

THESE DE DOCTORAT

Présentée pour l'obtention du grade de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITE DE CERGY-PONTOISE

Spécialité : Génie Civil

Par

Bidossessi A. Prosper PLIYA

Sujet de la thèse :

Contribution des fibres de polypropylène et métalliques à l'amélioration du comportement du béton soumis à une température élevée

Soutenue le 29 Novembre 2010

Devant le jury composé de :

Rapporteur	M. Gérard DEBICKI	Maître de conférences - HDR à l'INSA de Lyon
Rapporteur	M. Christophe LANOS	Professeur d'Université à l'IUT de Rennes
Examineur	M. Jean-Michel TORRENTI	Professeur à l'ENPC, LCPC
Examineur	M. Mouloud BEHLOUL	Directeur de l'innovation à Lafarge Ciments
Directeur de thèse	M. Albert NOUMOWE	Professeur à l'Université de Cergy-Pontoise
Co-encadrant	Mme. Anne-Lise BEAUCOUR	Maître de conférences à l'Université de Cergy-Pontoise

Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier chaleureusement les membres du jury, principalement Monsieur Jean-Michel Torrenti qui a accepté d'en être le président. Mes remerciements s'adressent également à Messieurs Gérard Debicki et Christophe Lanos qui ont eu la lourde tâche d'effectuer un rapport sur ce travail, sans oublier Monsieur Mouloud Behloul pour son travail d'examineur. Je leur exprime ici toute ma gratitude.

Je tiens également à remercier Monsieur Albert Noumowé, mon directeur de thèse, pour ses conseils avant et tout au long de ces années de recherche, de son soutien et de la confiance à mon égard.

Je voudrais également remercier Madame Anne-Lièze Beaucour qui m'a encadré dans ce travail et avec qui ce fut un grand plaisir de pouvoir dialoguer, expliquer ou concevoir de nouvelles approches. Je la remercie de sa patience et du soutien qu'elle m'a accordé tout au long de ces années de recherche.

Mes remerciements s'adressent à Monsieur Renault Norbert, Maître de Conférences à l'Université de Cergy-Pontoise, avec qui j'ai travaillé durant les deux semaines sur le

chantier à Arcueil dans le cadre du Projet National sur l'Ingénierie de la Sécurité Incendie, sans oublier aussi l'équipe du Laboratoire Central de la Préfecture de Police.

Mes remerciements s'adressent de même à tous les doctorants, le personnel du Laboratoire de Mécanique et Matériaux du Génie-Civil et toute l'équipe des enseignants du département de Génie-Civil de l'Université de Cergy-Pontoise.

Je ne saurais terminer sans remercier mes parents, mes frères et sœurs, ma copine et toutes les personnes qui n'ont cessé de me soutenir et de m'encourager. Je vous dédie ce mémoire.

Je tiens à remercier enfin toutes les personnes qui m'ont accompagné de prêt ou de loin tout au long de ces années de recherche. Recevez ici l'expression de toute ma reconnaissance.

Prosper Pliya

Table des matières

Table des matières	5
Liste des figures	9
Liste des tableaux	16
Liste des notations	19
Résumé	21
Abstract	23
INTRODUCTION GENERALE	25
CHAPITRE 1 - ANALYSE BIBLIOGRAPHIQUE	29
1.1 Introduction	31
1.2 Composants du béton	31
1.2.1 Microstructure de la matrice cimentaire	31
1.2.2 L'eau dans la microstructure.....	34
1.2.3 Les granulats	35
1.2.4 L'interface pâte-granulats	36
1.3 Comportement du béton soumis à une température élevée	36
1.3.1 Différentes formes d'endommagement thermique	37
1.3.2 Mécanismes du phénomène d'écaillage et de l'éclatement du béton chauffé	38
1.3.3 Paramètres et phénomènes favorisant l'instabilité thermique du béton	41
1.3.4 Transformations physico-chimiques de la matrice cimentaire	43
1.3.5 Evolution des granulats.....	45
1.3.6 Déformations thermiques du béton.....	46
1.3.7 Evolution des propriétés mécaniques	48
1.4 Influence des fibres de polypropylène sur le comportement du béton soumis à une température élevée :	53
1.4.1 Sur l'instabilité thermique.....	53
1.4.2 Sur la perte de masse du béton.....	57
1.4.3 Sur la porosité du béton	59
1.4.4 Sur les caractéristiques mécaniques.....	62
1.4.5 Synthèse sur l'influence des fibres de polypropylène sur le comportement du béton soumis à une température élevée	67
1.5 Influence des fibres métalliques sur le comportement du béton soumis à une température élevée :	67
1.5.2 Sur l'instabilité thermique.....	68
1.5.3 Sur les caractéristiques mécaniques.....	69
1.5.4 Synthèse sur l'influence des fibres métalliques sur le comportement du béton soumis à une température élevée	72

1.6	Influence du cocktail de fibres de polypropylène et métalliques sur le comportement du béton soumis à une température élevée :	73
1.6.1	Sur les caractéristiques mécaniques	74
1.6.2	Influence des fibres sur les courbes de contrainte - déformation béton	77
1.6.3	Synthèse sur l'influence du cocktail de fibres sur le comportement du béton soumis à une température élevée	79
1.7	Conclusion de l'analyse bibliographique	80
CHAPITRE 2 - PROGRAMME EXPERIMENTAL		83
2.1	Introduction	85
2.2	Compositions et caractéristiques des matériaux	85
2.2.1	Formulations	85
2.2.2	Caractéristiques des matériaux utilisés	89
2.3	Fabrication et conservation des éprouvettes	92
2.3.1	Fabrication et mise en œuvre	92
2.3.2	Conservation	93
2.3.3	Ages	93
2.4	Dispositif expérimental	94
2.4.1	Cycles de chauffage - refroidissement	94
2.4.2	Mesure des propriétés physiques	96
2.4.3	Mesure des propriétés mécaniques	98
CHAPITRE 3 - COMPORTEMENT DES BETONS SANS FIBRES		101
3.1	Introduction	103
3.2	Evolution des propriétés physiques en fonction du chauffage	103
3.2.1	Différence de température entre la surface et le centre de l'éprouvette	103
3.2.2	Perte de masse	105
3.2.3	Evolution de la porosité	108
3.3	Evolution des propriétés mécaniques résiduelles en fonction du chauffage	111
3.3.1	Résistance en compression	111
3.3.2	Résistance en traction par flexion	114
3.3.3	Module d'élasticité	116
3.4	Relation entre porosité et résistance en compression	118
3.5	Conclusion sur le comportement des bétons sans fibres	119
CHAPITRE 4 - COMPORTEMENT DES BETONS DE FIBRES DE POLYPROPYLENE		121
4.1	Introduction	123
4.2	Etude de la stabilité thermique	123
4.3	Evolution des propriétés physiques en fonction du chauffage	125
4.3.1	Différence de température entre la surface et le centre de l'éprouvette	125

4.3.2	Perte de masse.....	128
4.3.3	Evolution de la porosité.....	132
4.4	Evolution des propriétés mécaniques résiduelles en fonction du chauffage	137
4.4.1	Résistance en compression.....	137
4.4.2	Résistance en traction par flexion.....	142
4.4.3	Module d'élasticité.....	147
4.5	Relation entre porosité et résistance en compression.....	151
4.6	Conclusion sur le comportement des bétons de fibres de polypropylène.....	152
CHAPITRE 5 - COMPORTEMENT DES BETONS DE FIBRES METALLIQUES ..		155
5.1	Introduction	157
5.2	Evolution des propriétés physiques en fonction du chauffage	157
5.2.1	Différence de température entre la surface et le centre de l'éprouvette	157
5.2.2	Perte de masse.....	159
5.2.3	Evolution de la porosité.....	161
5.3	Evolution des propriétés mécaniques résiduelles en fonction du chauffage	166
5.3.1	Résistance en compression.....	166
5.3.2	Résistance en traction par flexion.....	171
5.3.3	Module d'élasticité.....	177
5.4	Relation entre porosité et résistance en compression.....	182
5.5	Conclusion sur le comportement des bétons de fibres métalliques.....	182
CHAPITRE 6 - COMPORTEMENT DES BETONS DE COCKTAIL DE FIBRES....		185
6.1	Introduction	187
6.2	Evolution des propriétés physiques en fonction du chauffage	187
6.2.1	Différence de température entre la surface et le centre de l'éprouvette	187
6.2.2	Perte de masse.....	189
6.2.3	Evolution de la porosité.....	191
6.3	Evolution des propriétés mécaniques résiduelles en fonction du cycle de chauffage.....	194
6.3.1	Résistance en compression.....	194
6.3.2	Résistance en traction par flexion.....	202
6.3.3	Module d'élasticité.....	210
6.4	Conclusion sur le comportement des bétons de cocktail de fibres.....	217
CHAPITRE 7 - FEUX EXPERIMENTAUX DANS UN IMMEUBLE		219
7.1	Objectif de l'étude.....	221
7.2	Description des locaux et potentiel calorifique	222
7.2.1	Appartement.....	222
7.2.2	Cage d'escalier.....	223
7.3	Scénarii	223

7.3.1	Appartement	223
7.3.2	Cage d'escalier	224
7.4	Mise en place de l'instrumentation.....	224
7.4.1	Appartement	225
7.4.2	Cage d'escalier	226
7.5	Evolution des températures durant les feux	227
7.5.1	Feu d'appartement	227
7.5.2	Feux de cages d'escalier	234
7.6	Analyse des résultats	237
7.7	Conclusion sur les feux expérimentaux dans un immeuble.....	239
	CONCLUSION GENERALE.....	241
	PERSPECTIVES	245
	REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	246

Liste des figures

figure 1.1. Image MEB de C-S-H [Rego, 1975].	32
figure 1.2. Molécule de C-S-H d'après le modèle de Feldman et Sereda [Feld, 1968].	33
figure 1.3. Etat de l'eau dans les C-S-H ([Sier, 1974] cité par [Rego, 1982]).	35
figure 1.4. Illustrations de dégradation d'ouvrages en béton à la suite d'une sollicitation thermique.	37
figure 1.5. Faciès de béton sans fibres montrant l'apparition de la zone de forte saturation au bout de 10, 15 et 20 minutes d'exposition au feu standard, [Jans, 2009].	39
figure 1.6. Illustration du mécanisme d'écaillage du béton [Zeim, 2006].	39
figure 1.7. Principales hypothèses de l'éclatement du béton : (a) pressions internes [Ande, 1997], (b) dilatation thermique empêchée [Baza, 1997], [Robe, 2008].	40
figure 1.8. Pressions internes dans le béton en fonction de la teneur en eau libre et températures d'apparition des pics de pression [Hage, 2004].	42
figure 1.9. Illustration du caractère instable des granulats de silex comparé aux granulats calcaires [Mind, 2009].	43
figure 1.10. Evolution des composantes du ciment sous l'échauffement [Cast, 2004].	45
figure 1.11. Déformations thermiques de bétons avec différents types de granulats ; 1 : Siliceux, 2 : Grès, 3 : Calcaire, 4 : Basalte, 5 : Argiles expansées, 6 : Pâte de ciment, [Pias, 1989].	48
figure 1.12. Résistances en compression à chaud de bétons à différentes températures [Hage, 2004].	49
figure 1.13. Résistances résiduelles en traction en fonction de la température de chauffage [Kane, 2007(a)].	52
figure 1.14. Modules d'élasticité à chaud de bétons à différentes températures [Hage, 2004].	53
figure 1.15. Courbes ATD et ATG des fibres de polypropylène [Kali, 2000].	54
figure 1.16. Evolution des champs de pression de vapeur de BHP avec et sans fibres de polypropylène [Kali, 2001].	56
figure 1.17. Evolution de la pression maximale de vapeur et du pic de température en fonction du dosage en fibres de polypropylène [Kali, 2001].	56
figure 1.18. Perte de masse en régime transitoire des bétons avec et sans fibres de polypropylène durant l'échauffement à la vitesse de $1^{\circ}\text{C.mn}^{-1}$, [Hage, 2004].	58
figure 1.19. Perte de masse de bétons sans et avec 1.8 kg/m^3 de fibres de polypropylène à la suite du traitement thermique au feu standard ISO 834 [Xiao, 2006].	58
figure 1.20. Evolution de la porosité à l'eau de bétons avec et sans fibres de polypropylène [Kali, 2001].	59
figure 1.21. Evolution de la porosité relative à l'eau en fonction de la température des bétons sans et avec 2 kg/m^3 de fibres de polypropylène [Mind, 2009].	60

figure 1.22. Distribution de tailles des pores sur des bétons non chauffés et chauffés à 180°C et 600°C contenant 0.9 kg/m ³ ou 1.75 kg/m ³ de fibres de polypropylène [Hage, 2004].....	61
figure 1.23. Béton à hautes performances contenant des fibres de polypropylène après un cycle de 180°C, agrandissement 1000x, profile. [Hage, 2004].....	62
figure 1.24. Transformations de la fibre de polypropylène dans la matrice cimentaire de la température ambiante à 180°C et 600°C [Hage, 2004].....	62
figure 1.25. Evolution de la résistance résiduelle et à chaud relative en compression de bétons pour différentes teneurs en fibres de polypropylène exprimées en pourcentage volumique.....	63
figure 1.26. Evolution de la résistance résiduelle relative en traction de bétons pour différentes teneurs en fibres de polypropylène exprimées en pourcentage volumique.....	65
figure 1.27. Evolution du module d'élasticité résiduel et à chaud relatif de bétons pour différentes teneurs en fibres de polypropylène exprimées en pourcentage volumique.....	66
figure 1.28. Résistances en compression (a) et en flexion (b) en fonction du rapport l/d et du volume de fibres métalliques dans le béton [Yazi, 2006].	68
figure 1.29. Evolution de la résistance résiduelle et à chaud relative en compression de bétons pour différentes teneurs en fibres métalliques exprimées en pourcentage volumique.....	69
figure 1.30. Evolution de la résistance résiduelle relative en traction de bétons pour différentes teneurs en fibres métalliques exprimées en pourcentage volumique.	71
figure 1.31. Evolution du module d'élasticité résiduel [Suha, 2006] et à chaud [Cheng, 2004] relatif de bétons pour différentes teneurs en fibres métalliques exprimées en pourcentage volumique.	72
figure 1.32. Evolution de la résistance résiduelle relative en compression de bétons de cocktail fibres métalliques - polypropylène, teneur en fibres exprimée en pourcentage volumique.....	74
figure 1.33. Evolution de la résistance relative en traction de bétons de cocktail fibres métalliques - polypropylène, teneur en fibres exprimée en pourcentage volumique.....	75
figure 1.34. Evolution du module d'élasticité relatif de bétons de cocktail fibres métalliques - polypropylène, teneur en fibres exprimée en pourcentage volumique.....	76
figure 1.35. Courbes contrainte - déformation de bétons sans fibres, avec les fibres de polypropylène, les fibres métalliques et le cocktail de fibres à différentes températures [Poon, 2004].....	78
figure 2.1. Courbes granulométriques et autres caractéristiques des granulats utilisés.....	90
figure 2.2. Fibres de polypropylène Duomix [®] Fire M6.....	91
figure 2.3. Fibres métalliques Dramix RC-80/30-BP.....	92
figure 2.4. Fabrication des éprouvettes de béton.....	93

figure 2.5. Paliers de température suivant le comportement de la matrice cimentaire et des fibres de polypropylène.	94
figure 2.6. Cycles de chauffage – refroidissement imposés aux éprouvettes.	94
figure 2.7. Dispositif de chauffage (a) et disposition des éprouvettes dans le four (b).....	95
figure 2.8. Mise en place des thermocouples de mesure.....	96
figure 2.9. Porosité à l'eau à huit et seize jours des bétons C2 et C3.	98
figure 2.10. Essais de résistance résiduelle en compression.....	99
figure 2.11. Dispositif expérimental pour la mesure du module d'élasticité.	100
figure 2.12. Dispositif expérimental pour l'essai de traction par flexion.	100
figure 3.1. Evolution de la différence de température entre la surface et le centre de l'éprouvette en fonction de la température de surface des bétons C2 et C3 sans fibres.....	104
figure 3.2. Evolution de la perte de masse moyenne des bétons sans fibres en fonction de la température du cycle de chauffage-refroidissement.	106
figure 3.3. Evolution de la porosité absolue (a) et porosité relative (b) des bétons sans fibres en fonction de la température du cycle de chauffage-refroidissement.	110
figure 3.4. Evolution de la résistance résiduelle (a) et relative (b) en compression des bétons sans fibres en fonction de la température du cycle de chauffage-refroidissement.....	113
figure 3.5. Evolution de la résistance résiduelle (a) et relative (b) en traction des bétons sans fibres en fonction de la température du cycle de chauffage-refroidissement.	115
figure 3.6. Evolution du module d'élasticité résiduel (a) et relatif (b) des bétons sans fibres en fonction de la température du cycle de chauffage-refroidissement.	117
figure 3.7. Faciès de rupture observé au sein du béton C3 après le cycle de chauffage-refroidissement de 600°C	118
figure 3.8. Résistance résiduelle en compression en fonction de la porosité des bétons sans fibres.	119
figure 4.1. Eclatement d'éprouvette de béton C3 conservée dans l'eau (a) et reconstitution de l'éprouvette à partir des morceaux résiduels (b).....	124
figure 4.2. Evolution de la différence de température en fonction de la température de surface de bétons avec et sans fibres de polypropylène.	126
figure 4.3. Evolution de la perte de masse des bétons C2 et CP2 en fonction de la température du cycle de chauffage-refroidissement.	130
figure 4.4. Evolution de la perte de masse des bétons C3 et CP3 en fonction de la température du cycle de chauffage-refroidissement.	131
figure 4.5. Eprouvettes de bétons C3 et CP3 à la suite du cycle de chauffage-refroidissement de 600°C.	131
figure 4.6. Evolution de la porosité absolue (a) et porosité relative (b, c) des bétons C2 avec les fibres de polypropylène en fonction de la température du cycle de chauffage-refroidissement.	134

figure 4.7. Evolution de la porosité absolue (a) et porosité relative (b, c) des bétons C3 avec les fibres de polypropylène en fonction de la température du cycle de chauffage-refroidissement.	135
figure 4.8. Evolution de la résistance résiduelle en compression (a) et relative (b, c) des bétons C2 avec les fibres de polypropylène en fonction de la température du cycle de chauffage-refroidissement.	139
figure 4.9. Evolution de la résistance résiduelle en compression (a) et relative (b, c) des bétons C3 avec les fibres de polypropylène en fonction de la température du cycle de chauffage-refroidissement.	140
figure 4.10. Evolution de la résistance résiduelle en traction (a) et relative (b, c) des bétons C2 avec les fibres de polypropylène en fonction de la température du cycle de chauffage-refroidissement.	144
figure 4.11. Evolution de la résistance résiduelle en traction (a) et relative (b, c) des bétons C3 avec les fibres de polypropylène en fonction de la température du cycle de chauffage-refroidissement.	145
figure 4.12. Evolution du module d'élasticité résiduel (a) et relatif (b, c) des bétons C2 avec les fibres de polypropylène en fonction de la température du cycle de chauffage-refroidissement.	149
figure 4.13. Evolution du module d'élasticité résiduel (a) et relatif (b, c) des bétons C3 avec les fibres de polypropylène en fonction de la température du cycle de chauffage-refroidissement.	150
figure 4.14. Résistance résiduelle en compression en fonction de la porosité des bétons de fibres de polypropylène.	152
figure 5.1. Evolution de la différence de température en fonction de la température de surface de bétons de fibres métalliques au cours du cycle de chauffage à 600°C.	157
figure 5.2. Evolution de la perte de masse des bétons C2 et CS2 en fonction de la température du cycle de chauffage-refroidissement.	160
figure 5.3. Evolution de la perte de masse des bétons C3 et CS3 en fonction de la température du cycle de chauffage-refroidissement.	161
figure 5.4. Evolution de la porosité absolue (a) et porosité relative (b, c) des bétons C2 avec les fibres métalliques en fonction du cycle de chauffage-refroidissement.	164
figure 5.5. Evolution de la porosité absolue (a) et porosité relative (b, c) des bétons C3 avec les fibres métalliques en fonction du cycle de chauffage-refroidissement.	165
figure 5.6. Evolution de la résistance résiduelle en compression (a) et relative (b, c) des bétons C2 avec les fibres métalliques en fonction de la température du cycle de chauffage-refroidissement.	168
figure 5.7. Evolution de la résistance résiduelle en compression (a) et relative (b, c) des bétons C3 avec les fibres métalliques en fonction de la température du cycle de chauffage-refroidissement.	169

figure 5.8. Test de compression de bétons de fibres de polypropylène et métalliques après traitement thermique à 300°C.....	171
figure 5.9. Evolution de la résistance résiduelle en traction (a) et relative (b, c) des bétons C2 avec les fibres métalliques en fonction de la température du cycle de chauffage-refroidissement.	173
figure 5.10. Evolution de la résistance résiduelle en traction (a) et relative (b, c) des bétons C3 avec les fibres métalliques en fonction de la température du cycle de chauffage-refroidissement.	174
figure 5.11. Charges de flexion en fonction du déplacement des bétons C2 (a) et C3 (b) contenant des fibres métalliques.....	176
figure 5.12. Evolution du module d'élasticité résiduel (a) et relatif (b, c) des bétons C2 avec les fibres métalliques en fonction de la température du cycle de chauffage-refroidissement.	179
figure 5.13. Evolution du module d'élasticité résiduel (a) et relatif (b, c) des bétons C3 avec les fibres métalliques en fonction de la température du cycle de chauffage-refroidissement.	180
figure 5.14. Résistance résiduelle en compression en fonction de la porosité des bétons de fibres métalliques.....	182
figure 6.1. Evolution de la différence de température centre/surface en fonction de la température de surface des éprouvettes de bétons de cocktail de fibres, pour le cycle de chauffage à 600°C.	188
figure 6.2. Evolution de la perte de masse des bétons de cocktail de fibres en fonction de la température du cycle de chauffage-refroidissement.	191
figure 6.3. Evolution de la porosité absolue (a) et porosité relative (b) de bétons de cocktail de fibres en fonction du cycle de chauffage-refroidissement.	193
figure 6.4. Evolution de la résistance résiduelle relative en compression des bétons C3 et CSP3 en fonction de la température du cycle de chauffage-refroidissement.	196
figure 6.5. Résistance résiduelle (a) et relative (b) en compression du béton sans fibres et des bétons de cocktail de fibres en fonction de la température du cycle de chauffage-refroidissement.	197
figure 6.6. Résistance résiduelle (a) et relative (b) en compression des bétons de fibres de polypropylène et des bétons de cocktail de fibres en fonction de la température du cycle de chauffage-refroidissement.	198
figure 6.7. Résistance résiduelle (a) et relative (b) en compression des bétons de fibres métalliques et des bétons de cocktail de fibres en fonction de la température du cycle de chauffage-refroidissement.	199
figure 6.8. Evolution comparée de la résistance résiduelle relative expérimentale et théorique en compression des bétons de cocktail de fibres.	201

figure 6.9. Evolution de la résistance résiduelle relative en traction des bétons C3 et CSP3 en fonction de la température du cycle de chauffage-refroidissement. 202

figure 6.10. Résistance résiduelle (a) et relative (b) en traction du béton sans fibres et des bétons de cocktail de fibres en fonction de la température du cycle de chauffage-refroidissement. 204

figure 6.11. Charge de flexion en fonction du déplacement des bétons C3 et CSP3 à la température ambiante (a) et après le cycle de chauffage-refroidissement de 300°C (b)..... 205

figure 6.12. Résistance résiduelle (a) et relative (b) en traction des bétons de fibres de polypropylène et des bétons de cocktail de fibres en fonction de la température du cycle de chauffage-refroidissement. 206

figure 6.13. Résistance résiduelle (a) et relative (b) en traction des bétons de fibres métalliques et des bétons de cocktail de fibres en fonction de la température du cycle de chauffage-refroidissement. 208

figure 6.14. Charge de flexion en fonction du déplacement des bétons C3, CS3 et CSP3 après le cycle de chauffage-refroidissement de 300°C. 209

figure 6.15. Evolution comparée de la résistance résiduelle relative expérimentale et théorique en traction des bétons de cocktail de fibres..... 210

figure 6.16. Evolution du module d'élasticité résiduel relatif des bétons C3 et CSP3 en fonction de la température du cycle de chauffage-refroidissement..... 212

figure 6.17. Module d'élasticité résiduel (a) et relatif (b) du béton sans fibres et des bétons de cocktail de fibres en fonction de la température du cycle de chauffage-refroidissement. 213

figure 6.18. Module d'élasticité résiduel (a) et relatif (b) des bétons de fibres de polypropylène et des bétons de cocktail de fibres en fonction de la température du cycle de chauffage-refroidissement. 214

figure 6.19. Module d'élasticité résiduel (a) et relatif (b) des bétons de fibres métalliques et des bétons de cocktail de fibres en fonction de la température du cycle de chauffage-refroidissement. 216

figure 7.1. Immeuble voué à la démolition, Cité de la Vache Noire, 20 rue Laplace. 221

figure 7.2. Disposition du potentiel calorifique dans le local avant la mise à feu. 222

figure 7.3. Potentiels calorifiques pour le feu de cage d'escalier. 223

figure 7.4. Préparation du support des thermocouples de mesure de température. 225

figure 7.5. Fixation finale des thermocouples de mesure de température 225

figure 7.6. Positions des thermocouples dans le cas du feu d'appartement..... 226

figure 7.7. Positions des thermocouples dans le local poubelle, cas du feu de cage d'escalier. 227

figure 7.8. Evolution des températures de surface du plafond en fonction du temps lors des essais de feux appartements B1 (a), B2 (b) et B3 (c)..... 229

figure 7.9. Evolution des températures de surface du sol en fonction du temps lors des essais de feux appartements B1 (a), B2 (b) et B3 (c)..... 230

figure 7.10. Evolution des températures de surface du mur en fonction du temps lors des essais de feux appartements B1 (a), B2 (b) et B3 (c).	231
figure 7.11. Températures maximales aux différents points de mesure des appartements B1, B2 et B3.	233
figure 7.12. Evolution des températures de surface en fonction du temps lors de l'essai de feu de cage d'escalier C1 [Plafond (a), Sol (b), Mur (c)].	235
figure 7.13. Evolution des températures de surface en fonction du temps lors de l'essai de feu de cage d'escalier C2 [Plafond (a), Sol (b), Mur (c)].	236
figure 7.14. Comparaison des courbes expérimentales de feu d'appartement à la courbe ISO.	237
figure 7.15. Quelques dégradations observées sur la surface du plafond.	239

Liste des tableaux

tableau 1.1 Composants anhydres du ciment Portland..... 31

tableau 1.2 Hypothèses sur l'évolution de la résistance en compression en fonction de la température..... 50

tableau 2.1 Composition des bétons sans fibres..... 87

tableau 2.2 Composition des bétons de fibres de polypropylène..... 87

tableau 2.3 Composition des bétons de fibres métalliques. 88

tableau 2.4 Composition des bétons de cocktail de fibres de polypropylène et métalliques .. 88

tableau 2.5 Caractéristiques du ciment CEM I de Villiers au Bouin. 89

tableau 2.6 Propriétés physiques des granulats de GSM Achères. 89

tableau 2.7 Caractéristiques du superplastifiant Cimfluid 2002. 90

tableau 2.8 Caractéristiques des fibres de polypropylène..... 91

tableau 2.9 Caractéristiques des fibres métalliques RC-80/30-BP..... 92

tableau 3.1 Différence de température (ΔT_{\max}) et gradient thermique ($\frac{\Delta T_{\max}}{\Delta r}$) maximaux des bétons sans fibres. 105

tableau 3.2 Pertes de masse moyenne des bétons sans fibres. 106

tableau 3.3 Quantité d'eau initiale moyenne et perte de masse à 600°C des bétons sans fibres..... 107

tableau 3.4 Porosité moyenne des bétons sans fibres..... 108

tableau 3.5 Détail expérimental de la détermination de la porosité des bétons C2..... 109

tableau 3.6 Résistance en compression des bétons sans fibres. 112

tableau 3.7 Résistance en traction par flexion des bétons sans fibres..... 114

tableau 3.8 Module d'élasticité des bétons sans fibres. 116

tableau 4.1 Masses des éprouvettes de bétons avant et après immersion et chauffage à 600°C..... 124

tableau 4.2 Différence de température et gradient thermique maximaux des bétons avec et sans fibres de polypropylène. 127

tableau 4.3 Perte de masse moyenne des bétons avec et sans fibres de polypropylène..... 129

tableau 4.4 Porosité moyenne des bétons avec et sans fibres de polypropylène..... 133

tableau 4.5 Résistance en compression des bétons avec et sans fibres de polypropylène. ... 138

tableau 4.6 Résistance en traction par flexion des bétons avec et sans fibres de polypropylène..... 143

tableau 4.7 Module d'élasticité des bétons avec et sans fibres de polypropylène. 148

tableau 5.1 Différence de température et gradient thermique maximaux des bétons de fibres métalliques. 158

tableau 5.2 Pertes de masse moyenne des bétons avec et sans fibres métalliques.	159
tableau 5.3 Porosité moyenne des bétons avec et sans fibres métalliques.	162
tableau 5.4 Résistances en compression des bétons avec et sans fibres métalliques.....	167
tableau 5.5 Résistances en traction par flexion des bétons avec et sans fibres métalliques. .	172
tableau 5.6 Module d'élasticité des bétons avec et sans fibres métalliques.	178
tableau 6.1 Différence de température et gradient thermique maximaux des bétons de cocktail de fibres comparés à ceux des bétons avec et sans fibres de polypropylène et fibres métalliques.....	188
tableau 6.2 Perte de masse moyenne des bétons de cocktail de fibres comparée à celle des bétons avec et sans fibres de polypropylène et fibres métalliques.	190
tableau 6.3 Porosité moyenne des bétons de cocktail de fibres comparée à celle des bétons avec et sans fibres de polypropylène et fibres métalliques.....	192
tableau 6.4 Résistance en compression des bétons de cocktail de fibres comparée à celle des bétons avec et sans fibres de polypropylène et fibres métalliques.	195
tableau 6.5 Résistances résiduelles relatives moyennes théoriques et expérimentales en compression des bétons de cocktail de fibres.	201
tableau 6.6 Résistance en traction des bétons de cocktail de fibres comparée à celle des bétons avec et sans fibres de polypropylène et fibres métalliques.	203
tableau 6.7 Résistances résiduelles relatives moyennes théoriques et expérimentales en traction des bétons de cocktail de fibres.	210
tableau 6.8 Module d'élasticité des bétons de cocktail de fibres comparés à celui des bétons avec et sans fibres de polypropylène et fibres métalliques.	211
tableau 7.1 Valeur des côtes citées sur la figure 7.6.....	226
tableau 7.2 Valeur des côtes citées sur la figure 7.7.....	227
tableau 7.3 Températures de surface maximales avec le temps équivalent pour les appartements B1, B2 et B3.	232
tableau 7.4 Températures expérimentales et températures obtenues par la courbe ISO.	238

Liste des notations

BHP	Béton à hautes performances
BO	Béton ordinaire
C	Béton
CP	Béton contenant les fibres de polypropylène
CS	Béton contenant les fibres métalliques
CSP	Béton contenant le cocktail de fibres de polypropylène et métalliques
ΔT	Différence de température entre la surface et le centre de l'éprouvette
E	Module d'élasticité
E_T	Module d'élasticité résiduel après un cycle de chauffage
E_{20}	Module d'élasticité à la température ambiante
E/C	Rapport eau/ciment
f_c	Résistance en compression
f_{cT}	Résistance résiduelle en compression après un cycle de chauffage
f_{c20}	Résistance en compression à la température ambiante
f_t	Résistance en traction
f_{tT}	Résistance résiduelle en traction après un cycle de chauffage
f_{t20}	Résistance en traction à la température ambiante
P_T	Porosité après un cycle de chauffage
P_{60}	Porosité après séchage à la température 60°C
RILEM	Réunion Internationale des Laboratoires d'Essais et de Recherche sur les Matériaux et les Constructions

Résumé

Les éléments de structures en béton peuvent être soumis à des conditions accidentelles telles que les incendies. La sécurité des personnes, de la structure et des biens dépend donc entre autres de la stabilité thermique et des propriétés mécaniques résiduelles du béton. Des dégradations du béton peuvent être observées à la suite des incendies de tunnels ou de bâtiments. Les travaux de recherche dans le domaine ont permis d'avoir des explications sur les phénomènes observés dans le comportement du béton chauffé.

