité dynamique du béton a été effectuée par auscultation ultrasonique des éprouvettes. Le principe est basé sur la mesure du temps de propagation des ondes ultrasoniques dans le matériau à l'aide d'un appareil muni d'un émetteur et d'un ou plusieurs récepteurs (figure III.5) selon la norme NF EN 12504-4 [108].



**Figure III.5.** La mesure de la vitesse de son (LMGE Université d'Annaba).

Le matériau est soumis à des oscillations longitudinales à l'aide d'un jeu de transducteurs électroacoustiques. Une impulsion de vibration longitudinale est produite par l'un des transducteurs, appliquée sur l'une des faces de l'élément. Après avoir parcouru une longueur  $L$  dans le matériau, cette onde est convertie en un signal électrique par un second transducteur électroacoustique.

Une fois l'appareil mis en marche, on peut lire le temps de propagation des ondes en microseconde. La vitesse de propagation ou la célérité  $C$  (m/sec) est donnée alors par l'équation suivante :

$$C = \frac{L}{T} \text{ (m/s)} \quad \dots\dots\dots \text{III.5}$$

Avec :

$L$  : distance entre les transducteurs en (m).

$T$  : temps en microseconde.

Une corrélation a été établie entre la vitesse de propagation des ondes et le module d'élasticité dynamique :

$$C = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{\rho_{app}(1+\nu)(1-2\nu)}} \dots\dots\dots \text{III.6}$$

Avec :

C : Célérité de propagation des ondes (m/s).

E : Module d'élasticité dynamique (MPa).

$\rho_{app}$  : Masse volumique apparente du béton (kg/m<sup>3</sup>).

$\nu$  : Coefficient de poisson dynamique.

Le module d'élasticité dynamique est obtenu par l'expression suivante:

$$E = \rho_{app} C^2 \frac{(1+\nu)(1-2\nu)}{(1-\nu)} \dots\dots\dots III.7$$

Pour un coefficient de poisson compris entre 0,2 et 0,3, on peut admettre que Rapport  $\frac{(1+\nu)(1-2\nu)}{(1-\nu)}$  est égal à 1, soit le module dynamique majoré :

$$E = \rho_{app} C^2 \dots\dots\dots III.8$$

#### II.2.2.4. Essai de mesure de l'ouverture de fissure (la lunette micrométrique)

La mesure de l'ouverture de fissure des surfaces des BHP a été réalisée avec la lunette micrométrique. Cet appareil permet de mesurer l'ouverture d'une fissure avec une résolution d'un centième de millimètre. Sous la forme d'un microscope portable, l'optique interne est équipée d'une réglette rotative que l'on positionne perpendiculairement à la fissure.



**Figure III.6.** Essai de mesure l'ouverture de fissure (LMGE Université d'Annaba).

### **III.3. RESULTATS ET DISCUSSION**

#### **III.3.1. Propriétés physique**

##### **III.3.1.1. Perte de masse résiduelle**

###### **➤ Effet de la température**

L'exposition des bétons aux hautes températures entraîne une dégradation dans la pâte de ciment ainsi que dans les granulats dont l'une des conséquences est la diminution des densités du béton. La perte de masse permet notamment de quantifier l'eau libre et l'eau liée présentes avant et après chauffage dans une éprouvette de béton. Cette eau se retrouve sous forme liée dans les hydrates, adsorbée à la surface des éléments solides et libres dans les pores. L'eau libre a la propriété d'être perdue facilement lors de variations thermiques [33].

La figure III.7 montre la perte de masse des BHPL et BHPFs en fonction de la température de chauffage. On peut observer que l'augmentation de la température conduit à une diminution continue de la masse pour tous les bétons. L'allure de la courbe de la perte de masse est la même pour tous les bétons. Les pertes de masse moyennes à 90 jours et pour un cycle de chauffage de 300°C et 700°C, sont respectivement de l'ordre de 3.93% et 7.35% pour les BHP avec addition de filler de laitier (BHPL). Cette perte est moins importante dans le cas des BHP avec fumée de silice (BHPFs) qui est respectivement de l'ordre de 3.38% et 6.68%.

Entre la température 20°C et 100 °C la perte de masse est presque identique dans les BHPL et BHPFs quel que soit l'âge du béton. À cette température la perte de masse était très faible. Ceci peut être expliqué par le départ de l'eau libre contenue dans les pores du béton (séchage du béton).

On observe que la phase entre la température 100°C et 300°C est caractérisée par une forte augmentation de perte de masse. Cette forte perte de masse est due au départ de l'eau contenue initialement dans les hydrates (C-S-H) et à la décomposition du gypse ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ). Le départ de l'eau liée chimiquement est à l'origine de la masse importante de matière perdue dans cette plage de température [10] [47] [104].

Dans la dernière phase où la température allant de 300°C et 700°C, la perte de masse est due à la déshydroxylation de la portlandite. Ce qui est montré préalablement dans la littérature [47] [10].

On observe aussi que la quantité d'eau perdue reste à peu près constante lorsque l'âge du béton augmente. On pense que la densification de la matrice cimentaire due à l'hydratation est à l'origine du phénomène observé. C'est-à-dire que l'hydratation du béton consomme l'eau libre pour former des nouveaux hydrates et par conséquent modifie la structure poreuse des bétons.

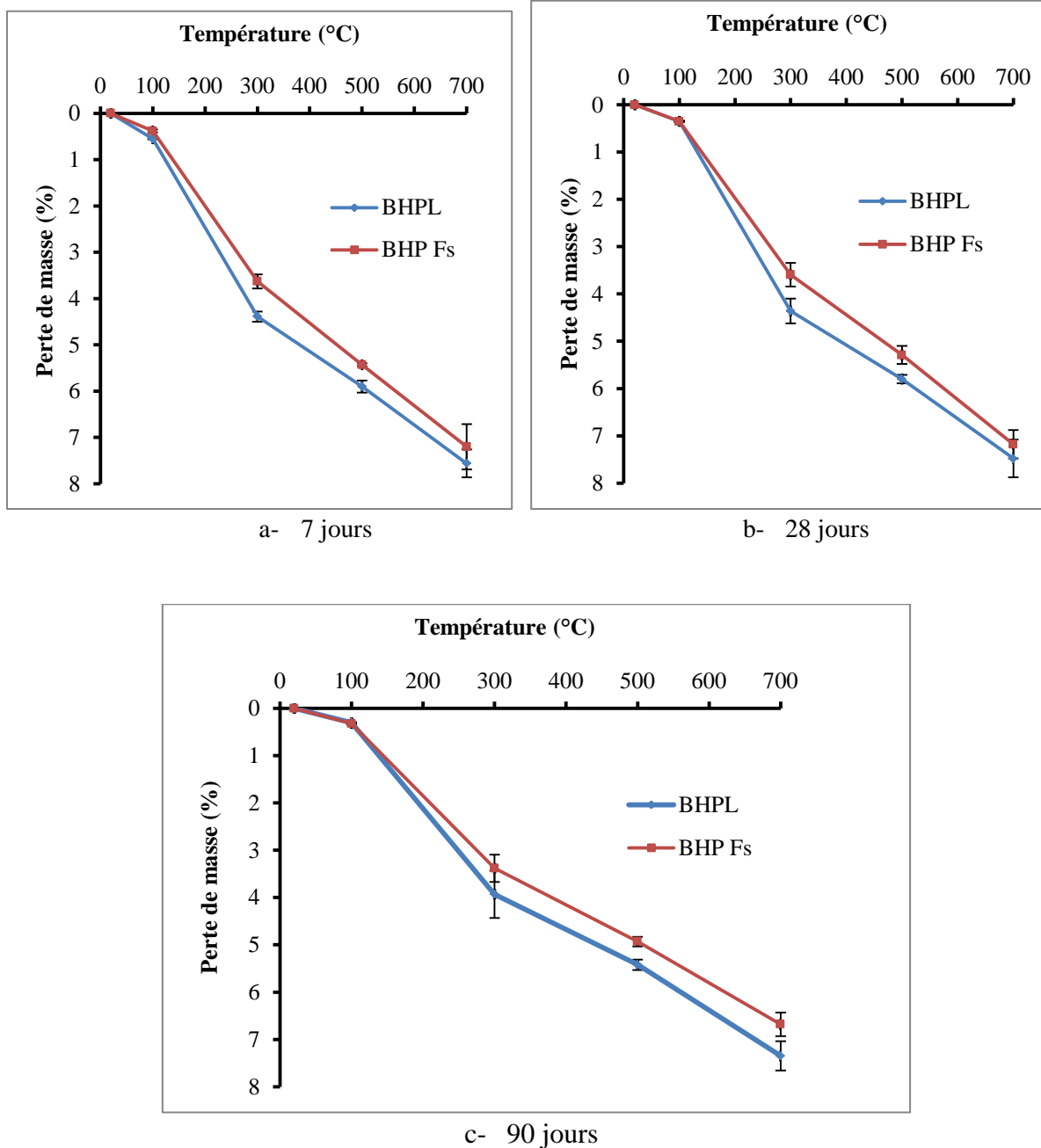


Figure III.7. Perte de masse des BHPL et BHPFs en fonction de la température de chauffage.

➤ *Effet de l'ajout des fibres de polypropylène*

Comme dans le cas des bétons sans fibres, la pesée de trois éprouvettes avant et après chaque cycle chauffage/refroidissement, a permis d'étudier l'évolution de la perte de masse des bétons avec les fibres de polypropylène en fonction de la température.

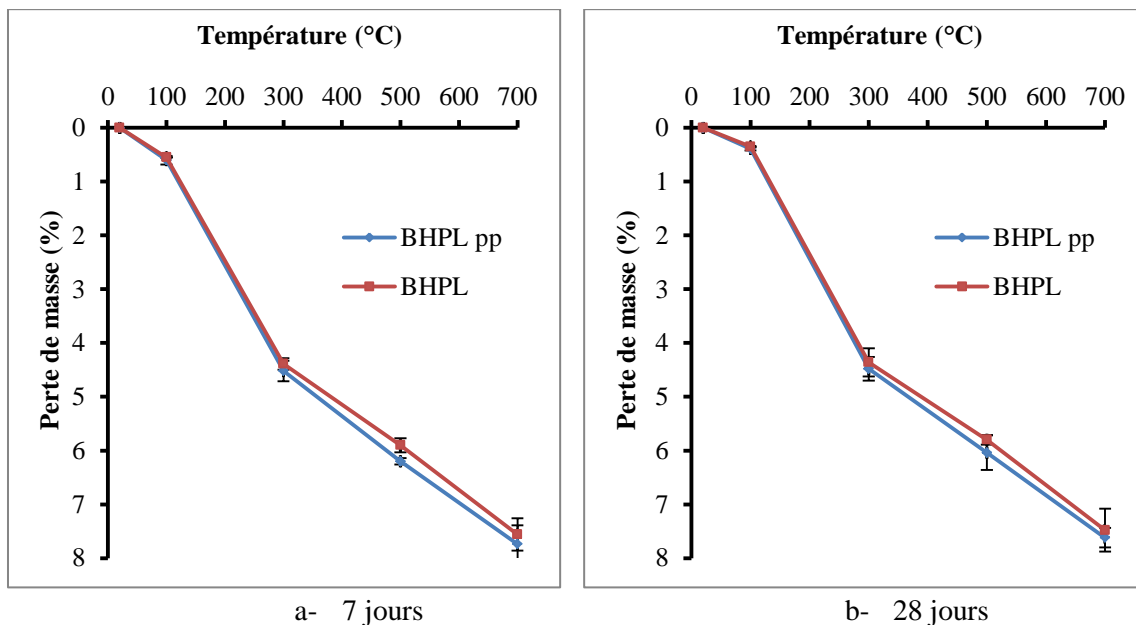
Les figures III.8 et III.9 présentent la perte de masse des BHPL pp et BHPFs pp en fonction de la température à 7, 28, 90 jours.

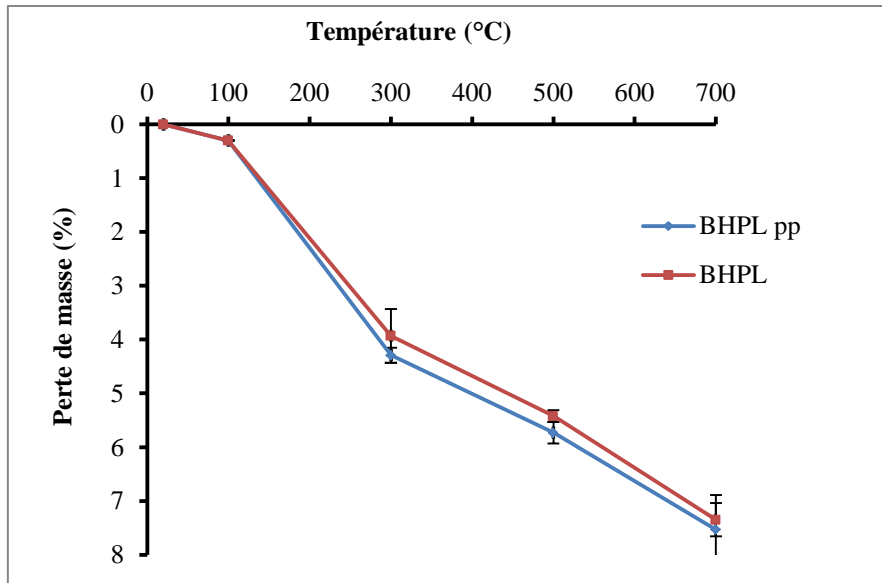
D'après les figures ci-dessous on remarque que l'ajout des fibres polypropylène ne modifier pas l'allure de la courbe de la perte de masse.

L'addition des fibres donne une légère augmentation de la perte de masse par rapport à celle des bétons sans fibres. Cette perte de masse additionnelle peut être liée à la fusion des fibres polypropylène lors de la montée en température. De plus, le réseau généré par la fusion des fibres facilite le transport de flux et l'évacuation de matière.

Après le cycle de chauffage- refroidissement de 700°C à 90 jours, la perte de masse des BHPL est de l'ordre de 7.35 % tandis que la perte des BHPL pp est de l'ordre de 7.53 %. À la même température, cette perte est de l'ordre de 6.68 % pour les BHPFs est de l'ordre de 6.97% pour les BHPFs pp.

✚ *Béton à base du fillers de laitier granulée*

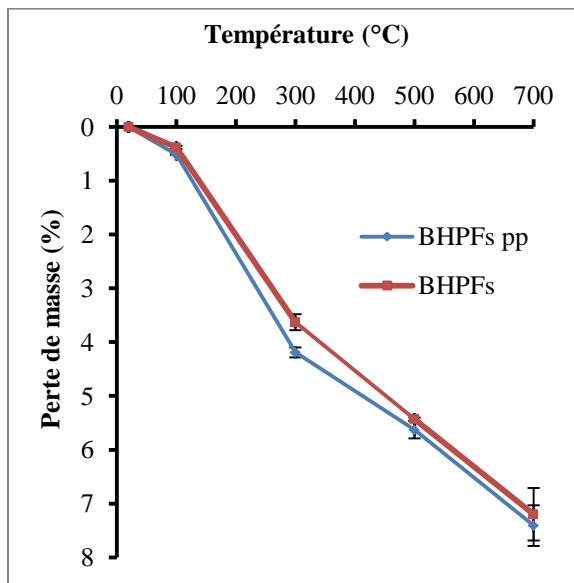




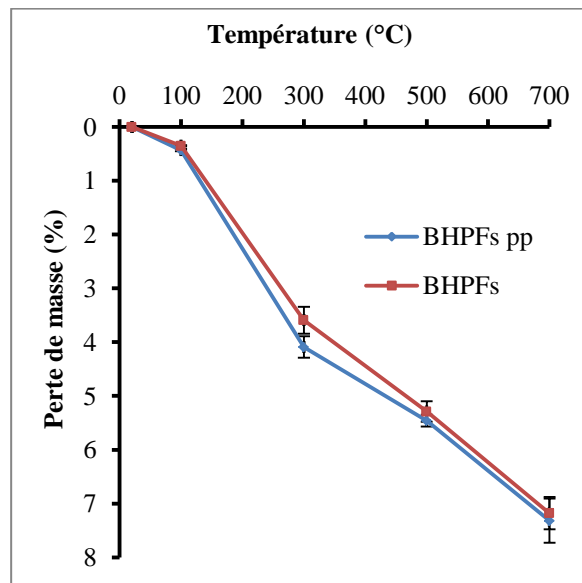
c- 90 jours

Figure III.8. Perte de masse des bétons fibrés a base du fillers de laitier en fonction de la température de chauffage.

✚ Béton à base du fillers de la fumée de silice

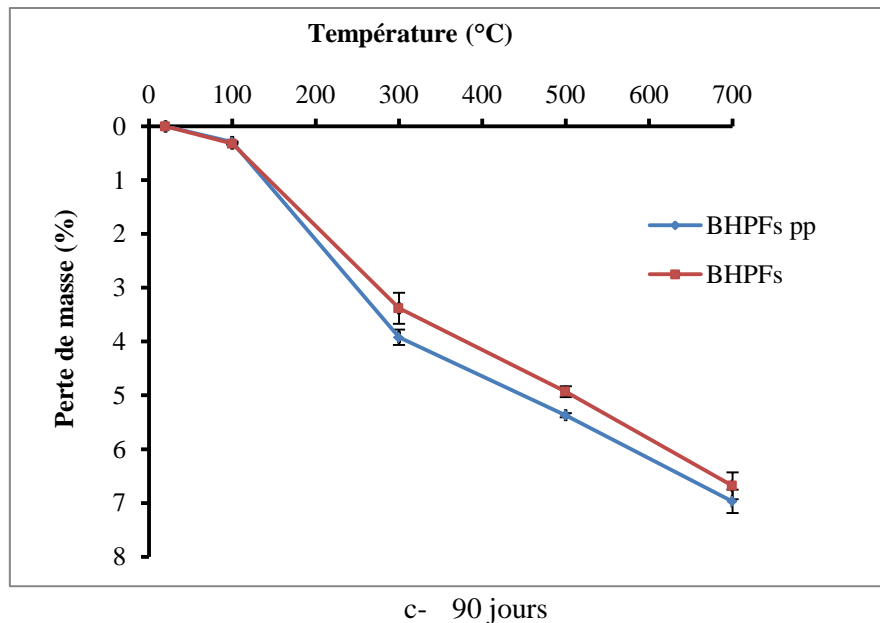


a- 7 jours



b- 28 jours





**Figure III.9.** Perte de masse des bétons fibrés à base de la fumée de silice en fonction de la température de chauffage.

### III.3.1.2. Porosité accessible à l'eau

#### ➤ Effet de la température

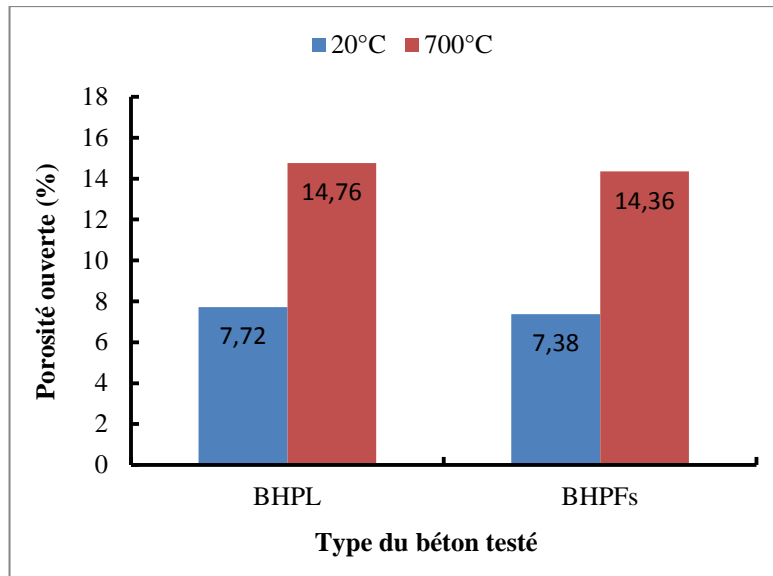
La figure III.10. Présente l'évolution de la porosité des BHPL et BHPFs sans fibres à 90 jours en fonction de la température de chauffage.

D'après la figure suivante on constate que l'augmentation de la température conduit à l'augmentation de la porosité des bétons BHPL et BHPFs. Quel que soit le changement de cycle de température (ambiante ou à 700°C), les BHPFs sont moins poreux que les BHPL. Ceci est justifié par l'effet de remplissage de la fumée de silice qui réduit la porosité totale et par l'effet pouzzolanique ou hydraulique qui améliore la compacité de la matrice cimentaire. L'augmentation de la porosité à 700° C est liée à la déshydratation importante de la pâte de ciment et une forte fissuration de la matrice, ce qui entraîne une augmentation de la porosité du squelette solide.

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

Ye et al. [49], ont montré que la porosité totale et la distribution des pores évoluent plus sur les pâtes de ciment des bétons à hautes performances que celles des bétons ordinaires. Les travaux réalisés par Gaweska [10] confirment l'augmentation de la porosité en fonction de la

température. Cependant, Gaweska note une croissance rapide avant 180°C puis une évolution progressive jusqu'à la température de 600°C.



**Figure III.10.** Evolution de la porosité des BHPL et BHPFs sans fibres en fonction de la température de chauffage.

➤ *Effet de l'ajout des fibres polypropylène*

Les figures III.11 et III.12 illustrent l'évolution de la porosité des BHPLpp et BHPFspp contenant des fibres de polypropylène en fonction de la température de chauffage.

Avec l'augmentation de la température, la porosité des BHP avec l'ajout des fibres de polypropylène s'augmente plus vite que celle des BHP sans fibres. La présence de fibres de polypropylène dans le béton chauffé entraîne une augmentation du volume poreux et modifie la cinétique d'apparition de la porosité. La porosité supplémentaire est liée à la quantité de fibres dans le béton. Plus le dosage en fibres augmente, plus il y a de vide qui se crée lors du chauffage.

Les études réalisées par Kalifa et al. [78], Noumowé [109], Komonen et al. [110], Gaweska [10] et Mindéguia [3] sur la porosité des BHP contenant les fibres de polypropylène montrent l'apparition d'une porosité supplémentaire. Cette porosité est liée à la microfissuration générée par la dilatation du polypropylène et aussi aux canaux formés après la fusion des fibres.

✚ Béton à base du fillers de laitier granulée

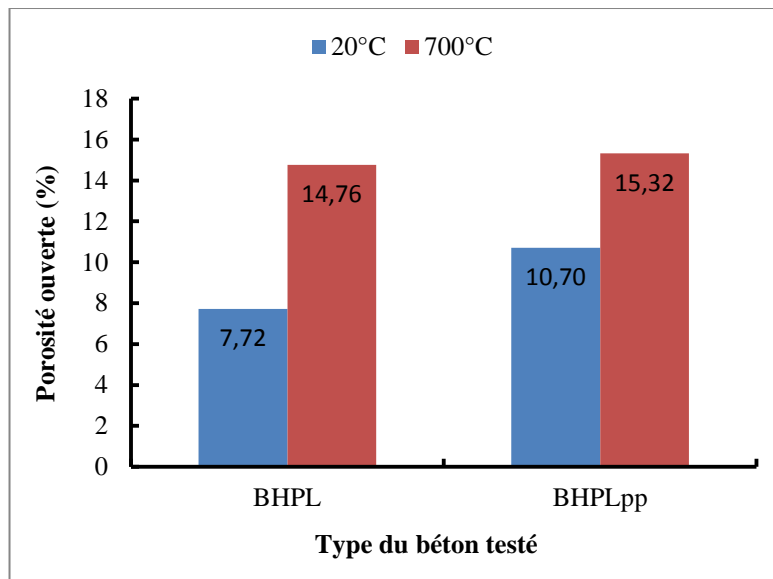


Figure III.11. Evolution de la porosité des bétons fibrés à base du fillers de laitier en fonction de la température de chauffage.

✚ Béton à base de fillers de la fumée de silice

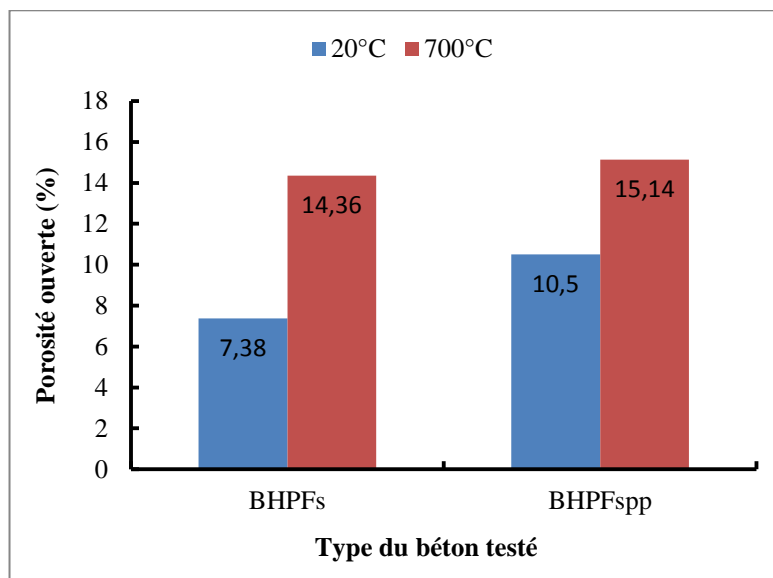


Figure III.12. Evolution de la porosité des bétons fibrés à base de fillers de fumée de silice en fonction de la température de chauffage.

### **III.3.2. Propriétés mécanique**

#### **III.3.2.1. Résistance résiduelle en compression**

➤ *Effet de la température*

La figure III.13 montre l'évolution de la résistance résiduelle en compression en fonction de la température.

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

Il est possible de distinguer trois phases consécutives dans l'évolution de la résistance en compression.

Entre la température 20°C et 100°C, les résistances des deux types de bétons, à savoir, celle des BHPL et des BHPFs diminuent. Ceci est dû à la dilatation thermique de l'eau qui provoque un écartement des feuillets du gel CSH. Cet écartement entraîne une diminution des forces d'attraction entre les feuillets et engendre la naissance de microstructures occasionnant une diminution de la résistance des bétons.

A température 300°C, un gain de résistance pour les deux bétons a été constaté. Ce gain est dû au départ de l'eau (l'eau liquide devient eau vapeur et arrive à s'échapper du béton) permettant une réaugmentation des forces d'attraction par le rapprochement des feuillets de CSH [52] [54].

Au-delà de la température 300°C, la résistance résiduelle en compression décroît plus rapidement. Les résistances obtenues après un chauffage à la température 700°C sont toutes inférieures à 40 MPa. Cette forte baisse de résistance suppose qu'il y a eut endommagement du matériau. Cet endommagement est dû à la dégradation de la matrice cimentaire et aussi à la désagrégation des granulats.

A travers l'ensemble des résultats, on peut regrouper le comportement des BHP en compression selon deux domaines. Le premier domaine allant de la température ambiante à la

température 300°C, caractérisé par une faible baisse et / ou amélioration de résistance. Le second domaine, au-delà de 300°C, présente une importante diminution de résistance. Cela est confirmé par certains auteurs y compris, Diederichs [42], phan [68], kanema [2].

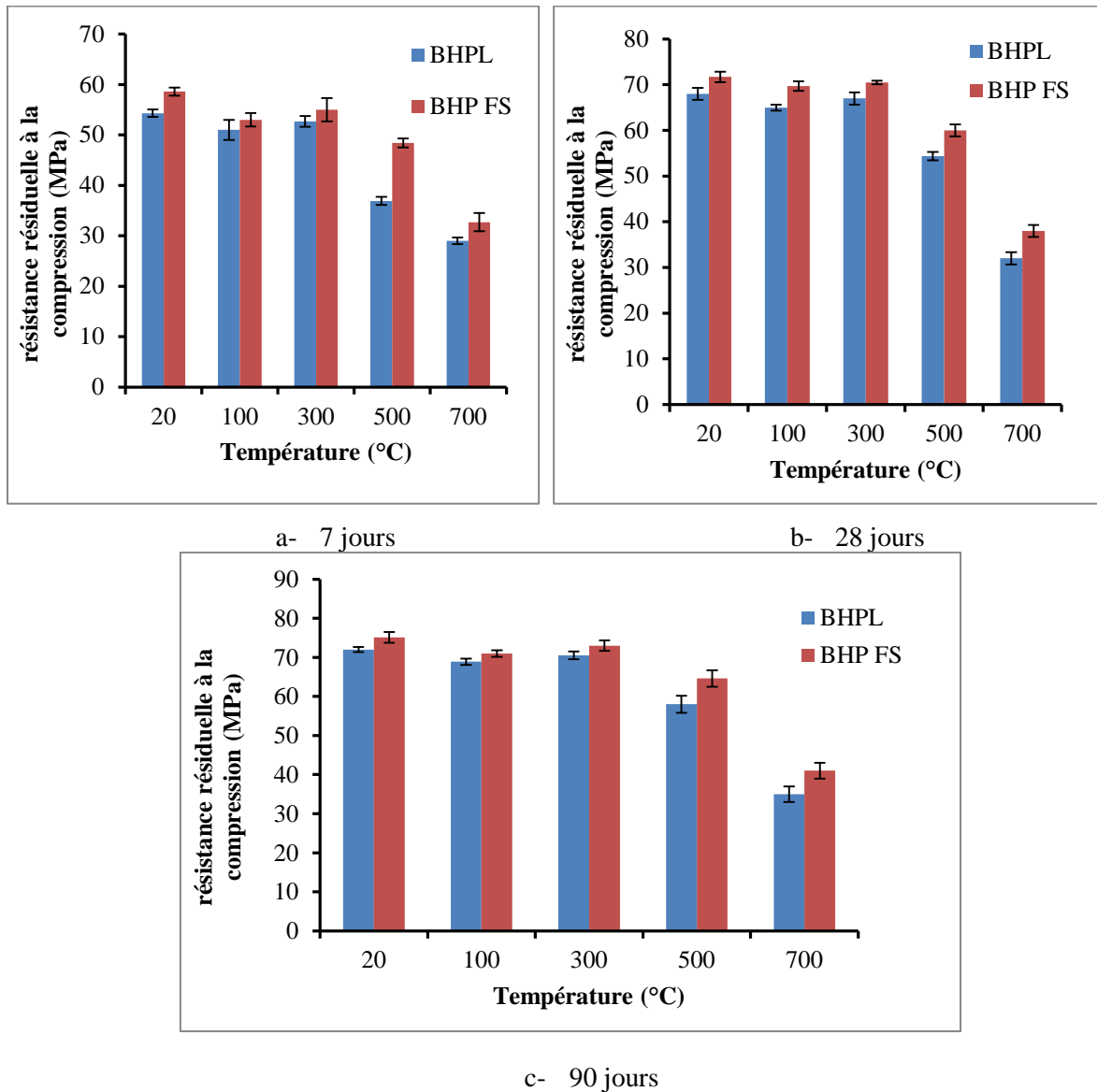


Figure III.13. Résistance résiduelle en compression des BHPL et BHPFs en fonction de la température de chauffage.

➤ *Effet de l'ajout des fibres polypropylène*

Les figures III.14 et III.15 montrent que la présence de fibres de polypropylène n'influe pas sur l'allure de la courbe de résistance en compression mais, une légère variation a été constatée sur les résistances résiduelles en compression.

La résistance en compression du BHPFs pp reste toutefois supérieure à celle du béton

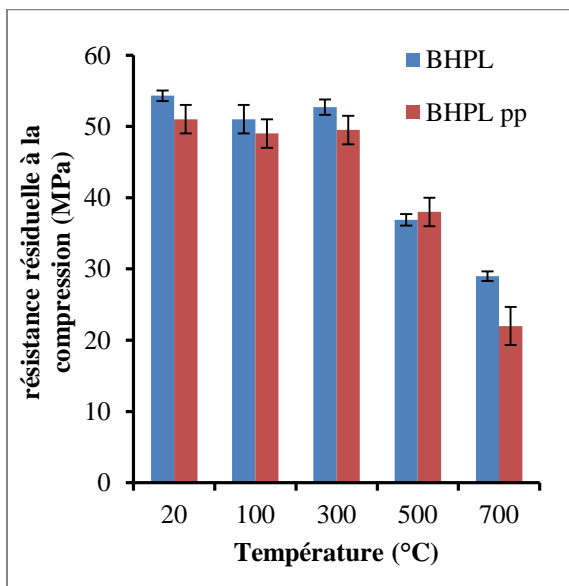
BHPLpp.

Les résistances en compression diminuent avec l'augmentation de la température. Trois phases caractérisant le comportement en compression des BHP fibré après le cycle de chauffage ont été observées.

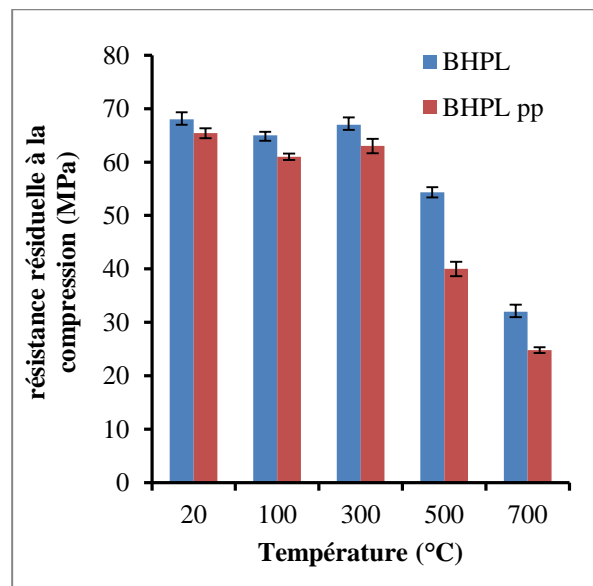
De la température ambiante à 100 °C, la résistance en compression diminue. À 300°C, une légère amélioration de la résistance en compression des BHP avec les fibres polypropylène et, au-delà de 300°C, la résistance baisse considérablement.

L'ajout des fibres de polypropylène n'améliore pas la résistance résiduelle en compression. Ceci s'explique par l'augmentation de la porosité générée par la fusion/vaporisation du polypropylène couplée avec l'apparition de microfissures engendre donc une perte de résistance du béton.

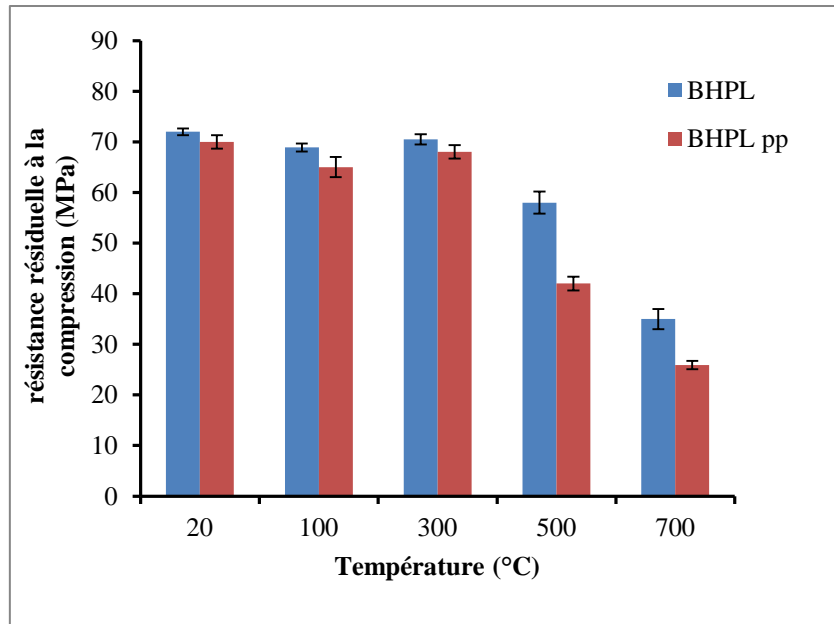
**🚧 Béton à base du fillers de laitier granulée**



a- 7 jours



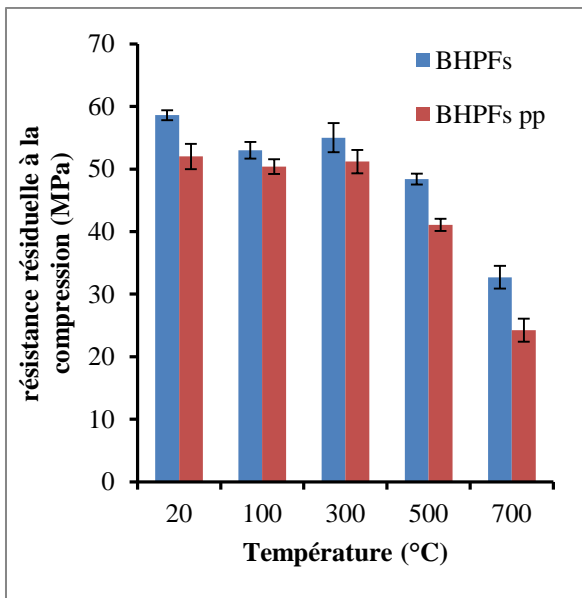
b- 28 jours



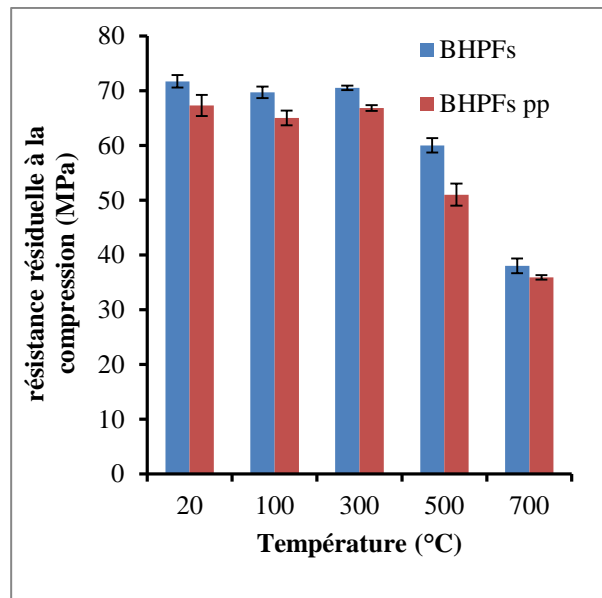
a- 90 jours

Figure III.14. Résistance résiduelle en compression des bétons fibrés à base du fillers de laitier en fonction de la température de chauffage.

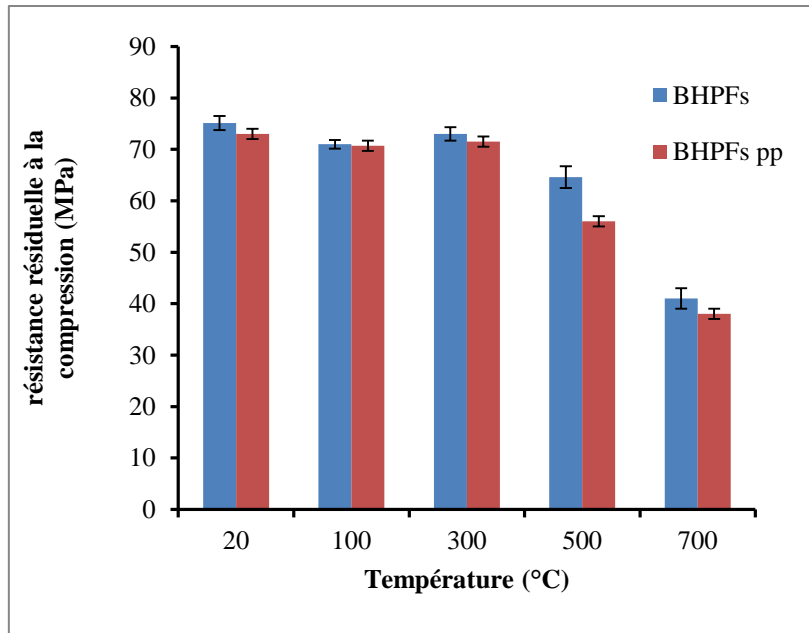
✚ Béton à base de fillers de la fumée de silice



a- 7 jours



b- 28 jours



C- 90 jours

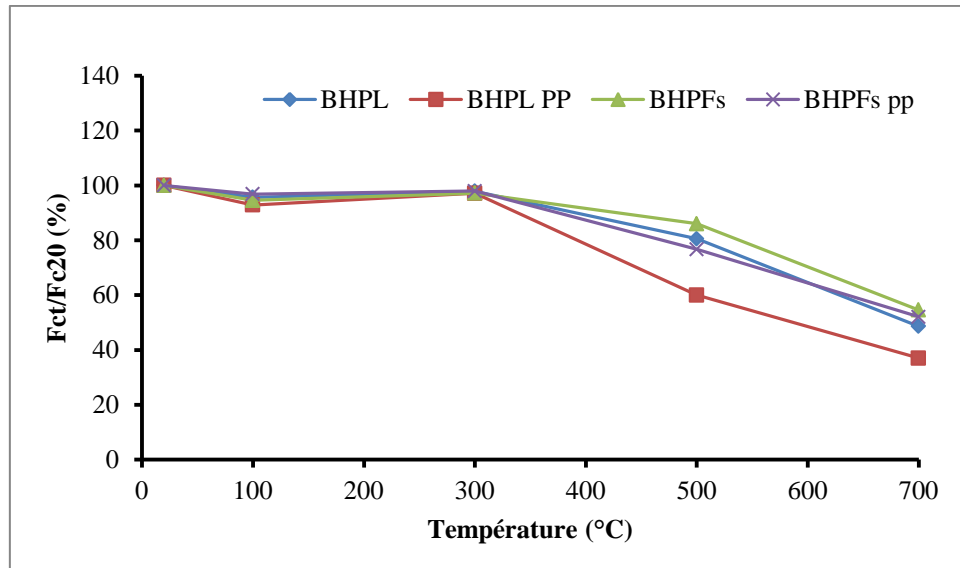
**Figure III.15.** Résistance résiduelle en compression des bétons fibrés à base de la fumée de silice en fonction de la température de chauffage.

La résistance résiduelle relative en compression (figure III.16) diminue avec l'ajout de fibres de polypropylène. Les résistances résiduelles relatives à la compression des bétons sans fibres BHPL et BHPFs sont respectivement de l'ordre de 80,56 % et 86,02% après un traitement à 500°C. À la même température de chauffage les bétons fibrés BHPLpp et BHPFspp ont une résistance relative respectivement de l'ordre de 60 % et 76,71%. Pour les deux bétons, la perte de résistance relative est d'environ 10 à 20 % par rapport aux bétons non fibrés. A 700°C, les pertes de résistance sont proches et ne dépendent pas du dosage en fibres.

La baisse de résistance en compression des BHP avec ou sans fibres de polypropylène a été aussi notée par Chan [111], Hoff, [112], Noum [76], Suha [113] et Mind [3]. Les travaux de Suhaendi et al. [113] ont porté sur le comportement de béton contenant des fibres de longueurs 6 mm et 30 mm introduites en deux proportions volumiques de 0.25% et 0.50% (respectivement 2.3 kg/m<sup>3</sup> et 4.6 kg/m<sup>3</sup>). La diminution de résistance résiduelle était plus importante après un chauffage de 200°C. Lorsqu'il n'y avait pas de fibres de polypropylène (baisse de résistance de 20% pour le béton sans fibres et 11% pour le béton contenant 0.25% de fibres de longueur 6 mm) mais le phénomène contraire a été observé à la température 400°C (baisse de résistance de 37% pour le béton sans fibres et 48% pour le béton contenant 0.25% de fibres de longueur 6 mm). L'augmentation de la perméabilité et de la porosité



modifie la microstructure du matériau occasionnant une baisse de ses propriétés mécaniques. Malgré cette forte perméabilité et porosité, certains auteurs ont été observés une amélioration du comportement résiduel en compression du béton. Des améliorations de résistance en compression de béton contenant des fibres de polypropylène ont été observées par Chen [34], Xiao [33] et Behn [114].



**Figure III.16.** Résistance relative en compression des bétons âgés de 90 jours en fonction de la température de chauffage.