Le but de ce travail de recherche est d'étudier l'effet de fibres de polypropylène et de fibres métalliques sur le comportement du béton soumis à une température élevée. D'une part, les fibres de polypropylène ont été ajoutées au béton pour améliorer sa stabilité thermique, et d'autre part les fibres métalliques ont été ajoutées au béton pour améliorer ses propriétés mécaniques résiduelles. De nouvelles formulations de béton ont ensuite été définies, en utilisant un cocktail de fibres de polypropylène et métalliques, afin d'améliorer à la fois la stabilité thermique et les propriétés mécaniques résiduelles du béton. Quatre familles de bétons ont été étudiées : - bétons témoins sans fibres, - bétons contenant des fibres de polypropylène, - bétons contenant des fibres métalliques, et - bétons contenant un cocktail de fibres de polypropylène et métalliques. Trois rapports eau/ciment sont utilisés : 0.30, 0.45 et 0.61. Les éprouvettes de béton, issues de ces compositions, ont été soumises à des cycles de chauffage – refroidissement de la température ambiante à une température de consigne de 150°C, 300°C, 450°C et 600 °C. La vitesse de chauffage a été fixée à 1 °C.min⁻¹. Les teneurs en fibres étaient de 0.11, 0.17 ou 0.22 % en proportion volumique pour les fibres de polypropylène et de 0.25, 0.38 ou 0.51 % pour les fibres métalliques. Les proportions volumiques de cocktail de fibres étaient de 0.49, 0.60, 0.62 et 0.73%. La stabilité thermique, les propriétés mécaniques (résistance en compression, résistance en traction, module d'élasticité), la porosité initiale et résiduelle des bétons formulés ont été analysées. La perte de masse des éprouvettes lors des différents chauffages a été aussi mesurée.

Cette étude expérimentale aboutit à la formulation de bétons dont à la fois la stabilité à haute température et le comportement mécanique après refroidissement sont améliorés.

Mots clés : *béton, température, fibres de polypropylène, fibres métalliques, cocktail de fibres, propriétés mécaniques, propriétés physiques.*

Abstract

Concrete structures in buildings or other constructions may be subjected to accidental conditions such as fire. Among many parameters, the safety of the structures depends on the thermal stability and the residual mechanical properties of the concrete. Concrete degradations can be observed following tunnels or buildings fires. The result of several studies made it possible to have explanations on the behaviour of the heated concrete.

The aim of this study was to investigate the effect of polypropylene and steel fibres on the behaviour of concrete subjected to high temperature. Polypropylene fibres were added to the studied concrete mixes in order to improve the concrete thermal stability. Steel fibres were added to the studied concrete mixes in order to improve the concrete residual mechanical properties. News concretes mixes were then designed by adding a cocktail of polypropylene fibres and steel fibres in order to improve both the thermal stability and the residual mechanical properties of the studied concrete. Four groups of concrete mixes were studied: - concretes without fibres, - concretes with polypropylene fibres, - concretes with steel fibres, and - concretes with a cocktail of polypropylene and steel fibres. Three water/cement ratios were used: 0.30, 0.45 and 0.61. The concrete specimens were subjected to various heating – cooling cycles from the room temperature to 150°C, 300°C, 450°C and 600 °C. The heating rate was fixed at 1 °C.min⁻¹. The amounts of fibres in the concrete were 0.11%, 0.17% or 0.22% in volume for polypropylene fibres and 0.25%, 0.38% or 0.51% in volume for steel fibres. The amounts of fibres in concrete with a cocktail of polypropylene and steel fibres were 0.49, 0.60, 0.62 and 0.73%, in volume. The thermal stability, the initial and residual mechanical properties (compressive strength, tensile strength, modulus of elasticity), the porosity and the mass loss of the studied concrete mixes were investigated.

This experimental study shows a way to design a concrete mix in order to improve both the thermal stability and the residual mechanical properties.

Keywords: *concrete, temperature, polypropylene fibres, steel fibres, cocktail of fibres, mechanical properties, physical properties.*

INTRODUCTION GENERALE

L'un des matériaux les plus utilisés pour la réalisation de bâtiments et ouvrages de génie civil est le béton. Sa mise en œuvre nécessite peu de moyens. Composé de liants, de granulats, d'eau et éventuellement d'adjuvant, le béton présente des performances mécaniques qui ont connu d'importantes avancées dans les années 1980 avec l'utilisation de particules fines. Ainsi, du béton ordinaire l'on arrive au béton à hautes performances voire au béton fibré à ultra hautes performances.

En cas d'incendies de bâtiments et tunnels, le béton peut présenter une instabilité thermique au-delà d'une certaine température. L'instabilité thermique du béton peut se présenter sous diverses formes. Les incendies de Tunnels sous la Manche (1996 et 2008), du Mont Blanc (1999) et du Fréjus (2005) en France, du Storebealt (1994) au Danemark, du Tauern (1999) en Autriche ou bien encore du tunnel S^t Gothard (2001) en Suisse sont des exemples illustrant l'endommagement du béton. L'incendie du tunnel du Mont Blanc est considéré comme l'incendie le plus meurtrier (39 décès) avec un feu d'une durée de cinquante quatre heures. La température maximale atteinte a avoisiné les 1000°C et peu d'éclatements de béton ont été observés. La résistance en compression du béton était de l'ordre de 20 MPa. Dans le cas du tunnel sous la Manche sollicité deux fois, l'expertise de 1996 a montré des éclatements des voussoirs ou une perte totale de l'épaisseur des voussoirs à certains endroits. La durée du feu était de dix heures et la température maximale atteinte était de l'ordre de 800°C. La résistance en compression du béton était de l'ordre de 100 MPa. Il semble donc que le comportement des bétons à la suite d'une sollicitation thermique varie suivant ses performances mécaniques.

Les recherches sur l'étude du comportement du béton à haute température ont permis d'apporter des éléments de réponse aux phénomènes observés. L'instabilité thermique a pour origine la formation de pression et de contraintes qui se développent dans le matériau chauffé. Les paramètres comme l'eau dans le béton, la porosité, la perméabilité, la nature des granulats ont une influence sur l'instabilité thermique. Une méthode efficace pour réduire le risque d'instabilité thermique est l'ajout des fibres de polypropylène dans la composition du béton. Il est par ailleurs important que le matériau confère aux ouvrages de bonnes possibilités de restauration après incendie. Pour cela, les performances mécaniques résiduelles doivent être maintenues à un niveau aussi proche que possible des performances initiales. L'incorporation de fibres métalliques dans le béton soumis à une température élevée peut être une solution pour améliorer les performances mécaniques résiduelles.

L'étude de l'influence des fibres de polypropylène dans le comportement des bétons chauffés montre l'apparition d'une porosité et d'une perméabilité supplémentaire liée à la fusion et la vaporisation du polypropylène. Les avis des auteurs divergent sur l'analyse des propriétés mécaniques de bétons de fibres de polypropylène chauffés. Certains ont constaté une amélioration de ces dernières tandis que pour d'autres, une

influence négative est remarquée. Il faudrait toutefois noter que les conditions expérimentales variaient suivant les auteurs.

Quant à l'utilisation des fibres métalliques, si les résultats de la littérature ont montré globalement une influence positive sur les performances mécaniques des bétons chauffés, il n'y a cependant pas de consensus sur l'apport quantitatif des fibres en fonction de leur fraction volumique, de la température et de la microstructure du béton.

Les fibres de polypropylène sont utilisées pour améliorer la stabilité thermique du béton. Les fibres métalliques peuvent être utilisées pour améliorer les performances mécaniques du béton chauffé. Il semble donc important de s'intéresser à l'utilisation couplée des deux natures de fibres. Les résultats expérimentaux relatifs aux cocktails de fibres dans le béton sont trop peu nombreux pour établir des éléments de recommandation utiles aux prescripteurs.

Le travail de doctorat présenté dans ce manuscrit a pour objectif de quantifier et d'améliorer la compréhension de la « contribution des fibres de polypropylène et métalliques à l'amélioration du comportement du béton soumis à une température élevée ». Les recherches visent en premier lieu à réaliser une base de donnée expérimentale plus exhaustive que ce qui existait, en testant l'influence des proportions de fibres, de la formulation de la matrice cimentaire tout en assurant un protocole expérimental identique. A formulation identique, l'influence des conditions de cure sur la stabilité thermique des bétons est aussi analysée. L'approche expérimentale suivie permet de relier l'évolution des propriétés physiques et des gradients thermiques aux performances mécaniques résiduelles des différents bétons. L'enjeu de ces travaux est aussi de comprendre l'interaction entre les différentes natures de fibres et des matrices cimentaires de microstructures différentes lorsque le béton est soumis à une température élevée. L'influence des fractions volumiques de fibres et de leurs différentes combinaisons dans le cocktail est discutée afin d'établir des éléments de recommandations nécessaires aux prescripteurs.

Le manuscrit est composé de six principaux chapitres, tous axés sur des essais en laboratoire. Une étude sur des feux expérimentaux a été réalisée dans le cadre du Projet National sur l'Ingénierie de la Sécurité Incendie. Cette étude constitue le dernier chapitre de cette thèse.

Le premier chapitre est une analyse bibliographique de travaux de recherche sur le comportement du béton à haute température. Il comporte une description sommaire des constituants du béton et l'effet de la température sur le béton. Les différentes formes d'instabilité que peut présenter le béton chauffé, les hypothèses émises pour expliquer ces phénomènes ainsi que les paramètres responsables sont énumérés. Ensuite, une étude est faite sur le comportement de la matrice cimentaire, des granulats et des propriétés mécaniques des bétons sans fibres en fonction de la température. La dernière partie de ce chapitre est consacrée à l'influence des fibres de polypropylène, des fibres métalliques et d'un cocktail des deux fibres sur les propriétés physiques et caractéristiques mécaniques du béton chauffé.

Le second chapitre décrit le programme expérimental défini dans le cadre de ce travail. Cette étude expérimentale est entièrement réalisée au Laboratoire de Mécanique et Matériaux du Génie Civil de l'Université de Cergy-Pontoise. Les compositions de bétons, les matériaux et matériels, le mode de cure et les essais de caractérisation sont présentés.

Le troisième chapitre regroupe les résultats des différents essais sur le comportement des bétons sans fibres. Pour les différents rapports E/C, la différence de température, la perte de masse, la porosité, la résistance en compression, la résistance en traction et le module d'élasticité en fonction de la température de chauffage sont étudiés. Les bétons sans fibres sont des bétons témoins, bétons de référence par rapport aux bétons fibrés.

L'influence des fibres de polypropylène dans le béton fait l'objet du chapitre quatre. Les résultats de propriétés physiques et mécaniques comme dans le cas des bétons sans fibres, pour les différents dosages en fibres et rapports E/C, sont présentés. Les pourcentages volumiques des fibres de polypropylène sont de 0.11%, 0.17% et 0.22%. Une étude préliminaire est faite pour montrer l'efficacité des fibres de polypropylène sur l'amélioration de la stabilité thermique ainsi que le rôle de l'eau dans le comportement à haute température. L'évolution des performances mécaniques résiduelles est discutée en fonction de l'évolution des propriétés physiques, dans le cas d'un béton ordinaire et d'un béton à hautes performances.

Le chapitre cinq regroupe quant à lui les résultats de l'impact des fibres métalliques sur le comportement du béton à la température ambiante ainsi qu'après chauffage. Les mêmes propriétés qu'au chapitre quatre sont étudiées pour les différents cycles de chauffage, dosages en fibres et rapports E/C. Les pourcentages volumiques des fibres métalliques sont de 0.25%, 0.38% et 0.51%. L'évolution des performances mécaniques résiduelles est discutée en fonction de l'évolution des propriétés physiques, dans le cas d'un béton ordinaire et d'un béton à hautes performances.

Le chapitre six montre le rôle que joue le cocktail de fibres de polypropylène et métalliques sur le comportement des bétons portés à une haute température. Un seul type de béton sera testé avec quatre combinaisons de fibres : 0.49%, 0.60%, 0.62% et 0.73%. Les différents essais sont réalisés comme décrit dans le chapitre 2 et les résultats sont comparés aux bétons de référence, aux bétons de fibres de polypropylène et à ceux contenant les fibres métalliques.

Le septième chapitre de cette étude est consacré aux travaux de feux expérimentaux d'un immeuble voué à la démolition. Ce travail a été réalisé au cours des essais de « Feux expérimentaux » du Projet National sur l'Ingénierie de la Sécurité Incendie. Il s'agit de mesurer la température de surface des éléments en béton dans le cas des feux d'appartement. Cette étude a permis de faire une comparaison de l'évolution de la température à la surface du béton en cas d'une situation réelle d'incendie d'un appartement à la courbe d'incendie ISO et aussi d'observer les cas d'écaillage du béton.

Enfin, nous concluons quant à l'apport de cette étude et aux perspectives qu'elle ouvre.

Chapitre 1 - ANALYSE BIBLIOGRAPHIQUE

1.1 Introduction

Le présent chapitre est une analyse bibliographique de travaux de recherche sur le comportement du béton soumis à une température élevée. Il sera divisé en trois grandes parties. La première partie portera sur la description des constituants du béton, la deuxième partie sur le comportement du béton non fibré soumis à une température élevée et, enfin la troisième partie est consacrée à l'influence des fibres de polypropylène, des fibres métalliques et du cocktail des deux fibres sur le comportement du béton chauffé.

1.2 Composants du béton

Le béton est un matériau composite formé par le mélange de liant (ciment), des granulats (graviers, sable), de l'eau et éventuellement des ajouts. Lorsqu'il est soumis à une température élevée, plusieurs transformations physico-chimiques s'opèrent. Du fait de son hétérogénéité, il est nécessaire de comprendre le rôle des différents éléments le constituant ainsi que leur comportement dans la phase de montée en température.

1.2.1 Microstructure de la matrice cimentaire

Le ciment est un liant hydraulique c'est-à-dire un matériau minéral finement moulu qui, gâché avec de l'eau, forme une pâte qui fait prise et durcit par suite de réactions et de processus d'hydratation. Après durcissement, il peut conserver sa résistance et sa stabilité même sous l'eau.

Le ciment Portland a été découvert au XIX^{ème} siècle et est issu d'un mélange de clincker et de sulfate de calcium dans un rapport d'environ 95 – 5%. La composition minéralogique des principaux composants anhydres du ciment portland est résumée dans le tableau 1.1.

tableau 1.1 Composants anhydres du ciment Portland.

Constituants	Notation cimentaire	Formule	Proportions (%)
Silicate tricalcique (alite)	C ₃ S	Ca ₃ SiO ₅	60 - 65
Silicate bicalcique (bélite)	C ₂ S	Ca ₂ SiO ₄	20 - 25
Aluminate tricalcique (célite)	C ₃ A	Ca ₃ Al ₂ O ₆	8 - 12
Aluminoferrite tétracalcique	C ₄ AF	Ca ₄ Al ₂ O ₁₀ Fe ₂	8 - 10

Le clinker Portland finement moulu réagit très rapidement avec l'eau et forme une pâte qui fait prise en quelques minutes. Afin de réguler la prise, on ajoute aux autres constituants du ciment au cours de sa fabrication du sulfate de calcium. Il peut s'agir de gypse (sulfate de calcium dihydraté, $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), de l'hémihydrate ($\text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$), de l'anhydrite (sulfate de calcium anhydre CaSO_4) ou tout mélange de ceux-ci.

Les différents constituants du ciment réagissent avec l'eau en formant des hydrates. L'hydratation du silicate tricalcique (C_3S) et du silicate bicalcique (C_2S) conduisent à la formation de l'hydrosilicate de calcium (C-S-H) et de l'hydroxyde de calcium $\text{Ca}(\text{OH})_2$ appelé portlandite. Le C-S-H confère au ciment sa résistance. La portlandite (CH) se forme avant le C-S-H et son apport en terme de résistance est très faible. L'équation résultant de l'hydratation des silicates de calcium est présentée d'une manière simplifiée :



Les C-S-H constituent la majeure partie de la phase liante de la pâte de ciment et existent en trois variétés distinguées par le rapport Ca/Si [Nona, 2008]:

- $0.66 < \text{Ca/Si} < 1.00 \rightarrow \text{C-S-H-}\alpha$
- $1.00 < \text{Ca/Si} < 1.50 \rightarrow \text{C-S-H-}\beta$
- $1.50 < \text{Ca/Si} < 2.00 \rightarrow \text{C-S-H-}\gamma$

Les C-S-H rencontrés lors de l'hydratation du ciment CEM I présentent le plus haut rapport Ca/Si. Les observations microscopiques montrent que les C-S-H sont des composés nanocristallins constitués de particules nanométriques agrégées les unes sur les autres (figure 1.1) (Regourd et al. [Rego, 1975] cité par Nonat [Nona, 2008]). Du fait de la petite taille des particules qui composent le C-S-H, il présente une surface spécifique très élevée (de l'ordre de $250 \text{ m}^2/\text{g}$) [Kant, 1961] et une forte densité de charges électriques.

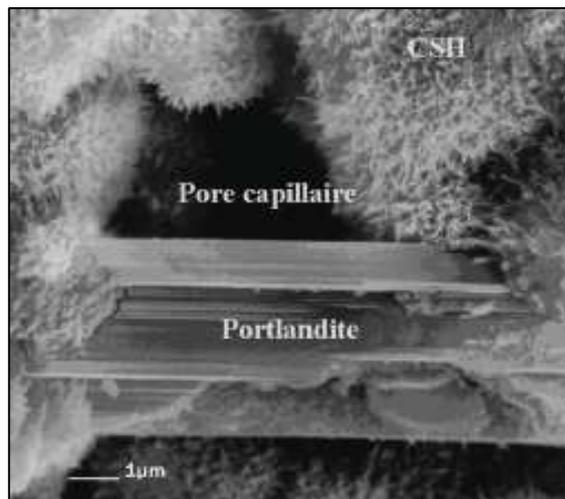


figure 1.1. Image MEB de C-S-H [Rego, 1975].

Différents modèles existent pour décrire la structure et la morphologie de C-S-H. Diamond [Diam, 1986] regroupe, selon les différences morphologiques, les gels C-S-H en quatre types morphologiques :

- Type I : les feuillets sont très minces et s'enroulent sur eux-mêmes pour former des tubes creux rayonnant autour des grains de ciment. Ils sont visibles aux premiers âges d'hydratation.
- Types II : une morphologie en nids d'abeilles avec une forme alvéolaire.
- Types III : une forme de petits disques ou de sphères assemblées pour former des particules plus massives. Ils s'observent à long terme.
- Type IV : une structure dense, amorphe et remarquable sur les pâtes vieilles.

Le modèle de Feldman et Sereda [Feld, 1968] permet d'interpréter l'influence de l'humidité relative sur les propriétés physiques et mécaniques de la pâte de ciment. Les particules de C-S-H se présentent sous la forme de lamelle (Type I) constituée de 2 à 4 feuillets simples (figure 1.2).

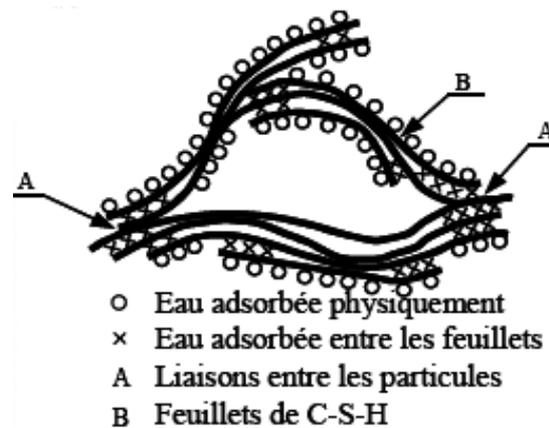


figure 1.2. Molécule de C-S-H d'après le modèle de Feldman et Sereda [Feld, 1968].

Le modèle de Munich [Ober, 1986] attribue le phénomène de retrait et de gonflement aux mouvements de l'eau dans la structure du gel C-S-H. Dans le gel C-S-H sec, les particules sont à l'état de contraction à cause des forces de tension superficielle. Ces forces sont réduites par l'eau adsorbée par les particules.

Les particules sont liées entre elles par des forces superficielles ou par des liaisons ioniques covalentes rigides. Les liaisons entre feuillets se renforcent au cours du séchage et sont détruites lors de l'humidification [Baro, 1994]. Cela explique la plus faible résistance du béton à l'état humide qu'à l'état sec. Les forces physiques exercées entre les feuillets sont de nature hydrophile. Il s'agit des :

- Forces de VAN DER WAALS (attractives),

- Forces électrostatiques (répulsives),
- Interactions stériques et des forces dues à la structuration de l'eau (répulsives).

La portlandite est la phase soluble de la pâte de ciment. Sa solubilité dans l'eau est de l'ordre de 22 mmol.L^{-1} (1.6 g.L^{-1}) à 25°C et elle diminue avec la température [Nona, 2008]. Elle se cristallise sous forme de cristaux hexagonaux plus ou moins développés dans la pâte de ciment, les pores et l'interface pâte-granulat. La portlandite est un matériau qui se dissout rapidement dans l'eau et cette réaction peut entraîner une diminution de la durabilité du béton. Afin de remédier à ce phénomène, la fumée de silice est ajoutée à la composition du ciment entraînant une réaction pouzzolanique consommant la portlandite pour donner le gel C-S-H améliorant ainsi les résistances et la durabilité.

Les autres principaux produits issus de l'hydratation du ciment sont les aluminates ou sulfo-aluminates de calcium hydratés, l'ettringite.

1.2.2 L'eau dans la microstructure

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

- **Eau libre (ou capillaire)** : c'est dans celle-ci que s'effectuent les écoulements et les cisaillements lors de la mise en œuvre du béton. Elle remplit le volume poreux et n'est pas soumise aux forces d'attraction des surfaces solides. Cette eau est la première à migrer et à s'éliminer en général pour des températures comprises entre 30°C et 120°C .

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

- **Eau chimiquement liée** : c'est l'eau qui réagit avec les éléments anhydres du ciment. Sierra [Sier, 1974] (cité par Regourd [Rego, 1982]) identifie dans la structure des C-S-H la présence de l'eau sous trois formes (figure 1.3) qui sont classées ici par ordre décroissant d'énergie de liaison avec le solide :

- **L'eau hydroxyle** (groupement OH) : elle est liée aux atomes de silice ou de calcium présents sur la surface des feuillets par une association d'un groupement hydroxyle.
- **L'eau interfoliaire** (ou interfeuille) : elle est liée aux feuillets par des groupements hydroxyles. Elle intervient directement dans la cohésion intrinsèque de la lamelle. Les molécules d'eau interfoliaire sont triplement liées par des ponts hydrogènes comme dans la structure de la glace. Pour Diamond [Diam, 1986], seul un puissant séchage permet d'extraire ces molécules d'eau et ceci de manière irréversible.
- **L'eau interlamellaire** : elle est liée à la surface des lamelles ou à des molécules d'eau par des ponts hydrogènes.

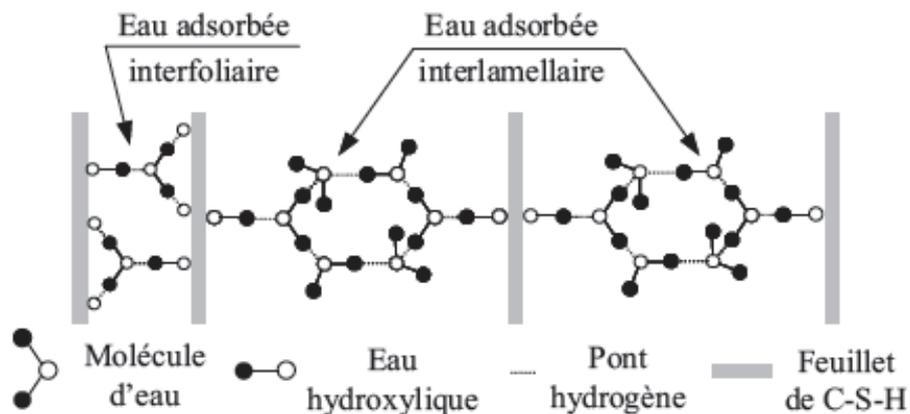


figure 1.3. Etat de l'eau dans les C-S-H ([Sier, 1974] cité par [Rego, 1982]).

1.2.3 Les granulats

Les granulats constituent le squelette du béton et représentent environ 60-80% du volume du béton. Les granulats sont d'origines diverses. Les granulats peuvent être **naturels** (origine minérale sans transformation autre que mécanique), **artificiels** (origine minérale et transformés, exemple du schiste expansé, laitier granulé de haut fourneau), ou **recyclés** (exemple du béton concassé). 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 (quartz) ou de roches éruptives (basalte, granite).

Au contact avec la pâte de ciment, on distingue des granulats réactifs et des granulats neutres. Les granulats réactifs (calcaires) 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.