### III.3.2.2. Résistance résiduelle en traction par flexion

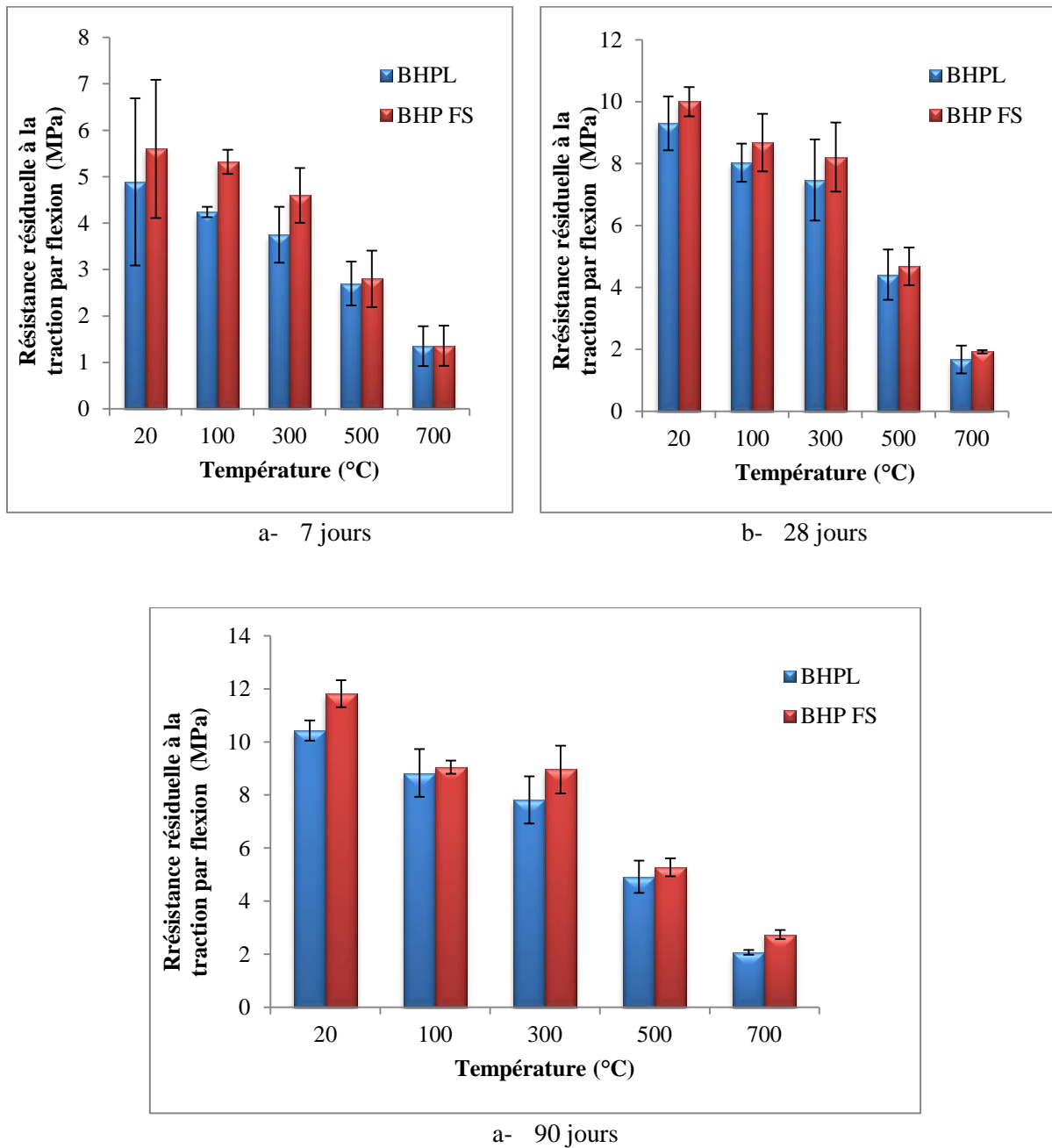
#### ➤ *Effet de la température*

La figure III.17 montre l'évolution des résistances résiduelles en traction par flexion des bétons en fonction de la température de chauffage.

La résistance résiduelle en traction par flexion diminue avec la montée en température pour tous les bétons d'étude. Au-delà de 300°C, on observe que la baisse de la résistance en traction devient plus élevée, tous les bétons perdent plus de 60% de leur résistance initiale à 700°C. Cela est dû à la dégradation de la matrice cimentaire (la décomposition de la portlandite et les CSH).

On constate qu'à 300°C et 700°C, la perte de la résistance relative en traction par flexion pour les BHPL est environ de 25.12% et 80%. Tandis que la perte de la résistance relative en traction par flexion pour les BHPFs est de l'ordre de 24 % et 76.82%.

Ces résultats confirment les constatations d'autres auteurs comme Noumowé [47], Min Li [62] et Kanéma [2].



**Figure III.17.** Résistances résiduelle à la traction des bétons en fonction de la température de chauffage.

➤ *Effet de l'ajout des fibres polypropylène*

Les figures III.178 et III.19 regroupent les résistances résiduelles en traction par flexion des bétons de fibres de polypropylène en fonction des différents cycles de chauffage-refroidissement.

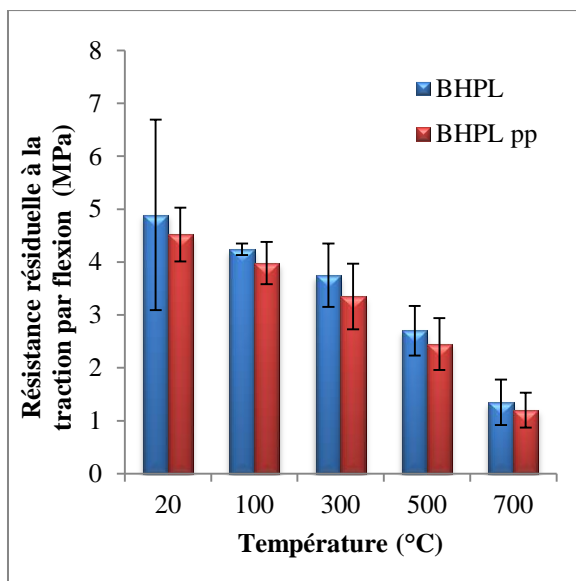
Les courbes d'évolution montrent une baisse progressive de la résistance en traction par flexion des bétons avec les fibres de polypropylène avec l'augmentation de la température de chauffage. L'allure de la courbe ne change pas avec la présence des fibres.

A la température ambiante, la présence des fibres de polypropylène modifie un peu la résistance en traction par flexion. A cette température on observe une légère baisse de résistance pour tous les BHP. Cela peut expliquer que le dosage élevé en fibre de polypropylène perturbe le réseau cristallin de la matrice cimentaire [115].

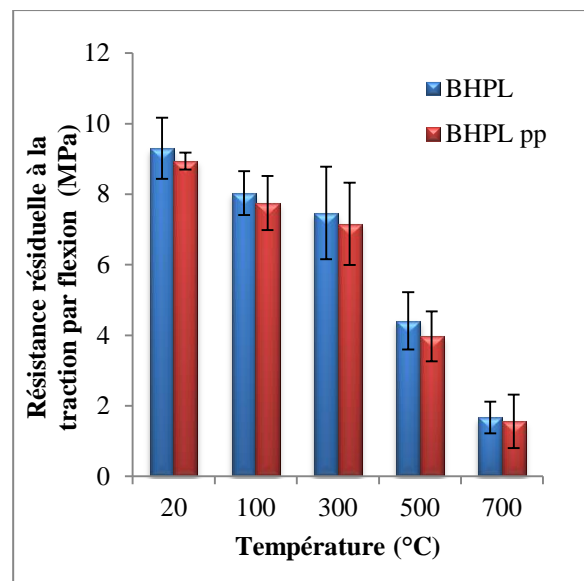
Dans un matériau à faible perméabilité comme le BHP, le polypropylène fondu diffuse moins dans la matrice cimentaire. Cette faible propagation du polypropylène, couplée à une fissuration induite par l'augmentation de volume de fibre avec la température, explique le fait que la résistance résiduelle en traction n'est pas améliorée.

A température 700°C, on remarque que les résistances résiduelles en traction des bétons avec et sans fibres de polypropylène sont presque les mêmes. On note alors une absence totale des fibres qui ont dû totalement s'échapper du matériau.

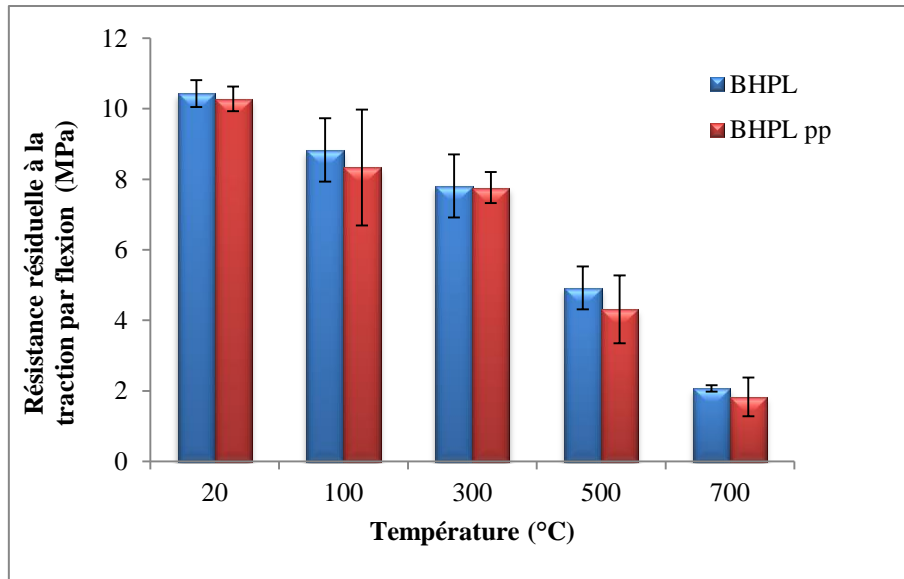
**🚩 Béton à base du fillers de laitier granulée**



a- 7 jours



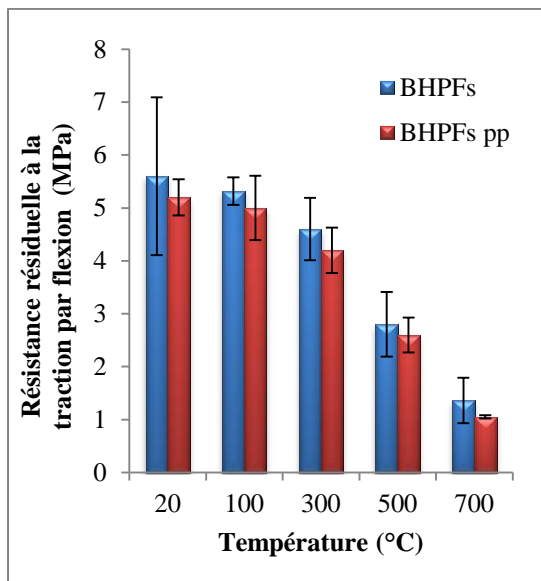
b- 28 jours



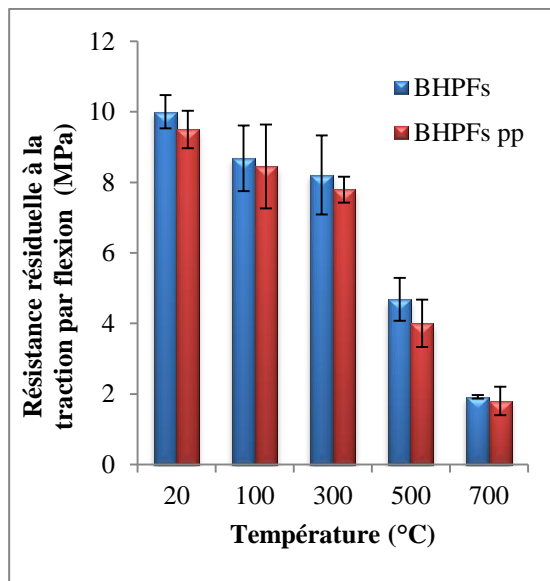
a- 90 jours

Figure III.18. Résistances résiduelle à la traction des bétons fibrés à base du fillers de laitier en fonction de la température de chauffage.

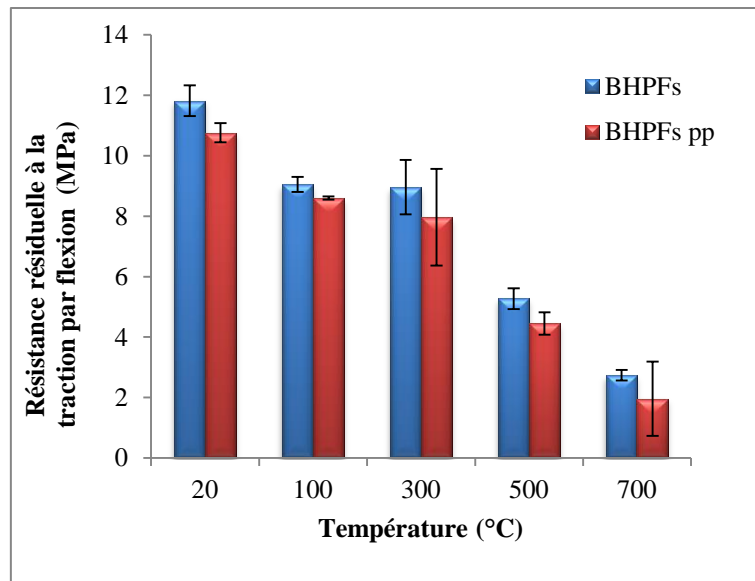
✚ Béton à base de fillers de la fumée de silice



a- 7 jours



b- 28 jours



a- 90 jours

**Figure III.19.** Résistances résiduelle à la traction des bétons fibrés à base de la fumée de silice en fonction de la température de chauffage.

### II.3.2.3. Module de déformation dynamique résiduelle (Essai non destructif)

#### ➤ *Effet de la température*

La figure III.20 montre l'évolution du module d'élasticité en fonction de la température de chauffage. Le module d'élasticité diminue sous l'effet du traitement thermique. Le comportement est similaire pour tous les bétons. D'autres auteurs comme Noumowé [47], Phan [68], Tolentino [63], Gaweska [10], Kanéma [2] ont déjà remarqué une évolution semblable du module d'élasticité pour différents bétons.

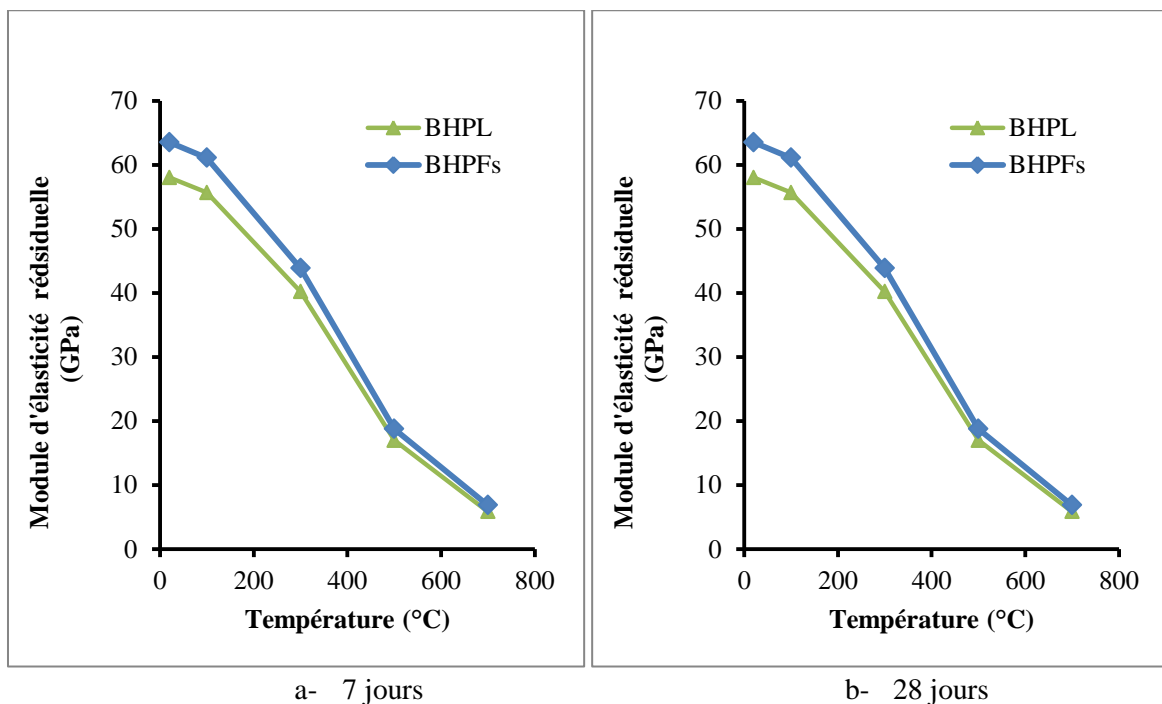
Deux domaines caractérisant l'évolution du module d'élasticité ont été observés. De la température ambiante jusqu'à 300°C, une diminution progressive du module d'élasticité a été notée. Tous les bétons peuvent conserver au moins 50% de leur module d'élasticité initial. Cette perte de module d'élasticité s'explique par l'augmentation de la porosité due à la déshydratation de la pâte cimentaire et l'apparition de microfissures à une température de 300°C. L'ouverture des fissures devient plus importante au-delà de cette température.

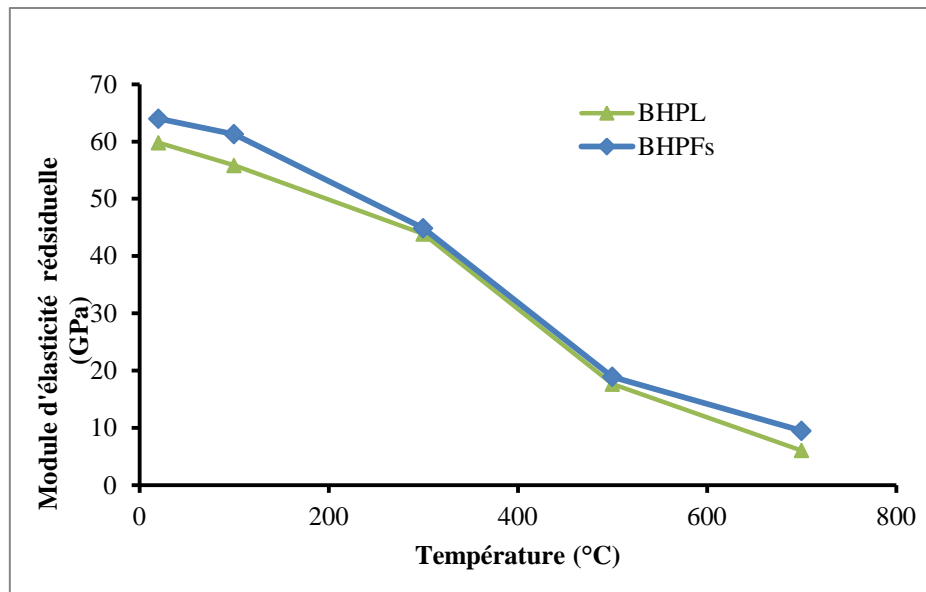
Au-delà de 300°C, le second domaine est caractérisé par une forte baisse du module d'élasticité jusqu'à 73 % pour tous les bétons jusqu'à 500°C. Cette forte baisse de module d'élasticité est due à l'endommagement que subissent les éprouvettes lors de la montée en température. Au-delà de la température de 500°C, la variation du module d'élasticité devient faible. A 700°C, la valeur du module d'élasticité est faible.

Phan [94] a constaté lors de ses travaux une perte de module d'élasticité de l'ordre de 70% pour tous les bétons (avec des rapports E/C allant de 0.22 à 0.57). Kanéma [2] a trouvé une baisse de plus de 95% pour les BHP et 85% pour les autres bétons après un chauffage à 450°C.

On remarque que quelque soit l'âge, le béton perd de sa rigidité avec l'augmentation de la température. On remarque aussi une augmentation de la rigidité initiale avec l'âge. Cela peut être expliqué par la microstructure changeante de la matrice cimentaire. D'après Klur [116], il existe des différences morphologiques dans la structure des C-S-H qui dépendent de la concentration en Portlandite (Ca(OH)) de la solution et du rapport C/S. Ces différences morphologiques des C-S-H peuvent également évoluer avec le temps c'est ce qui a été observé par Diamond [18], des structures morphologiques différentes entre les bétons jeunes et âgés.

La déshydratation de ces structures morphologiques de C-S-H n'étant pas identique avec la température d'après Glasser [117], ceci pourrait expliquer la légère différence de comportement observée en fonction de l'âge des bétons





a- 90 jours

**Figure III.20.** Évolution du module d'élasticité résiduelle des BHPL et BHPFs en fonction de la température de chauffage.

➤ *Effet de l'ajout des fibres polypropylène*

Les figures III.21 et III.22 illustrent l'évolution du module d'élasticité en fonction de la température des bétons fibrés.

Le module d'élasticité des BHP fibrés diminue progressivement par rapport aux bétons non fibrés avec la montée en température. Le comportement des bétons fibrés est similaire à celui des bétons sans fibres; la courbe se partageant en deux domaines de pentes distinctes.

La présence des fibres de polypropylène entraîne une baisse du module d'élasticité par rapport aux bétons non fibrés. Cette baisse de module d'élasticité des bétons fibrés est peut être due à la modification de la microstructure qui est conditionnée par la forte porosité entraînée par l'addition des fibres polypropylène.

Le module d'élasticité résiduel des BHPFspp reste toujours supérieur au module d'élasticité résiduel des BHPLpp pour une même température. A 700 °C, le module d'élasticité résiduel relatif des BHPFs pp est de 14.3 % tandis que celui de BHPL pp est de 9.6%.

Les travaux de recherche de [113] montrent une diminution du module d'élasticité résiduel avec l'augmentation de fibres de polypropylène. Suite à un chauffage à 400°C, il observe peu de différences entre le béton sans fibres et le béton additionné de 0.25% de fibres de

polypropylène. Par contre, lorsque le pourcentage de fibres double, la perte supplémentaire de module d'élasticité induite est de 15%.

✚ Béton à base du fillers de laitier granulée

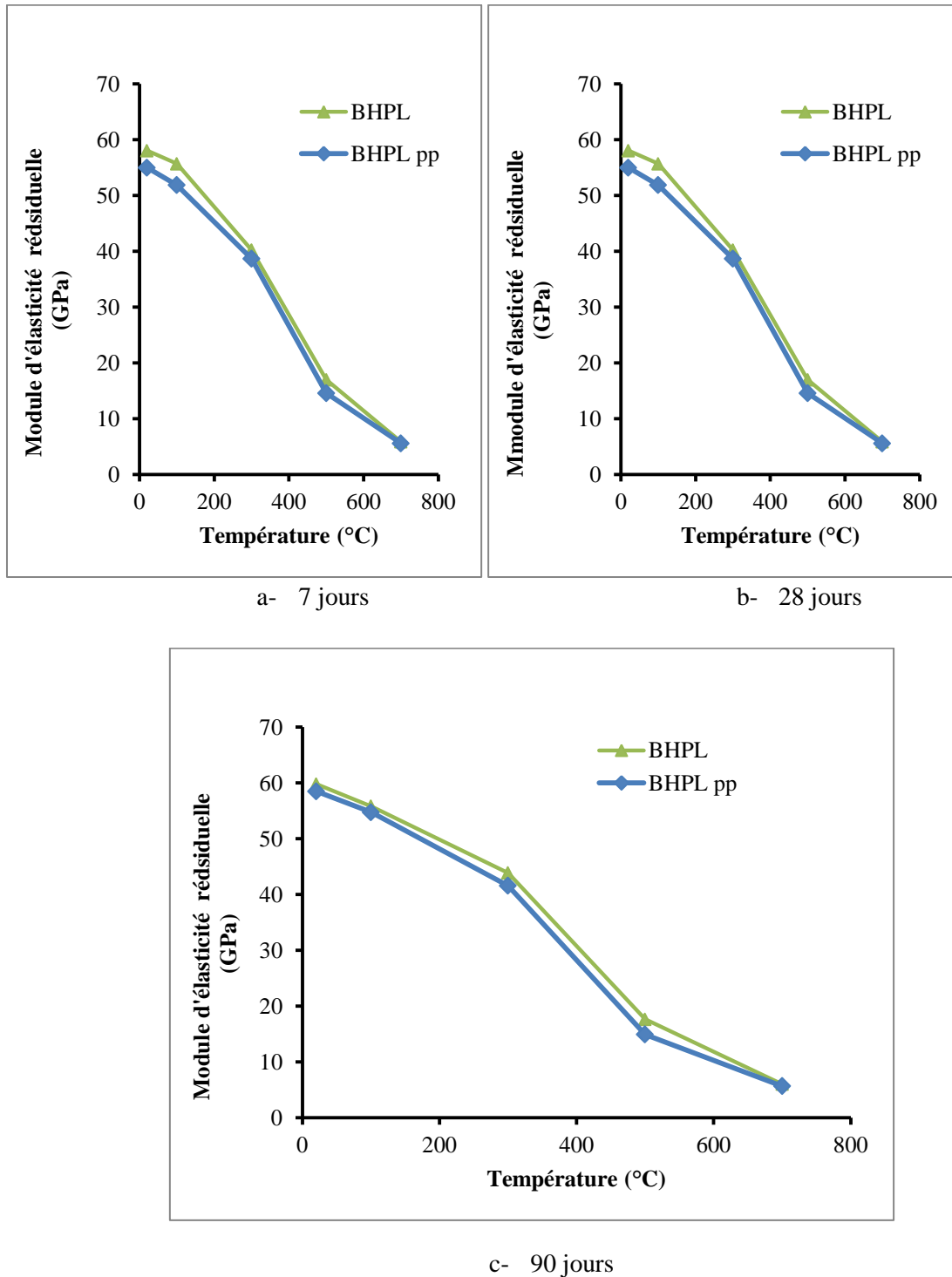


Figure III.21. Évolution du module d'élasticité résiduelle des bétons fibrés à base du fillers de laitier en fonction de la température de chauffage.



✚ Béton à base de fillers de la fumée de silice

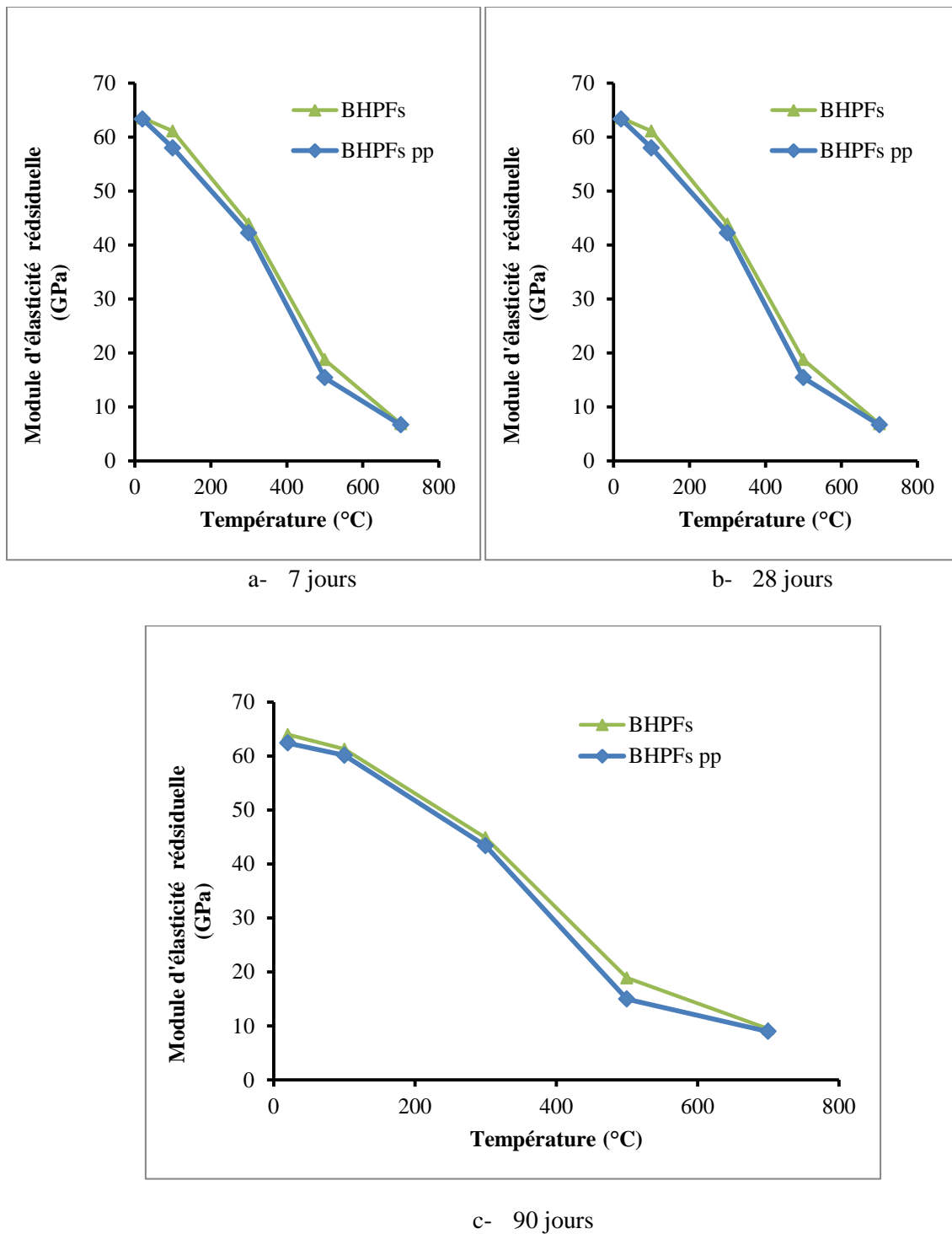
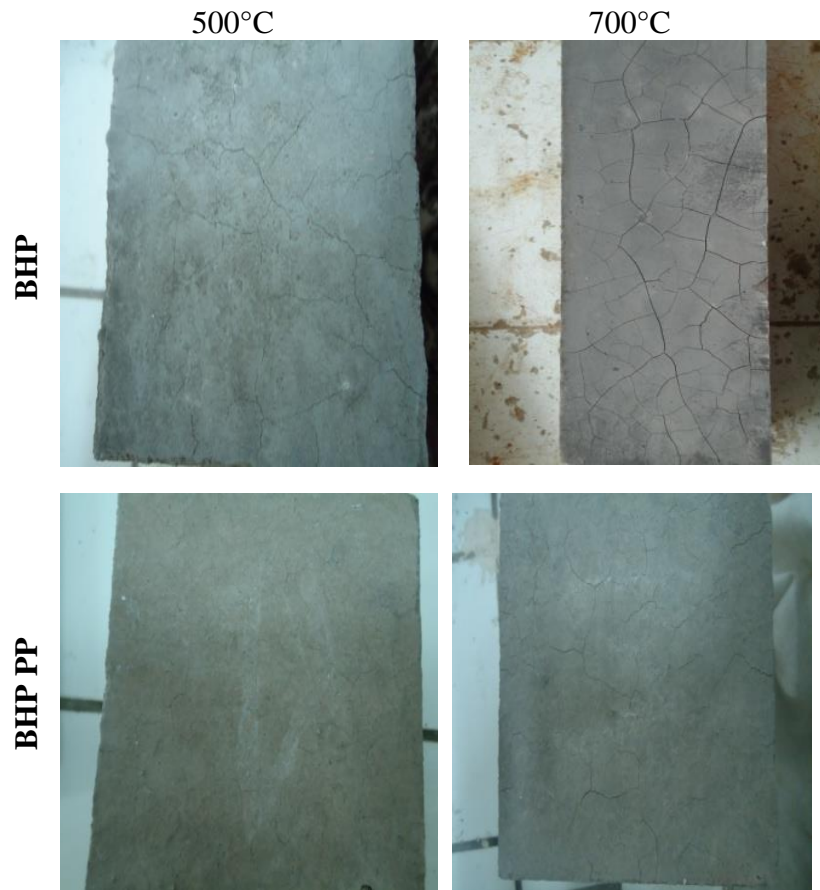


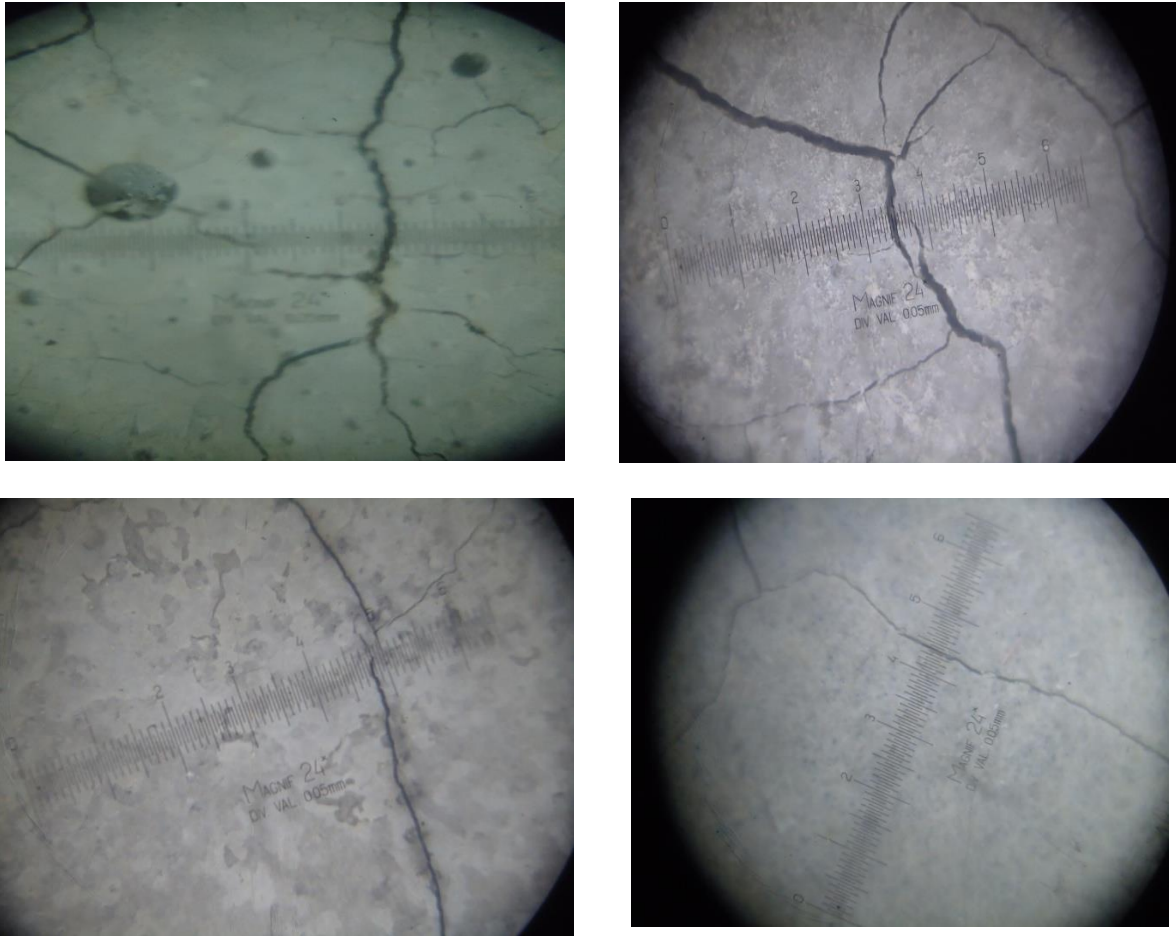
Figure III.22. Évolution du module d'élasticité résiduelle des bétons fibrés à base du fillers de la fumée de silice en fonction de la température.

### **III.3.3. Phénomène d'écaillage ou fissuration**

Les figures III.23 et III.24 montrent l'état de surface de BHP et BHP-PP chauffés à 500°C, 700°C. Après l'exposition à haute température, on observe de nombreuses fissures sur la surface des éprouvettes du BHP, alors que les surfaces des BHP-PP ne contiennent que quelques fissures.



**Figure III.23.** Vue visuelle des éprouvettes avec et sans fibre polypropylène soumis à différente température.



**Figure III.24.** Essai de mesure de l'ouverture des fissures des surfaces de béton.

D'après les figures III.25 et III.26, on constate que les fissures sont de taille de  $15\mu\text{m}$  et  $20\mu\text{m}$  pour les BHPL, de  $10\mu\text{m}$  et  $15\mu\text{m}$  pour les BHPFs après un cycle de chauffage de  $500^\circ\text{C}$  et  $700^\circ\text{C}$  respectivement. Tandis que les fissures des BHPL-PP sont de l'ordre de  $7,5\mu\text{m}$  et  $15\mu\text{m}$ , ainsi que la taille des fissures des BHPFs-PP sont de l'ordre de  $5\mu\text{m}$  et  $10\mu\text{m}$  après un cycle de  $500^\circ\text{C}$  et  $700^\circ\text{C}$  respectivement. La diminution des fissures sur la surface des bétons avec l'ajout des fibres est dû à l'échappement d'abord de l'eau libre facilement évacuable à environ  $105^\circ\text{C}$ , puis de l'eau combinée dans la matrice de ciment qui devient plus difficile comme rapporté par Phan et al. [118].

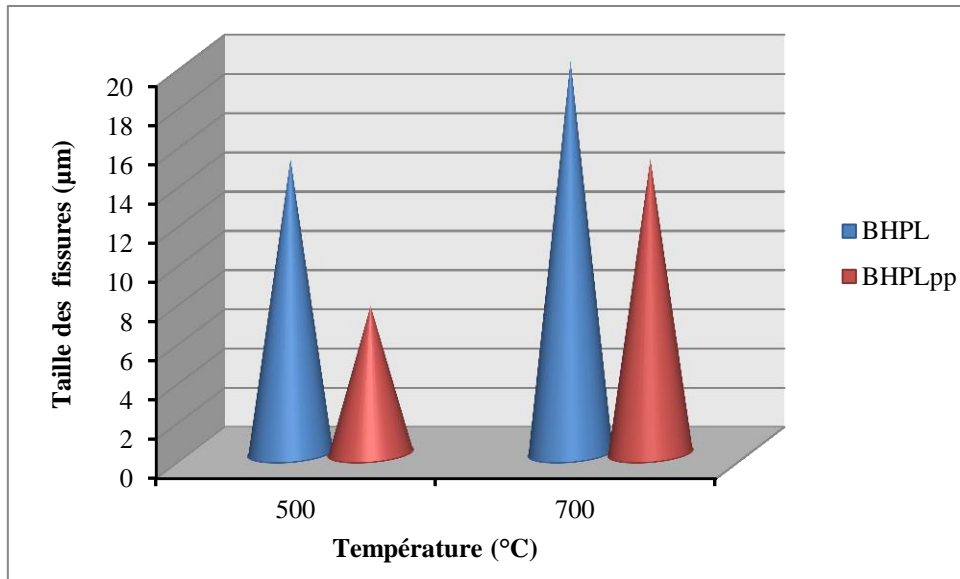


Figure III.25. Taille des fissures dans les bétons à base de laitiers granulée en fonction de la température.

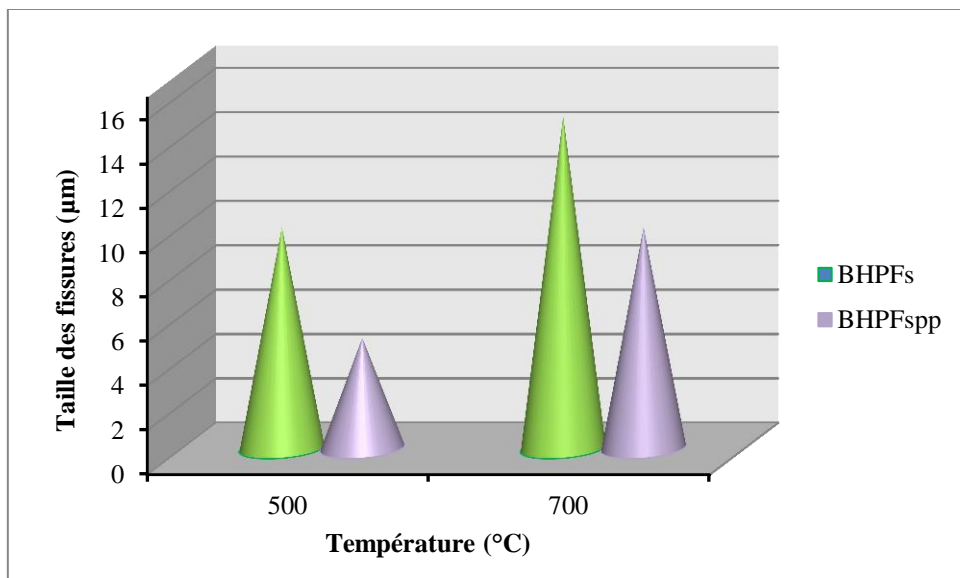


Figure III.26. Taille des fissures dans les bétons à base de la fumée de silice en fonction de la température.

#### III.4. CONCLUSION

Ce chapitre a permis de mettre en évidence le comportement du béton à hautes températures, ainsi que variations de ces propriétés physiques et mécaniques. Plusieurs points peuvent être soulignés:

- La perte de masse diminue avec l'augmentation de la température dans tous les bétons, jusqu'à 100 °C la diminution était très faible. La phase entre 100°C et 300°C, se caractérise par une forte augmentation de la perte de masse.
- L'ajout des fibres polypropylène ne modifier pas l'allure de la courbe de la perte de masse et montre une légère augmentation de la perte de masse à celle des bétons sans fibres.
- La porosité des bétons BHPL et BHPFs augmente avec l'augmentation de la température. Et le BHPFs reste moins poreux que le BHPL, quelque soit la température considérée.
- Avec l'augmentation de la température, la porosité des bétons de fibres de polypropylène s'accroît plus vite que celle des bétons sans fibres.
- La résistance en compression diminue avec l'augmentation de la température. La résistance du BHPFs reste supérieure à celle du BHPL. Tous les bétons présentent une faible diminution de la résistance entre les températures 20°C et 300°C. A 300°C, on constate un gain de résistance pour les deux types des bétons.
- L'ajout des fibres de polypropylène n'améliore pas la résistance résiduelle en compression.
- La résistance résiduelle à la traction et le module d'élasticité dynamique sont diminués avec la montée en température pour tous les bétons d'étude.
- Les fibres polypropylènes améliorent le comportement au feu des bétons à hautes performance.



**CHAPITRE IV**

**MICROSTRUCTURE DES BÉTONS À HAUTE  
PERFORMANCE**

## **IV.1. INTRODUCTION**

Afin de confirmer les performances mécaniques obtenues dans le chapitre précédent et répondre aux exigences des BHP, une étude microstructurale est abordée dans ce dernier chapitre.

Des observations au microscope électronique à balayage, Analyse par diffraction des rayons X (DRX) sont réalisées sur des BHP soumis à deux gammes de température de 20°C et 700°C.

Des analyses complémentaires thermogravimétriques (ATG) sont réalisées afin de quantifier la quantité globale d'hydrates formés lors de maturations des pâtes de ciment est obtenue en dérivant les courbes obtenues par l'analyse ATG dans le temps. Il est en effet possible de réaliser une comparaison dans un BHP avec et sans fibres en fonction de la haute température. Cette étude commence par une description détaillée du protocole expérimentale utilisé, suivi d'une présentation et interprétation des résultats obtenues.

## **IV.2. PROTOCOLE EXPERIMENTAL**

### **IV.2.1. Observation au microscope électronique à balayage**

Le principe du microscope électronique à balayage (MEB) est de balayer un échantillon avec un faisceau d'électrons incidents. L'interaction de ce faisceau avec un matériau conduit alors à l'émission d'électrons secondaires qui proviennent de la zone superficielle du matériau. L'intensité de l'émission dépend de la topographie de surface du matériau du potentiel local et du numéro atomique de l'élément excité. Les matériaux observés sont généralement recouverts de carbone pour améliorer leur conductibilité superficielle. Le faisceau d'électrons émis est transformé en signal électrique, ce dernier module l'intensité du faisceau d'un tube à balayage synchrone. L'image est obtenue après balayage complet de l'écran.

Les observations au MEB (figure IV.1) ont porté sur des échantillons de béton soumis à une température ambiante 20°C et après un traitement à hautes températures de 700°C dans le but de compléter les analyses aux rayons X et observer l'évolution de la microstructure de ces bétons en fonction de la température de traitement.



Figure IV.1. Microscope électronique à balayage (LMDC-INSA Toulouse).

#### IV.2.2. Analyse par Diffraction des Rayons X (DRX)

La diffraction des rayons X est une méthode qui permet l'identification des phases cristallines d'un matériau. Elle permet aussi de réaliser des analyses quantitatives ou semi-quantitatives, en comparaison avec un échantillon étalon. L'analyse par diffraction des différents échantillons a été effectuée à l'aide d'un diffractomètre de type siemens D5000 équipé d'un monochromateur arrière SOLLER et d'une anticathode au cobalt  $\text{Co.K}\alpha$  ( $\lambda = 1,789 \text{ \AA}$ ). Toutes les analyses ont été réalisées sur une plage de  $10$  à  $60^\circ$  ( $2\theta \text{ Co. K}\alpha$ ), avec un pas d'avancement de  $0,02^\circ$  et un temps de comptage de 12 secondes, sur des échantillons préalablement broyés. Le processus de broyage est réalisé manuellement au mortier d'Agate (taille des grains inférieure à  $63 \mu\text{m}$ ). Ce procédé de broyage, contrairement à un broyage mécanique classique pouvant détériorer certains hydrates (l'ettringite) par échauffement, ne génère pas de chaleur importante comme celle générée par l'échauffement mécanique du broyeur.