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

1.2.4 L'interface pâte-granulats

Lors de l'hydratation, une liaison s'établit entre la pâte de ciment et les particules granulaires. Cette liaison donne naissance à une zone appelée « auréole de transition » ou « zone de transition interfaciale ». La qualité de l'auréole de transition est fortement liée à la nature des granulats [Diam, 1986 ; 2004], [Perr, 1999]. Au contact avec la pâte de ciment, il existe deux types de granulats, comme montré dans le paragraphe sur les granulats. Les granulats réactifs présentent de fortes liaisons avec la pâte de ciment du fait des réactions chimiques qui se produisent au cours du temps en augmentant les forces d'adhésion. En effet, le carbonate de calcium (CaCO_3) présent dans les granulats calcaires réagit avec l'aluminate tricalcique et les alumino-ferrites tétracalciques pour former des monocarbo-aluminates de calcium $\text{C}_3\text{A}-\text{CaCO}_3\text{H}_{11}$. La zone de transition entre les granulats calcaires et la pâte de ciment est plus résistante et faiblement perméable. Avec les granulats neutres, la zone de transition présente une plus faible résistance mécanique et une perméabilité aux gaz plus accrue. Elle constitue une zone de faiblesse du béton. La forme des granulats joue un rôle très important. La liaison entre pâte et granulats concassés est meilleure que celle avec des granulats roulés [Meth, 1986].

La zone de transition interfaciale est mécaniquement plus faible dans le cas des bétons ordinaires. Elle présente une porosité plus importante que le reste de la pâte. Les pores plus grossiers deviennent un réseau de cheminement privilégié pour les transports de masse [Mour, 1999], [Diam, 2004]. L'épaisseur de l'auréole de transition est liée à la taille des granulats et au rapport E/C mais, elle reste toutefois inférieure à 50 μm [Meth, 1986]. Avec les bétons à hautes performances contenant de la fumée de silice, l'épaisseur de l'auréole de transition est limitée à 12 μm . La fumée de silice réagit avec la portlandite pour le former le gel de C-S-H ce qui rend ainsi la structure du matériau dense. L'utilisation de la fumée de silice permet donc de réduire la porosité et d'améliorer la liaison entre la pâte et les granulats [Vive, 1997], [Savv, 2005].

1.3 Comportement du béton soumis à une température élevée

Le béton est composé de liant, de granulats, de l'eau et éventuellement d'adjuvant. Lors du chauffage, les différents constituants du béton subissent diverses transformations qui ont un impact sur les propriétés du béton. Les phénomènes observés sont le retrait de dessiccation, la dilatation thermique, le fluage et des transformations minéralogiques. Dans cette étude, nous présenterons en première partie les différentes formes d'endommagement thermique avec les mécanismes et paramètres pouvant être à l'origine de ce phénomène. Ensuite, en dernière partie, l'étude portera sur les modifications de la matrice cimentaire et des granulats ainsi que l'évolution des propriétés mécaniques du béton.

1.3.1 Différentes formes d'endommagement thermique

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. Les différents exemples d'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) montrent d'importantes dégradations caractérisées par un détachement de matière, une perte de résistance mécanique voire la mise hors service de l'ouvrage. La figure 1.4 illustre quelques dégradations d'ouvrages en béton à la suite d'un incendie.



Tunnel Sous la Manche en phase de réparation à la suite de l'incendie de Septembre 2008, [Lejd, 2008].



Tour Windsor (Madrid) 2005, Partie de la structure en béton, [Debu, 2005].

figure 1.4. Illustrations de dégradation d'ouvrages en béton à la suite d'une sollicitation thermique.

Les études sur le comportement du béton datent de plusieurs décennies et les différentes instabilités thermiques peuvent être regroupées de la façon suivante [Arup, 2005] :

- **Eclatement explosif** (explosive spalling) : ce type d'éclatement se produit pendant les trente premières minutes du feu ou d'un essai standard. Il peut se produire à une température supérieure à 100°C. L'éclatement explosif est caractérisé par un détachement brutal de petits ou gros morceaux de bétons accompagné d'un bruit fort.
- **Eclatement de surface** (surface spalling) : couramment appelé écaillage, l'éclatement de surface est caractérisé par le détachement de petits morceaux (jusqu'à 20 mm environ) du parement exposé au feu. Il est moins violent que l'éclatement explosif.

- **Eclatement de granulats** (aggregate spalling) : cet éclatement est dû à la dilatation thermique des granulats proches de la surface à cause de la montée en température. Les dommages engendrés par l'éclatement de granulats ne sont que superficiels.

- **Eclatement d'angle** (corner separation) : il s'observe dans les stades avancés du feu lorsque le béton devient faible et les fissures qui se développent en raison des contraintes de traction le long des bords et coins de l'ouvrage.

- **Eclatement par détachement des granulats** (Sloughing off) : ce type d'instabilité est issu de la modification de la microstructure de la pâte de ciment avec la montée en température et aussi des fissures internes engendrées par la dilatation thermique différentielle entre la pâte de ciment et les granulats.

- **Eclatement en phase de refroidissement** (post-cooling spalling) : il est non violent et sans bruit. Ce phénomène est causé par la présence des granulats calcaires et de la réhydratation de la chaux lors de la phase de refroidissement.

1.3.2 Mécanismes du phénomène d'écaillage et de l'éclatement du béton chauffé

Deux principales hypothèses permettent actuellement d'expliquer le phénomène d'éclatement observé au sein du béton chauffé :

- **L'éclatement hydraulique par pression** ([Harm, 1965], [Ande, 1997]): l'éclatement est lié à l'augmentation de la pression (eau vapeur et eau liquide) lors du chauffage. Lors de la montée en température, l'eau qui se trouve dans le matériau, qu'elle soit sous forme libre ou liée, s'évapore. Une partie de cette eau vaporisée s'évacue vers la surface chauffée et une autre partie se déplace vers les zones froides à l'intérieur du matériau puis se condense. Les pores se remplissent d'eau liquide migrant vers les zones froides. La condensation de l'eau crée une zone de forte saturation « le bouchon hydraulique » qui rend ainsi la migration difficile. Les travaux expérimentaux menés par Jansson et Bostrom [Jans, 2009] sur des bétons sans fibres et des bétons contenant les fibres de polypropylène exposés au feu standard (ISO 834) montrent l'existence de la zone de forte saturation lors de la montée en température. La figure 1.5 illustre le faciès du béton sans fibres chauffé pendant 10, 15 et 20 minutes. Ils remarquent qu'aucune saturation n'est observable après 10 mn de chauffage tandis que pour les chauffages de 15 mn et 20 mn la zone saturée est bien remarquable.

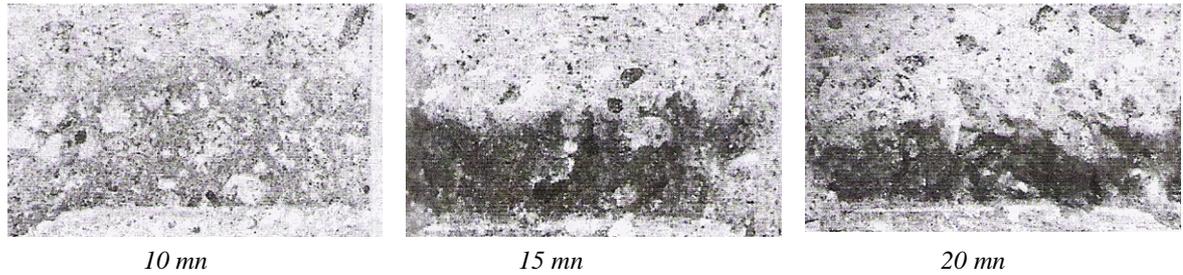


figure 1.5. Faciès de béton sans fibres montrant l'apparition de la zone de forte saturation au bout de 10, 15 et 20 minutes d'exposition au feu standard, [Jans, 2009].

Le bouchon hydraulique provoque l'augmentation de pressions de gaz du côté chaud du front de saturation. Ces pressions de vapeur associées aux fortes contraintes thermiques aboutissent à l'apparition du phénomène d'écaillage. La figure 1.6 illustre le mécanisme d'écaillage de béton exposé à une source de chaleur.

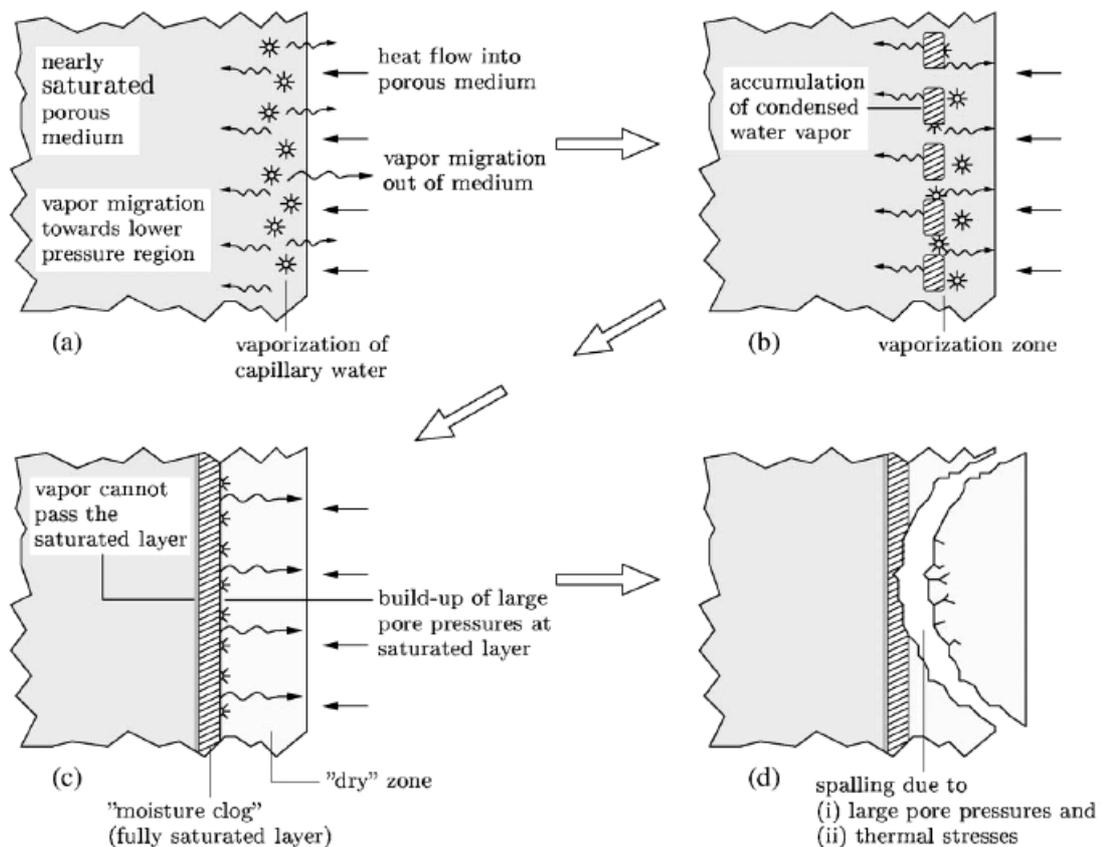


figure 1.6. Illustration du mécanisme d'écaillage du béton [Zeim, 2006].

Quatre zones sont mises en évidence (figure 1.7 (a)) pour caractériser une structure en béton au cours du chauffage [Robe, 2008] :

- Zone1 : elle est complètement sèche et se situe près de la surface chauffée. Sa température augmente rapidement,

- Zone 2 : elle est humide, chaude et voit se développer en son sein des pressions gazeuses qui repoussent la vapeur et la phase d'eau liquide vers la surface extérieure chauffée et vers l'intérieur du matériau,
- Zone 3 : elle se forme progressivement sous l'effet des mouvements de masse. Cette zone s'humidifie et est alimentée par les mouvements d'eau liquide et la condensation de la vapeur dans cette zone plus froide,
- Zone 4 : elle est la zone froide gardant presque les caractéristiques initiales du matériau.

Les bétons à hautes performances sont plus susceptibles à l'éclatement par pression que les bétons ordinaires, à cause de leur faible perméabilité. La forte pression de vapeur d'eau générée lors du chauffage tend à expliquer l'éclatement des BHP.

- **L'éclatement par dilatation thermique empêchée** ([Baza, 1997], [Ulm, 1999]) : la dilatation thermique causée par le chauffage, lorsqu'elle est empêchée, entraîne des contraintes de compression parallèles à la surface du béton soumise au feu. Ces contraintes de compression entraînent une destruction du matériau par délaminage parallèle à la surface (figure 1.7 (b)).

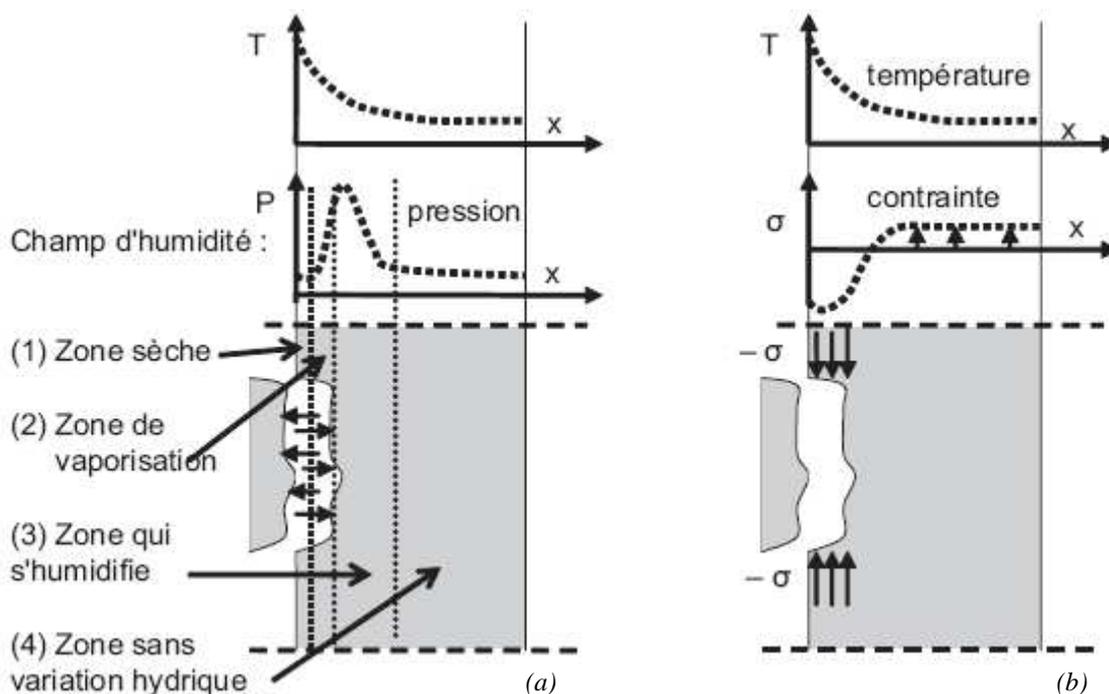


figure 1.7. Principales hypothèses de l'éclatement du béton : (a) pressions internes [Ande, 1997], (b) dilatation thermique empêchée [Baza, 1997], [Robe, 2008].

Ainsi, deux processus peuvent expliquer l'instabilité thermique. Le processus thermohydrique qui lie l'instabilité thermique à la formation de fortes pressions de vapeur et le processus thermomécanique pour lequel l'instabilité est due aux importantes contraintes de compression parallèles à la surface chauffée.

Les mesures de pression de vapeur réalisées par Mindéguia [Mind, 2009] sur différentes compositions de béton ont montré des risques d'instabilité thermique (Courbe ISO) pour des bétons subissant une pression de vapeur inférieure à 0.6 MPa. D'autres bétons subissant des pressions importantes, supérieure à 2.5 MPa, n'ont pas présenté d'instabilité thermique. De plus, en variant la vitesse de chauffage, l'auteur observe, pour un chauffage lent, des pressions de vapeur élevées (0.9 - 2.6 MPa) et des risques d'instabilité thermique tant pour le béton ordinaire (résistance en compression à 28 jours : 37 MPa) que pour le béton à hautes performances (résistance en compression à 28 jours : 61 MPa). La profondeur endommagée des dalles et le volume de béton éjecté ont été plus élevés dans le cas du chauffage lent que dans le cas d'un chauffage ISO. L'instabilité thermique n'est donc pas due seulement au processus thermohydrrique ou thermomécanique. Elle serait donc une résultante des processus thermiques, hydriques, mécaniques couplés et éventuellement d'un grand nombre de paramètres et phénomènes tant à l'échelle du matériau qu'à celle de l'élément de structure.

1.3.3 Paramètres et phénomènes favorisant l'instabilité thermique du béton

Plusieurs paramètres et phénomènes peuvent influencer l'éclatement du béton porté à haute température :

- **La présence d'eau dans le béton** : l'eau dans le béton joue un rôle important dans l'instabilité thermique. Elle est à l'origine de la formation de pressions internes qui sont considérées comme une des sources du phénomène d'éclatement. Les travaux menés par Hager [Hage, 2004] sur la détermination de la pression de vapeur dans un BHP (M100C) séché à 105°C ($w = 0\%$), partiellement séché à 80°C ($w = 0.38\%$) et non séché ($w = 3.1\%$) montrent une variation de la pression de vapeur en fonction de la teneur en eau libre (w) dans le matériau (figure 1.8). Le béton séché présente une faible pression de vapeur (0.26 MPa) tandis que pour le béton non séché une forte pression est obtenue (4 MPa). Les auteurs suivants [Harm, 1964], [Hert, 2003], [Newm, 2003] considèrent qu'une teneur en eau massique inférieure à 3-4% limiterait le risque d'éclatement. Toutefois des instabilités thermiques ont été observées sur des éprouvettes de bétons avec une teneur en eau libre bien inférieure à 3% (Shuttleworth [Shut, 1997], Both [Both, 2000], Sintef [Sint, 1992] rapportés par [Arup, 2005]).

Il a été observé que l'éclatement n'apparaît pas si le matériau est sec, même en présence d'un fort gradient thermique (Harmathy et al. repris par Hertz [Hert, 2002]).

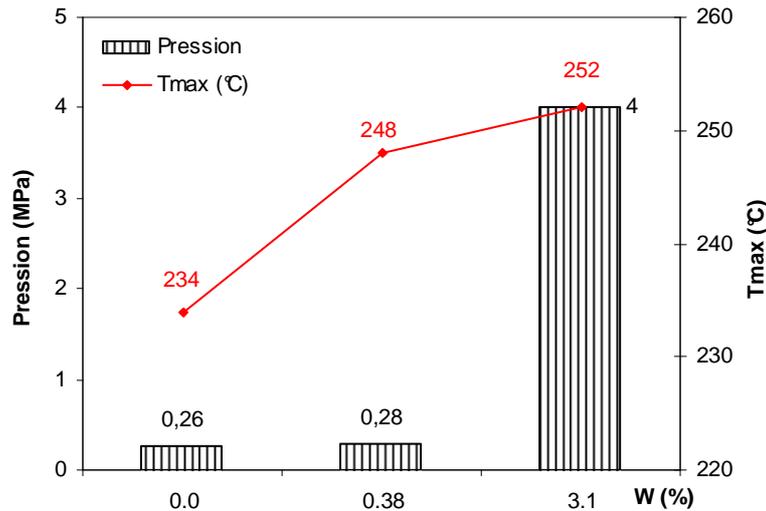


figure 1.8. Pressions internes dans le béton en fonction de la teneur en eau libre et températures d'apparition des pics de pression [Hage, 2004].

- **Les propriétés physico-mécaniques du matériau** (rapport eau/liant-densité-porosité- perméabilité) : le béton caractérisé par un faible rapport eau/liant est plus sensible à l'instabilité thermique que le béton dont le rapport est élevé. La structure dense, la faible porosité et la faible perméabilité caractérisant les bétons à hautes performances, rendent difficile le transfert des fluides ce qui pourra entraîner une augmentation de pressions internes lors de la montée en température.

- **La vitesse de chauffage** : c'est un facteur qui influe beaucoup sur la stabilité thermique du béton. Plus la vitesse de chauffage est importante, plus le risque d'éclatement est élevé. Les essais de caractérisation effectués par [Kane, 2007(a)] sur des éprouvettes de béton soumises à des cycles de chauffage-refroidissement à la vitesse de $1^{\circ}\text{C.mn}^{-1}$ conduisent à des éclatements d'éprouvettes tandis que les éprouvettes soumises à la vitesse de chauffage de $0.1^{\circ}\text{C.mn}^{-1}$ n'éclatent pas. La faible vitesse de montée en température limite la formation de la zone saturée et réduit le gradient de température. L'échauffement rapide de la surface du béton engendre de forts gradients thermiques (contraintes thermiques). Le gradient thermique engendre des contraintes de compression et de traction pouvant entraîner l'écaillage du béton.

- **La nature des granulats** : selon leur nature chimique et minéralogique, le comportement des granulats diffère lorsqu'ils sont soumis à une montée en température. Le coefficient de dilatation des granulats siliceux est plus élevé que celui des granulats calcaires ce qui permet aux granulats calcaires d'avoir une stabilité thermique meilleure que les granulats siliceux ([Arup, 2005], [Mind, 2009]). Les essais de chauffage jusqu'à 200°C de granulats silico-calcaires réalisés par Mindégua [Mind, 2009] montrent un clivage violent des granulats de silex pour une gamme de température de 110°C à 165°C . La figure 1.9 illustre l'instabilité thermique des granulats de silex comparée aux granulats calcaires à la suite d'un cycle thermique à 200°C .

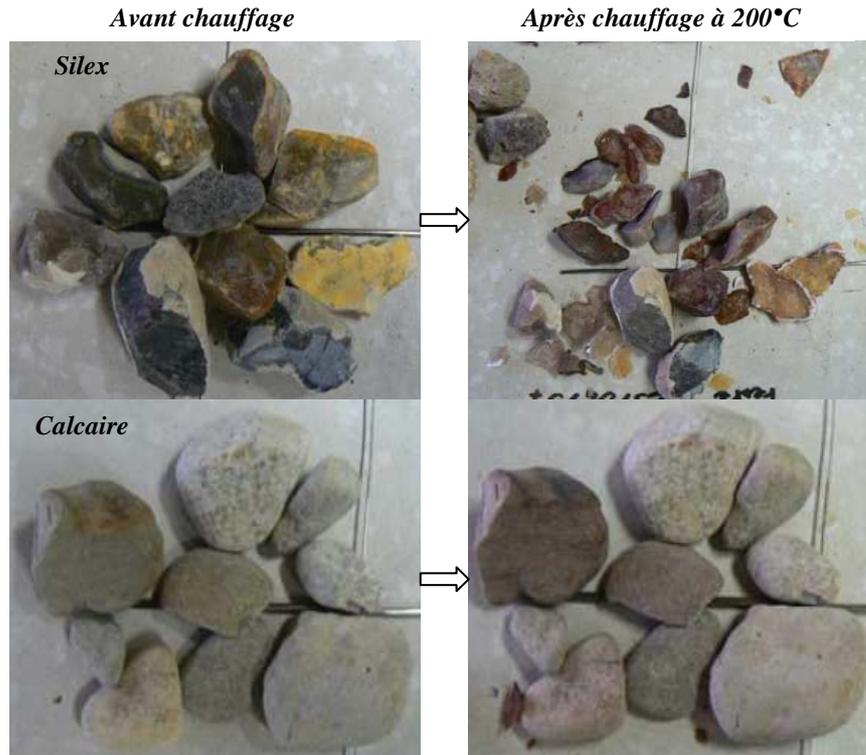


figure 1.9. Illustration du caractère instable des granulats de silex comparé aux granulats calcaires [Mind, 2009].

- **La taille du spécimen** : la taille des spécimens est un facteur important sur la stabilité thermique. Des études réalisées par [Kane, 2007] sur des éprouvettes cylindriques \varnothing 11 x 22 cm et \varnothing 16 x 32 cm ont montré plus de risques d'instabilité thermique avec les éprouvettes de dimensions \varnothing 16 x 32 cm, confirmant un effet d'échelle bien connu.

- **La déformation thermique empêchée** : elle génère des contraintes internes en compression dans la direction parallèle à la surface soumises au feu. Cette sollicitation en compression favorise la rupture de l'élément de structure, tandis que les pressions internes ne jouent qu'un rôle secondaire d'initiation de la fissuration.

- **La présence de la charge mécanique** : la charge mécanique notamment celle de la précontrainte favorise dans certains cas le phénomène d'éclatement ([Jahr, 1989], [Died, 1989]).

1.3.4 Transformations physico-chimiques de la matrice cimentaire

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 [Schn, 1981] et Noumowé [Noum, 1995] avec une élévation en température sont les suivantes :

- 20°C - 120°C : départ de l'eau libre et d'une partie de l'eau liée [Alar, 2005]. Noumowé [Noum, 1995] considère que l'eau libre est complètement éliminée à 120°C. Castellote [Cast, 2004] note une décomposition de l'ettringite et son élimination complète de la pâte de ciment avant 100°C.
- 130°C - 170°C : double réaction endothermique de décomposition du gypse $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ [Noum, 1995], [Alar, 2005].
- Les premiers signes de destruction du C-S-H sont remarqués avant 100°C et se poursuivent jusqu'à 300°C [Cast, 2004], [Alon, 2004].
- 450°C - 550°C : décomposition de la Portlandite. Elle s'effectue en libérant de l'eau [Noum, 1995], [Alar, 2005] suivant l'équation: $\text{Ca}(\text{OH})_2 \rightarrow \text{CaO} + \text{H}_2\text{O}$.
- 600°C - 700°C : seconde étape de la déshydratation des silicates de calcium hydratés. Cette déshydratation s'accompagne d'une libération des molécules d'eau et de la création d'une nouvelle forme de silicates bicalciques [Noum, 1995].
- Au-delà de 650°C : décomposition du carbonate de calcium accompagnée d'un dégagement de chaleur et d'un dégagement de dioxyde de carbone, selon l'équation suivante: $\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$ [Alon, 2004].
- A partir de 1300°C : fusion de la pâte de ciment et des granulats, élimination des sulfates et évaporation des alcalins [Schn, 1981].

La technique de la diffraction des neutrons de l'ESRF (European Synchrotron Radiation Facility) de Grenoble a permis de suivre l'évolution des principaux constituants de la pâte de ciment [Cast, 2004] avec l'augmentation de la température. Il s'agit de la portlandite, de l'ettringite, de la calcite, du larnite, du gel C-S-H et du CaO. La vitesse de chauffage est de $1^\circ\text{C} \cdot \text{mn}^{-1}$ jusqu'à la température de 700°C. La figure 1.10 illustre le comportement de ces composantes avec la température.

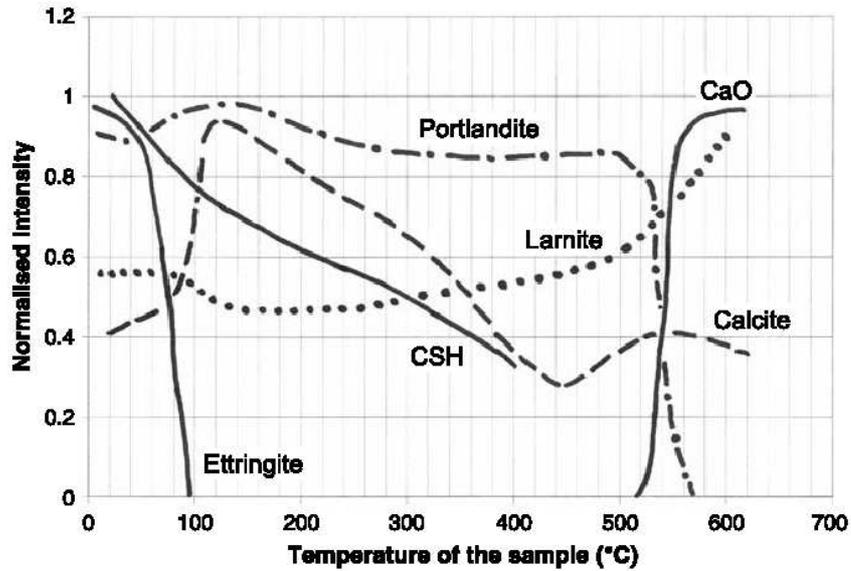


figure 1.10. Evolution des composantes du ciment sous l'échauffement [Cast, 2004].