**Figure IV.2.** Dispositif utilisé pour l'analyse par Diffraction des Rayons X (*LMDC-INSA Toulouse*).

### IV.2.3. Analyse Thermogravimétrique (ATG)

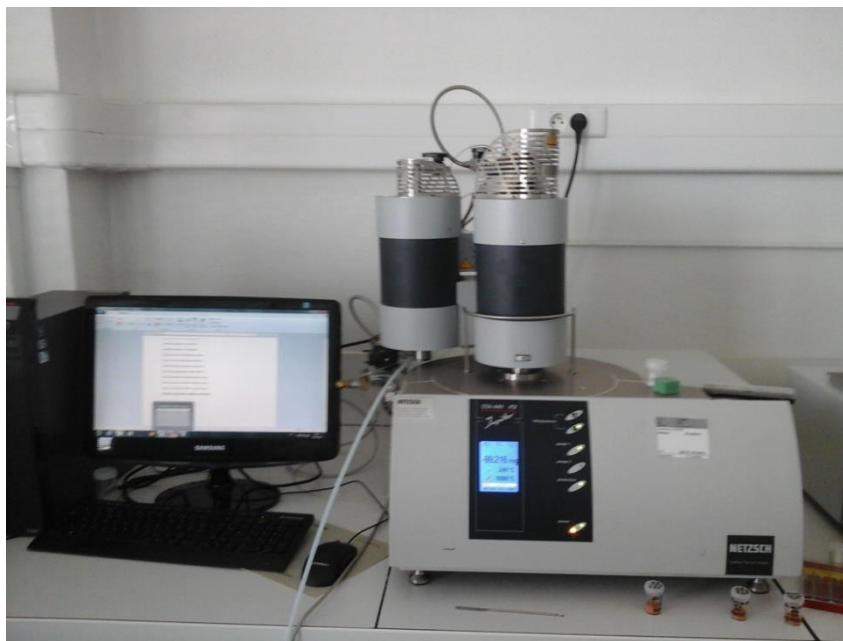
La technique d'analyse thermogravimétrique ATG est utilisée pour les matériaux cimentaires afin d'évaluer, de façon quantitative, les proportions des différentes phases (ettringite, C-S-H, Portlandite, calcite, etc.) qui y sont présentes dans une matrice cimentaire. Elle consiste à chauffer un échantillon du matériau testé en mesurant l'évolution de sa masse avec la température. Cette masse diminue en effet notablement lors de la déshydratation (ou déshydroxylation) de l'ettringite, des C-S-H et de la Portlandite  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  et lors de la décarbonatation de la calcite. Dans le cas d'une pâte de ciment, ces réactions de décomposition chimique sont étagées les unes par rapport aux autres, ce qui permet de spécifier la contribution de chaque phase à la perte de masse.

Ce système peut être couplé à une mesure différentielle de la température (ATD), qui donne une évaluation du flux de chaleur perdue ou emmagasinée au cours du chauffage. Les pics du flux de chaleur correspondent aux réactions de décomposition chimiques qui se produisent lors du chauffage. En l'absence d'ATD, les résultats de l'ATG sont dérivés et lissés afin d'obtenir les courbes dérivées thermogravimétriques (DTG) qui présentent également des pics

traduisant les points d'inflexion des courbes d'ATG et correspondant aux réactions chimiques qui ont lieu. Dans les deux cas, l'utilisation des pics d'ATD ou de DTG permet de délimiter nettement les températures de début et de fin des réactions de décomposition avec le chauffage.

Les analyses thermiques vont permettre de qualifier et de quantifier les phases hydratées, qu'elles soient cristallisées ou bien amorphes au travers de leur décomposition avec l'élévation de la température.

L'analyse thermogravimétrique est quantitative. Le principe consiste à mesurer la perte de masse induite par la décomposition des hydrates lors d'une élévation de température (ici de la température ambiante jusqu'à 1000°C, à raison de 10°C/min). L'échantillon (de béton réduit en poudre de 63µm), de masse égale à environ 200 mg, est placé dans un creuset cylindrique en quartz. L'appareil utilisé est un dispositif Netzsch STA 499 F3 couplé au logiciel Netzsch Proteus Software pour le dépouillement et l'analyse en déconvolution de la courbe dérivée (voir figure IV.3).



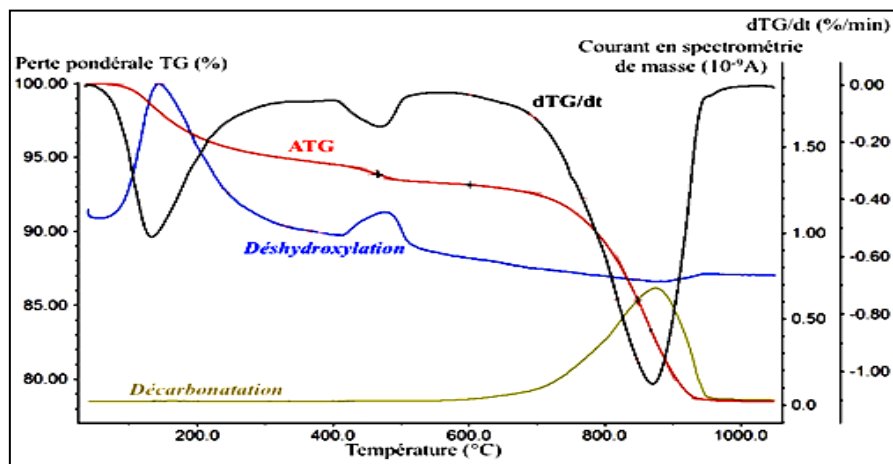
**Figure IV.3.** Dispositif utilisé pour l'analyse thermogravimétrique (*LMDC-INSA Toulouse*).

#### ❖ **Manière d'exploitation des résultats de l'ATG et de la DTG**

Les résultats obtenus à partir d'une analyse thermique sont traités selon deux aspects qui sont indiqués au niveau de la figure IV.4 :

- la courbe brute : pourcentage en perte de masse en fonction de la température (ATG en rouge),
- la courbe dérivée de la perte pondérale dans le temps en fonction de la température et notée DTG/dt en noir).

En parallèle, un suivi en spectrométrie de masse permet de dissocier les pertes de masse associées à la déshydroxylation des hydrates (en bleu sur la Figure IV.4) ou à la décarbonatation de certaines phases (en vert).



**Figure IV.4.** Courbes issues d'une analyse thermique et exploitations associées [119].

L'exploitation de cette analyse est effectuée à l'aide des intervalles de températures associés à la décomposition des phases reconnues [34] [10] [35] [7] et [120], ces intervalles sont résumés comme suit :

- **30 à 105 °C:** L'eau évaporable est éliminée. Dans cette étude, on s'affranchit de l'eau évaporable grâce au procédé de lyophilisation.
- **110 à 170 °C :** Les décompositions du gypse, avec une double réaction endothermique, de l'ettringite, de certains aluminates de calcium hydratés et des silicates de calcium hydratés (C-S-H pour 100-180°C) interviennent.
- **180 à 350 °C:** La perte d'eau est due à la décomposition d'autre C-S-H et des silicoaluminates de calcium hydratés.
- **450 à 570 °C:** La déshydroxylation de la portlandite apparaît.
- **650 à 750 °C:** La décarbonatation de la calcite de carbonatation.
- **850 à 920 °C:** La décarbonatation de la calcite présente dans le ciment ou les granulats.

### **IV.3. RESULTATS ET INTERPRETATION**

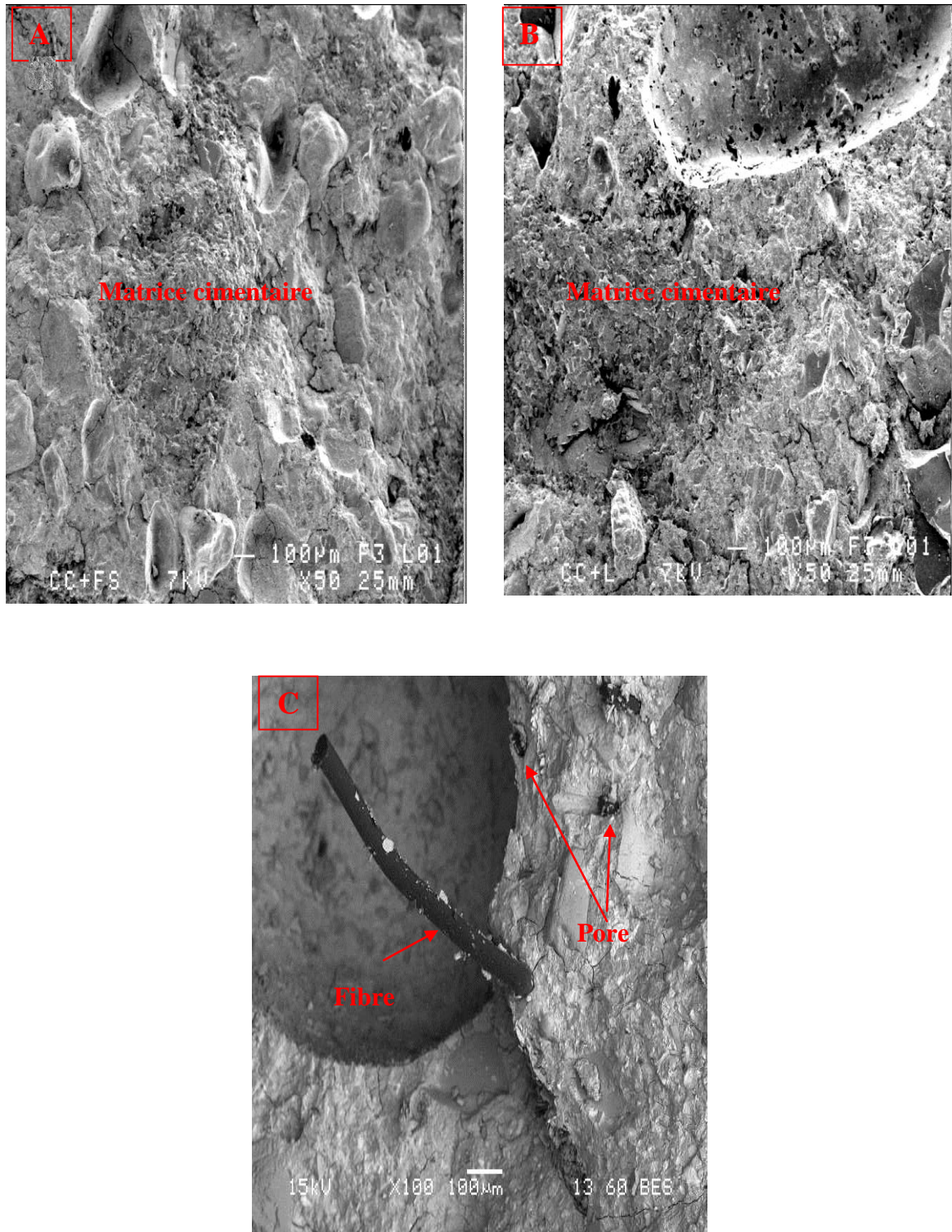
#### **IV.3.1. Observation au microscope électronique à balayage**

Les figures IV.5 et IV.6 illustrent les observations au microscope électronique à balayage (MEB) de la microstructure des bétons à haute performances fibrés et non fibrés à température ambiante (20 °C) et ceux chauffés à 700 °C. Ces observations nous a permis d'analyser la transformation de la microstructure de ces bétons après le chauffage.

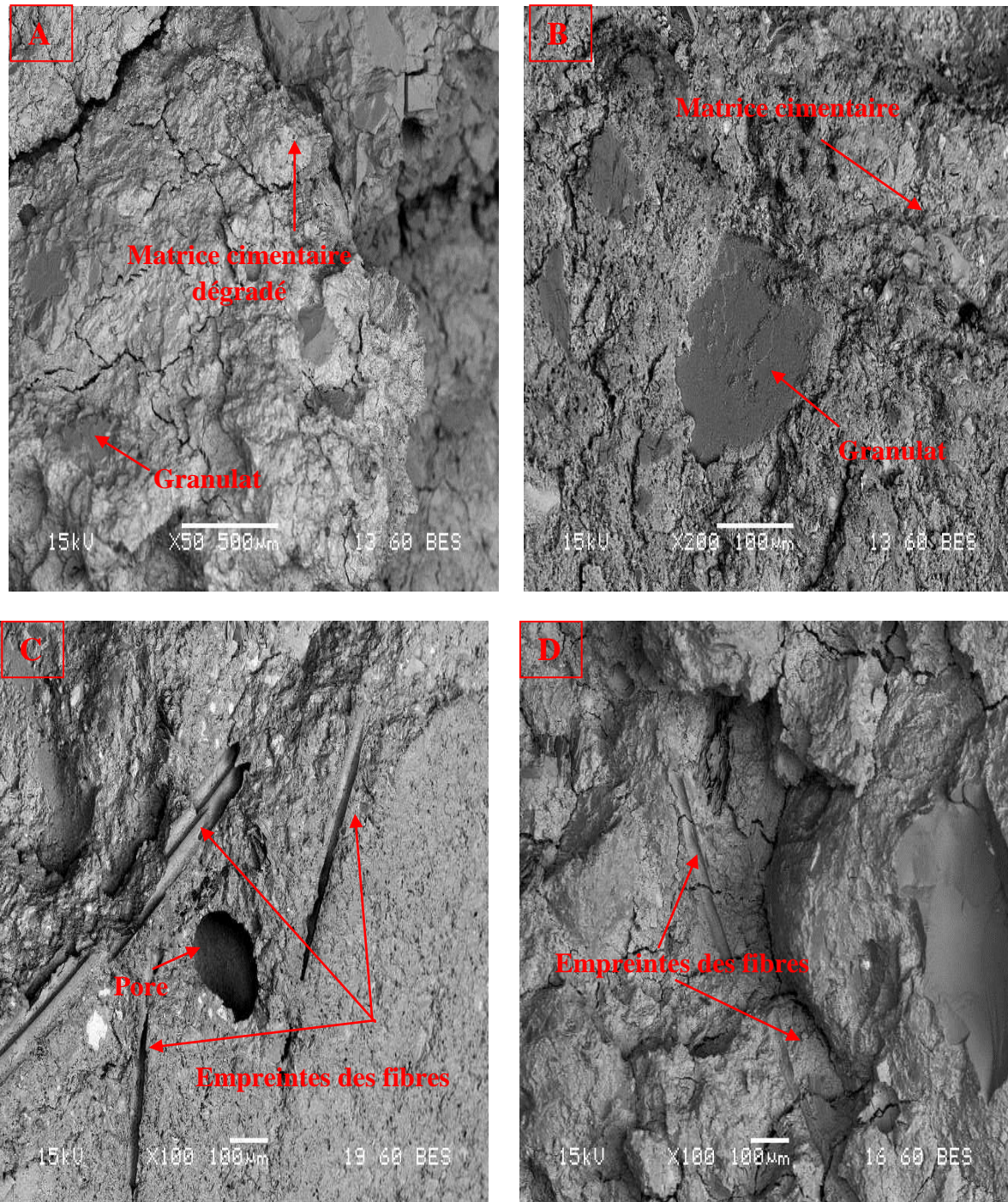
Par l'analyse de la figure IV.5 (A et B) on peut voir que à température ambiante le béton sans fibre présente une microstructure dense avec une bonne adhérence matrice cimentaire – granulats. Par contre le béton fibré (figure C) présente une légère porosité causé par l'ajout des fibres.

La figure IV.6 (A et B) montre une modification au niveau de la microstructure après le chauffage à 700 °C, on peut observer que le matériau béton devient plus poreux. Cette augmentation de la porosité est liée à l'ouverture de microfissures engendrée par la dilatation matrice cimentaire – granulats suite au départ d'une grande partie de l'eau chimiquement liée à une température élevée de chauffage. Ceci confirme nos résultats des propriétés mécaniques et physiques qui sont obtenues dans le précédent chapitre.

La présence des fibres de polypropylène montre aussi une augmentation de la porosité. Cette porosité est liée à la fusion du polypropylène lors de la montée en température comme montre la figure IV.6 (C et D). De plus, le réseau généré par la fusion des fibres facilite le transport de flux et l'évacuation de matière.



**Figure IV.5.** Microstructure des bétons à température ambiante (A et B sont des bétons non fibrés, C est un béton fibré).



**Figure IV.6.** Microstructure des bétons après un chauffage à 700°C (A et B sont des bétons non fibrés, C et D sont des bétons fibrés).

### **IV.3.2. Analyse par Diffraction des Rayons X (DRX)**

Les figures IV.7, IV.8, IV.9, IV.10, IV.11 et IV.12 illustrent les diagrammes de diffraction des rayons X des BHP à base des fillers de laitier granulé, de la fumée de silice et ceux avec l'ajout des fibres polypropylène soumis au un cycle de chauffage- refroidissement de 700°C et ceux non chauffés.

On remarque d'après les figures que tous les diffractogrammes sont similaires quelle que soit le types de béton.

D'après les figures IV.7, IV.9 des bétons non chauffés (à température ambiante) on constate la présence de la portlandite, de calcite, de quartz- $\alpha$  et l'ettringite, dont elle est détectée à  $2\theta = 10.6^\circ$  [120]. Les carboaluminates n'ont pas été détectés, parce que la raie principale  $2\theta$  de ces éléments est inférieure à  $10^\circ$ .

Les diffractogrammes des bétons chauffés à 700°C présentent nettement que tous les pics correspondants à l'ettringite et la portlandite disparaissent. La diminution de la portlandite est due à la décomposition d'hydroxyde de calcium qui commence entre 450 et 500°C. Cette transformation a été également observée sur les essais de l'ATG.

Ce qui concerne l'ettringite, elle commence à perdre son eau de constitution à partir de 80°C et devient amorphe pour des températures supérieures à 100°C. Ceci la rend alors indétectable par cette technique. De même, le monocarboaluminate de calcium hydraté se déshydrate à partir de 150°C.

Par contre, on ne détecte pas la transformation allotropique du quartz- $\alpha$  en quartz- $\beta$  entre les diffractogrammes de 20°C et 700°C car il s'agit d'une transformation réversible.

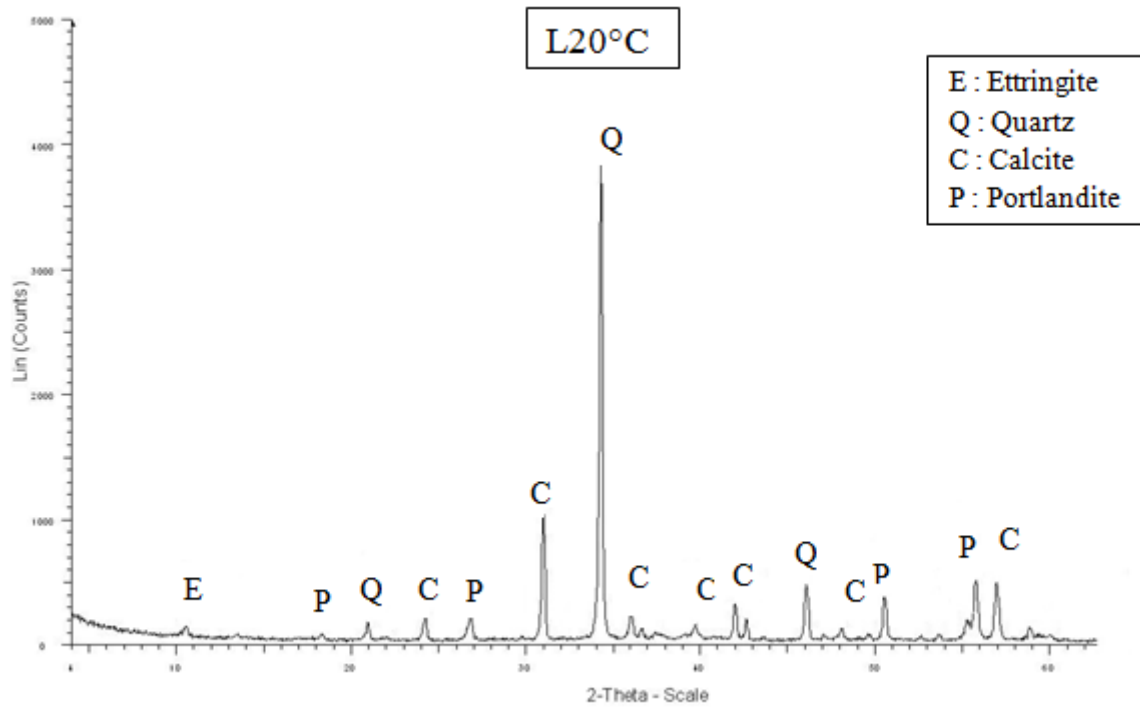


Figure IV.7. Diagrammes de diffraction des rayons X des BHPL 20 °C.

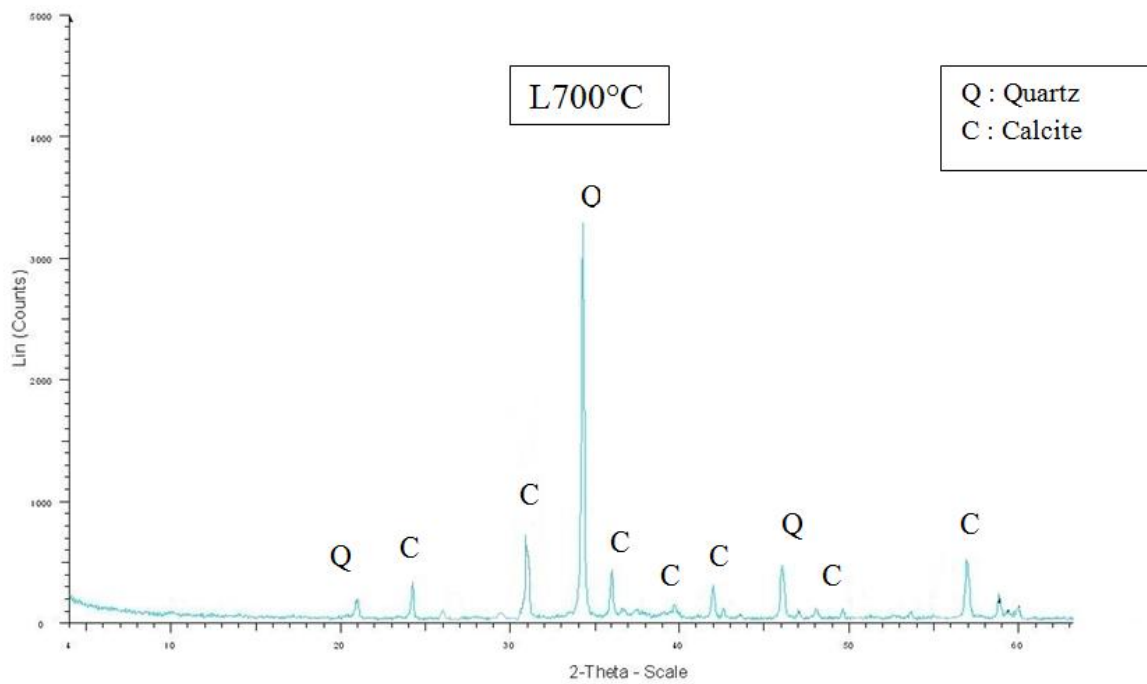


Figure IV.8. Diagrammes de diffraction des rayons X des BHPL 700 °C.



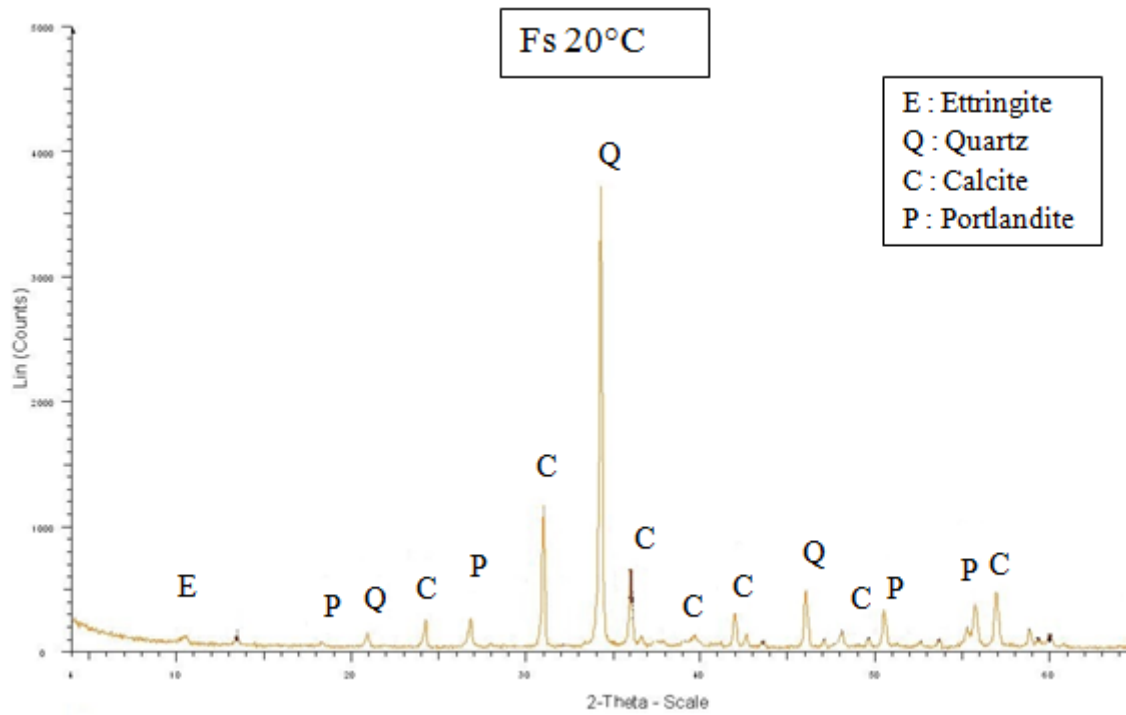


Figure IV.9. Diagrammes de diffraction des rayons X des BHPFS 20 °C.

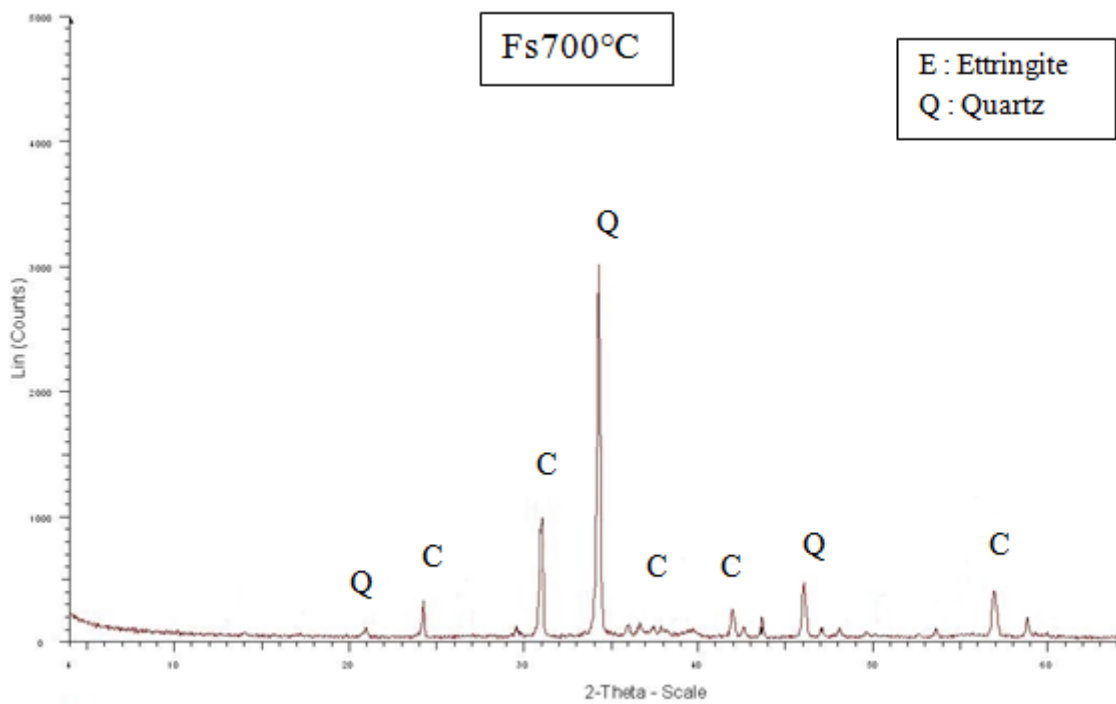


Figure IV.10. Diagrammes de diffraction des rayons X des BHPFS 700 °C.

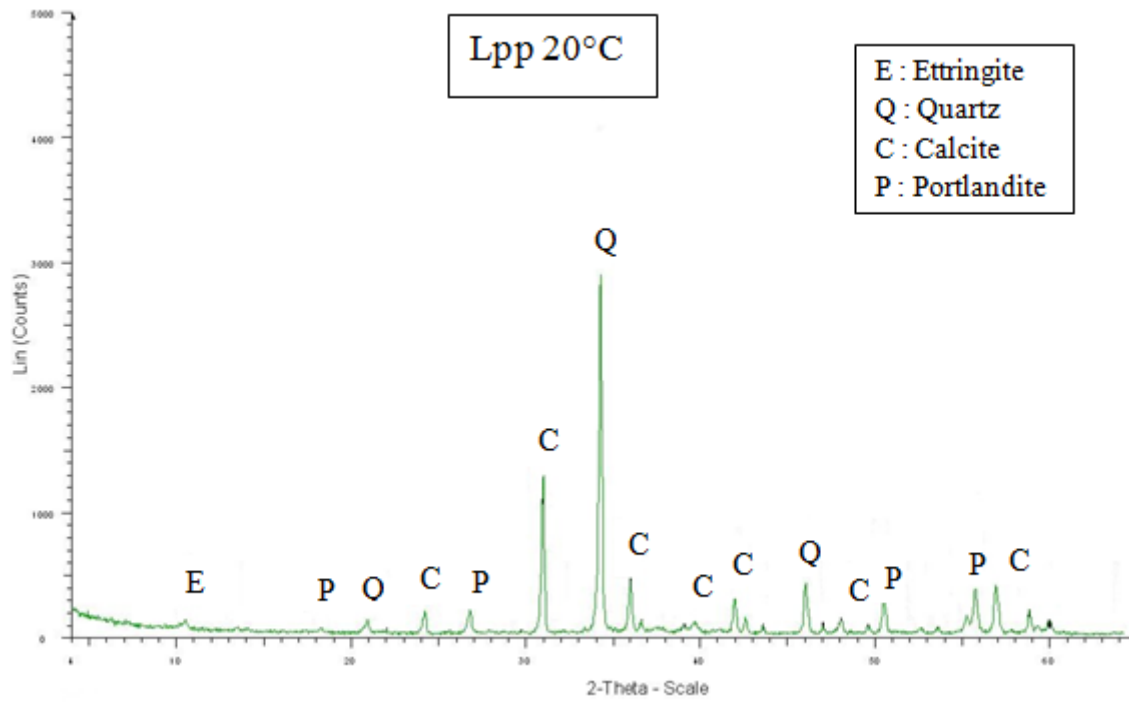


Figure IV.11. Diagrammes de diffraction des rayons X des BHPLpp 20 °C.

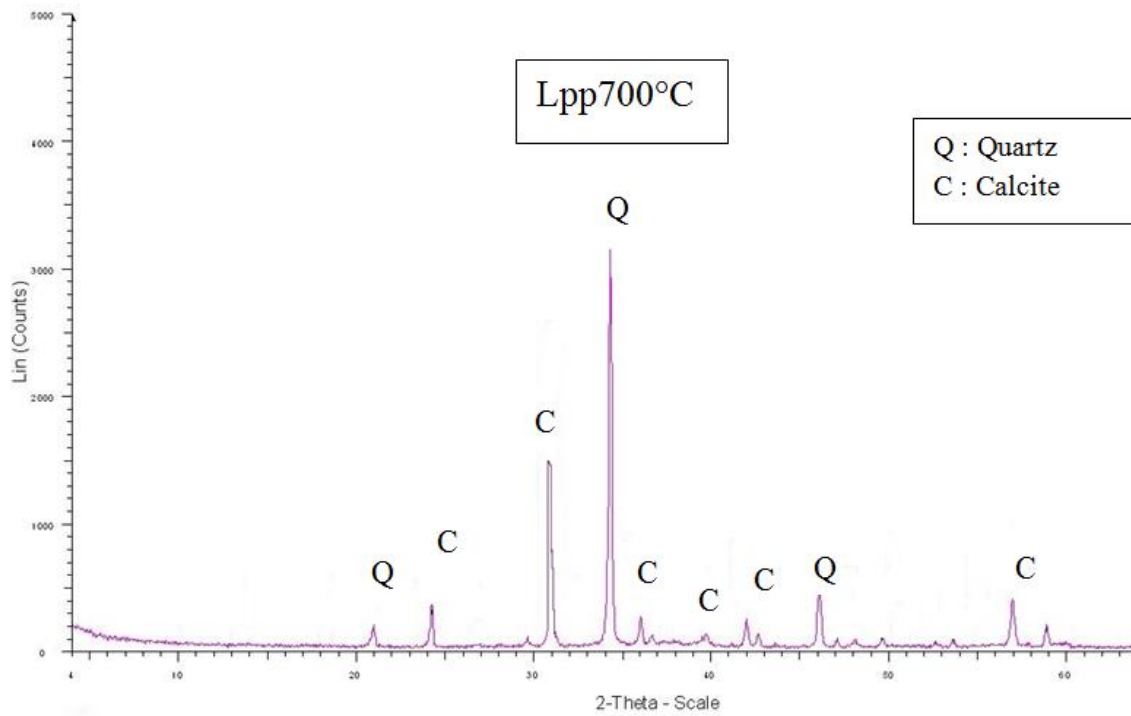


Figure IV.12. Diagrammes de diffraction des rayons X des BHPLpp 700 °C.

### IV.3.3. Analyse Thermogravimétrique (ATG)

Les résultats des analyses thermiques réalisées sur des échantillons de BHP à base des fillers de laitier granulé, de la fumée de silice à température ambiante avec et sans l'ajout des fibres polypropylène sont présentés sur les figures ci-dessous (figures IV.13, IV.14, IV.15, IV.16). Les courbes en pointillés correspondent aux analyses thermogravimétriques (ATG) et les courbes en traits unis à la dérivée de la perte pondérale dans le temps en fonction de la température (DTG).

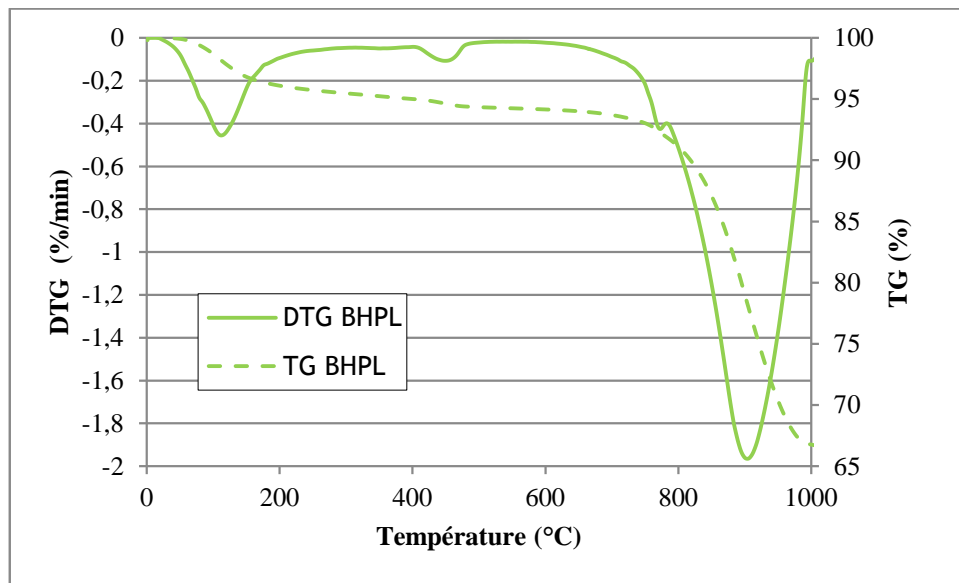


Figure IV.13. Analyse thermogravimétrique des échantillons du BHPL.

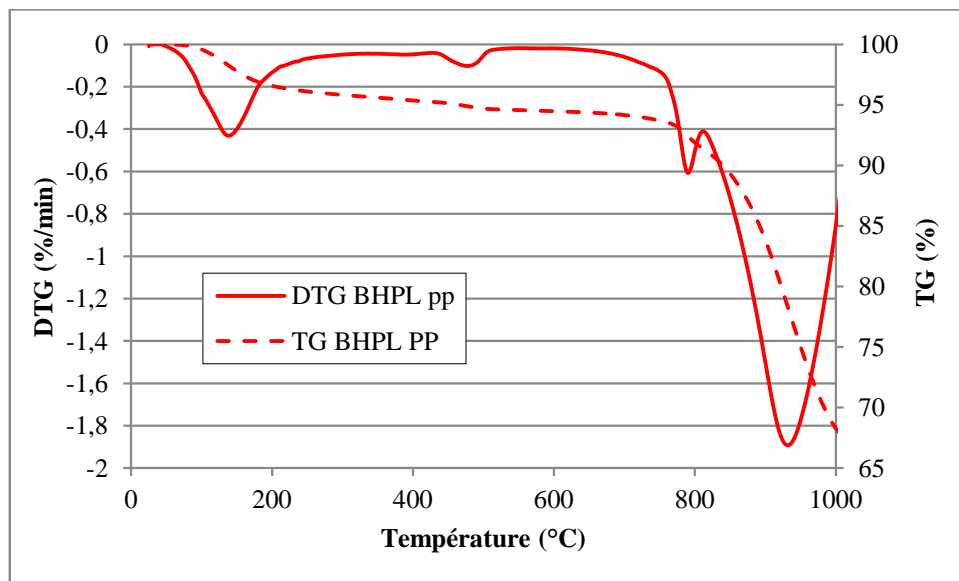
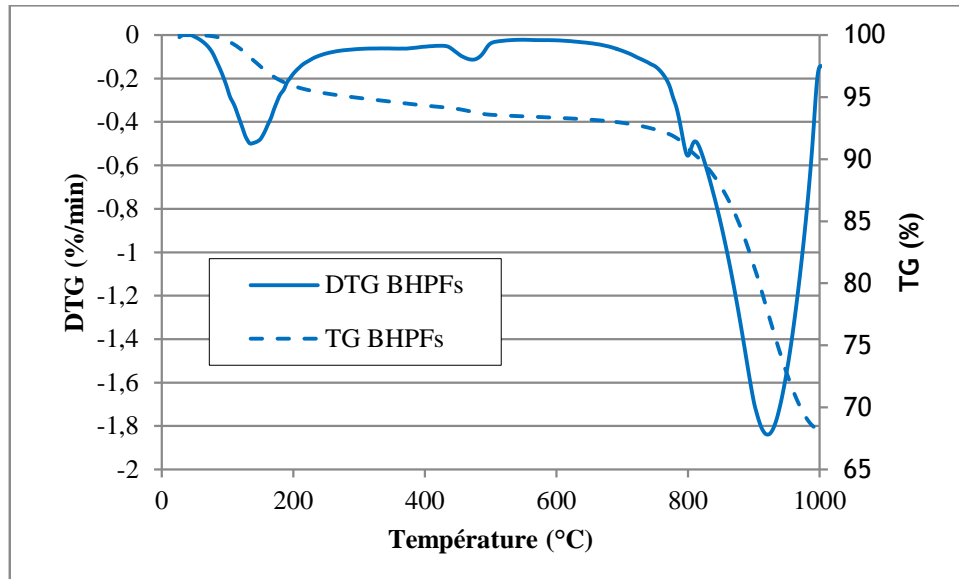
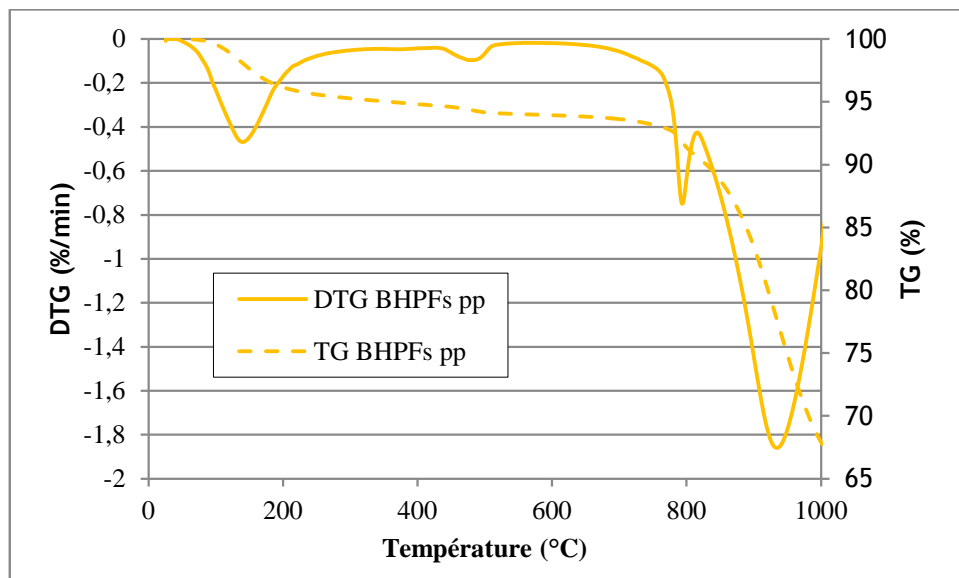


Figure IV.14. Analyse thermogravimétrique des échantillons du BHPL pp.



**Figure IV.15.** Analyse thermogravimétrique des échantillons du BHPFs.



**Figure IV.16.** Analyse thermogravimétrique des échantillons du BHPFs pp.

L'analyse thermogravimétriques (TG) sur les BHP à base du laitier granulé sans et avec fibres (BHPL et BHPLpp) donne des pertes de masse totales respectivement de l'ordre de 31,34% et 30,33%, qui présentent l'accumulation de trois diminutions de masse.

Pour le cas des BHP à base de fumé de silice sans et avec fibres (BHPFs et BHPFspp), l'analyse thermique (TG) donne des pertes de masse totales respectivement de l'ordre de 30,65% et 29,08%, qui présentent l'accumulation de trois diminutions de masse.

D'après les figures (IV.10, IV.11, IV.12, IV.13). On peut distinguer des différents pics relatifs aux principales pertes de masse :

- Une première perte de masse aux alentours de 120°C est due à l'évaporation d'eau et à la déshydratation des C-S-H et de l'ettringite [34], [119].
- Une deuxième perte de masse aux alentours de 450°C correspond à la déshydratation de la portlandite [ $\text{Ca(OH)}_2 \rightarrow \text{CaO} + \text{H}_2\text{O}$ ].
- Une troisième perte de masse très importante, aux alentours de 800°C, traduit la décarbonatation de la calcite contenue dans les granulats calcaires [ $\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$ ].

Les trois pics de perte de masse correspondant aux différentes températures du BHP à base de filler de laitier granulé sont très semblables à ceux des BHP à base de fumée de silice.

#### IV.4. CONCLUSION

Ce chapitre a permis de mettre en évidence la réponse, l'évolution de la microstructure des bétons à des hautes températures avec l'augmentation de la température. Les résultats obtenus confirment les bonnes performances mécaniques obtenues dans le chapitre précédent

- Les observations au microscope électronique à balayage (MEB) montrent que à température ambiante le béton présente une microstructure plus au moins dense et avec un minimum de porosité. Par contre après un chauffage à 700 °C, le béton devient plus poreux cela est due au départ d'une grande partie de l'eau chimiquement liée à une température élevée de chauffage. La présence des fibres de polypropylène montre aussi une augmentation de la porosité. On peut traduire ça par la fusion du polypropylène lors de la montée en température.
- Les résultats des analyses par Diffraction des Rayons X et des analyses Thermogravimétrique confirment la dégradation de la microstructure des bétons en fonction de la température: certaines transformations chimiques ont lieu comme la décomposition de la portlandite, la perte de l'eau conduisant à la destruction des gels de C-S-H ou encore la transformation du quartz- $\alpha$  en quartz- $\beta$ . Tous ces changements créent une porosité additionnelle entraînant une augmentation de porosité. Ces transformations physico-chimiques entraînent des répercussions importantes sur les propriétés physiques et mécaniques.



**CONCLUSION GENERALE**

## **CONCLUSION GÉNÉRALE ET PERSPECTIVES**

L'objectif de ce travail est d'étudier et mieux comprendre le comportement à haute température des bétons à haute performance, et surtout celles qui sont préparés avec les fillers de laitier granulé en substitution totale de la fumée de silice.

Le premier chapitre de cette thèse a été consacré à l'étude bibliographique dans lequel il est rappelé les travaux réalisés sur l'évolution des propriétés physiques et mécaniques des bétons soumis à haute température. Le programme expérimental réalisé comporte trois parties. La première partie établie dans le deuxième chapitre présente les compositions des matériaux étudiés. Une optimisation de la formulation des BHP et les résultats d'essais expérimentaux qui caractérisent l'influence de la nature de l'addition minérale et du l'ajout des fibres polypropylène sur les propriétés des BHP à l'état frais. Dans le troisième chapitre, décrive le comportement physique et mécanique des BHP sous différents cycle de chauffage - refroidissement. Le quatrième chapitre concerne une étude microstructurale est abordée afin de confirmer les résultats obtenus.

Sur la base des résultats obtenus nous pouvons établir des conclusions suivantes :

### **Propriété physique**

- La perte de masse est diminuée avec l'augmentation de la température dans tous les bétons. À 100°C, la perte de masse était très faible. Ceci peut être expliqué par le départ de l'eau libre contenue dans les pores du béton (séchage du béton). à 300°C se caractérise par une forte augmentation de perte de masse. Cette forte perte de masse correspond au départ de l'eau liée chimiquement. A 700°C, la perte de masse est due à la dégradation de la matrice cimentaire.
- L'ajout des fibres polypropylène montre une légère augmentation de la perte de masse par rapport à celle des bétons sans fibres. Cette perte de masse additionnelle peut être liée à la fusion du polypropylène lors de la montée en température ce qui facilite le transport de flux et l'évacuation de matière.