L'observation des différentes courbes révèle une disparition complète de l'ettringite avant la température 100°C. La déshydratation du C-S-H débute bien avant 100°C et se poursuit jusqu'à 400°C. La Portlandite se décompose progressivement jusqu'à 500°C. Au-delà de cette température, la diminution de la portlandite s'accompagne de la formation du CaO. La portlandite disparaît complètement au-delà de 600°C au profit du CaO. Le départ de l'eau avec l'élévation de la température se traduit par une modification considérable des propriétés mécaniques du béton. On considère, dans les BHP, que leur porosité plus fine empêche l'eau de s'écouler et de s'échapper facilement du matériau. Ce qui entraîne une augmentation de la pression de vapeur d'eau qui provoque des réactions thermohydriques et la transformation complémentaire des produits hydratés formés [Alon, 2004], [Jona, 2005].

1.3.5 Evolution des granulats

Les granulats représentent environ 60 à 80% du volume du béton et constituent son squelette. En principe inertes dans le béton à la température ambiante sauf cas de pathologie comme les réactions alcali-granulats, les granulats ont un comportement différent aux températures élevées. La montée en température modifie la structure des minéraux qui constituent la roche. Les granulats les plus utilisés pour les ouvrages en béton sont les granulats calcaires et les granulats siliceux. Soumis à des températures élevées, ces deux types de granulats présentent des comportements différents compte tenu de leur nature minéralogique.

Les granulats siliceux sont constitués de minéraux tels que le quartz, la calcédoine, l'opale. Le quartz présent dans ces granulats siliceux est sous forme d'un édifice tétraédrique (atome de silicium entouré de quatre atomes d'oxygène) qui, à partir d'une

température de 575°C, subit une légère rotation des liaisons pour former une structure cristalline de symétrie hexagonale. Ce changement de phase du quartz α en quartz β est accompagné d'un changement de volume de 1% à 5.7%. Cette variation de structure cristalline du quartz dans les granulats peut provoquer un endommagement dans le béton [Schn, 1981].

Des études ont montré l'instabilité thermique de certains granulats siliceux (silex). Ceux-ci explosent en de multiples fragments à des températures comprises entre 110°C et 165°C [Mind, 2009] ou entre 150°C et 450°C [Xing, 2009]. Le caractère instable de ces granulats à faible température peut être attribué à la présence d'eau piégée dans les micropores ou d'eau provenant de la deshydroxylation des groupes silanols du quartz cryptocristallin dont sont majoritairement composés les silex. Les silex peuvent contenir de la calcédoine et de l'opale qui sont des formes de silice hydratée. L'opale peut contenir jusqu'à 20% d'eau dans sa structure cristalline. Du fait de la faible perméabilité des silex, les pressions de vapeur augmentent jusqu'à conduire à l'éclatement brutal de ces granulats.

Concernant les granulats calcaires, le phénomène observé est différent. Les granulats calcaires ont un comportement thermique stable jusqu'à une température de 700°C. Au-delà de cette température, la calcite (CaCO_3) se décompose en donnant du dioxyde de carbone (CO_2) et du monoxyde de calcium (CaO). Le CaO ainsi formé peut, pendant le refroidissement, réagir avec l'humidité de l'air pour donner de la Portlandite $\text{Ca}(\text{OH})_2$ dont le volume est supérieur à celui du granulat initial. La formation de cette nouvelle Portlandite entraîne un accroissement de fissure dans le béton, qui est sans doute à l'origine de la diminution des résistances mécaniques résiduelles constatées [Dias, 1990], [Khou, 1984].

Ainsi, d'après les recherches menées par Schneider [Schn, 1988] et Khoury [Khou, 1992] et bien d'autres chercheurs, les propriétés d'un bon granulat du point de vue 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 changement des phases,
- une structure mono - minérale de la roche composante du granulat.

1.3.6 Déformations thermiques du béton

Avant l'étude de la déformation thermique du béton, nous distinguons dans un premier temps la déformation thermique de la pâte de ciment durcie de celle des granulats.

Les travaux de recherche sur la déformation thermique de la pâte de ciment montrent que celle-ci se décompose en deux phases : la phase d'expansion et la phase de retrait. Les travaux expérimentaux de Crowley [Crow, 1956], Philleo [Phil, 1958], Cruz et Gillen [Cruz, 1980], Jumpanen [Jump, 1989], Kosiorek [Kosi, 1994] et bien d'autres auteurs (rapportés par [Meno, 2004] et [Hage, 2004]) ont montré que la pâte de ciment se dilate dans la plage de température allant jusqu'à 150°C. La vitesse de chauffage influence le changement de signe de la déformation thermique ([Crow, 1956], [Hara, 1972], [Cruz, 1980]). Pour une vitesse de chauffage inférieure à 10°C.mn⁻¹, la température de changement de signe est autour de 150°C et 200°C. A une vitesse de 35°C.mn⁻¹, la température avoisine 300°C ([Cruz, 1980] rapporté par [Hage, 2004]). Les vitesses de 0.5°C.mn⁻¹ et 1°C.mn⁻¹ utilisées par Hager [Hage, 2004] conduisent respectivement à des températures de changement de 225°C et 300°C. Cette phase de dilatation initiale de la pâte de ciment est attribuée aux mouvements cinétiques moléculaires qui s'ajoutent à la pression développée par une diminution de la tension superficielle de l'eau lorsque la température augmente (Dettling, 1964, rapporté par [Meno, 2004]). Le coefficient de dilatation thermique est très influencé par l'humidité relative de la pâte de ciment. Au-delà de cette plage de température de 150°C, la pâte de ciment subit un retrait très important lié au départ de l'eau contenue dans le matériau. La pâte de ciment à hautes performances se dilate plus que la pâte ordinaire et elle se rétracte moins.

Les granulats ont un comportement différent de celui de la pâte de ciment. L'expansion thermique des granulats dépend de la nature minéralogique des roches notamment de leur teneur en silice. Le coefficient de dilatation thermique des granulats est fonction aussi de leur teneur en eau et de la cristallinité des minéraux [Meno, 2004]. Les granulats calcaires ont des déformations thermiques plus faibles que les granulats de nature siliceuse. Le coefficient thermique moyen des roches calcaires est de l'ordre de 5.5 – 11.8 x 10⁻⁶.°C⁻¹ et celui des roches à forte teneur en silice est 9 – 10 x 10⁻⁶.°C⁻¹ pour des températures comprises entre 20°C et 100°C.

Le béton étant constitué majoritairement de granulats, sa déformation thermique dépend surtout de la nature des granulats. La figure 1.11 illustre les travaux de Piasta [Pias, 1989] sur une étude comparée de déformation thermique de la pâte de ciment à celle du béton contenant des granulats d'origines diverses. La déformation du béton est fortement liée à la nature des granulats qui constituent son squelette. La dilatation du béton est caractérisée par une expansion volumique non linéairement dépendante de la température. Pour une température supérieure à 150°C, la pâte de ciment s'oppose à cette dilatation et se rétracte. Au-delà de 600°C, une faible ou un arrêt de dilatation et un léger retrait s'observent dans le comportement du béton, toujours selon la nature minéralogique des granulats. L'évolution opposée des granulats et de la pâte de ciment génère à l'interface pâte-granulats des incompatibilités de déformations qui génèrent des contraintes de traction au sein de la pâte de ciment et des contraintes de compression au niveau des granulats. Le comportement opposé granulats - pâte de ciment pourrait donc engendrer des microfissurations dans le matériau.

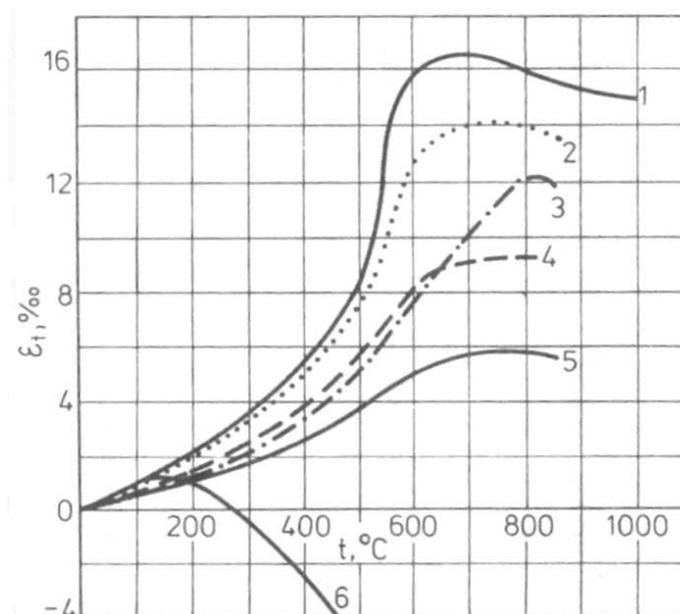


figure 1.11. Déformations thermiques de bétons avec différents types de granulats ; 1 : Siliceux, 2 : Grès, 3 : Calcaire, 4 : Basalte, 5 : Argiles expansées, 6 : Pâte de ciment, [Pias, 1989].

1.3.7 Evolution des propriétés mécaniques

Lors de la montée en température, le béton subit des transformations physico-chimiques. La modification de la microstructure du béton influence donc ses propriétés mécaniques. Dans cette partie, l'étude portera sur l'évolution des propriétés mécaniques à chaud ou après refroidissement (propriétés résiduelles) en fonction de la température. Les caractéristiques mécaniques sont la résistance en compression, la résistance en traction et le module d'élasticité.

1.3.7.1 Résistance en compression

La résistance en compression est une des propriétés les plus importantes pour caractériser un béton. La résistance en compression du béton baisse globalement avec l'élévation de la température.

Hager [Hage, 2004] a réalisé des essais de compression à chaud sur différentes formulations de bétons de rapports E/C de 0.3, 0.4 et 0.5. L'analyse de la courbe d'évolution (figure 1.12) de la résistance à chaud en fonction de la température lui permet de regrouper cette évolution en trois phases. La première phase, allant de la température ambiante à 100°C, est caractérisée par une diminution de la compression relative de 20 à 30%. La seconde phase, entre 100°C et 250°C, est marquée par une augmentation de résistance par rapport à la température 100°C. Les BHP ne présentent cette augmentation qu'à 400°C. Cette augmentation dite retardée comme l'ont aussi remarquée Castillo [Cast, 1990], Pimenta [Pime, 2000], Kanéma [Kane, 2007], peut s'expliquer par la faible

perméabilité de ces bétons compacts. Le départ de l'eau est donc ralenti. La dernière phase, au-delà de la température 400°C pour le BHP et 250°C pour les autres bétons, souligne une diminution de résistance de façon monotone. Les premières fissures liées à la déformation différentielle entre les granulats et la pâte sont observées.

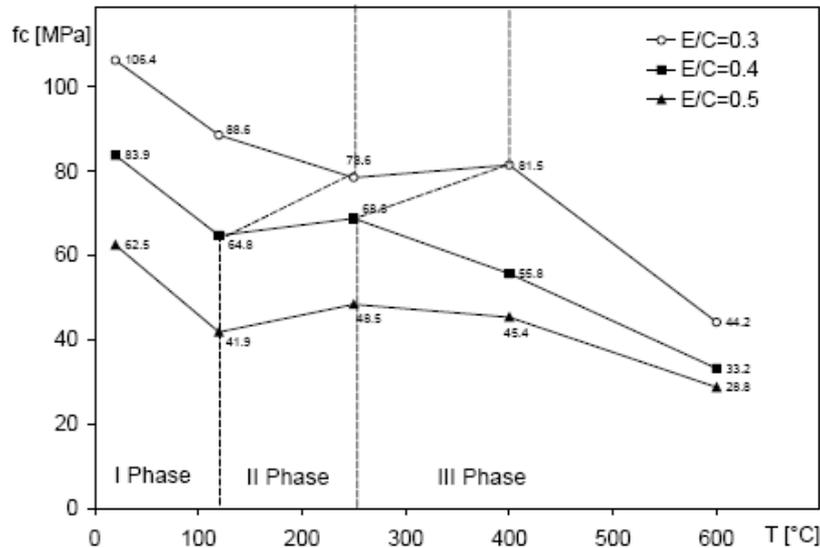


figure 1.12. Résistances en compression à chaud de bétons à différentes températures [Hage, 2004].

Les essais de compression résiduelle montrent aussi un comportement similaire du béton. D'autres auteurs comme Diederichs [Died, 1992], Phan [Phan, 2002-2003], Kodur [Kodu, 2004], Kanéma [Kane, 2007] regroupent l'évolution de la résistance en compression en fonction de la température en deux domaines. Le premier domaine, de la température ambiante à 250°C- 400°C. Il est caractérisé par une légère baisse, un maintien ou une augmentation de résistance. Le second domaine, de la limite intermédiaire à la température 600°C, marque la baisse continue de la résistance en compression.

Les essais, tant à chaud ou après refroidissement, montrent une baisse de la résistance en compression entre les températures 100°C et 200°C. Lorsque la température augmente, la dilatation thermique de l'eau peut entraîner un écartement des feuillets du gel C-S-H. Cet écartement génère une réduction des forces de cohésion de type Van der Waals comprises entre les feuillets [Khou, 1992]. Cette réduction d'énergie de surface entre gels développe éventuellement des groupes silanols (Si-OH OH-Si) qui présentent des forces de liaisons faibles. La rupture à la compression étant liée au dépassement des contraintes de cisaillement, l'affaiblissement des liaisons entre les hydrates peut provoquer l'apparition de micro-défauts facilitant le glissement.

Entre les températures 250°C et 350°C (voire 400°C), un gain de résistance en compression s'observe. Le départ de l'eau du matériau peut entraîner une re-augmentation des forces de liaison entre les hydrates avec un accroissement des énergies de surface

[Dias, 1990]. Ces différents phénomènes peuvent entraîner une augmentation de la résistance en compression.

Au-delà de la température 350°C (400°C), la résistance baisse de façon monotone. Après cette température, le comportement du béton est lié à la deshydroxylation de la portlandite, la dilatation thermique différentielle entre la pâte de ciment (se rétracte) et les granulats (se dilatent). De plus, la transformation du quartz α en quartz β des granulats siliceux autour de la température 570°C fragilise le granulat et peut entraîner également une baisse de la résistance du béton [Feli, 2000].

Nous regroupons dans le tableau 1.2 les différentes hypothèses émises sur les phénomènes observés lors de l'étude de la résistance en compression du béton en fonction de la température.

tableau 1.2 Hypothèses sur l'évolution de la résistance en compression en fonction de la température.

Plage de température :	Effet sur la résistance en compression	Hypothèses concernant l'explication du phénomène
20°C - 200°C	diminution	<ul style="list-style-type: none"> - dilatation thermique de l'eau, - réduction des forces de liaison entre les couches de C-S-H, - réduction de l'énergie de surface entre surfaces, - développement éventuel de groupes silanols (Si-OH HO-Si), - pressions de vapeur d'eau créant des contraintes internes non négligeables exercées sur le squelette.
200°C - 350°C (400°C)	augmentation	<ul style="list-style-type: none"> - départ de l'eau, - hydratation supplémentaire de la matrice cimentaire, - accroissement des forces de liaison entre les gels C-S-H, - accroissement de l'énergie de surface.
> 350°C (400°C)	diminution	<ul style="list-style-type: none"> - déshydratation du gel C-S-H, - deshydroxylation de la portlandite, - décomposition du carbonate de calcium, - clivage des granulats, - endommagement par fissuration causée par la dilation différentielle thermique entre les granulats et la pâte.

La comparaison des mesures de la résistance à chaud du béton avec les résistances résiduelles [Hara, 1970], [Dias, 1990], [Hage, 2004] montrent une baisse plus significative de cette dernière. Le refroidissement a un effet supplémentaire sur le comportement du béton chauffé. Hager [Hage, 2004] explique ce phénomène par trois mécanismes:

- le gradient thermique supplémentaire lors du refroidissement engendre des contraintes thermiques de signe inversé par rapport à la phase de montée en température,
- l'endommagement supplémentaire du matériau dû à une sollicitation thermique qu'est le refroidissement,
- l'affaiblissement du matériau par l'augmentation du volume de la portlandite lors de la phase de refroidissement. Au cours cette dernière, la chaux (CaO) se mélange avec l'eau (H₂O) présente dans l'environnement pour former de la portlandite (Ca(OH)₂) supplémentaire.

1.3.7.2 Résistance en traction

Dans la littérature, il existe peu de résultats relatifs à l'évolution de la résistance en traction en fonction de la température. La détermination de cette propriété est primordiale du fait que l'instabilité thermique du matériau béton est liée au dépassement de sa résistance en traction. La plupart des observations sur la résistance en traction porte sur des essais après refroidissement.

Kanéma [Kane, 2007(a)] a réalisé des essais de traction par fendage sur cinq formulations de bétons B325 - B350 - B400 - B450 - B500. Les paramètres ayant fait l'objet de cette étude sont l'influence du rapport E/C, la vitesse de chauffage, la durée du palier de température ainsi que l'âge du béton. Les éprouvettes cylindriques de section 11 x 22 cm ont été soumises à différents cycles de chauffage-refroidissement.

La figure 1.13 illustre l'évolution de la résistance résiduelle en traction en fonction du cycle de chauffage-refroidissement pour une vitesse de montée en température de 1°C.mn⁻¹ avec un palier de température d'une durée d'une heure. L'intensité de la résistance résiduelle en traction baisse pour toutes les compositions de bétons et elle dépend du rapport E/C. Les bétons à faible rapport E/C (B450 - B500) présentent une baisse plus significative de leur résistance que les bétons à E/C élevé (B325 - B350) dès la température 150°C. Les travaux de Min Li [Min, 2004] montrent également la baisse plus rapide de la résistance résiduelle en traction par fendage des pâtes à hautes performances que celle des pâtes ordinaires dans la plage de température comprise entre 200°C et 400°C. En effet, la destruction du gel C-S-H peut bien s'effectuer dès la température 100°C comme illustré dans les travaux de Jonatka [Jona, 2005].

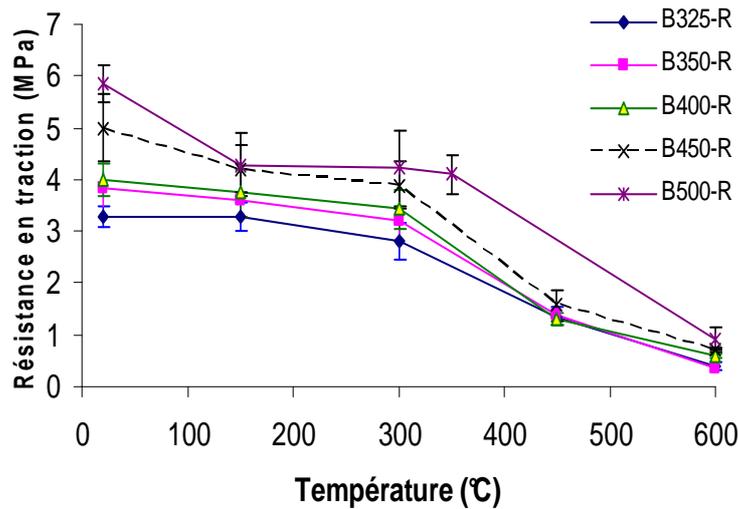


figure 1.13. Résistances résiduelles en traction en fonction de la température de chauffage [Kane, 2007(a)].

L'étude de l'influence de la vitesse de chauffage sur l'évolution de la résistance résiduelle en traction des bétons B325 et B500 pour une même durée de palier, montre une résistance plus faible des bétons B325 ($E/C = 0.62$) à la suite du traitement thermique à la vitesse de $0.1 \text{ } ^\circ\text{C}\cdot\text{mn}^{-1}$ par rapport à la vitesse de $1 \text{ } ^\circ\text{C}\cdot\text{mn}^{-1}$. Quant aux bétons B500 ($E/C = 0.29$), le changement de vitesse influe peu sur les résultats de la résistance en traction [Kane, 2007(a)]. Cela semble être lié à la quantité d'eau présente dans le béton.

Cette diminution de résistance résiduelle en traction est aussi montrée par Harada [Hara, 1970], Noumowé [Noum, 1995], Chang [Chan, 2006].

Par contre, certains auteurs comme Khoury [Khou, 1988], Hager [Hage, 2004] observent une augmentation de la résistance en traction à chaud par rapport à celle déterminée avant chauffage. Les travaux de Hager [Hage, 2004] portent sur des essais de traction directe à chaud sur un BHP (100 MPa) pour différents cycles de chauffage de 120°C , 250°C et 400°C . L'auteur observe une augmentation de la résistance en traction à chaud (6.2 MPa à 400°C) par rapport à celle obtenue à la température ambiante (3.8 MPa).

1.3.7.3 Module d'élasticité en compression

Suite aux différentes transformations physico-chimiques de la matrice cimentaire ainsi qu'à la déformation des granulats, l'évolution du module d'élasticité traduit l'évolution de la rigidité du béton à une température élevée.

La détermination du module d'élasticité à chaud par Hager [Hage, 2004] en fonction de la température (figure 1.14) traduit une diminution progressive identique en fonction de la température quel que soit le rapport E/C . Une diminution de 20% est constatée à la température 120°C et environ 80% à 600°C . Le rapport E/C n'influence pas l'évolution du module d'élasticité en fonction de la température, contrairement aux

courbes séquentielles observées dans l'étude de la résistance en compression. Cette remarque est aussi faite par Sabeur [Sabe, 2007] travaillant sur des essais à chaud.

Des essais de détermination de modules d'élasticité résiduels de Noumowé [Noum, 1995], Tolentino [Tole, 2002], Kanéma [Kane, 2007(a)] montrent aussi que le module d'élasticité décroît avec la température mais le rapport E/C n'influe pas sur son évolution.

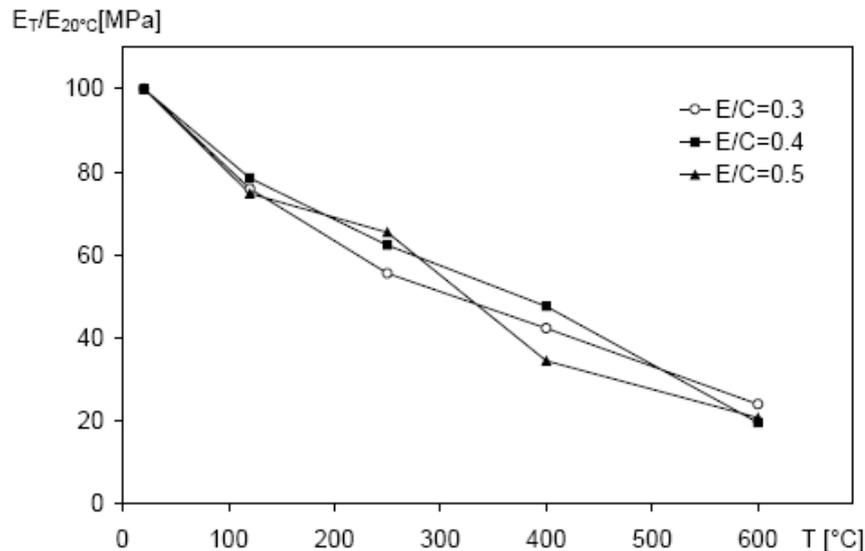


figure 1.14. Modules d'élasticité à chaud de bétons à différentes températures [Hage, 2004].

Pour Kanéma [Kane, 2007(a)] 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 [Tole, 2002] explique la baisse de rigidité des bétons portés à une température élevée par l'augmentation des volumes poreux dans le béton.

1.4 Influence des fibres de polypropylène sur le comportement du béton soumis à une température élevée :

Ce paragraphe dresse un bilan sur l'ajout des fibres de polypropylène dans le béton chauffé. Son influence sur la stabilité thermique, sur les propriétés physiques et mécaniques du béton est présentée.

1.4.1 Sur l'instabilité thermique

Les fibres de polypropylène sont utilisées pour lutter contre la fissuration du béton à l'état frais. Elles permettent de renforcer le béton avant durcissement et d'éviter ainsi la fissuration de retrait au très jeune âge. Leur domaine d'application s'est élargi à la prévention du phénomène d'éclatement des BHP à une température élevée. Hammer

[Hamm, 1992], Nishida [Nish, 1995], Lennon [Lenn, 1999], Kalifa et al. [Kali, 2000-2001], Komonen et al. [Komo, 2003], Noumowé [Noum, 2002-2005], Zeiml et al. [Zeim, 2006] et d'autres auteurs ont montré que l'utilisation des fibres de polypropylène dans le béton réduit considérablement l'éclatement. La première utilisation des fibres de polypropylène date des années 1995 (Japan Centre, Frankfur, Allemagne) [Brei, 1996]. Cette technique de prévention est d'ailleurs recommandée par l'Eurocode 2 [Euro, 2004]. La quantité minimale de fibres de polypropylène permettant d'éviter le risque d'éclatement est de l'ordre de 0.20 % du volume de béton.

L'analyse thermique différentielle (ATD) des fibres de polypropylène effectuée par Kalifa et al. [Kali, 2000] montre des pics sur les courbes d'ATD des fibres (figure 1.15). Les auteurs attribuent le premier pic au point de fusion des fibres de polypropylène à une température 171°C ; le second pic correspond à la température de vaporisation à 341°C et le troisième, au point de carbonatation à 457°C.

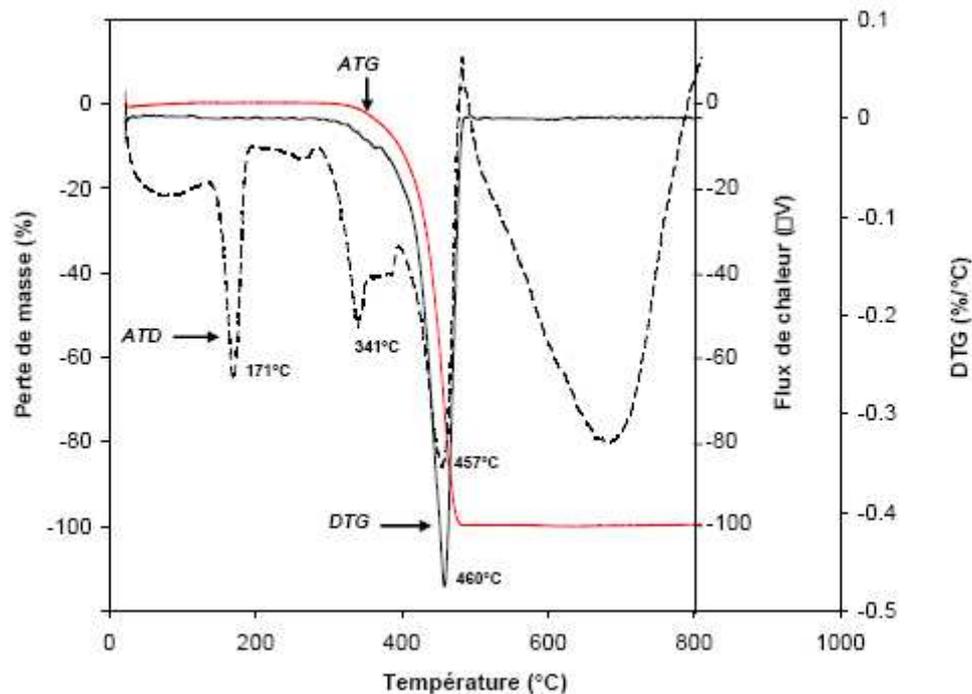


figure 1.15. Courbes ATD et ATG des fibres de polypropylène [Kali, 2000]

En fondant autour de 171°C, les fibres sont absorbées totalement ou partiellement par le réseau poreux de la matrice cimentaire puis le polypropylène se vaporise [Kali, 2000]. Un vide est par conséquent créé à l'endroit initial de la fibre offrant un espace supplémentaire à la vapeur d'eau pour circuler. Par ailleurs, l'utilisation des fibres dans le béton entraîne une densité de fissures plus importante par rapport au béton non fibré. Kalifa et al. [Kali, 2002] émettent deux hypothèses pour expliquer cette fissuration supplémentaire des bétons : la première est liée à la dilatation de 10% des fibres qui génère des contraintes locales et une nucléation de fissures. La seconde est liée à la formation locale de fissure et l'initiation de faïençage.

L'ajout de fibres de polypropylène dans le béton diminue le pic de la pression de vapeur avec la montée en température. L'étude réalisée par Kalifa et al. [Kali, 2001] sur la mesure de pression (figure 1.16) sur des éprouvettes de béton de dimensions 300 x 300 x 120 mm (aux points situés à 10 – 20 – 30 – 40 – 50 mm de la surface chauffée) contenant des fibres de polypropylène (dosées à 0 – 1.1 – 1.75 – 2.40 et 3 kg/m³) montre une augmentation de la chute du pic de pression avec l'accroissement du dosage en fibres.

La figure 1.17 illustre l'évolution de la pression maximale de vapeur et de la température correspondante en fonction du dosage en fibres de polypropylène. La pression maximale atteinte par un BHP sans fibres est de l'ordre de 4 MPa. Pour le même béton contenant 3 kg/m³ de fibres de polypropylène, la pression baisse jusqu'à 1 MPa. Le béton contenant 1.1 kg/m³ de fibres a un pic de pression de 2 MPa et c'est une valeur proche de celle atteinte par un béton ordinaire [Kali, 2001]. La température du béton à la pression maximale varie de 180 - 200°C pour le béton fibré à 3 kg/m³ et de 240 - 260°C pour le béton sans fibres. L'utilisation de 1.75 kg/m³ de fibres (soit 0.2% en proportion volumique) entraîne une réduction de 70% de la pression maximale obtenue au sein des bétons sans fibres. Il n'y a pas d'amélioration significative lorsque le dosage dépasse 1.75 kg/m³.

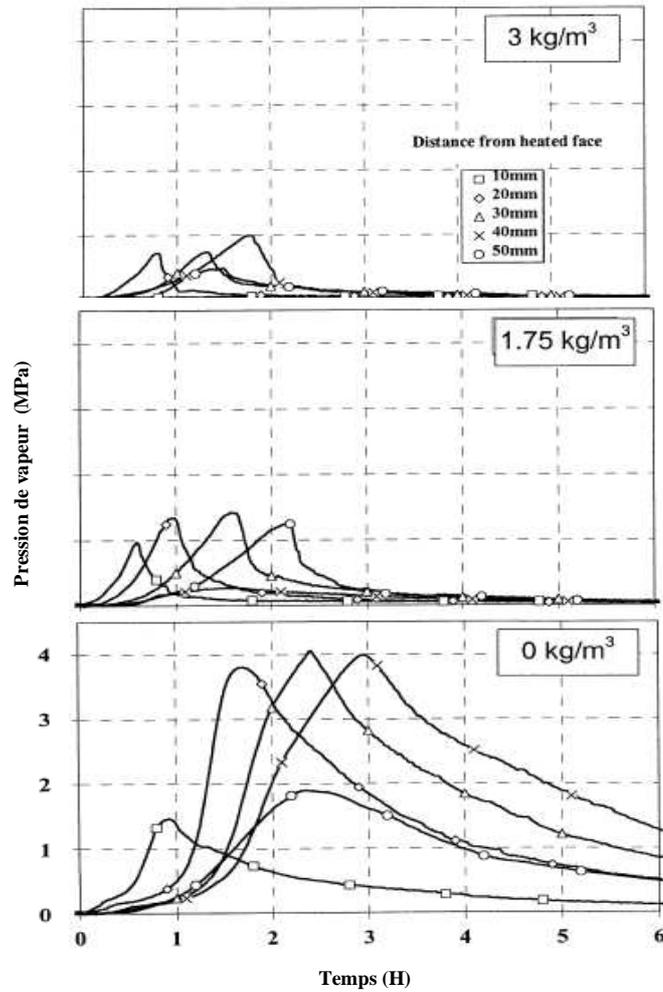


figure 1.16. Evolution des champs de pression de vapeur de BHP avec et sans fibres de polypropylène [Kali, 2001].

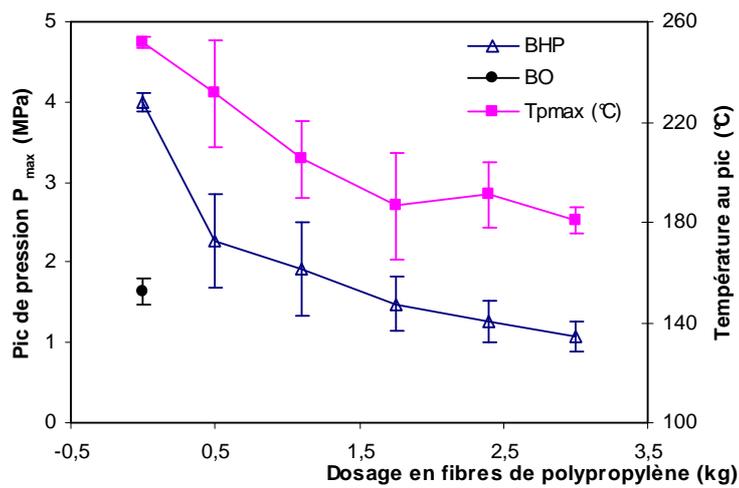


figure 1.17. Evolution de la pression maximale de vapeur et du pic de température en fonction du dosage en fibres de polypropylène [Kali, 2001].

1.4.2 Sur la perte de masse du béton

Lors de la montée en température, le béton perd de la masse, en rapport au départ de l'eau sous forme libre ou liée. La figure 1.18 illustre l'évolution de la perte de masse de différentes compositions de bétons avec et sans fibres de polypropylène au cours du chauffage [Hage, 2004]. L'évolution de la perte de masse est la même pour tous les bétons.

La courbe d'évolution de 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 [Mali, 1982], [Noum, 1995],
- 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 [Noum, 1995], [Hage, 2004],
- 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 [Noum, 1995], [Khou, 1992], [Hage, 2004].

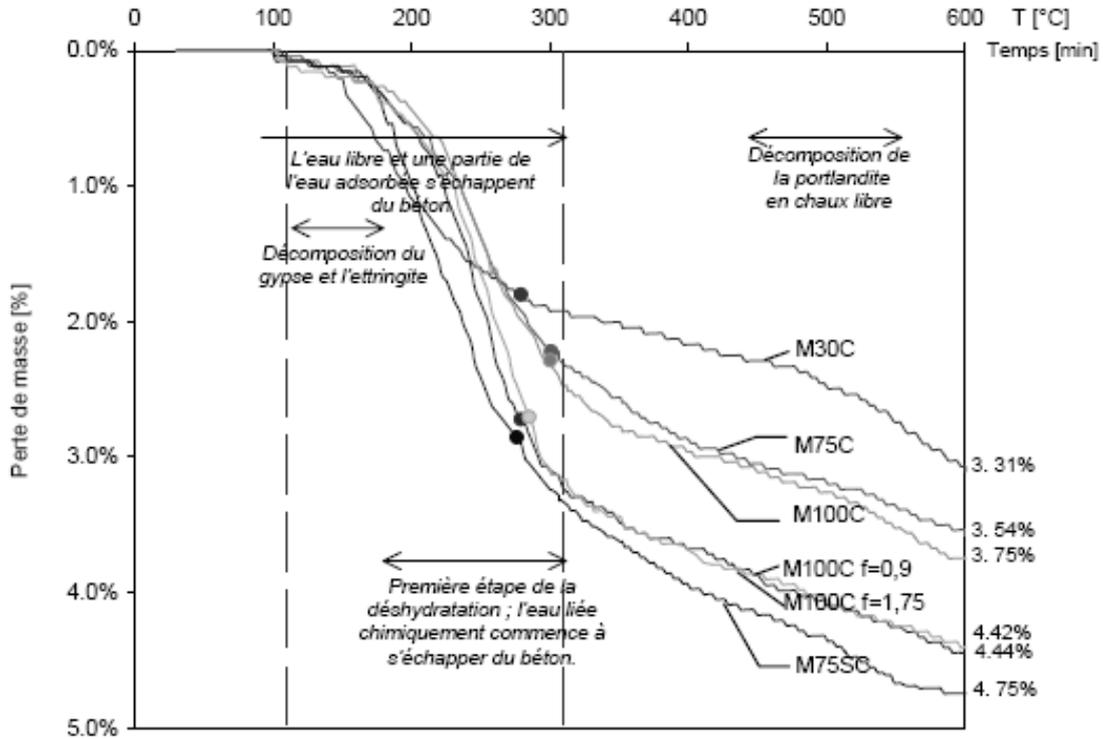


figure 1.18. Perte de masse en régime transitoire des bétons avec et sans fibres de polypropylène durant l'échauffement à la vitesse de $1^{\circ}\text{C}\cdot\text{mn}^{-1}$, [Hage, 2004].

L'addition des fibres de polypropylène dans le béton ne change pas l'évolution de la perte de masse en fonction de la température tant au cours du chauffage [Hage, 2004] qu'après refroidissement [Xiao, 2006] (figure 1.19). Les trois domaines caractérisant l'évolution de la perte de masse sont également observés.

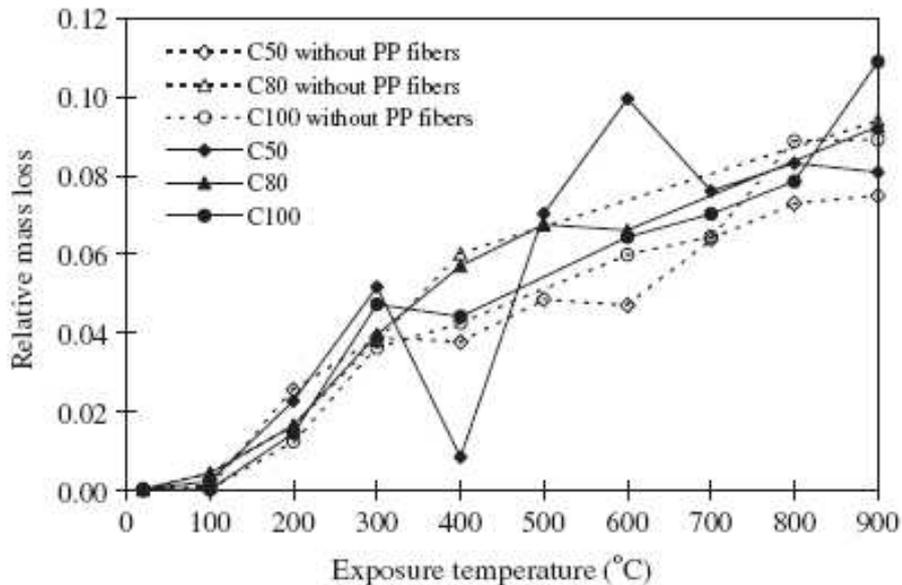


figure 1.19. Perte de masse de bétons sans et avec 1.8 kg/m^3 de fibres de polypropylène à la suite du traitement thermique au feu standard ISO 834 [Xiao, 2006].

En conclusion, on peut retenir que les bétons de fibres de polypropylène perdent plus de masse que les bétons sans fibres. Cette perte de masse additionnelle peut être liée à la fusion du 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.

1.4.3 Sur la porosité du béton

Afin de comprendre le rôle joué par les fibres de polypropylène dans le béton porté à une température élevée, des études sur la porosité ont été menées. La connaissance de la porosité permet d'évaluer la dégradation du béton et de déterminer l'évolution de sa microstructure. Deux techniques sont rapportées dans la littérature : la porosité à l'eau et la porosité au mercure.

1.4.3.1 Porosité à l'eau

La porosité à l'eau permet de quantifier le volume de pores accessibles à l'eau. Kalifa et al. [Kali, 2001] ont étudié l'influence de la variation de la proportion de fibres de polypropylène sur la porosité d'un BHP à différentes températures. La figure 1.20 illustre l'évolution de la porosité à l'eau des bétons en fonction de la température et du dosage en fibres. D'une manière générale, un accroissement rapide du volume des pores s'observe entre les températures 80°C et 105°C et, au-delà de cette température, la variation de la porosité est moins élevée. Cette croissance rapide de porosité est principalement liée au départ de l'eau.

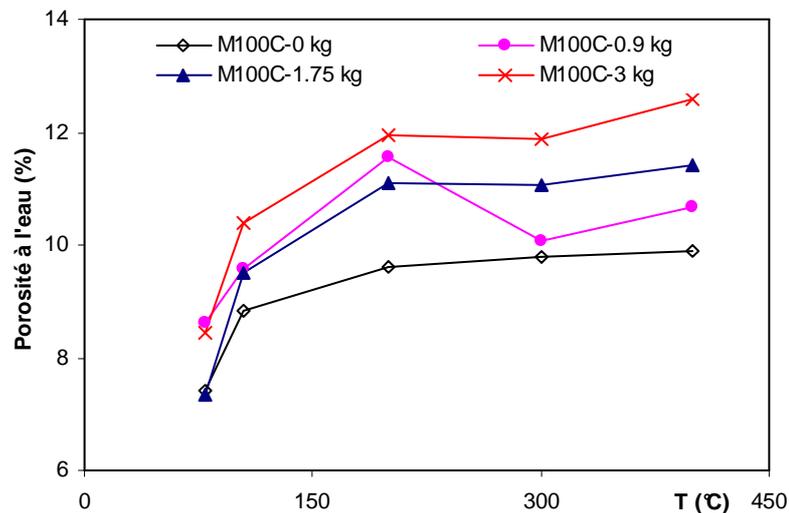


figure 1.20. Evolution de la porosité à l'eau de bétons avec et sans fibres de polypropylène [Kali, 2001].

L'addition des fibres de polypropylène ne change pas l'allure de l'évolution de la porosité. Une porosité supplémentaire s'observe avec la présence des fibres [Noum, 2002], [Hage, 2004], [Mind, 2009]. Celle-ci augmente avec le dosage en fibres.

Mindeguia [Mind, 2009] a mené une étude sur l'évolution de la porosité à l'eau de deux compositions de bétons B40 ($E/C = 0.54$) et B60 ($E/C = 0.3$) avec un même dosage en fibres de polypropylène de 2 kg/m^3 . La figure 1.21 illustre l'évolution de la porosité normée par rapport à la valeur obtenue à la température 120°C des différentes compositions de bétons.

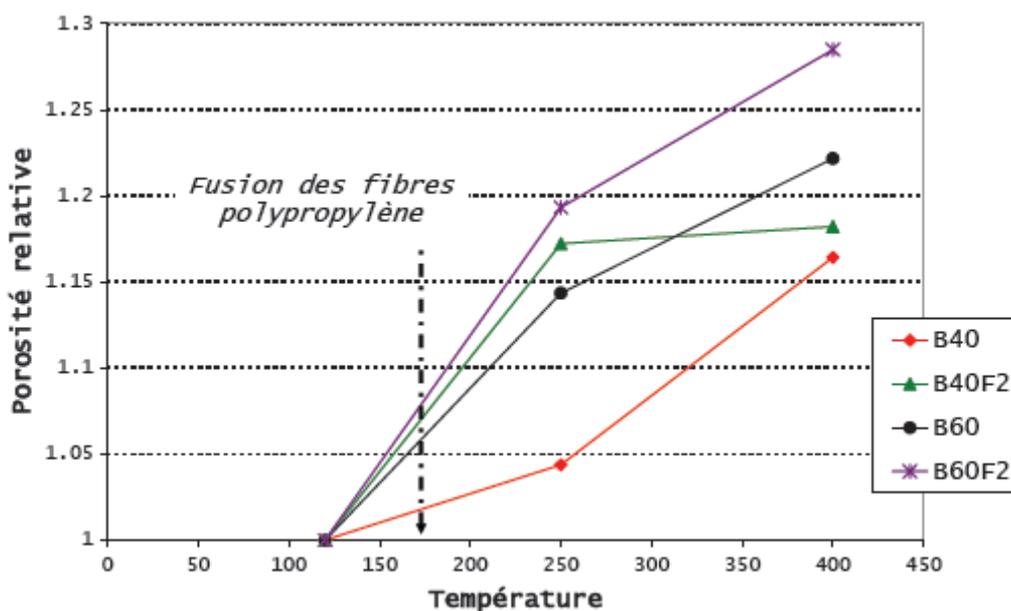


figure 1.21. Evolution de la porosité relative à l'eau en fonction de la température des bétons sans et avec 2 kg/m^3 de fibres de polypropylène [Mind, 2009].

L'auteur remarque un effet très notable des fibres de polypropylène sur le béton B40. Une augmentation de 12.2% de la porosité s'observe entre les températures 120°C et 250°C en présence des fibres. Avec le béton B60, la variation de la porosité est beaucoup plus faible. Elle est de 4.4%. Cette différence de comportement entre les deux bétons est attribuée à la faible connection du réseau généré par la fusion des fibres dans le cas des bétons B60.

Or la littérature montre que le béton sans fibres à faible rapport E/C s'endommage plus que le béton à rapport E/C élevé. Les résultats de porosité de Mindéguia [Mind, 2009] le confirment. L'augmentation de la porosité relative du béton B60 est supérieure à celle du béton B40 (figure 1.21). Comment pourrait-on expliquer la faible différence de porosité des bétons à faible rapport E/C suite à l'ajout des fibres de polypropylène ? Peu de recherches dans la littérature font l'objet de la variation de la composition de béton et de la teneur en fibres en fonction de la température.

1.4.3.2 Porosité au mercure

La porosité au mercure permet de déterminer la distribution de tailles des pores. Elle permet ainsi d'analyser la modification de microstructure du béton exposé à une haute température. Hager [Hage, 2004] montre à travers les résultats d'analyse de la porosité au

mercure de bétons fibrés l'apparition d'une porosité supplémentaire dès 180°C. Cette porosité comprise entre 15-120 nm se situe dans le domaine des micropores.

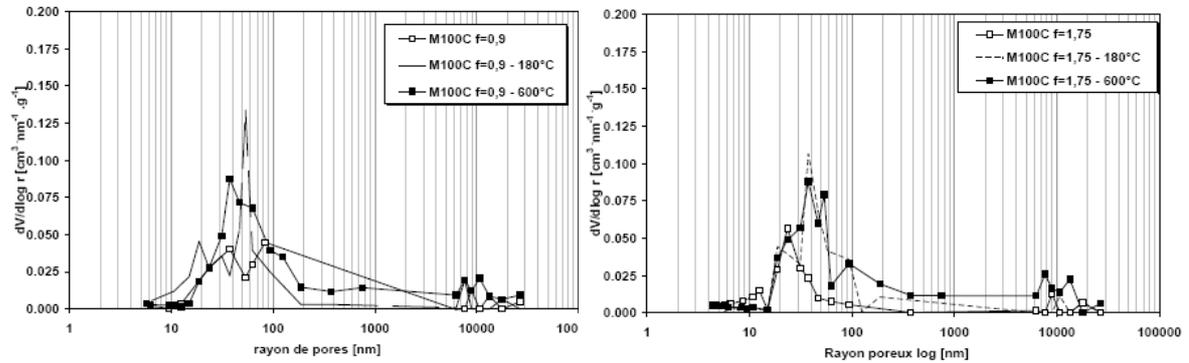


figure 1.22. Distribution de tailles des pores sur des bétons non chauffés et chauffés à 180°C et 600°C contenant 0.9 kg/m³ ou 1.75 kg/m³ de fibres de polypropylène [Hage, 2004].

La figure 1.22 illustre la distribution de tailles des pores des bétons contenant les fibres de polypropylène avant et après chauffage [Hage, 2004]. La courbe présente la même allure avant et après chauffage. Un premier pic caractérisé par une grande population de pores de diamètre moyen 31.3 nm est visible et correspond à la population des pores capillaires. Le deuxième pic, moins significatif, se situe vers 10000 nm correspond aux grosses fissures présentes dans le matériau. Après exposition à 180°C, le polypropylène après fusion reste dans l'espace occupé par les fibres durant la phase de refroidissement. Les fibres utilisées étant de section 50 x 150 µm, il ne serait pas possible de voir une nette augmentation de la porosité correspondant à une telle taille de pores. Après 600°C, le pic modal est visible pour un rayon de taille d'environ 40 nm.

1.4.3.3 Observations microscopiques

L'observation microscopique (figure 1.23) réalisée sur des échantillons issus du cycle de 180°C confirme le phénomène de resolidification du polypropylène après refroidissement. Une décohésion entre la fibre et la matrice cimentaire s'est effectuée. La taille de l'espace créé est d'environ 4 µm, inférieure à la dimension d'une fibre (50 x 150 µm). Après un cycle à 180°C, le polypropylène est resté dans l'espace occupé par la fibre et, durant la phase de refroidissement, celui-ci s'est resolidifié.

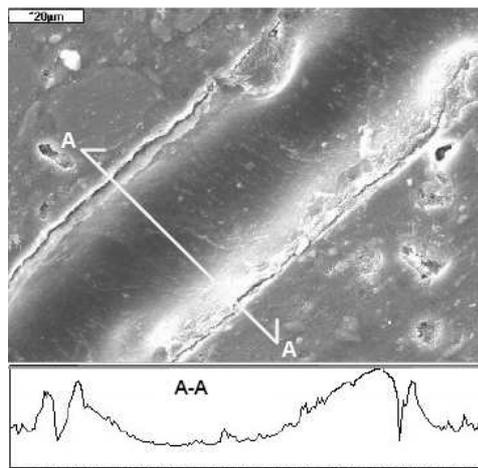


figure 1.23. Béton à hautes performances contenant des fibres de polypropylène après un cycle de 180°C, agrandissement 1000x, profile. [Hage, 2004]

La figure 1.24 illustre les différents états d'une fibre de polypropylène dans la matrice cimentaire après refroidissement suite à des cycles thermiques de 180°C et 600°C. Après une exposition à la température 180°C suivie du refroidissement, la fibre de polypropylène est partiellement fondue. Après le cycle de chauffage-refroidissement de 600°C, un vide est créé à la suite d'une vaporisation complète de la fibre [Hage, 2004].

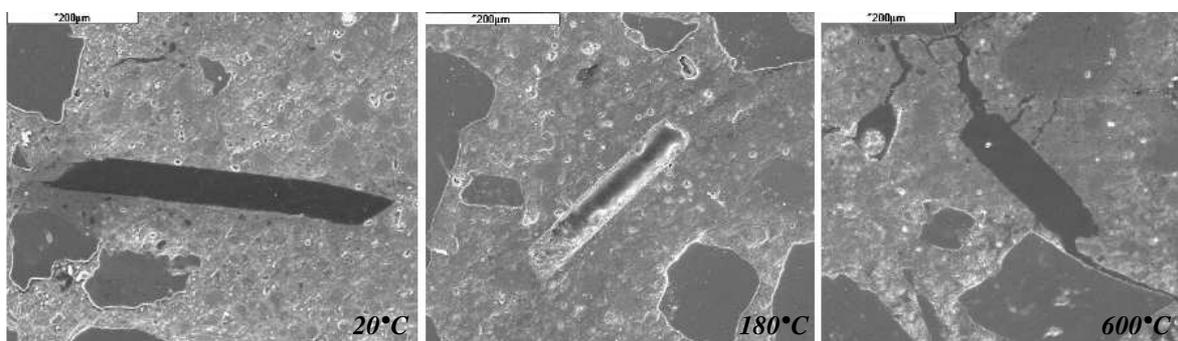


figure 1.24. Transformations de la fibre de polypropylène dans la matrice cimentaire de la température ambiante à 180°C et 600°C [Hage, 2004].

1.4.4 Sur les caractéristiques mécaniques

L'ajout des fibres de polypropylène génère une porosité supplémentaire ce qui pourrait engendrer une baisse des performances mécaniques du béton. Cette partie réalise une synthèse des travaux portant sur la conséquence de l'ajout des fibres de polypropylène sur les performances mécaniques à chaud et résiduelles des bétons.

1.4.4.1 Résistance en compression

A la température ambiante, les résistances en compression varient peu pour des dosages inférieurs à 3 kg/m^3 de fibres [Baya, 2002], [Suha, 2006]. Les résultats obtenus par Hager [Hage, 2004] montrent au contraire une baisse de résistance de 17% et 25% pour des bétons contenant respectivement 1.75 kg/m^3 et 0.9 kg/m^3 de fibres de polypropylène malgré l'augmentation de 10% de la pâte de ciment dans la composition des bétons fibrés.

L'évolution de la résistance en compression en fonction de la température des bétons de fibres de polypropylène varie suivant les auteurs. La figure 1.25 rassemble les résultats obtenus par différents auteurs.

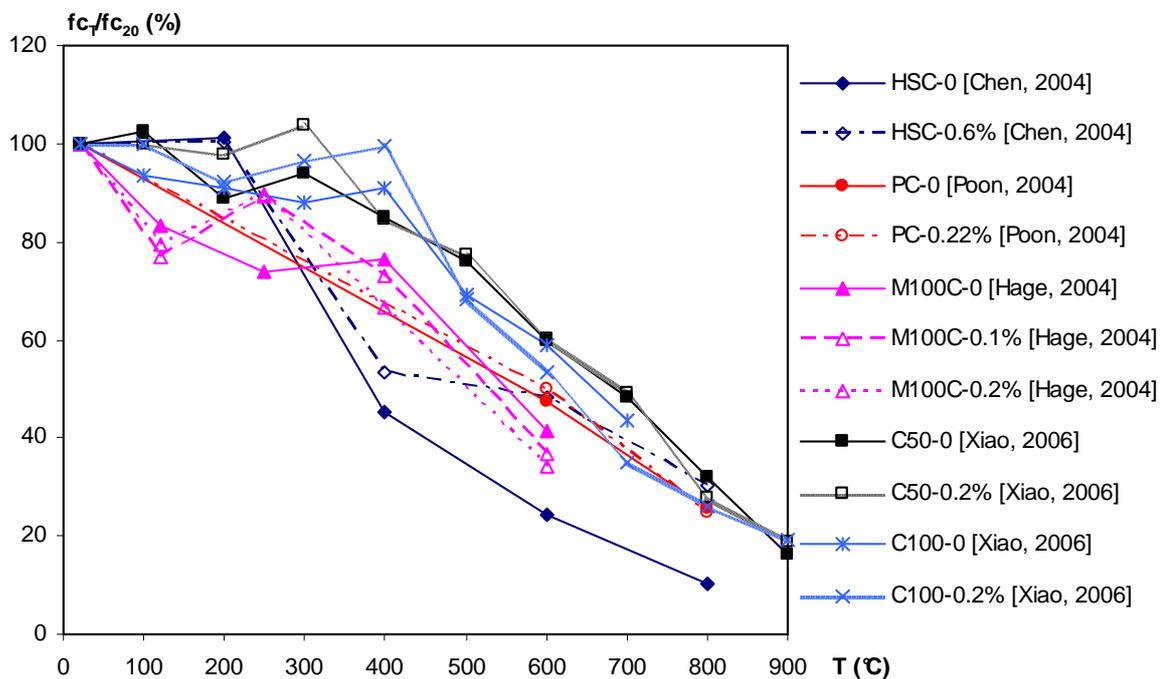


figure 1.25. Evolution de la résistance résiduelle et à chaud relative en compression de bétons pour différentes teneurs en fibres de polypropylène exprimées en pourcentage volumique.

L'étude menée par Hager [Hage, 2004] sur des essais de résistance à chaud montre que l'addition des fibres de polypropylène ne dégrade pas les résistances relatives en compression des BHP à haute température. Il apparaît même, qu'à 250°C , les résultats déterminés sur les bétons fibrés sont supérieurs à ceux obtenus sur les bétons équivalents sans fibres. Cette amélioration de résistance s'explique par l'effet des fibres qui facilitent l'évaporation de l'eau.

Les travaux de Chen et Liu [Chen, 2004] montrent aussi une augmentation de la résistance résiduelle en compression des bétons contenant 0.6% de fibres de polypropylène bien après la température 400°C . A la température de 800°C , le gain de résistance relative des bétons fibrés est d'environ 20% par rapport aux bétons sans fibres.

Les essais sont réalisés sur des BHP (résistance en compression à 28 jours : 82 MPa) conservés dans l'eau jusqu'au vingt huitième jour. Les éprouvettes sont séchées jusqu'à une teneur en eau de 3.5% avant d'être soumises aux différents cycles de chauffage-refroidissement à une vitesse de chauffage de $10^{\circ}\text{C.mn}^{-1}$.

L'amélioration de la résistance résiduelle en compression des bétons de fibres de polypropylène a été remarquée aussi à travers les travaux de Xiao et Falkner [Xiao, 2006] et, Behnood et Ghandehari [Behn, 2009]. Xiao et Falkner [Xiao, 2006] attribuent le léger gain de résistance à la fusion du polypropylène qui génère de nouveaux canaux permettant la réduction des pressions induites lors de la montée en température. Cette baisse de pression limite ainsi la perte de la résistance en compression.