- Quel que soit le changement de cycle de température (ambiante ou à 700°C), les BHPFs sont moins poreux que les BHPL. Ceci est justifié par l'effet de remplissage de la fumée de silice qui réduit la porosité totale et par l'effet pouzzolanique ou hydraulique qui améliore la compacité de la matrice cimentaire.
- la porosité des bétons BHPL et BHPFs augmente avec l'augmentation de la température. Et le BHPFs reste moins poreux que le BHPL quelque soit à la température ambiante ou à 700°C. Ces résultats montrent que lors du chauffage, la microstructure du béton est modifiée et le matériau béton devient plus poreux. Cette porosité ouverte facilite le transport de flux d'humidité, réduisant ainsi « l'effet bouchon ».
- Avec l'augmentation de la température, la porosité des bétons de fibres de polypropylène s'accroît plus vite que celle des bétons sans fibres, la présence de fibres de polypropylène dans le béton chauffé entraîne une augmentation du volume poreux et modifie la cinétique d'apparition de la porosité.

### **Propriété mécanique**

- l'augmentation de la température diminue la résistance en compression résiduelle des BHP. A toutes les gammes des températures, la résistance du BHPFs reste supérieure à celle du BHPL. Ceci peut s'expliquer par le fait que la fumée de silice est une addition à caractère très pouzzolanique qui accélère les résistances mécaniques et grâce à sa finesse plus élevée
- Tous les bétons présentent une faible diminution de la résistance résiduelle en compression entre la température ambiante à la température 100°C, Ceci est dû à la dilatation thermique de l'eau qui provoque un écartement des feuilletts du gel CSH. Cet écartement entraîne une diminution des forces d'attraction entre les feuilletts et engendre la naissance de microstructures. A température 300°C, un gain de résistance pour les deux bétons a été constaté. Ce gain est dû au départ de l'eau qui permettant de réaugmentation des forces d'attraction par le rapprochement des feuilletts de CSH. Au-delà de la température 300°C, la résistance résiduelle en compression décroît plus rapidement. Les résistances obtenues après un chauffage à la température 700°C sont toutes inférieures à 40 MPa. Cet endommagement est dû à la dégradation de la matrice cimentaire et aussi à la désagrégation des granulats



- De la température ambiante à 300°C, une légère amélioration de résistance résiduelle en compression des bétons fibrés été remarquée et, au-delà de 300°C, la résistance résiduelle en compression baisse considérablement. L'ajout des fibres de polypropylène n'améliore pas la résistance résiduelle en compression. Ceci expliquer par l'augmentation de porosité générée par la fusion/vaporisation du polypropylène couplée avec l'apparition de microfissures engendre donc une perte de résistance du béton.
- La résistance résiduelle en traction par flexion diminue avec la montée en température pour tous les bétons d'étude. Au-delà de 300°C, on observe que la baisse de la résistance en traction devient plus élevée, tous les bétons perdent plus de 60% de leur résistance initiale à 700°C. Cela est dû à la dégradation de la matrice cimentaire (la décomposition de la portlandite et les CSH).
- A la température ambiante, on constate une légère baisse de résistance résiduelle à la traction pour tous les BHP fibrés. Cela peut expliquer que le dosage élevé en fibre de polypropylène perturbe le réseau cristallin de la matrice cimentaire. L'évolution de la température diminue La résistance résiduelle à la traction des bétons fibrés. Cela peut être expliqué par que dans un matériau à faible perméabilité, le polypropylène fondu diffuse moins dans la matrice cimentaire. Cette faible propagation du polypropylène, couplée à une fissuration induite par l'augmentation de volume de fibre avec la température, explique le fait que la résistance résiduelle en traction n'est pas améliorée.
- L'évolution du module d'élasticité peut être aussi scindée en deux domaines. Jusqu'à 300°C, on note une diminution progressive du module d'élasticité. Tous les bétons ont pu conserver au moins 50% de leur module d'élasticité initial. Cette perte de module d'élasticité s'explique par l'augmentation de la porosité due à la déshydratation de la pâte cimentaire. Au-delà de 300°C, le second domaine est caractérisé par une forte baisse du module d'élasticité.
- Globalement, la présence des fibres de polypropylène entraîne une baisse du module d'élasticité. Le module d'élasticité résiduel des bétons BHPFs reste toutefois toujours supérieur au module d'élasticité résiduel des bétons BHPL pour une même température.
- l'addition des fibres polypropylènes est généralement une solution efficace permettant de réduire la sensibilité à l'écaillage des BHP. Les fibres sont

employées en quantité de 0.2% du volume du béton. Ceci correspond à une quantité couramment employée dans le but de la prévention de l'écaillage.

### **Analyse microstructurale**

- Les observations au microscope électronique à balayage (MEB) montrent que à température ambiante le béton présente une microstructure plus au moins dense et avec un minimum de porosité. Par contre après un chauffage à 700 °C, le béton devient plus poreux cela est due au départ d'une grande partie de l'eau chimiquement liée à une température élevée de chauffage. La présence des fibres de polypropylène montre aussi une augmentation de la porosité. On peut traduire ça par la fusion du polypropylène lors de la montée en température.
- Les résultats des analyses par Diffraction des Rayons X et des analyses Thermogravimétrique confirment la dégradation de la microstructure des bétons en fonction de la température: certaines transformations chimiques ont lieu comme la décomposition de la portlandite, la perte de l'eau conduisant à la destruction des gels de C-S-H. Tous ces changements créent une porosité additionnelle entraînant une augmentation de porosité. Ces transformations physico-chimiques entraînent des répercussions impotentes sur les propriétés physiques et mécaniques.

## **PERSPECTIVES**

Ce travail ouvre plusieurs perspectives concernant aussi bien l'amélioration du comportement au feu des bétons à haute performance et de préciser les mécanismes à l'origine de certains phénomènes observés.

On peut soulever quelques points intéressants à explorer à l'avenir :

- Réaliser ce genre de test avec des éprouvettes à échelle réelle.
- Etudier l'influence de la longueur des fibres polypropylène sur le comportement des BHP.
- Comparer ces résultats expérimentaux avec ceux théoriques (modèles numériques).



**REFERENCES**  
**BIBLIOGRAPHIQUES**

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] Stefano D. P., « *Lien entre la perméabilité et l'endommagement dans les bétons à haute température* », thèse de doctorat, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 2004.
- [2] Kanema M. T., « *Influence des paramètres de formulation sur le comportement à haute température des bétons* », thèse de doctorat, Université de Cergy-Pontoise, 2007.
- [3] Mindeguia J. C., « *Contribution expérimentale à la compréhension des risques d'instabilité thermique des bétons* », thèse de doctorat, Université de Pau et des Pays de l'Adour, 2009.
- [4] Baroghel-Bouny V., « *Caractérisation des pâtes de ciment et des bétons-Méthode, analyse, interprétations* », publié par Laboratoire Central des Ponts et Chaussées et Ministère de l'Équipement, des Transports et du Tourisme, 1994.
- [5] Guillon. E., « *Durabilité des matériaux cimentaires - Modélisation de l'influence des équilibres physico-chimiques sur la microstructure et les propriétés mécaniques résiduelles* », ENS de Cachan.
- [6] Bidossessi A. Prosper P., « *Contribution des fibres de polypropylène et métalliques à l'amélioration du comportement du béton soumis à une température élevée* », thèse de doctorat, Université de Cergy-Pontoise, 2010.
- [7] Belkacem T., « *Etude de l'influence des hautes températures sur le comportement du béton* », thèse de doctorat, Matériaux, Université Mentouri Constantine, 2010.
- [8] Flore B., « *Rôles de la température et de la composition sur le couplage thermo-hydro-mécanique des bétons* », thèse de doctorat, Ecole Centrale De Lille, 2009.
- [9] Baroghel Bouny V., « *Caractérisation microstructurale et hydrique des pâtes de ciment et des bétons ordinaires et à très hautes performances* », thèse de doctorat, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 1994.
- [10] Gaweska I. H., « *Comportement à haute température des bétons à haute performance-évolution des principales propriétés mécaniques* », Thèse de doctorat, Ecole Doctorale MODES, 2004.
- [11] Richardson I. G., « *The calcium silicate hydrates* », Cement and Concrete Research, vol. 38, p. 137-158, 2008.
- [12] Yurtdas I., « *Couplage comportement mécanique et dessiccation des matériaux à matrice cimentaire: étude expérimentale sur mortiers* », thèse de doctorat, Université des Sciences et Technologie de Lille, 2003.

- [13] Ruiz A. L., « *Analyse de l'évolution de la microstructure de la pâte de ciment sous chargements thermiques* », Thèse de doctorat, Ecole Nationale des Ponts et de Chaussées, 2003.
- [14] Sabeur H., « *Etude du comportement du béton a hautes températures, une nouvelle approche thermo-hygro-mécanique couplée pour la modélisation du fluage thermique transitoire* », thèse de doctorat, Université De Marne La Vallée, 2006.
- [15] Dreux G., Festa J., « *Nouveau guide du béton et de ses constituants* », huitième édition, Edition Eyrolles, 2002.
- [16] Benmarce A., « *Résistance du Béton à Hautes Performances vis-à-vis du feu* », thèse de Doctorat, Université de Annaba, 2005.
- [17] Agostini F., Lafhaj Z., Skoczylas F., and Loosveldt H., « *Experimental study of accelerated leaching on hollow cylinders of mortar* », Cement and Concrete Research, vol. 37, p. 71–78, 2007.
- [18] Diamond S., « *The microstructure of cement paste and concrete – a visual primer* », Cement and Concrete Composites, vol. 26, p. 919-933, 2004.
- [19] Malier Y., « *Les bétons à hautes performances – Caractérisation, durabilité, applications* », Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, p.674, 1992.
- [20] Mehta P.K., « *Concrete. Structure, properties, and materials* », Englewood cliff, New Jersey, Prentice-Hall, 1986.
- [21] Mouret M., Bascoul A., Escadeillas G., « *Microstructural features of concrete in relation to initial temperature-SEM and ESEM characterization* », Cement and Concrete Research, vol. 29, p. 369-375, 1999.
- [22] Aitcin P.C., « *The durability characteristics of high performance concrete* », Cement and Concrete Composites, vol. 25, p. 409-420,2003.
- [23] Chaussadent T., Baroghel-Bouny V., Rafai N., Ammouche A., Hornain H., « *Influence du rapport E/C sur l'hydratation, la microstructure et les déformations endogènes de pâtes de ciment durcies* ». Revue Française de Génie Civil, vol. 5, N° 2-3, p.217-230, 2001.
- [24] Vivekanandam K., Patnaikuni I., « *transition zone in high performance concrete during hydration* », vol. 27, p. 817 – 823, 1997.
- [25] INERIS, « *Développement d'une méthodologie d'évaluation des effets thermiques et toxiques des incendies d'entrepôts (DRA-03)* », Rapport intermédiaire Comportement de structures soumises à un incendie, Premières Réflexions Direction des Risques Accidentels, 2001

- [26] Billard Y., « *Contribution à l'étude des transferts de fluides au sein d'une paroi en béton* », Thèse de doctorat, INSA de Lyon, 2003.
- [27] DeSa C., « *Etude hydro-mécanique et thermo-mécanique du béton : influence des gradients et des incompatibilités de déformation* », Thèse de doctorat, ENS de Cachan, 2007.
- [28] Fares H., « *Propriétés mécaniques et physico-chimiques de bétons autoplaçants exposés à une température élevée* », Thèse de doctorat, Université de Cergy-Pontoise, 2009.
- [29] ACI Committee 363, « *State-of-the-Art Report on High-Strength Concrete (ACI 363R-92)* ». ACI Manual of Concrete Practice, American Concrete Institute, Detroit, MI, Part 1-55p., 1993.
- [30] Aitcin P. C., Neville A., « *High-Performance Concrete Demystified* », Concrete International, vol. 15, N° 1, p. 21-26, 1993.
- [31] Forster S. W., « *High-Performance Concrete - Stretching the Paradigm* », Concrete International, Vol. 16, N° 10, p. 33-34, 1994.
- [32] Goodspeed C. H., Vanikar S., et Cook R. A., « *Haut-Performance Concrete Defined pour Highway Structures* », International Concret, vol. 18, N° 2, p. 62-67, 1996.
- [33] 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.
- [34] Xiao-Ting C., « *Effet du chauffage sur le comportement mécanique et poro-mécanique de matériaux cimentaires -propriétés hydrauliques et changements morphologiques* », Thèse de doctorat, École Centrale de Lille, 2009.
- [35] Menou A., « *Etude du comportement thermomecanique des betons a haute Temperature : Approche multi echelles de l'endommagement thermique* », Thèse de doctorat, Université de Pau et des Pays de l'Adour, 2004.
- [36] Harada T., Takeda J., Yamane S., Furumura F., « *Strength, elasticity and thermal properties of concrete subjected to elevated temperatures* », Concrete for Nuclear Reactors, Detroit : American Concrete Institute, SP-39, p. 179-203, 1973.
- [37] Felicetti R., Gambarova P.G., « *Effects of High Temperature on the Residual Compressive Strength of High-Strength Siliceous Concretes* », ACI Materials Journal, vol. 95, N°4, 1995.
- [38] Schneider U., Diederich U., EHM C., « *Effect of temperature on steel and concrete for PCRVS* », Nuclear Engineering and Design, vol. 67, p.245-258, 1981
- [39] « *Fire design of concrete structures - materials, structures and modelling* », International Federation for Structural Concrete.

- [40] Schneider U., « *concrete at high temperature – a general review* ». Fire Safety Journal, vol. 13, p.55-68, 1988.
- [41] Khoury G. A., « *compressive strength of concrete at high temperatures: a reassessment* », Compressive Strength of Concrete Research, Vol. 44, p.291-309, 1992.
- [42] Diederichs U., Jumpanen U-M. and Penttala V., « *Behaviour of high temperatures* », Helsinki University of Technology, Department of Structural Engineering, Report 92. p.723, 1992.
- [43] Bazant Z. P. et Kaplan M. F., « *Concrete at High Temperatures: Material Properties and Mathematical Models* », Pearson Education, 1996.
- [44] Sliwinski J., Leonard R., Tracz T., « *Influence of High Temperature on the Residual Permeability of High Performance Concrete (in Polish)* », Proc. Of 2nd Conf. Dni Betonu, Polski Cement, Wisła 2004.
- [45] Kalifa, P. et Menneteau F. D., « *Mesures de pression, température et perte en masse dans les bétons à hautes températures* », Rapport BHP 2000.
- [46] Piasta J., « *Heat deformations of cements phases and microstructures of cement paste* », Matériaux et Constructions, N°102, p.415-420, 1984.
- [47] Noumowé N. A., « *Effet de hautes températures sur le béton (20-600°C), Cas particulier du béton à hautes performances* », Thèse de doctorat, INSA de Lyon, 1995.
- [48] Noumowé N. A., Clastres P., Debicki G., Costaz J. L., « *Transit heating effect on high strength concrete* », Nuclear Engineering and Design, vol. 166, p. 99-108, 1996.
- [49] Ye G., Liu X., De Schutter G., Taerwe L., Vandevelde P., « *Phase distribution and microstructural changes of self-compacting cement paste at elevated temperature* », Cement and Concrete Research, vol. 37, p. 978-987, 2007.
- [50] Kalifa P., Tsimbrovska M., « *Comportement des BHP à hautes températures* », État de la Question et Résultats Expérimentaux, Cahier de CSTB N° 3078.
- [51] Ludovic M., « *Étude du comportement sous très hautes températures des Bétons Fibrés à Ultra Hautes Performances : application au BCV* », Thèse de doctorat, Université de Grenoble, 2006.
- [52] Phan L. T., Carino N. J., « *Codes provisions for high strength concrete strength – temperature relationship at elevated temperature* », National institute of standards and technology, Materials and structures, vol. 36, N°256, p.91-98, 2003.
- [53] 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 Materials Journal, N°87M18, 1990.
- [54] Castillo C., Durrani A. J., « *Effect of transient high temperature on high-strength concrete* », ACI Materials Journal, N°87-M7, p.47-53, 1990.

- [55] Felicitti R., Gambarova P. G., Sora M. N., Khoury G. A., « *Mechanical behaviour of HPC and UHPC in direct tension at high temperature and after cooling* », Fifth Rilem Symposium on Fibre-Reinforced Concretes, N°5, p.749-758, Lyon, France, 2000.
- [56] Thelandersson S., « *Effect of high temperatures on tensile strength of concrete* », Lund Institute of Technology, Division of Struct. Mech. And Concrete Constr., Neostyled, p. 27, 1971.
- [57] Felicetti R., Gambarova P. G., Sora MP. N., Khoury G. A. « *Mechanical behaviour of HPC and UHPC in direct tension at high temperature and after cooling* », 1985.
- [58] Felicetti R., Gambarova P. G., « *The Residual Tensile Properties of Performance Siliceous Concrete Exposed to High Temperature* », Mechanics of Quasi-Brittle Materials and Structures, HERMES Science Publications, Paris, p.167 -186, 1999.
- [59] Harada T., Takeda J., Yamane S. and Furumura F., « *Strength, elasticity and thermal properties of concrete subjected to elevated temperatures* », In International Seminar on Concrete for Nuclear reactors, ACI Special Publication, paper SP34, p 377-406, 1972.
- [60] Khoury G. A., Sullivan P. J. E., « *Research at imperial college on the effect of elevated temperatures on concrete* », Fire Safety Journal, vol. 13, p.68-72, 1988.
- [61] Chang Y. F., Chen Y. H., Shen M. S., Yao G. C., « *Residual stress-strain for concrete after exposure to high temperatures* », Cement and Concrete Research, vol. 36, p.1999-2005, 2006.
- [62] Min Li et al., « *Mechanical properties of high-strength concrete after fire* », Cement and Concrete Research, vol. 34, p. 1001-1005, 2004.
- [63] Tolentino E., Lameira F.S., Gomes A.M., Rigo da Silva C.A., Vasconcelos W.L., « *Effects of high temperature on the residual performance of Portland cement concretes* », Materials Research, vol. 5, N°3, p. 301-307, 2002.
- [64] Sabeur H., Colina H., Bejjani M., « *Elastic strain, young's modulus variation during uniform heating of concrete* », Magazine of Concrete Research, vol.59, N°8, p. 559-566, 2007.
- [65] Diederichs U., Jumppanen U. M., « *High temperature properties and spalling behaviour of high-strength concrete* », Verlag für Architekturund techn.wissenschaften, Ernst & schn, p.191-197, 1992.
- [66] Harmathy T. Z., « *Effect of moisture on the fire endurance of building elements* », ASTM Special Technical Publication, N° 385, p. 74-95, 1964.
- [67] Zeiml M., Leitherner D., Lackner R., Mang H.A., « *How do polypropylene fibers improve the spalling behavior of in-situ concrete?* », Cement and Concrete Research, vol. 36, p. 929-942, 2006.



- [68] Phan L.T, Lawson J.R., Davis F.L., « *Effects of elevated temperature exposure on heating characteristics, spalling, and residual properties of high performance concrete* », Materials and Structures, vol. 34, p.83-91, 2001.
- [69] Harmathy T.Z., « *Effect of moisture on the fire endurance of building element* », National Research Council, Research paper N° 270 of the division of building research, Ottawa, Canada, 1965.
- [70] Hertz K., « *Heat-induced explosion of dense concretes* », Technical University of Denmark, Institute of Building Design, Report N° 166, 1984.
- [71] Zhukov V.V., « *Reasons of explosive spalling of concrete by fire* », Scientific research Institute for Concrete and Reinforced Concrete, Moscow, 1994.
- [72] Hertz K. D., « *Limits of spalling of fire – exposed concrete* », Fire safety Journal, vol. 38, p. 103-116, 2003.
- [73] Khoury G.A, « *Effect of heat on concrete* », International Centre for Mechanical Sciences, 2003.
- [74] Hertz K., S., « *Limits of palling of Fire Exposed Concrete* », Dep. Of Buildings and Energy Technical University of Denmark, 1998.
- [75] ULM F.J., Coussy O., Bazant Z.P., « *The “Chunnel” Fire. I: Chemoplastic Softening in Rapidly Heated Concrete* », Journal of Engineering Mechanics, pp 272-282, 1999.
- [76] Noumowe A., « *Mechanical properties and microstructure of high strength concrete containing polypropylene fibres exposed to temperatures up to 200 °C* », Cement and Concrete Research vol.35(11), p. 2192-2198, 2005.
- [77] Khoury G. A., Willoughby B., « *Polypropylene fibres in heated concrete. Part 1: molecular structure and materials behaviour* », Magazine of Concrete Research, vol. 60(2), p. 125136, 2008.
- [78] Kalifa P., Chéné G., Gallé C., « *High-temperature behaviour of HPC with polypropylene fibres: From spalling to microstructure* », Cement and Concrete Research, vol. 31(10), p. 1487-1499, 2001.
- [79] Khoury G. A., « *Polypropylene fibres in heated concrete. Part 2: pressure relief mechanisms and modelling criteria* », Magazine of Concrete Research, vol. 60(3), p. 189-204, 2008.
- [80] Kalifa P., Menneteau F.D., Quenard D., « *Spalling and pore pressure in HPC at high temperatures* », Cement and Concrete Research, pp 1915-1927, 2000.
- [81] Kalifa P., Pardon D., Manneteau F.D., GALLE C., CHENE G., PIMIANTA P., « *Comportement à haute température des Bétons à Hautes Performances: de l'éclatement à la microstructure* », Cahiers du CSTB.

- [82] Kalifa P., Chene G., Galle C., « *High-temperature behaviour of HPC with polypropylene fibres From spalling to microstructure* », Cement and Concrete Research, p. 1487–1499, 2001.
- [83] Shuttleworth P., « *Fire protection of precast concrete tunnel linings on the Channel Tunnel Rail Link* », Concrete, vol. 35(4), p. 12-22, 2001.
- [84] Bilodeau A., Kodur V. K. R. et Hoff G.C., « *Optimization of the type and amount of polypropylene fibres for preventing the spalling of lightweight concrete subjected to hydrocarbon fire* », Cement and Concrete Composites, vol. 26(2), p. 163-174, 2004.
- [85] Yasuda K., Ono, et Otsuka T., « *Fire protection for TBM shield tunnel lining* », Tunn. Undergr. Sp. Tech., vol. 19(4-5), p.317, 2004.
- [86] EN 197-1 2012 « *Composition, Specifications and Conformity Criteria for Common Cements* ». AFNOR, La Plaine Saint-Denis, France (in French), Cement - Part 1, 2012.
- [87] NA 442 2005 « *Ciment, composition, spécifications et critères de conformité des ciments courants* », 2005
- [88] NFEN 15167-1 2006 « *Laitier granulé de haut-fourneau moulu pour utilisation dans le béton, mortier et coulis - Partie 1 : définitions, exigences et critères de conformité* », 2006.
- [89] Ali Boucetta T., « *Contribution du laitier granulé et de la poudre de verre sur les propriétés d'écoulement et de durabilité des bétons autoplaçants et de hautes performances* », Thèse de doctorat, Université d'Annaba, Algérie, 2014.
- [90] NF EN 13263-1 2009 « *Fumée de silice pour béton - Partie 1 : définitions, exigences et critères de conformité* », 2009.
- [91] XP P18-545 2008 « *Granulats : éléments de définition, conformité et codification* », 2008.
- [92] NF EN 933-1 1997 « *Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats - Partie 1: détermination de la granularité. Analyse granulométrique par tamisage* », AFNOR, 1997.
- [93] NF EN 934-2 2012 « *Adjuvants pour bétons, mortier et coulis - Partie 2 : adjuvants pour béton Définitions, exigences, conformité, marquage et étiquetage* », 2012.
- [94] NF EN 1008 2003 « *Eau de gâchage pour bétons - Spécifications d'échantillonnage, d'essais et d'évaluation de l'aptitude à l'emploi, y compris les eaux des processus de l'industrie du béton, telle que l'eau de gâchage pour béton* », 2003.
- [95] Aïctin P.C., « *Bétons a Haute Performance* », Editions Eyrolles, 2001.
- [96] NF EN 12390-1 2001 « *Essai pour béton durci, Partie 1: Forme, dimensions et autres exigences relatives aux éprouvettes et aux Moules, Indice de classement P 18-430* », AFNOR, 2001.