Poon et al. [Poon, 2004] ont travaillé sur l'influence des fibres de polypropylène dans différentes compositions de bétons de ciment portland avec ou sans le métakaolin ou la fumée de silice. Les éprouvettes issues de ces différentes compositions de béton sont conservées dans l'eau au bout de 28 jours puis dans une enceinte à la température 20°C avec une humidité relative de 75% pendant 28 jours. Les éprouvettes sont ensuite chauffées jusqu'à la température 600°C et 800°C à une vitesse de chauffage de $2.5^{\circ}\text{C mn}^{-1}$. Les proportions volumiques des fibres de polypropylène sont de 0.11% et 0.22%. De légers gains de résistance résiduelle s'observent au sein des compositions de bétons contenant le ciment portland avec ou sans métakaolin. Il faut toutefois noter que la résistance résiduelle relative de ces bétons avec ou sans les fibres est approximativement la même à la température 800°C . En présence de la fumée de silice, une baisse de résistance résiduelle relative de 4% et 7% des bétons fibrés (0.22% de fibres de polypropylène) est constatée après les chauffages de 600°C et 800°C . Pour des bétons de fumée de silice contenant 0.2% (1.82 kg/m^3) de fibres de polypropylène, Chan et al. [Chan, 2000] obtiennent une baisse de résistance résiduelle de 6.1% après le chauffage à 800°C . Pour un volume semblable en fibres (1.8 kg/m^3), Noumowé [Noum, 2005] observe à la suite du chauffage à 200°C , une baisse de résistance résiduelle relative de 9% pour des bétons de fibres de polypropylène.

La résistance résiduelle en compression des bétons contenant les fibres de polypropylène semble être liée aux différentes conditions expérimentales [Xiao, 2006]. Le mode de conservation, l'âge des éprouvettes et la vitesse de chauffage sont des paramètres qui peuvent influencer les résultats de la résistance en compression des bétons fibrés.

Le comportement en compression à haute température des bétons fibrés est semblable à celui des bétons non fibrés. Les différentes phases d'évolution de la résistance des bétons sans fibres se retrouvent pour les bétons avec les fibres de polypropylène. L'étude comparative de la résistance à chaud et résiduelle faite par Hager [Hager, 2004] sur les bétons contenant des fibres de polypropylène montre comme pour les bétons sans fibres, de meilleures performances à chaud.

1.4.4.2 Résistance en traction

La résistance résiduelle en traction des bétons fibrés de polypropylène diminue en fonction de la température comme pour les bétons non fibrés. La figure 1.26 illustre l'évolution de la résistance résiduelle relative à la traction obtenue par différents auteurs.

L'influence des fibres de polypropylène sur la résistance en traction par flexion n'est pas significative [Xiao, 2006]. La réduction de la résistance en traction par fendage, obtenue après un cycle de 400°C, est quasiment la même quelles que soient les longueurs ou le volume de fibres [Suha, 2006]. Comparativement aux bétons sans fibres, la perte de résistance est plus importante. Les résultats des essais pour un béton sans fibres conduisent à une perte de 30% tandis que pour le béton fibré, cette perte est de l'ordre de 50% [Suha, 2006].

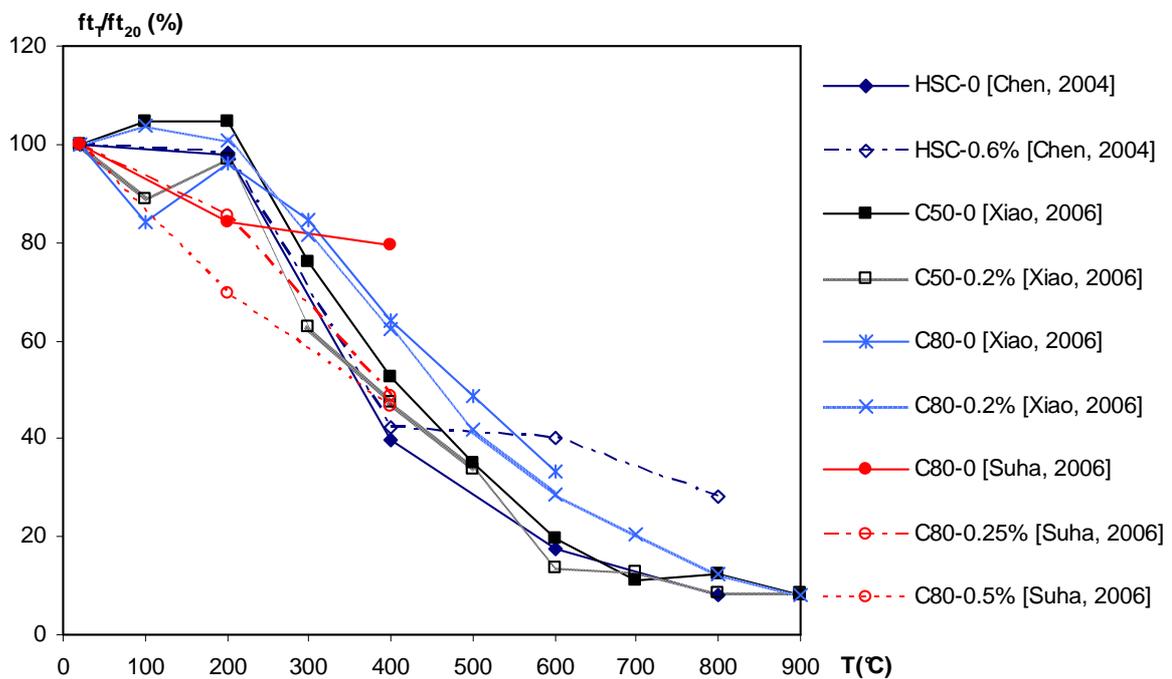


figure 1.26. Evolution de la résistance résiduelle relative en traction de bétons pour différentes teneurs en fibres de polypropylène exprimées en pourcentage volumique.

Les résultats obtenus par Chen et Liu. [Chen, 2004], sur un BHP (résistance en compression des bétons sans fibres à 28 jours : 82 MPa) contenant 0.6% de fibres de polypropylène, ne montrent pas une influence significative des fibres jusqu'à la température 400°C. Au-delà de cette température, la résistance résiduelle relative en traction des bétons de fibres de polypropylène s'améliorent d'environ 20% par rapport aux bétons sans fibres pour des chauffages de 600°C et 800°C.

1.4.4.3 Module d'élasticité

Comme la résistance en compression, l'évolution du module d'élasticité à chaud [Hage, 2004] et résiduel [Suha, 2006] des bétons fibrés est semblable à celle du béton non fibré. Les valeurs du module d'élasticité relatif des bétons contenant des fibres sont globalement inférieures aux valeurs obtenues avec les bétons sans fibres [Hage, 2004], [Suha, 2006]. La figure 1.27 illustre l'évolution du module d'élasticité relatif obtenu par Hager et Suhaendi.

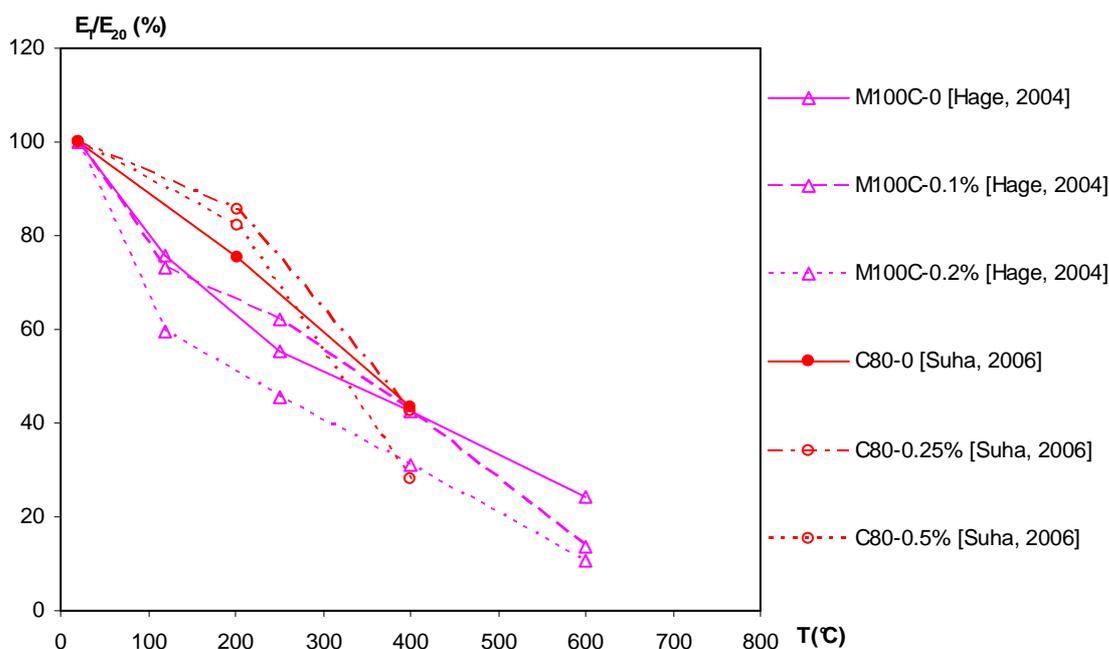


figure 1.27. Evolution du module d'élasticité résiduel et à chaud relatif de bétons pour différentes teneurs en fibres de polypropylène exprimées en pourcentage volumique.

Les travaux de [Suha, 2006] ont porté sur des bétons contenant 0.25% et 0.5% de fibres de polypropylène soumis à une vitesse de chauffage de $10^{\circ}\text{C}.\text{mn}^{-1}$ jusqu'aux températures de 200°C et 400°C . Le module d'élasticité résiduel baisse en fonction du volume de fibres de polypropylène dans le béton. A un cycle de chauffage - refroidissement de 400°C , le module d'élasticité relatif est égal à 42% et 28% du module d'élasticité avant chauffage pour un pourcentage volumique de fibres de 0.25% et 0.5%.

La baisse du module d'élasticité des bétons contenant 0.2% (1.8 kg/m^3) de fibres de polypropylène a été remarquée par Noumowé [Noum, 2005]. L'essai est réalisé sur des bétons (résistance en compression à 28 jours : 61 MPa) qui ont été chauffés jusqu'à 200°C à une faible vitesse de chauffage de $0.5^{\circ}\text{C}.\text{mn}^{-1}$. L'auteur observe une baisse de 4% du module d'élasticité résiduel relatif après le traitement thermique à 200°C .

La détermination du module d'élasticité à chaud par Hager [Hage, 2004] sur des bétons de fibres de polypropylène montre globalement aussi une baisse de module d'élasticité des bétons fibrés. L'essai est réalisé sur des bétons contenant 0.1% et 0.2% de

fibres de polypropylène. La variation de la baisse de module d'élasticité en fonction de l'augmentation du volume de fibres est aussi remarquable pour les essais à chaud. Les résultats de comparaison de module d'élasticité résiduel et de module d'élasticité à chaud sont identiques à ceux des bétons sans fibres.

1.4.5 Synthèse sur l'influence des fibres de polypropylène sur le comportement du béton soumis à une température élevée

L'ajout des fibres de polypropylène dans le béton améliore sa stabilité thermique. Les fibres de polypropylène fondent et s'évaporent, générant un canal qui facilite le transport de flux hydriques. L'étude des bétons contenant des fibres montre, en présence du polypropylène, une baisse de pic de pression de vapeur avec la montée en température. Cette diminution est liée au volume de fibres.

L'analyse des propriétés mécaniques des bétons de fibres de polypropylène en fonction de la température conduit à des avis divergents. Certains auteurs constatent une amélioration des propriétés mécaniques en présence des fibres de polypropylène. Ce gain de résistance est attribué à l'évacuation rapide de l'eau du matériau et la réduction des pressions induites lors de la montée en température. D'autres auteurs constatent que les fibres de polypropylène n'ont pas une influence positive sur les propriétés mécaniques. Les conditions expérimentales peuvent certainement expliquer ces constats différents notamment la teneur hydrique du béton et la vitesse de chauffage.

1.5 Influence des fibres métalliques sur le comportement du béton soumis à une température élevée :

L'utilisation des fibres métalliques dans le béton date du début des années 1960. Les fibres sont utilisées dans le béton pour limiter la propagation des fissures dans une matrice fragile [Romu, 1963] améliorant ainsi la ductilité du béton. Le rapport longueur/diamètre (l/d) dans le choix d'une fibre métallique est primordial selon [Casa, 1996] [Ross, 1998–2002-2007-2008], [Qian, 2000], [Yazi, 2006], [Riva, 2006], et bien d'autres auteurs. Le dosage, la section et les performances intrinsèques des fibres sont des paramètres importants pour le comportement des bétons renforcés de fibres métalliques.

Yazici et al. [Yazi, 2006] ont effectué des essais de compression et de flexion sur des bétons contenant des fibres métalliques en faisant varier le rapport longueur/diamètre des fibres et aussi le volume de fibres dans la composition. Les différents rapports utilisés sont de 45, 65 et 80. Les fibres sont ajoutées à la composition du béton dans des proportions volumiques de 0.5%, 1.0% et 1.5%. La figure 1.28 traduit les résultats issus des tests de compression (a) et de flexion (b) pour les différents rapports l/d et volumes de fibres.

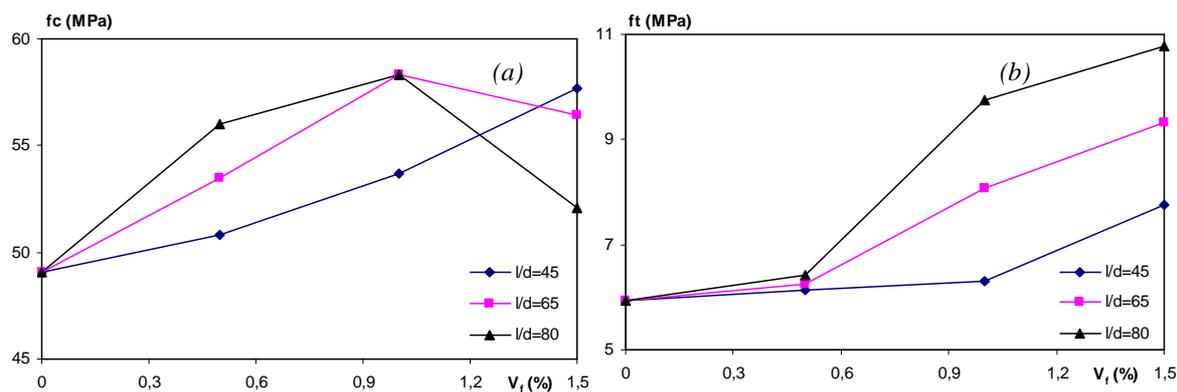


figure 1.28. Résistances en compression (a) et en flexion (b) en fonction du rapport l/d et du volume de fibres métalliques dans le béton [Yazi, 2006].

Les auteurs mettent en évidence l'importance du rapport l/d et du volume des fibres métalliques. L'augmentation du l/d accroît le problème de distribution hétérogène et de floculation des fibres. Les rapports l/d le plus souvent utilisés dans le béton varient entre 50 et 100. Le volume de fibres joue un rôle sur l'ouvrabilité. Les valeurs recommandées sont comprises entre 0.5% et 2.5% pour un béton de rapport E/C de 0.36. La résistance en compression et à la flexion augmentent avec l'ajout des fibres métalliques, selon le rapport l/d et le volume de fibres.

1.5.2 Sur l'instabilité thermique

L'influence des fibres métalliques sur l'instabilité thermique reste peu étudiée. Dans la littérature, les avis sont partagés. Certains auteurs pensent que l'existence de micropores autour des fibres métalliques permet la réduction de la pression de vapeur lors de la montée en température [Riva, 2004]. Les fibres métalliques aideraient donc à prévenir contre les risques d'éclatement de béton en situation d'incendie.

Comme les fibres métalliques retardent l'apparition et l'expansion des fissures du béton et donc la possibilité d'une meilleure dissipation des pressions de vapeur, d'autres auteurs pensent que la présence des fibres métalliques ne peut réduire le risque d'éclatement.

Peng et al. [Peng, 2006] ont obtenu des instabilités thermiques avec des bétons à hautes performances (résistance en compression du béton sans fibres à 28 jours : 94 MPa) contenant 100 kg/m^3 de fibres métalliques pour un chauffage à une température inférieure à 200°C (7 éprouvettes sur 16 ont éclaté). La vitesse de chauffage des éprouvettes était de 10°C.mn^{-1} et les éprouvettes de béton ont été conservées dans de l'eau (jusqu'au vingt huitième jour) puis dans une enceinte à une température de 20°C et une humidité relative de 50% (jusqu'au jour des essais 56 jours).

Chen et Liu [Chen, 2004] ont aussi observé des éclatements d'éprouvettes de béton à hautes performances (résistance en compression des bétons sans fibres à 28 jours : 82 MPa) contenant 48 kg/m^3 de fibres métalliques ou de carbone (0.6% en proportion

volumique) lors d'un chauffage à 800°C. La vitesse de chauffage était de 10°C.mn⁻¹. La présence de fibres métalliques ou de carbone pourrait retarder le phénomène d'éclatement.

La dispersion des résultats relevés dans la littérature peut être liée aux différents dosages en fibres. Aucune étude de la littérature n'a étudié l'impact du volume de fibres métalliques sur l'éclatement des bétons.

1.5.3 Sur les caractéristiques mécaniques

Ce paragraphe dresse un bilan des études antérieures de l'influence des fibres métalliques sur les caractéristiques mécaniques à chaud et résiduelles des bétons.

1.5.3.1 Résistance en compression

La figure 1.29 montre l'évolution de la résistance résiduelle ([Chen, 2004], [Poon, 2004], [Suha, 2006]) et la résistance à chaud [Cheng, 2004] relative de bétons à hautes performances avec et sans fibres métalliques.

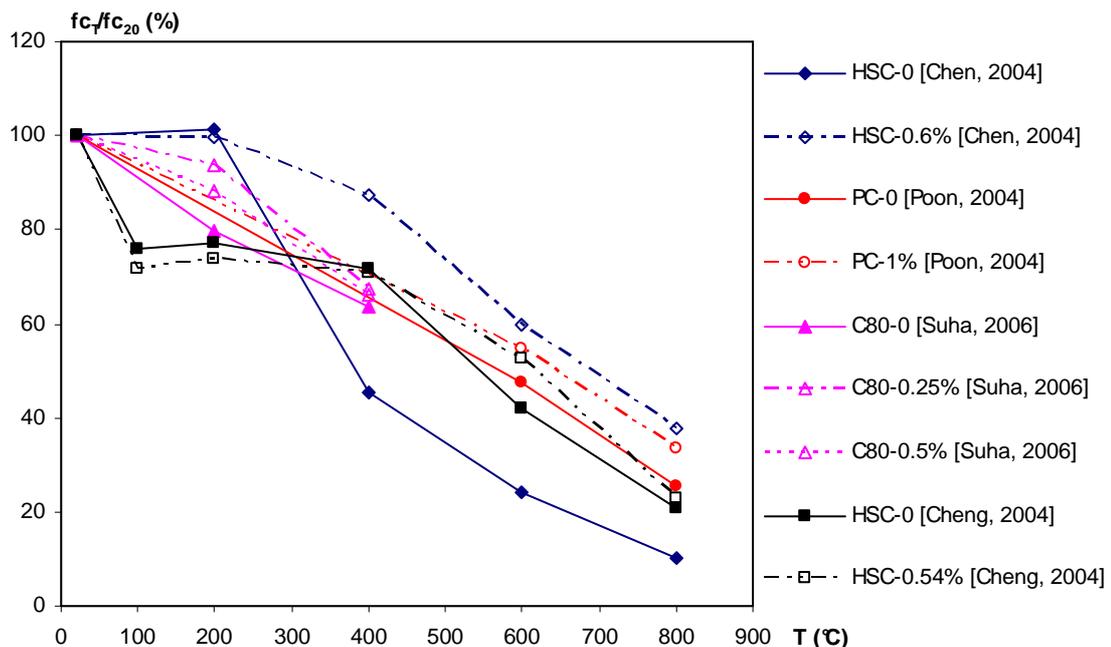


figure 1.29. Evolution de la résistance résiduelle et à chaud relative en compression de bétons pour différentes teneurs en fibres métalliques exprimées en pourcentage volumique.

Les résultats montrent une diminution avec la température de la résistance des bétons de fibres métalliques tout comme les bétons sans fibres. De façon générale, les auteurs ont montré que l'addition de fibres métalliques améliore les résistances résiduelles ou à chaud en compression.

Les résultats présentés par Suhaendi et al. [Suha, 2006] concernent des bétons à hautes performances renforcés de fibres métalliques (0.25% et 0.5%) chauffés à une vitesse de $10^{\circ}\text{C.mn}^{-1}$ jusqu'à la température de 200°C et 400°C . Les pertes relatives de résistance résiduelle sont plus faibles de quelques pourcents par rapport à celles des bétons non renforcés. Le doublement du volume de fibres n'entraîne pas d'amélioration du comportement résiduel.

L'étude réalisée par Poon et al. [Poon, 2004] porte aussi sur des BHP mais chauffés à des températures plus élevées, 600°C et 800°C . La vitesse de chauffage est de $2.5^{\circ}\text{C.mn}^{-1}$ et le pourcentage de fibres métalliques est de 1%. L'amélioration induite sur la résistance résiduelle relative est en moyenne de 7%.

Lau et al. [Lau, 2006] ont aussi étudié l'influence de l'ajout de 1% de fibres métalliques. Trois bétons de résistances initiales en compression de 39 MPa (M1), 53 MPa (M2) et 99 MPa (M3) ont été chauffés aux paliers de 105°C , 200°C , 300°C , 400°C , 600°C , 800°C , 1000°C , 1100°C et 1200°C à une vitesse de $5^{\circ}\text{C.mn}^{-1}$ jusqu'à 600°C puis de $4^{\circ}\text{C.mn}^{-1}$ au-delà. Les résultats obtenus sont très hétérogènes. On ne distingue pas d'impact significatif des fibres métalliques avant 400°C et au-delà de 800°C . Le gain induit par les fibres sur les résistances résiduelles à 600°C varie de 9 à 14%.

L'étude réalisée par Cheng et al. [Cheng, 2004] porte aussi sur des BHP chauffés à une vitesse de $2^{\circ}\text{C.mn}^{-1}$ jusqu'aux températures 100°C , 200°C , 400°C , 600°C et 800°C . L'originalité par rapport aux autres essais est que la résistance obtenue est une résistance à chaud. La quantité de fibres métalliques utilisée est 42 kg/m^3 (soit 0.54%). La présence des fibres métalliques dans le béton a une légère influence sur la résistance en compression à chaud. Le gain induit par les fibres est faible et n'est notable qu'à partir de la température 400°C .

1.5.3.2 Résistance en traction

La figure 1.30 regroupe les résultats obtenus par différents auteurs sur l'évolution comparée de la résistance résiduelle relative en traction des bétons avec ou sans les fibres métalliques. La résistance résiduelle en traction des bétons fibrés diminue aussi avec la montée en température. Cependant, le meilleur comportement résiduel en traction des bétons contenant des fibres métalliques est bien plus remarquable que pour le comportement résiduel en compression.

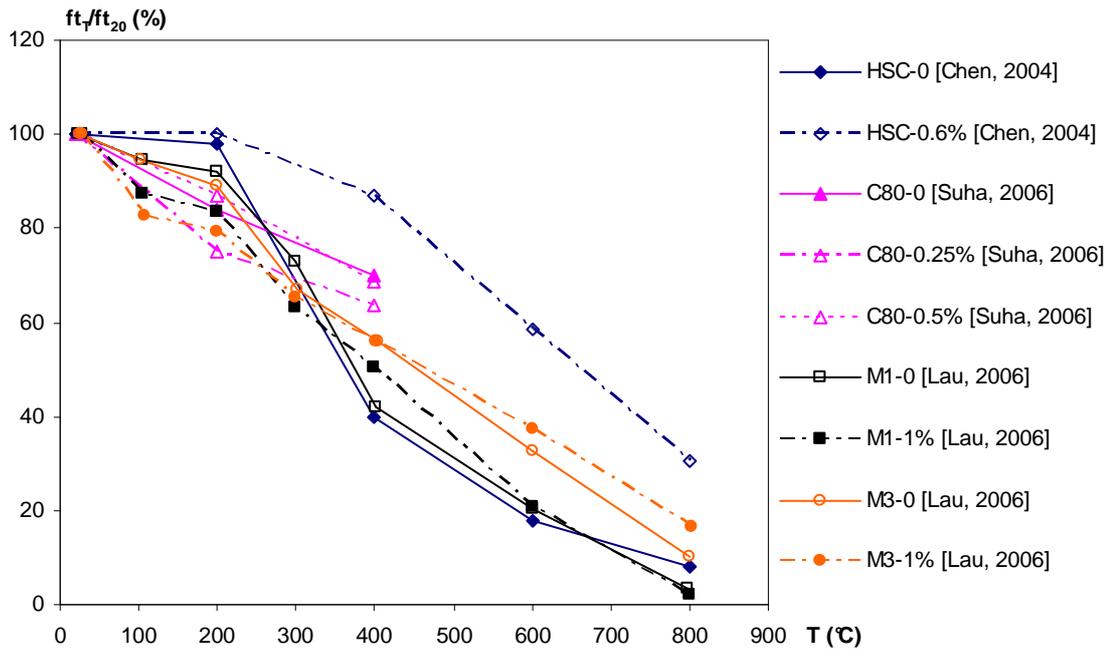


figure 1.30. Evolution de la résistance résiduelle relative en traction de bétons pour différentes teneurs en fibres métalliques exprimées en pourcentage volumique.

Les essais de traction réalisés par [Chen, 2004] et [Suha, 2006] sont des essais de traction par fendage tandis que ceux de [Lau, 2006] sont des essais de traction par flexion.

D'après les résultats décrits par Suhaendi et al. [Suha, 2006], les fractions volumiques de fibres de 0.25% et 0.5% ne sont pas suffisantes pour améliorer de façon significative le comportement résiduel relatif en traction des BHP. Les essais ont été menés jusqu'à la température 400°C.

Pour des bétons de résistance similaire, Chen et Liu [Chen, 2004] trouvent qu'un ajout d'une fraction volumique de 1% de fibres métalliques induit une amélioration de 40% de la résistance résiduelle relative à la température de 400°C. Cette amélioration est encore de 30% à 800°C. Les bétons testés sont initialement saturés et chauffés à la vitesse de 10°C.mn⁻¹.

L'étude de Lau et Anson [Lau, 2006] montre que l'influence positive de l'ajout de 1% de fibres métalliques ne se fait sentir qu'à partir de la température 400°C. Cette amélioration disparaît à 800°C pour les bétons ordinaires (M1) tandis qu'avec les BHP (M3), le gain de résistance résiduelle relative est d'environ 10%.

1.5.3.3 Module d'élasticité

La figure 1.31 compare l'évolution du module d'élasticité résiduel [Suha, 2006] et à chaud [Cheng, 2004] relatif de bétons avec ou sans les fibres métalliques. L'ajout des fibres métalliques ne modifie pas l'allure des courbes.

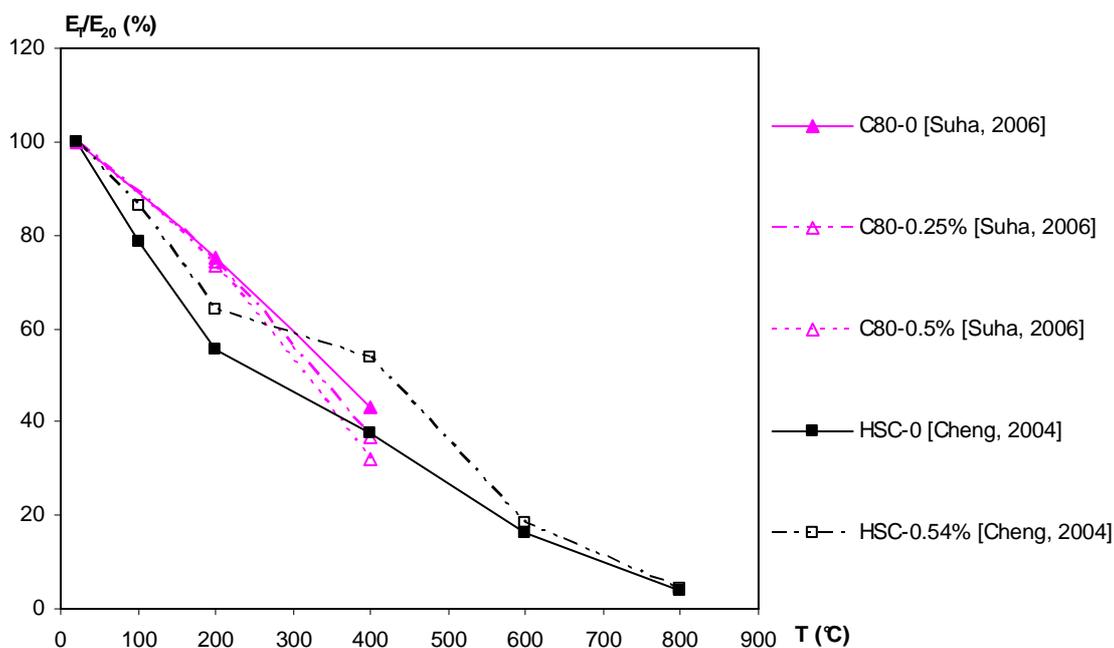


figure 1.31. Evolution du module d'élasticité résiduel [Suha, 2006] et à chaud [Cheng, 2004] relatif de bétons pour différentes teneurs en fibres métalliques exprimées en pourcentage volumique.

D'après les travaux de Suhaendi et al. [Suha, 2006], les fibres métalliques avec un dosage de 0.25% et 0.5% n'ont pas d'influence bénéfique sur le module d'élasticité résiduel.

Par contre, les travaux de Cheng et al [Cheng, 2004] sur la détermination du module d'élasticité montrent une influence positive des bétons contenant 0.54% de fibres métalliques jusqu'à la température 400°C. Au-delà de cette température, l'apport des fibres métalliques n'est plus significatif. Entre les températures 400°C et 600°C, le module d'élasticité relatif des bétons contenant les fibres métalliques diminue plus rapidement que celui des bétons sans fibres.

Lau et Anson [Lau, 2006] ont déterminé le coefficient de poisson de BHP avec et sans fibres en fonction de la température. Les valeurs initiales du coefficient de poisson des bétons M3 sans et avec 1% de fibres métalliques sont respectivement de 0.22 et 0.21. Le coefficient de poisson baisse aussi avec l'augmentation de la température. Les résultats à 1100°C sont respectivement de 0.01 et 0.02 pour le béton sans et avec fibres.

1.5.4 Synthèse sur l'influence des fibres métalliques sur le comportement du béton soumis à une température élevée

L'étude de l'influence des fibres métalliques sur le comportement du béton porté à une haute température montre pour certains auteurs une instabilité thermique à une température peu élevée (inférieure à 200°C) ou une instabilité retardée (à partir de 800°C).

Plusieurs paramètres peuvent être à l'origine des différences observées : le mode de cure des éprouvettes (éprouvettes sèches ou saturées), la vitesse de chauffage, la teneur en fibres qui semble être un facteur prépondérant. Plus la teneur en fibres métalliques est élevée, plus il y aura un risque de répartition hétérogène des fibres voire la floculation des fibres. La forte quantité de fibres peut aussi générer un gradient thermique supplémentaire qui engendrerait le phénomène d'instabilité thermique.

Les résultats des travaux de [Suha, 2006] montrent que l'ajout de 0.25% et 0.5% de fibres métalliques ne permet pas d'améliorer de façon significative les propriétés mécaniques résiduelles du béton chauffé jusqu'à 400°C. Pour des proportions volumiques de 0.54% [Cheng, 2004], 0.6% [Chen, 2004] et 1% [Poon, 2004], [Lau, 2006], l'influence positive des fibres métalliques est observée. Cette amélioration peut être retardée et disparaître à partir d'un seuil de température. Les résultats notamment sur l'amplitude du gain apporté par les fibres métalliques varient suivant les auteurs. Une convergence des résultats de l'influence des fibres métalliques sur le comportement résiduel du béton n'apparaît pas encore à travers la littérature.

1.6 Influence du cocktail de fibres de polypropylène et métalliques sur le comportement du béton soumis à une température élevée :

L'utilisation des fibres de polypropylène dans le béton permet de limiter le risque d'instabilité thermique des bétons portés à une haute température. Les fibres fondent autour de 160-170°C, créant un canal entre les pores qui facilitent le transport de flux d'humidité. La détermination des propriétés mécaniques résiduelles ou à chaud des bétons fibrés en polypropylène montrent une baisse des propriétés ou dans certains cas une amélioration. L'incorporation des fibres métalliques dans le béton contribue à une amélioration des propriétés mécaniques résiduelles. Du point de vue de la stabilité thermique, une divergence des résultats est remarquée. Certaines instabilités sont recensées à des températures inférieures à 200°C ou à des températures supérieures à 800°C.

Il peut être intéressant de combiner les effets de ces deux types de fibres pour améliorer le comportement du béton à haute température. L'influence couplée de ces deux natures de fibres sur la stabilité thermique et sur les propriétés mécaniques a fait l'objet de quelques études. Poon et al. [Poon, 2004], Peng et al. [Peng, 2006], Suhaendi et al. [Suha, 2006] ont étudié le comportement de bétons contenant des fibres métalliques et des fibres de polypropylène à différentes températures. Chen et al. [Chen, 2004], quant à eux, ont mené des travaux non seulement sur les fibres métalliques et de polypropylène mais aussi sur les fibres de carbone. Une plus grande perte de propriétés mécaniques résiduelles a été constatée avec les bétons contenant le mélange fibres métalliques - carbone qu'avec les mélanges fibres métalliques - polypropylène et fibres de carbone - polypropylène. Le

comportement mécanique des bétons de cocktail de fibres est beaucoup plus lié au volume de fibres métalliques.

Les résultats des études sur le cocktail fibres métalliques - polypropylène prouvent que la stabilité thermique de tels bétons peut susciter encore quelques questions. Des éprouvettes de béton contenant, 0.3 kg/m^3 de fibres de polypropylène et 70 kg/m^3 de fibres métalliques ont éclaté (3 éprouvettes sur 16), pour une température inférieure à 200°C à une vitesse de chauffage de 10°C.mn^{-1} . Mais, pour une composition de 0.6 kg/m^3 de polypropylène et 40 kg/m^3 de fibres métalliques, aucun éclatement n'a été enregistré pour des chauffages allant jusqu'à 800°C [Peng, 2006].

1.6.1 Sur les caractéristiques mécaniques

1.6.1.1 Résistance en compression

La figure 1.32 regroupe les résistances résiduelles relatives en compression de [Chen, 2004], [Poon, 2004], et [Suha, 2006] de bétons contenant un cocktail de fibres métalliques et de polypropylène. Les proportions de fibres sont en pourcentage volumique et se présentent comme suit: % fibres métalliques x % fibres de polypropylène.

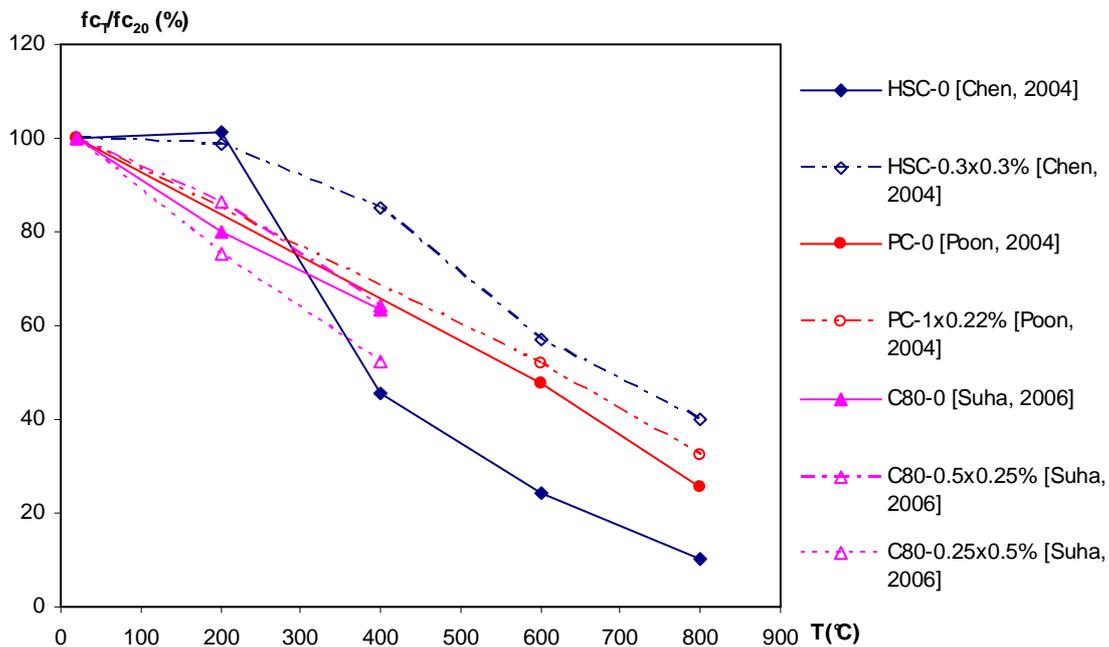


figure 1.32. Evolution de la résistance résiduelle relative en compression de bétons de cocktail fibres métalliques - polypropylène, teneur en fibres exprimée en pourcentage volumique.

De légers gains de résistance sont notés par rapport aux bétons sans fibres. En comparant les résistances des différents groupes de bétons, Poon et al. [Poon, 2004] relèvent que la baisse de résistance des bétons de cocktail de fibres est supérieure à celle des bétons de fibres métalliques mais leur résistance reste toujours supérieure à celle des

bétons sans fibres. Le gain de résistance relative à la compression de [Chen, 2004] est bien notable au-delà de la température 200°C. A 600°C, la résistance résiduelle relative des bétons cocktail de fibres est supérieure de 40% à la résistance des bétons sans fibres.

La variation de la teneur en fibres affecte la résistance résiduelle en compression. Suhaendi et al. [Suha, 2006] comparent deux bétons de cocktail de fibres contenant 0.5x0.25% et 0.25x0.5% de fibres. La proportion volumique de cocktail de fibres est la même pour les deux compositions de béton (0.75%). Bien que les deux bétons aient un même volume de fibres, le béton contenant moins de fibres métalliques perd plus de résistance. Il faut remarquer dans les travaux de [Suha, 2006] qu'une baisse de résistance est notée avec l'ajout du cocktail de fibres 0.25x0.5% par rapport aux bétons sans fibres. Ce résultat est contraire à celui obtenu par [Poon, 2004], [Peng, 2006], et [Chen, 2004].

1.6.1.2 Résistance en traction

Les évolutions de la résistance résiduelle relative en traction par fendage issue des travaux de [Chen, 2004] et [Suha, 2006] sont regroupées sur la figure 1.33. La résistance en traction des bétons de cocktail de fibres baisse avec la température. Comme en compression, le cocktail de fibres induit une amélioration de la résistance résiduelle en traction [Chen, 2004].

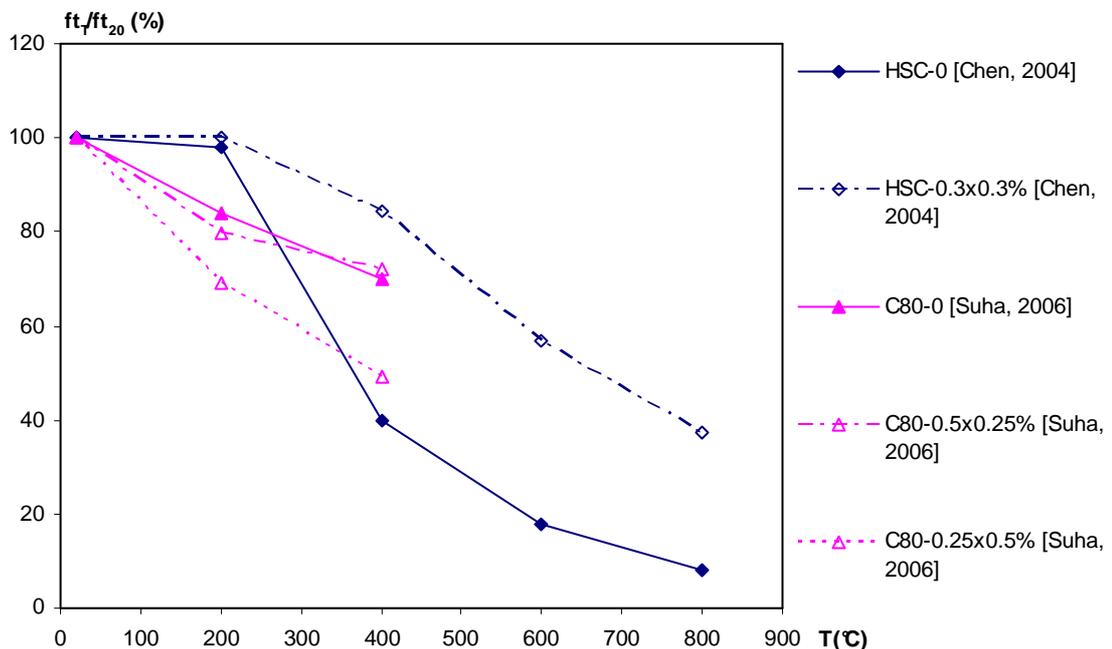


figure 1.33. Evolution de la résistance relative en traction de bétons de cocktail fibres métalliques - polypropylène, teneur en fibres exprimée en pourcentage volumique.

Les résultats de [Suha, 2006] permettent de mettre en évidence l'impact des fibres métalliques sur le comportement des bétons de cocktail de fibres. Pour deux compositions de bétons contenant un même volume de cocktail de fibres, les auteurs observent, à la

suite du chauffage à 400°C, une résistance résiduelle relative en traction de 72% pour la composition contenant 0.5% de fibres métalliques et 49% pour la composition avec 0.25% de fibres métalliques. Peng et al. [Peng, 2006] concluent que les bétons de fibres métalliques maintiennent leur résistance élevée tandis que les bétons de fibres de polypropylène et de cocktail des deux fibres subissent une légère baisse de résistance liée à la fusion du polypropylène et du canal ainsi formé.

Comme pour la résistance résiduelle en compression, une baisse de résistance résiduelle relative en traction du béton contenant 0.25% de fibres métalliques est observée [Suha, 2006]. Après le chauffage à 400°C, la résistance résiduelle relative des bétons sans fibres est de 70% tandis que celle du béton de cocktail de fibres (0.5x0.25%) est de 49%. Par ailleurs, la présence de 0.5% de fibres métalliques dans le cocktail de fibres ne montre pas non plus un impact majeur par rapport aux bétons non fibrés.

1.6.1.3 Module d'élasticité

Peu d'études ont porté sur le module d'élasticité des bétons de cocktail de fibres de polypropylène et métalliques. Le module d'élasticité résiduel relatif baisse de façon progressive avec la température.

Poon et al [Poon, 2004] observent une amélioration du module d'élasticité résiduel relatif aux températures 600°C et 800°C d'environ 5% par rapport aux bétons sans fibres. Les proportions volumiques de fibres introduites dans le béton sont de 1% pour les fibres métalliques et de 0.22% pour les fibres de polypropylène.

Pour des proportions de fibres métalliques plus faibles (0.25 et 0.5%), les résultats obtenus par [Suha, 2006] ne montrent pas d'amélioration de la rigidité du béton suite à l'ajout du cocktail de fibres (figure 1.34).

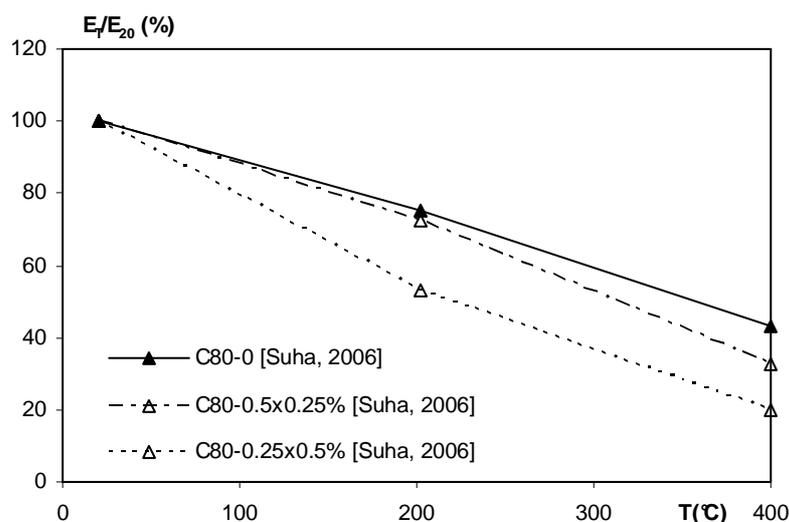


figure 1.34. Evolution du module d'élasticité relatif de bétons de cocktail fibres métalliques - polypropylène, teneur en fibres exprimée en pourcentage volumique.

1.6.2 Influence des fibres sur les courbes de contrainte - déformation béton

L'influence de l'addition des fibres sur le comportement post rupture du béton chauffé et non chauffé a fait l'objet des travaux de [Poon, 2004] et [Cheng, 2004].

Les bétons testés par Poon et al. [Poon, 2004] sont des bétons sans fibres (PC-0), des bétons contenant 1% de fibres métalliques (OPC-1), des bétons contenant 0.22% de fibres de polypropylène (OPC-2) et des bétons de cocktail de fibres (OPC-3, avec 1% de fibres métalliques et 0.22% de fibres de polypropylène). Les essais sont réalisés après refroidissement sur des éprouvettes cylindriques (100 x 200 mm) soumises à un chargement de 0.1 mm.mn^{-1} jusqu'à un déplacement maximal de 4 mm. La figure 1.35 illustre l'évolution des contraintes de compression en fonction de la déformation pour des bétons non chauffés et des bétons chauffés à 600°C et 800°C.

Les courbes contrainte - déformation des bétons avec et sans fibres de polypropylène présentent la même allure. On observe un pic de contrainte à la même déformation. Avec les bétons de fibres métalliques ou de cocktail de fibres, on observe un changement important après rupture tant à la température ambiante qu'après chauffage. Le pic de contrainte varie peu pour toutes les compositions de béton à la température ambiante et la variation de la déformation n'est pas significative. Après chauffage, les déformations des bétons chauffés (600°C et 800°C) sont environ 2.3 à 2.9 fois celles des bétons non chauffés. Les bétons de fibres métalliques ou de cocktail de fibres ont un pic de contrainte plus élevé. L'ajout des fibres de polypropylène n'affecte pas la déformation au pic de contrainte de façon significative.

Les travaux de Cheng et al. [Cheng, 2004] portent uniquement sur des bétons à chaud avec et sans fibres métalliques (0.54%). La déformation correspondant au pic de contrainte ne change pas significativement jusqu'à la température 400°C. Au-delà de cette température, la déformation correspondant au pic de contrainte croît considérablement comme remarquée dans les travaux de Poon et al. [Poon, 2004] pour les températures 600°C et 800°C. Les résultats montrent qu'à une température élevée, les bétons de fibres métalliques présentent une meilleure ductilité par rapport au béton sans fibres.

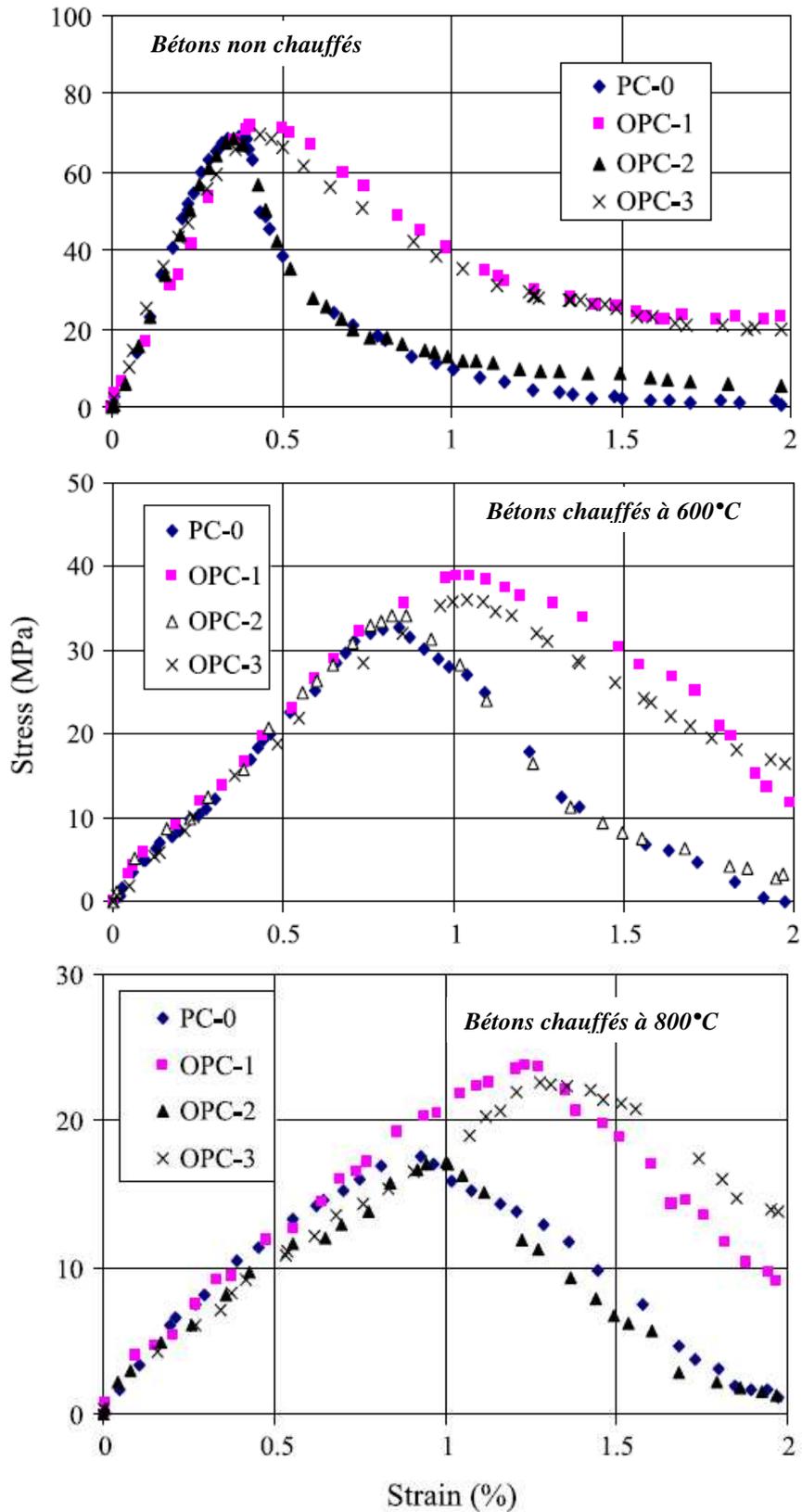


figure 1.35. Courbes contrainte - déformation de bétons sans fibres, avec les fibres de polypropylène, les fibres métalliques et le cocktail de fibres à différentes températures [Poon, 2004].

1.6.3 Synthèse sur l'influence du cocktail de fibres sur le comportement du béton soumis à une température élevée

Très peu d'études sur l'influence du cocktail de fibres dans le comportement des bétons soumis à haute température ont été menées jusqu'à présent. Les résultats des travaux issus de la littérature montrent d'une manière générale une amélioration de la stabilité thermique et des résistances mécaniques du béton de cocktail de fibres métalliques et de polypropylène. Le comportement mécanique des bétons de cocktail de fibres apparaît beaucoup plus lié au volume de fibres métalliques. L'utilisation d'une proportion de 0.25% et 0.5% de fibres métalliques dans le mélange conduit selon les travaux de [Suha, 2006] à une baisse de propriétés mécaniques. Tandis que, selon les travaux de [Chen, 2004], pour un volume de fibres métalliques de 0.3%, un gain de résistance est observé. Ces résultats sont contradictoires ; d'autres données expérimentales sont nécessaires pour préciser le rôle effectif du cocktail de fibres.

1.7 Conclusion de l'analyse bibliographique

Lors de l'élevation de la température, les constituants du béton subissent diverses transformations modifiant sa microstructure et ses propriétés mécaniques. L'eau, présente sous diverses formes (eau liée, eau libre, eau adsorbée), s'échappe du béton. L'ettringite disparaît avant la température de 100°C. La portlandite se décompose en formant de la chaux. L'analyse des déformations thermiques montre une expansion thermique de la matrice cimentaire jusqu'à 150°C puis un retrait thermique au-delà de cette température. Les granulats se dilatent avec la température et l'on note une déformation thermique différée entre la pâte de ciment et les granulats. Ces différentes modifications engendrent sur le plan macroscopique une baisse de performances mécaniques. Les résultats de différents auteurs montrent une diminution de la résistance en compression, de la résistance en traction et du module d'élasticité. La détermination de la porosité et de la perméabilité, les analyses microscopiques permettent de mettre en évidence une forte augmentation du volume poreux et l'endommagement du matériau béton soumis à un traitement thermique. Les bétons à faible rapport E/C sont plus susceptibles d'instabilité thermique que les bétons à rapport E/C élevé. Cette instabilité se traduit par un comportement explosif dans certaines situations ou par un écaillage du béton. Trois hypothèses sont avancées pour expliquer l'instabilité thermique du béton. La première lie l'instabilité thermique à la formation de pression (eau liquide et eau vapeur) et la seconde à la dilatation thermique empêchée. La troisième hypothèse combine la formation de pression et la dilatation thermique empêchée. La vitesse de chauffage, les propriétés physico-mécaniques du matériau béton, la présence de l'eau et la nature des granulats sont des paramètres influençant l'instabilité thermique du béton.

Différentes méthodes se développent pour améliorer la stabilité thermique du béton. L'utilisation des fibres de polypropylène permet de réduire le risque d'instabilité thermique. Les fibres, à la suite de leur fusion à la température 160-170°C puis leur vaporisation à 340°C, facilitent le transport de flux d'humidité. Des essais de porosité et de perméabilité montrent en effet une forte augmentation de ces propriétés après chauffage. Cette porosité et perméabilité supplémentaires des bétons de fibres de polypropylène expliquent la perte de masse élevée de ces bétons par rapport aux bétons sans fibres. L'analyse des propriétés mécaniques conduit à des avis divergents. Certains auteurs constatent une amélioration des propriétés qui semble être liée à l'évacuation rapide de l'eau du matériau et la réduction des pressions induites lors de la montée en température. Par contre, d'autres auteurs notent une influence négative de l'ajout des fibres de polypropylène sur les propriétés mécaniques du béton chauffé. Il faudrait toutefois noter que les conditions expérimentales telles que la vitesse de chauffage, l'état hydrique du béton varient suivant les auteurs.

Les fibres métalliques, sont traditionnellement utilisées dans le béton pour limiter la propagation de fissures et rendre le béton plus ductile. L'étude de l'influence des fibres métalliques sur le comportement du béton soumis à une température élevée a montré pour

certaines auteurs une instabilité thermique. L'état hydrique des éprouvettes, la vitesse de chauffage, la teneur en fibres peuvent être des paramètres pouvant expliquer de tel phénomène. L'analyse des propriétés mécaniques conduit, d'une façon globale, à une influence positive des fibres métalliques dans le béton chauffé. Cette amélioration peut être retardée et disparaître à partir d'un seuil de température. Les résultats, notamment sur l'amplitude de gain apporté par les fibres, varient suivant les auteurs.

Quelques recherches ont été menées sur l'utilisation d'un mélange de fibres de polypropylène et de fibres métalliques dans les bétons. D'une façon générale, une stabilité thermique de ces bétons est notée. Les propriétés mécaniques résiduelles des bétons de cocktail de fibres semblent meilleures que celles des bétons sans fibres. Les performances mécaniques de ces bétons dépendent des proportions relatives des deux natures de fibres. Les résultats disponibles dans la littérature ne concernent qu'une faible variété de combinaisons et sont obtenus avec des conditions expérimentales différentes. Il est donc difficile de comparer les résultats et de distinguer le rôle de chacune des natures de fibres sur la stabilité thermique et les performances mécaniques résiduelles du béton.

Nous proposons dans la suite du document d'étudier le comportement de bétons sans fibres, de bétons contenant des fibres de polypropylène, de bétons contenant des fibres métalliques et de bétons contenant un cocktail des deux fibres soumis à une température élevée. L'influence des différentes fibres en fonction du rapport eau/ciment et de la teneur en fibres est étudiée. Les caractéristiques physiques et mécaniques sont déterminées pour pouvoir expliquer les phénomènes mis en jeu dans le comportement du béton chauffé.

Chapitre 2 - PROGRAMME EXPERIMENTAL

2.1 Introduction

L'objectif de ce travail est d'analyser l'influence de fibres de polypropylène, de fibres métalliques et d'un cocktail de fibres de polypropylène et métalliques sur le comportement du béton porté à une température élevée. L'influence des différentes fibres est étudiée en fonction du rapport eau/ciment de la matrice. Plusieurs éprouvettes de béton sont donc confectionnées. Les propriétés physiques et mécaniques sont déterminées à la température ambiante et après différents traitements thermiques. Le but du présent chapitre est de présenter les caractéristiques des matériaux utilisés, les compositions de bétons et le dispositif expérimental mis en place.

2.2 Compositions et caractéristiques des matériaux

2.2.1 Formulations

Plusieurs formulations de béton sont ainsi confectionnées dans lesquelles le volume de pâte reste constant. Nous avons au total quatre familles de béton:

- les bétons sans fibres (C),
- les bétons avec les fibres de polypropylène (CP),
- les bétons avec les fibres métalliques (CS),
- les bétons avec un cocktail de fibres de polypropylène et métalliques (CSP).