- [97] NF EN 12390-2 2001 « *Essai pour béton durci, Partie 2: Confection et conservation des éprouvettes pour essais de résistance, Indice de classement P 18-438* », AFNOR, 2001.
- [98] NF EN 12350-2 1999 « *Essai pour béton frais. Partie 2: Essai d'affaissement* », AFNOR, 1999.
- [99] NF EN 12350-6 2012 « *Essai pour béton frais - Partie 6 : masse volumique* », 2012.
- [100] NF EN 12350-7 2012 « *Essais pour béton frais - Partie 7 : teneur en air - Méthode de la compressibilité* », 2012.
- [101] Newman J. B., « *Advanced Concrete Technology: Constituent Materials* », Butterworth-Heinemann, 2003.
- [102] Khan S.U, Nuruddin M.F, Ayub T, Shafiq N., « *Effects of different mineral admixtures on the properties of fresh concrete* », The Scientific World Journal, p.1–11, 2014.
- [103] Pliya P., Beaucour A-L., Noumowé A., « *Contribution of cocktail of polypropylene and steel fibres in improving the behaviour of high strength concrete subjected to high temperature* », Construction and Building Materials, vol. 25, p. 1926–1934, 2011.
- [104] Xiao H., Falkner, « *On residual strength of high-performance concrete with and without polypropylene fibres at elevated temperatures* », Fire Safety Journal, vol. 41, p. 115–121, 2006.
- [105] AFPC-AFREM., « *Méthodes recommandées pour la mesure des grandeurs associées à la durabilité, Compte-rendu des journées techniques AFPC-AFREM; Durabilité des bétons* », Toulouse, France, 1997.
- [106] NF EN 12390-3 2012 « *Essais pour béton durci - Partie 3 : résistance à la compression des éprouvettes* », 2012.
- [107] Norme Française NF P 18-407 1981 « *Bétons –Essai de Flexion* », Éditions AFNOR, 1981.
- [108] NF EN 12504-4 2005 « *Essais pour béton dans les structures –Partie 4 : Détermination de la vitesse de propagation du son* », 2005.
- [109] Noumowé A., Lefèvre A., Duval R., « *Porosité supplémentaire consécutive à la fusion de fibres de polypropylène dans un béton à hautes performances* », Revue Française de Génie Civil, vol. 6, N°2, p. 301-313, 2002.
- [110] Komonen J., Penttala V., « *Effect of high temperature on the pore structure and strength of plain and polypropylene fiber reinforced cement pastes* », Fire Technol, vol. 39(1), p. 23-34, 2003.

- [111] Chan Y.N., Luo X., Sun W., « *Compressive strength and pore structure of high performance concrete after exposure to high temperature up to 800°C* », *Cement and Concrete Research*, vol. 30, p. 247-251, 2000.
- [112] Hoff G., Bilodeau A., Malhotra V. M., « *Elevated temperature effects on HSC residual strength* », *Concrete International*, vol. 22 (4), p. 41- 47, 2000.
- [113] Suhaendi S.L., Horiguchi T., « *Effect of short fibers on residual permeability and mechanical properties of hybrid fibre reinforced high strength concrete after heat exposition* », *Cement and Concrete Research*, vol. 36, p. 1672-1678, 2006.
- [114] Behnood A., Ghandehari M., « *Comparison of compressive and splitting tensile strength of high-strength concrete with and without polypropylene fibers heated to high temperatures* », *Fire Safety Journal*, 2009. doi:10.1016/j.firesaf.2009.07.001.
- [115] Melais F. Z., « *Durabilité des bétons de sable fibres dans les différents milieux agressifs « effets de la nature des fines d'ajouts et fibres* », Thèse de doctorat, Université d'Annaba, Algérie, 2016.
- [116] Klur I., « *Etude par la R.M.N de la structure des silicates de calcium hydrates* ». Thèse de doctorat, Université Paris 6, 1996.
- [117] Glasser F.P., Hong S.Y., « *thermal treatment of C-S-H at 1 bar H<sub>2</sub>O pressure up to 200°C* », *Cement and concrete research*, vol. 33, p. 271-279, 2003.
- [118] Phan L.T., Carino N. J., « *Mechanical properties of high strength concrete at elevated temperatures. Gaithersburg, Maryland: NISTIR 6726* », Building and Fire Research laboratory, National Institute of Standards and Technology, 2001.
- [119] kaïkea A., « *Elaboration des bétons à hautes performances fibrés Avec addition du laitier granulé « comportement mécanique et durabilité* », thèse de doctorat, Université d'Annaba, Algérie, 2015.
- [120] Cassagnabère F., « *Produits préfabriqués en béton file : vers l'amélioration des performances du matériau pour mieux gérer le procédé de production* », thèse de doctorat, Université Paul Sabatier Toulouse III, 2007.



## **ANNEXES**

## ANNEXE : FICHES TECHNIQUES

Construction

**Notice technique**  
Edition octobre 2006  
Numéro 2.11  
Version n°136.2006 R 001  
SIKA® VISCOCRETE® TEMPO 12

**SIKA® VISCOCRETE® TEMPO 12**

Superplastifiant/Haut Réducteur d'eau polyvalent pour bétons prêts à l'emploi.

Conforme à la norme NF EN 934-2 Tab. 1, 3.1 et 3.2.

**Présentation** SIKA VISCOCRETE TEMPO 12 est un superplastifiant/haut réducteur d'eau polyvalent de nouvelle génération non chloré à base de copolymère acrylique.

**Domaines d'application**

- SIKA VISCOCRETE TEMPO 12 permet la fabrication de bétons plastiques à autoplaçants transportés sur de longues distances et pompés.
- Dans les bétons autoplaçants, SIKA VISCOCRETE TEMPO 12 améliore la stabilité, limite la ségrégation du béton et rend les formules moins susceptibles aux variations d'eau et des constituants.

**Caractères généraux** SIKA VISCOCRETE TEMPO 12 est un superplastifiant puissant qui confère aux bétons les propriétés suivantes :

- longue rhéologie (>2h),
- robustesse à la ségrégation,
- qualité de parement.

**Caractéristiques**

**Aspect** Liquide brun clair

**Conditionnement**

- Fûts de 200 kg
- Cubi de 1000 kg
- Vrac

**Stockage** Dans un local fermé, à l'abri de l'ensoleillement direct et du gel, entre 5 et 30 °C. SIKA VISCOCRETE TEMPO 12 peut geler, mais, une fois dégelé lentement et réhomogénéisé, il retrouve ses qualités d'origine. En cas de gel prolongé et intense, vérifier qu'il n'a pas été déstabilisé.

**Conservation** 1 an en emballage intact

**Données techniques**

**densité** 1,06 ± 0,01

**pH** 6 ± 1

**Teneur en Na<sub>2</sub>O Eq.** ≤ 1 %

**Extrait sec** 30,2 ± 1,3 %



## Construction

<b>Teneur en ions Cl<sup>-</sup></b>	≤ 0,1 %
<b>Conditions d'application</b>	
<b>Dosage</b>	Plage d'utilisation recommandée : 0,2 à 3 % du poids du liant ou du ciment selon la fluidité et les performances recherchées. Plage d'utilisation usuelle : 0,4 à 1,5 % du poids du ciment ou du liant.
<b>Mise en œuvre</b>	SIKA VISCOCRETE TEMPO 12 est ajouté, soit en même temps que l'eau de gâchage, soit en différé dans le béton préalablement mouillé avec une fraction de l'eau de gâchage.
<b>Précautions d'emploi</b>	En cas de contact avec la peau, laver abondamment à l'eau. Consulter la fiche de données de sécurité.
<b>Mentions légales</b>	Produit réservé à un usage strictement professionnel Nos produits bénéficient d'une assurance de responsabilité civile. «Les informations sur la présente notice, et en particulier les recommandations relatives à l'application et à l'utilisation finale des produits SIKA, sont fournies en toute bonne foi et se fondent sur la connaissance et l'expérience que la Société SIKA® a acquises à ce jour de ses produits lorsqu'ils ont été convenablement stockés, manipulés et appliqués dans des conditions normales. En pratique, les différences entre matériaux, substrats et conditions spécifiques sur site sont telles que ces informations ou toute recommandation écrite ou conseil donné n'impliquent aucune garantie de qualité marchande autre que la garantie légale contre les vices cachés. Nos agences sont à votre disposition pour toute précision complémentaire. Notre responsabilité ne saurait d'aucune manière être engagée dans l'hypothèse d'une application non conforme à nos renseignements. Les droits de propriété détenus par des tiers doivent impérativement être respectés. Toutes les commandes sont acceptées sous réserve de nos Conditions de Vente et de Livraison en vigueur. Les utilisateurs doivent impérativement consulter la version la plus récente de la fiche technique correspondant au produit concerné, qui leur sera remise sur demande.»

Organisme de certification :  
AFNOR CERTIFICATION  
11, avenue Francis de Pressensé  
93571 Saint-Denis La Plaine cedex  
France



Sika El Djazair.  
08 route de l'Arbaa, 16111 Eucalyptus  
Alger/ ALGERIE  
www.sikaeldjazair.com

Tel.: 213 (0) 21 50 21 84  
213 (0) 21 50 16 92 à 95  
Fax: 213 (0) 21 50 22 08  
Email: sika.commercial@dz.sika.com



**Notice technique**  
Edition juin 2009  
Numéro 1.52  
Version n°111.2009  
SIKACRETE® HD DURABILITE

## SIKACRETE® HD Durabilité

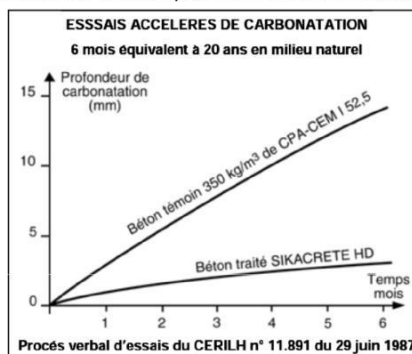
Additif à base de silice micronique pour bétons en milieux agressifs.

**Présentation** Le SIKACRETE® HD est un additif qui permet de fabriquer des bétons à hautes performances ayant une durabilité exceptionnelle.

**Domaines d'application** Bétons soumis aux environnements agressifs  
A partir d'un liant standard du type CEM I 52,5, le SIKACRETE® HD apporte au béton une durabilité exceptionnelle vis-à-vis de nombreux milieux agressifs, sans faire appel à des liants spéciaux :

- domaine agricole : ensilage, stockage d'engrais, aires de stabulation,...
- milieu industriel : industries chimiques et agro-alimentaires, sucreries, conserveries, laiteries, bacs de rétention (nous consulter), ...
- stations services : huiles, carburants, aires de lavage,...
- bétons en présence d'eaux agressives: milieu marin, bétons de montagne soumis aux eaux pures (fonte des neiges) et aux sels de déverglaçage, fondations en présence d'eaux séléniteuses, stations d'épuration, égouts, caniveaux,...
- bétons soumis aux atmosphères agressives : zones industrielles et urbaines, à forte teneur en gaz carbonique.

Les essais montrent qu'un béton plastique dosé à 350 kg/m<sup>3</sup> de CEM I 52,5 PM se carbonate 5 fois moins vite lorsqu'il est additionné de SIKACRETE HD.



### Alcalis-réaction

Il est reconnu que l'apport de silice micronique diminue de façon notable les risques d'expansion du béton inhérents à l'alcali-réaction.

Le SIKACRETE® HD, par la forte réduction d'eau qu'il autorise et la fixation des alcalins du ciment, est à même de prévenir cette réaction en cas d'emploi de matériaux «à risques» dans la composition du béton.





**Bétons à hautes performances**

L'addition de SIKACRETE® HD permet d'accroître de 50 à plus de 100 % les résistances mécaniques en compression du béton. Les autres caractéristiques mécaniques (résistance en traction, module d'élasticité) sont elles aussi fortement augmentées. Le retrait à long terme et le fluage des bétons à hautes résistances sont plus faibles que ceux d'un béton classique.

**Résistance en compression (MPa)**

échéance	1 j	2 j	7 j	28 j	90 j
Béton témoin 350 kg/m <sup>3</sup> CPA-CEM I 52.5	9.5	17.3	30.5	38	47.2
témoin + 30 kg/m <sup>3</sup> SIKACRETE HD	23.2	38.3	53.2	65	72

Pour obtenir des bétons à très hautes performances, nous consulter.

**Résistance à l'abrasion et l'érosion**

Le SIKACRETE® HD permet de fabriquer avec des granulats durs (sable roulé, gravillons et graviers concassés), un rapport G/S élevé et un faible rapport E/C, des bétons résistants à l'érosion et à l'abrasion sans revêtement protecteur :

- canalisations, égouts, ...
- évacuateurs de crue de barrage
- bétons fortement sollicités (sols industriels, zones de manœuvre, entrepôts, quais, péages...)

**Caractères généraux**

Les bétons traités avec le SIKACRETE® HD peuvent résister aux agressions chimiques (engrais, sulfates, gaz carbonique, etc...) comme aux agressions physiques (gel-dégel) et mécaniques (érosion, abrasion, etc...).

Grâce à l'effet granulaire de la silice micronique et à la réduction d'eau importante qu'il autorise, le SIKACRETE® HD permet la réalisation de bétons très cohésifs à l'état frais, qualité mise à profit pour le coulage de bétons fluides sans ségrégation, pour le pompage ou la projection.

Par l'effet réducteur d'eau et grâce à la réactivité pouzzolannique de la silice micronique, le SIKACRETE® HD réduit la taille et le nombre des pores du béton durci.

On réalise des bétons de très faible perméabilité, pratiquement imperméables aux liquides et aux gaz. Il permet l'obtention de bétons à résistances mécaniques élevées.

Le SIKACRETE® HD contient les adjuvants nécessaires à une mise en œuvre facile du béton.

De ce fait, nous déconseillons l'emploi d'adjuvants complémentaires autres que ceux produits par notre société (se reporter aux conseils d'utilisation).

**Caractéristiques**

**Coloris** Gris

**Conditionnement** Le SIKACRETE® HD est conditionné en sacs de 15 kg et livré sur palette houscée de 40 sacs.  
Des conditionnements spécifiques peuvent être réalisés pour des emplois en quantité importante. Nous consulter.

**Stockage** Stocker à l'abri de l'humidité.

**Conservation** Dans son emballage d'origine intact, le produit se conserve 3 ans..

**Données techniques**

**Densité apparente** 0,5 environ

**Nature** Poudre

**Conditions d'application**

**Dosage** Le SIKACRETE® HD s'utilise normalement à raison d'un à deux sacs de 15 kg par mètre cube de béton, quel que soit le dosage en ciment.  
**Les sacs doivent être utilisés en entier.**

**Mise en œuvre**

Le SIKACRETE® HD doit être mélangé à sec avec les autres constituants du béton avant introduction de l'eau de gâchage. Après ajout de l'eau, un malaxage long doit être respecté (au moins 1 min 30) pour permettre une répartition complète des différents constituants.

Dans le cas d'emploi d'une centrale de dosage, la totalité du SIKACRETE® HD sera introduit dans le camion malaxeur avec une partie de l'eau de gâchage; mélanger une minute puis ajouter les granulats, le ciment et le complément d'eau selon les modalités habituelles.

Malaxer jusqu'à l'obtention d'un matériau de consistance homogène.

**Conseils d'utilisation**

Les effets bénéfiques du SIKACRETE® HD sur la pérennité du béton durci ne sont possibles qu'à condition de respecter un dosage minimum en ciment de 350 kg/m<sup>3</sup>, avec une composition granulatoire correcte et pour des valeurs faibles du rapport E/C (inférieures à 0,45)..

**Réalisation de dallages**

Le faible rapport eau/ciment des bétons traités avec le SIKACRETE® HD et l'absence de ressuage de tels bétons les rendent particulièrement sensibles à la dessiccation. Une cure soignée est indispensable surtout par temps chaud ou en présence de courants d'air.

On peut réaliser des bétons de consistance plastique, mis en place par vibration interne et tirés à la règle avant talochage. L'état de surface ainsi obtenu évite une finition mécanique toujours préjudiciable à la résistance à l'usure.

Pulvérisation immédiate sur la surface du béton d'un produit de cure : ANTISOL® BAN, ANTISOL® TP 45 (se reporter aux notices techniques des produits pour les dosages à utiliser).

En cas d'incorporation de grains durs type CHAPDUR® ou d'une finition par talochage mécanique, remplacer l'application du produit de cure par la mise en place d'un film plastique mince ou de paillasons humides afin d'assurer une pré-protection du béton sans risque de dessiccation. Cette phase nécessite de la part du chapiste un suivi attentif de l'évolution du béton. Après talochage, maintenir la protection du béton pendant au moins 48 heures ou utiliser un produit de cure.

**Réalisation de bétons banchés**

L'attention des utilisateurs est attirée sur le fait que l'ajout de SIKACRETE® HD dans un béton lui confère un effet «collant» (effet de thixotropie). On veillera à respecter une vibration soignée, sans prolonger la durée et tout en rapprochant les points de vibration.

**Emplois spécifiques**

Le béton pourra être additionné simultanément de SIKACRETE HD et de différents adjuvants. On utilisera :

- le SIKA® RETARDER ou le PLASTIRETARD® dans le cas de mise en place par temps chaud ou lors de transports de longue durée (nous consulter pour les dosages optimaux),
- le SIKA® AER 5 pour des bétons soumis au gel-dégel,
- un superplastifiant de la gamme SIKA® VISCOCRETE® pour les bétons à très faible rapport E/C.

**Précautions d'emploi**

Le SIKACRETE® HD étant un produit pulvérulent, l'emploi d'un masque est préconisé lors du déversement dans le malaxeur.

Consulter la fiche de données de sécurité.

**Mentions légales**

Produit réservé à un usage strictement professionnel

Nos produits bénéficient d'une assurance de responsabilité civile.

«Les informations sur la présente notice, et en particulier les recommandations relatives à l'application et à l'utilisation finale des produits SIKA, sont fournies en toute bonne foi et se fondent sur la connaissance et l'expérience que la Société SIKA a acquises à ce jour de ses produits lorsqu'ils ont été convenablement stockés, manipulés et appliqués dans des conditions normales. En pratique, les différences entre matériaux, substrats et conditions spécifiques sur site sont telles que ces informations ou toute recommandation écrite ou conseil donné n'impliquent aucune garantie de qualité marchande autre que la garantie légale contre les vices cachés. Nos agences sont à votre disposition pour toute précision complémentaire. Notre responsabilité ne saurait d'aucune manière être engagée dans l'hypothèse d'une application non conforme à nos renseignements. Les droits de propriété détenus par des tiers doivent impérativement être respectés. Toutes les commandes sont acceptées sous réserve de nos Conditions de Vente et de Livraison en vigueur. Les utilisateurs doivent impérativement consulter la version la plus récente de la fiche technique correspondant au produit concerné, qui leur sera remise sur demande.»



Sika El Djazair.  
08 route de l'Arbaa, 16111 Eucalyptus  
Alger/ ALGERIE  
www.sikaeldjazair.com

Tel.: 213 (0) 21 50 21 84  
213 (0) 21 50 16 92 à 95  
Fax: 213 (0) 21 50 22 08  
Email: sika.commercial@dz.sika.com



# GRANIFIBRES

## Fibres en polypropylène

### DESCRIPTION

GRANIFIBRES sont des fibres en polypropylène qui sont ajoutées dans le béton pour réduire les fissurations et le faïençage des bétons et mortiers. Les chapes réalisées avec l'addition du GRANIFIBRES présentent de meilleures résistances à l'abrasion et aux chocs.

### PROPRIETES

La dispersion des fibres dans le béton ou mortier crée un réseau fibré haute densité, ainsi :

- Elles améliorent la cohésion à l'état frais
- Elles réduisent les fissurations de retrait et le «cracking»
- Très bonne résistance aux milieux alcalins
- Très bonne résistance aux chocs, pouvant atteindre des valeurs 100 fois supérieures à celle du témoin
- Très bonne résistance à l'abrasion

### DOMAINES D'UTILISATION

- Hangars de stockage
- Ateliers mécaniques
- Revêtements extérieurs
- Couloirs de circulation
- Parkings...

### CARACTERISTIQUES GENERALES

- Longueur de la fibre ..... 12 mm
- Densité ..... 0.9 g/cm<sup>3</sup>
- Point de fusion ..... 150°C
- Module de Young ..... 3KN / mm<sup>2</sup>
- Allongement à la rupture ..... 50%
- Section de la fibre ..... 30 microns

### MODE D'EMPLOI

La quantité de GRANIFIBRES est ajoutée directement dans le malaxeur avec les composants du béton mais jamais dans l'eau.

Si GRANIFIBRES est utilisé en dose, prolonger le malaxage encore 5 min. afin de faire dissoudre le sacnet.

Pour les mortiers de granulométrie inférieure à 10 mm, il est préférable d'ajouter la quantité de fibres manuellement.

#### Consommation :

Un sacnet de 800 grammes par mètre cube de béton.  
Deux sacnets de 800 grammes par mètre cube de mortier.

### CONDITIONNEMENT ET STOCKAGE

Cartons de 40 doses de 800 g en papier soluble et en sacnet non soluble de 800 g pour mortier

A stocker à l'abri de l'humidité.

#### Durée de conservation :

3 ans dans son emballage d'origine.

### PRECAUTIONS D'EMPLOI

Manipulation non dangereuse.

Se référer à la Fiche de Données de Sécurité disponible sur : [www.granitex.dz](http://www.granitex.dz)

*Les renseignements donnés dans cette notice sont basés sur notre connaissance et notre expérience à ce jour. Il est recommandé de procéder à des essais de convenance pour déterminer la fourchette d'utilisation en art compte des conditions réelles de chantier.*