En fonction du rapport E/C, nous distinguons trois types de béton : le béton ordinaire (BO) **C1**, le béton à hautes performances (BHP) **C3** et un béton intermédiaire (entre le BO et le BHP) **C2**. Pour chaque composition étudiée, le squelette granulaire est quasiment identique avec un rapport graviers / sable de l'ordre de 1.64 ± 0.01 . La variable est le rapport E /C. Ce rapport varie de 0.61 pour le béton C1 à 0.30 pour le béton C3. La composition des bétons sans fibres est obtenue en utilisant la méthode de formulation de Dreux-Gorisse [Dreu, 1998]. Le dosage en adjuvant est ajusté en réalisant des essais préliminaires permettant d'avoir un mélange assurant une bonne maniabilité. La classe de consistance du béton obtenu est S4 caractérisée par un affaissement au cône d'Abrams compris entre 16 et 20 cm ± 1 . Les compositions des bétons sans fibres sont présentées dans le tableau 2.1.

En ce qui concerne les compositions des bétons de fibres de polypropylène et métalliques, nous nous sommes intéressés aux formulations de bétons C2 et C3.

Les dosages en fibres de polypropylène sont de 1 – 1.5 et 2 kilogrammes par mètre cube de béton soit un pourcentage volumique respectif de 0.11 – 0.17 et 0.22%. Le tableau 2.2 montre la composition des bétons fibrés de polypropylène. La désignation de ces

bétons est la suivante : **CP2-1 (1.5 ou 2)** ou **CP3-1 (1.5 ou 2)**. La notification CP2 (CP3) désigne le béton C2 (C3) avec des fibres de polypropylène dosé à 1, 1.5 ou 2 kilogrammes par mètre cube de béton.

Les fibres métalliques sont utilisées dans des proportions de 20 – 30 et 40 kilogrammes dans un mètre cube de béton soit un pourcentage volumique respectif de 0.25 – 0.38 et 0.51%. Le tableau 2.3 montre les différentes formulations confectionnées et les éprouvettes sont référencées par : **CS2-20 (30 ou 40)** ou **CS3-20 (30 ou 40)**. Cette notification est semblable à celle des bétons de fibres de polypropylène.

Le béton de cocktail de fibres est obtenu en combinant un certain dosage de fibres de polypropylène aux fibres métalliques. Quatre combinaisons sont ainsi effectuées avec un volume en fibres variant de 0.49 à 0.73%. Les pourcentages volumiques de fibres de polypropylène sont 0.11 et 0.22% et ceux des fibres métalliques 0.38 et 0.51%. Le cocktail de fibres n'est introduit que dans la formulation du béton C3. La composition des bétons de cocktail de fibres est résumée dans le tableau 2.4. Les éprouvettes de bétons de cocktail de fibres sont désignées de la façon suivante : **CSP3-30x1 (30x2, 40x1, 40x2)** où le CSP3 désigne le béton C3 avec le cocktail de fibres et les chiffres donnent respectivement le dosage en kilogramme en fibres métalliques suivi de celui en fibres de polypropylène.

tableau 2.1 Composition des bétons sans fibres.

Dosage (kg/m³)	C1	C2	C3
Ciment	334	400	500
Eau	203	181	150
Sable 0-4	669	668	667
Graviers 4-22.4	1104	1105	1102
Sup. (extrait sec)	0	0.64	1.55
Ratio E/C	0.61	0.45	0.30
Mv	2310	2355	2421

tableau 2.2 Composition des bétons de fibres de polypropylène.

Dosage (kg/m³)	CP2-1	CP2-1.5	CP2-2	CP3-1	CP3-1.5	CP3-2
Ciment	400	400	400	500	500	500
Eau	181	181	180	150	150	150
Sable 0-4	668	667	667	666	665	664
Graviers 4-22.4	1102	1102	1102	1101	1100	1098
Sup (extrait sec)	0.96	0.96	1.00	1.61	1.61	1.76
F-PP	1.00	1.50	2.00	1.00	1.50	2.00
Ratio E/C	0.45	0.45	0.45	0.30	0.30	0.30
Fibres (%)	0.11	0.17	0.22	0.11	0.17	0.22
Mv	2353	2352	2351	2419	2418	2417

tableau 2.3 Composition des bétons de fibres métalliques.

Dosage (kg/m ³)	CS2-20	CS2-30	CS2-40	CS3-20	CS3-30	CS3-40
Ciment	400	400	400	500	500	500
Eau	181	181	181	150	151	151
Sable 0-4	670	669	667	668	656	652
Graviers 4-22.4 / 6.3-20	1095	1093	1091	1091	1072	1072
Sup (extrait sec)	0.6	0.58	0.60	1.52	1.28	1.42
F-S	20	30	40	20	30	40
Ratio E/C	0.45	0.45	0.45	0.30	0.30	0.30
Fibres (%)	0.25	0.38	0.51	0.25	0.38	0.51
Mv	2367	2374	2380	2430	2410	2416

tableau 2.4 Composition des bétons de cocktail de fibres de polypropylène et métalliques

Dosage (kg/m ³)	CSP3-30x1	CSP3-30x2	CSP3-40x1	CSP3-40x2
Ciment	500	500	500	500
Eau	151	151	151	151
Sable 0-4	655	655	654	653
Graviers 6.3-20	1070	1070	1068	1066
Sup (extrait sec)	1.43	1.60	1.5	1.67
F-S	30	30	40	40
F-PP	1.00	2.00	1.00	2.00
Ratio E/C	0.30	0.30	0.30	0.30
Fibres (%)	0.49	0.60	0.62	0.73
Mv	2408	2406	2415	2413

2.2.2 Caractéristiques des matériaux utilisés

2.2.2.1 Ciment

Le type de ciment utilisé pour les bétons ordinaires comme pour les bétons à hautes performances est le CEM I 52.5 N CE CP2 NF de Villiers au Bouin distribué par la société Ciments Calcia. Il est essentiellement constitué de 98% de clinker de Villiers au Bouin et de 2% de fines de cru. Les caractéristiques physiques et mécaniques (tableau 2.5) du ciment CEM I de Villiers au Bouin se présentent comme suit :

tableau 2.5 Caractéristiques du ciment CEM I de Villiers au Bouin.

Compression en MPa				Retrait en $\mu\text{m/m}$ à 28 jrs	Début de prise en mn	Chaleur en J/g à 41h	Masse volumique en g/cm^3
1jr	2jrs	7jrs	28jrs				
18.1	31.7	48.5	61.3	580	165	351	3.13

2.2.2.2 Granulats

Tous les bétons ont été confectionnés avec des granulats (sable et graviers) semi concassés de type silico-calcaire de la carrière GSM Achères. Les granulats sont constitués de 70-75% de silice, 20-25% de calcaire et 5% de feldspath. La classe granulaire du sable est 0/4 et celles des graviers sont 4/22.4 et 6.3/20. Les graviers de classe 4/22.4 sont utilisés dans les compositions de bétons sans fibres, bétons avec les fibres de polypropylène et bétons avec les fibres métalliques excepté le CS3 dosé à 30 et 40 kilogrammes de fibres. Suite à une modification de production de la carrière, les graviers de classe 6.3/20 remplacent les graviers de classe 4/22.4 dans les deux dernières compositions ainsi que les compositions de cocktail de fibres. Le rapport graviers/sable est conservé lors du changement de graviers. Les analyses des courbes granulométriques des différents granulats et leurs caractéristiques chimiques sont présentées sur la figure 2.1. Le tableau 2.6 regroupe quelques propriétés physiques des granulats.

tableau 2.6 Propriétés physiques des granulats de GSM Achères.

Granulats	Sable : 0/4	Graviers : 4/22.4	Graviers : 6.3/20
Densité	2.51	2.50	2.51
Coefficient d'absorption	1.40	1.80	1.90
Module de finesse	2.74	-	-
Equivalent de sable (%)	81.2	-	-

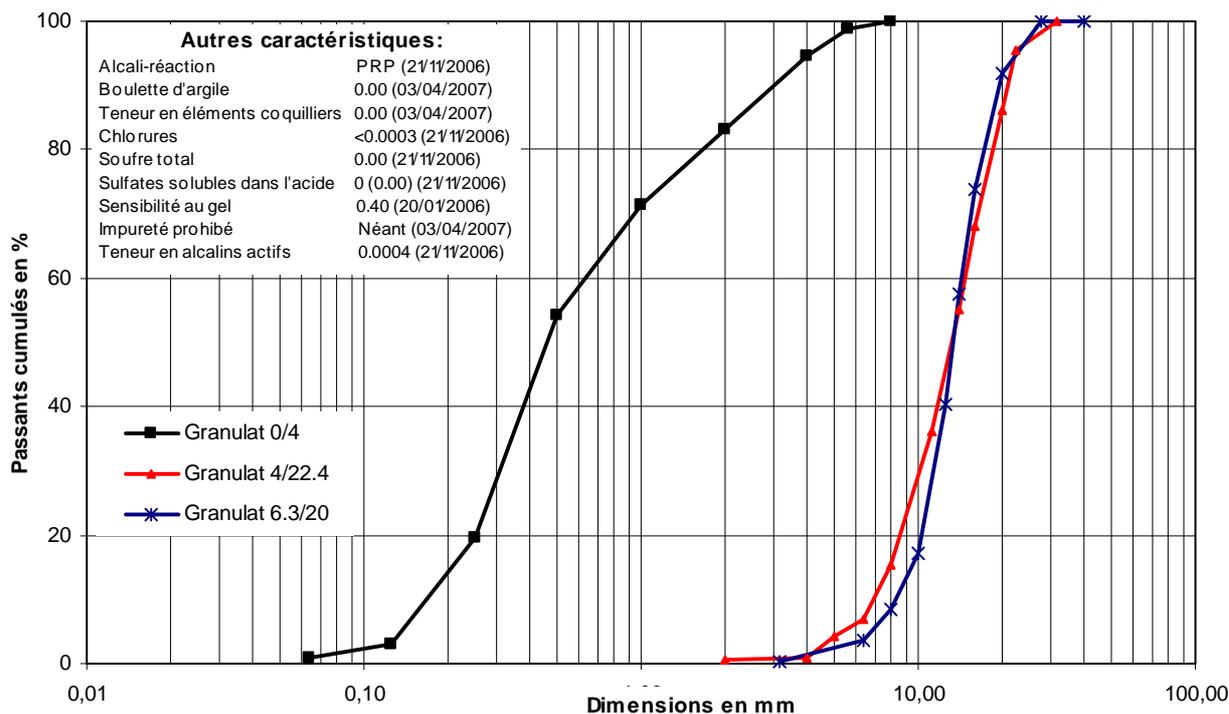


figure 2.1. Courbes granulométriques et autres caractéristiques des granulats utilisés.

2.2.2.3 Superplastifiant

Le type de superplastifiant utilisé est un adjuvant haut réducteur d'eau à base de polycarboxylate modifié. Il est commercialisé par la société AXIM Italcementi Group sous le nom de Cimfluid 2002 dont les caractéristiques (tableau 2.7) se présentent comme suit :

tableau 2.7 Caractéristiques du superplastifiant Cimfluid 2002.

Masse volumique à 20°C	1.1 kg/dm ³ ± 0.020
PH	7.0 ± 1.0
Extrait sec	35.0 % ± 1.7 %
Na ₂ O _{équivalent}	3.8 %
Cl ⁻	< 0.10 %
Température de congélation	- 6 °C environ

Le superplastifiant est dosé de façon à avoir une maniabilité constante.

2.2.2.4 Eau

L'eau utilisée pour les différentes gâchées de béton est issue directement du robinet. La masse volumique prise en compte pour les calculs de formulation est la valeur conventionnelle de 1000 kg/m^3 . Les propriétés chimiques de cette eau n'ont pas fait l'objet de la présente étude. Elle est supposée potable et ne contenir aucune impureté nuisible (matières organiques, alcalis...) conformément à la norme NF P 18-303.

2.2.2.5 Fibres de polypropylène

Les fibres utilisées sont des monofilaments fins de polypropylène sous l'appellation de DUOMIX[®] FIRE (M6). Elles sont de forme cylindrique et ont une longueur de 6 mm et un diamètre nominal de $18 \mu\text{m}$. Les fibres sont livrées sous forme d'amas et se dispersent facilement lors du malaxage (figure 2.2).

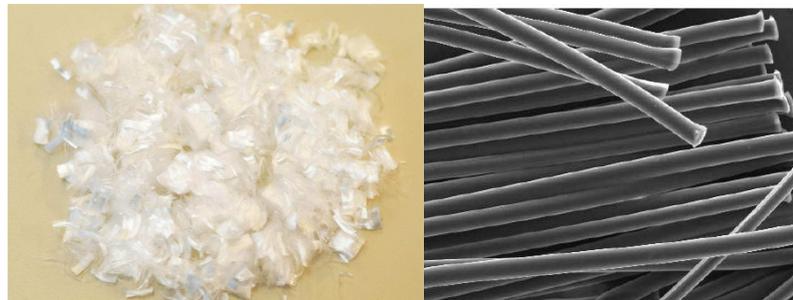


figure 2.2. Fibres de polypropylène Duomix[®] Fire M6.

Les caractéristiques (tableau 2.8) des fibres de polypropylène se présentent comme suit :

tableau 2.8 Caractéristiques des fibres de polypropylène.

Matériel	Polypropylène
Masse volumique	0.91 kg/dm^3
Module d'élasticité	3500 - 3900 MPa
Résistance en traction	300 MPa
Température de fusion	160 - 165 °C
Coefficient d'absorption	0%

2.2.2.6 Fibres métalliques

Les fibres métalliques utilisées sont des fibres DRAMIX de type RC-80/30-BP. Ce sont des fibres à haute teneur en carbone. Elles sont fabriquées à partir de fil d'acier tréfilé et comportent un ancrage mécanique constitué de crochets aux deux extrémités. Elles sont encollées les unes aux autres en plaquette (figure 2.3) afin d'assurer leur répartition et se décollent facilement au cours du malaxage.

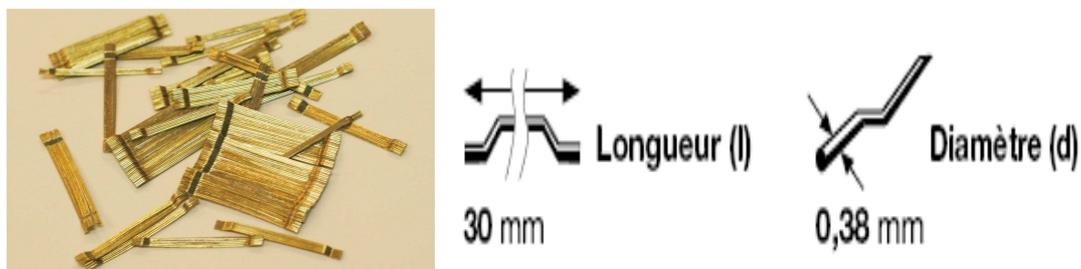


figure 2.3. Fibres métalliques Dramix RC-80/30-BP.

Les caractéristiques des fibres métalliques sont présentées dans le tableau 2.9 suivant :

tableau 2.9 Caractéristiques des fibres métalliques RC-80/30-BP.

Longueur	30 mm
Diamètre	0.38 mm
Module d'élasticité	210000 MPa
Résistance en traction	2300 MPa
Masse volumique	7.85 kg/dm ³
Quantité	34000 fibres par kilogramme

2.3 Fabrication et conservation des éprouvettes

2.3.1 Fabrication et mise en œuvre

Les modalités de fabrication des éprouvettes sont les suivantes :

- à la suite d'un pré mouillage et séchage du malaxeur, les matériaux y sont mis du plus gros granulats au plus fin (graviers, sables, ciment et fibres),
- préparation du mélange eau / superplastifiant,
- un malaxage à sec des différents constituants, (durée allant de 60 à 90 secondes),

- ajout du mélange eau / superplastifiant (du tiers à la quantité entière pour une durée totale de malaxage de 100 à 300 secondes).

Après avoir effectué la vérification de l'affaissement (classe S4) au cône recherché, le béton est coulé dans des moules cylindriques (figure 2.4) en carton de dimensions 16 x 32 cm et des moules métalliques prismatiques 10 x 10 x 40 cm. Chaque moule est rempli en deux couches subissant chacune une vibration allant de 10 à 15 secondes. Chaque moule cylindrique est recouvert de son couvercle et les moules prismatiques d'une bâche en plastique afin de les protéger de la dessiccation.



figure 2.4. *Fabrication des éprouvettes de béton.*

2.3.2 Conservation

Les conditions de conservation sont les suivantes :

- sept jours dans leur moule couvert à une température de $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$,
- à partir du huitième jour, dans des sacs plastiques étanches à une température de $20 \pm 2^{\circ}\text{C}$ dans une salle d'humidité relative de $50 \pm 5\%$ jusqu'au moment des essais.

Les conditions de conservation définies dans le cadre de notre projet diffèrent peu des recommandations de la RILEM TC 200-MHT [Rile, 2007].

2.3.3 Ages

Les éprouvettes sont conservées jusqu'à quatre vingt dix jours au minimum afin de s'assurer de la stabilité des réactions pouzzolaniques et aussi d'avoir moins d'eau libre dans le béton. L'eau libre joue un rôle important lors de la montée en température du béton.

2.4 Dispositif expérimental

2.4.1 Cycles de chauffage - refroidissement

Dans le cadre de notre étude, nous avons appliqué quatre cycles de chauffage refroidissement de la température ambiante de 20°C à différentes températures de palier : 150°C, 300°C, 450°C et 600°C au moyen d'un four électrique. Le choix de ces températures est fait par rapport au comportement des différents composants de la matrice cimentaire et des fibres de polypropylène comme l'illustre la figure 2.5.

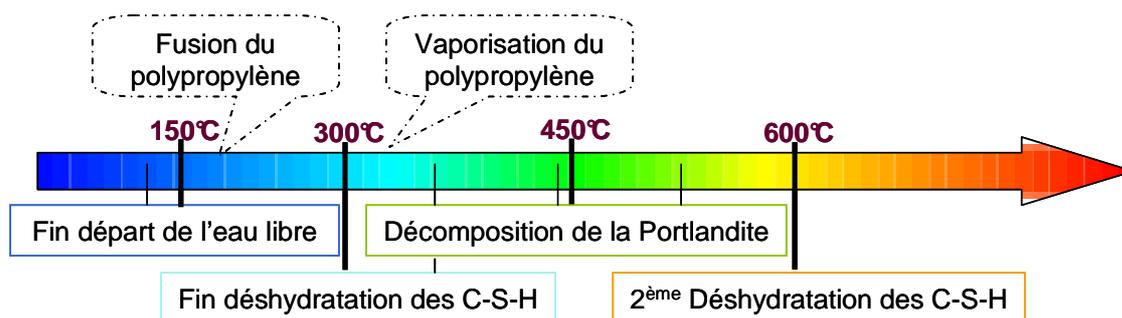


figure 2.5. Paliers de température suivant le comportement de la matrice cimentaire et des fibres de polypropylène.

Chaque cycle est composé de trois phases (figure 2.6). La première constitue une rampe de montée en température à une vitesse de $1^{\circ}\text{C}\cdot\text{mn}^{-1}$. La seconde est un palier de température constante dans le four afin d'homogénéiser la température au sein des éprouvettes. Elle dure une heure de temps. La dernière phase est une diminution de la température jusqu'à atteindre la valeur ambiante à la vitesse moyenne de $-1^{\circ}\text{C}\cdot\text{mn}^{-1}$. Cette phase de refroidissement des éprouvettes n'est pas pilotée. Elle se fait de façon naturelle en fonction de la température à l'intérieur du four qui est maintenu fermé. On souhaite en effet s'assurer que l'endommagement induit dans le béton résulte seulement de l'effet de la température.

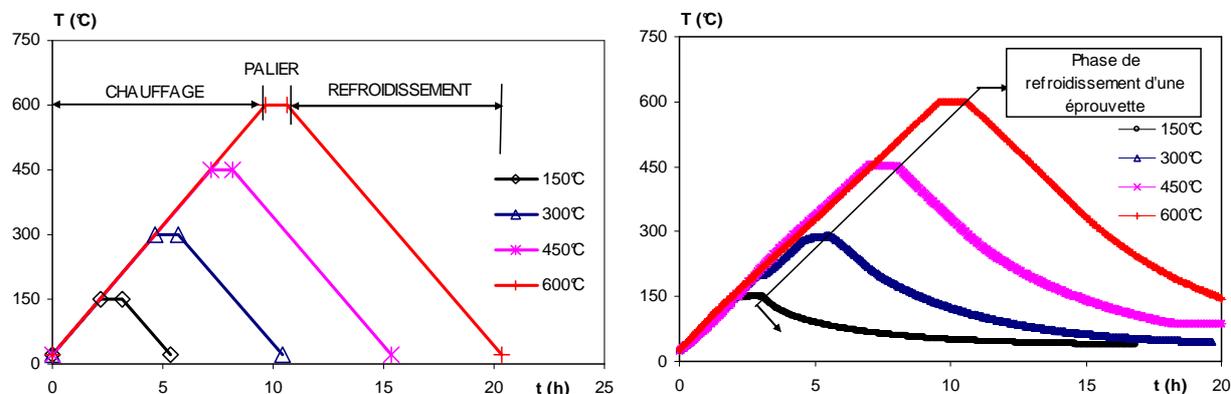


figure 2.6. Cycles de chauffage – refroidissement imposés aux éprouvettes.

Les éprouvettes sont disposées dans le four (figure 2.7 (b)) de façon à ce que la chaleur se répartisse d'une manière homogène. Cette répartition de chaleur est faite grâce au système de ventilation du four. Certaines éprouvettes sont munies de thermocouples au centre et à la surface pour pouvoir déterminer l'évolution de la température. Ces thermocouples de type K sont reliés à une centrale d'acquisition qui transmet à l'ordinateur les différentes valeurs de température en fonction du temps. C'est la température de surface qui pilote la montée en température du four.

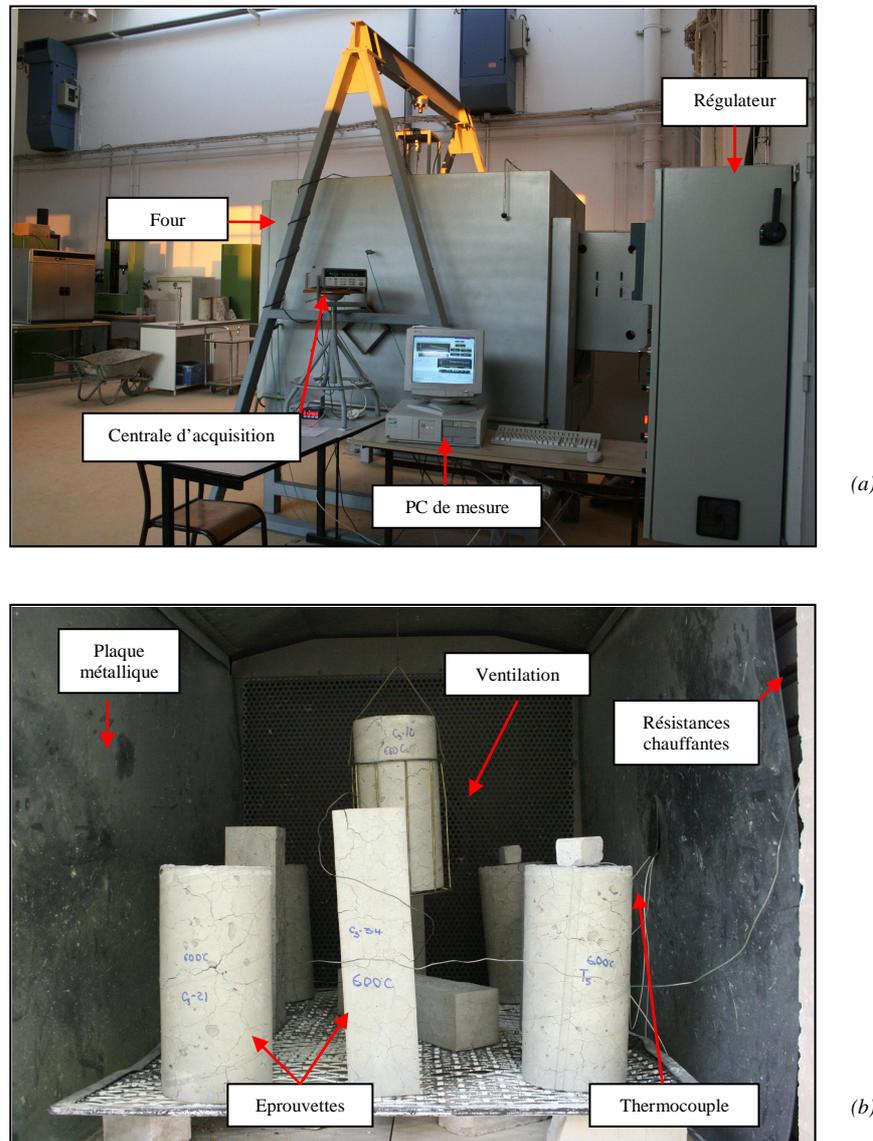


figure 2.7. Dispositif de chauffage (a) et disposition des éprouvettes dans le four (b).

Le pilotage du four est réalisé à l'aide d'un régulateur programmeur EURO THERM (figure 2.7 (a)) auquel sont reliés les thermocouples. Les différents cycles peuvent être ainsi programmés. Lors des différentes phases, la mesure des températures est réalisée en continu grâce à une centrale d'acquisition automatique de données HP 323. Les thermocouples posés sur la surface ou au centre des éprouvettes lors de la confection

sont connectés aux voies de la centrale d'acquisition. Les mesures effectuées par la centrale sont enregistrées directement sur l'ordinateur.

2.4.2 Mesure des propriétés physiques

2.4.2.1 Différence de température entre la surface et le centre de l'éprouvette

Dans le souci de déterminer le gradient thermique (à partir de la différence de température) dans le béton lors du cycle de chauffage-refroidissement, nous avons mesuré les températures de surface et au centre des éprouvettes. Les températures de surface et au centre sont obtenues sur des éprouvettes cylindriques de 16 x 32 cm en utilisant des thermocouples de type K.SV/SV.2x0.03 mm² de ACTIFA. Le thermocouple au centre est noyé dans l'éprouvette lors de sa confection (figure 2.8). Le thermocouple de surface est placé sur la surface de l'éprouvette avant le début de chaque cycle de chauffage. Chaque thermocouple est relié à la centrale d'acquisition ce qui permet d'avoir les courbes d'évolution des températures de surface et au centre de l'éprouvette en fonction du temps. La mesure de ces températures permet de déterminer la différence de température entre la surface et le centre de l'éprouvette et d'en déduire l'évolution du gradient thermique.

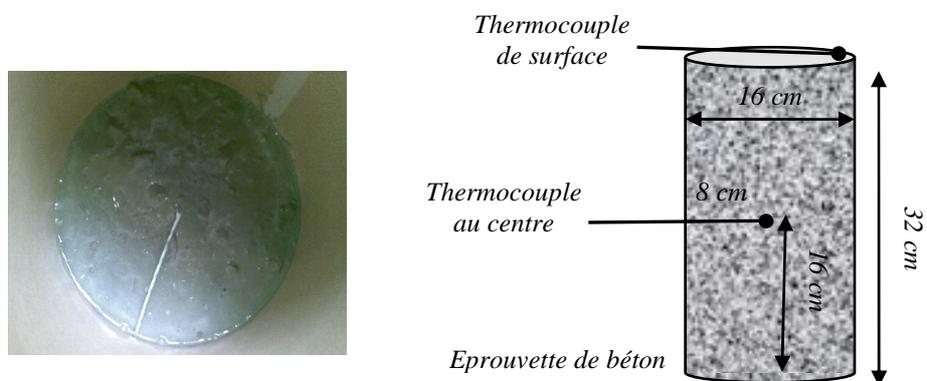


figure 2.8. Mise en place des thermocouples de mesure.

2.4.2.2 Perte de masse

Pour la détermination de l'évolution de la perte de masse en fonction du cycle de chauffage-refroidissement, au moins quatre éprouvettes cylindriques 16 x 32 cm (éprouvettes n'ayant pas de thermocouples) sont pesées avant et après chaque cycle de chauffage – refroidissement. 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 subie 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 :

$$\Delta_{m_i} = \frac{m_a - m_{T_i}}{m_a} \times 100$$

avec Δ_{m_i} désignant la perte de masse en %, la masse m_a de l'éprouvette à la température ambiante avant le chauffage et la masse m_{T_i} de l'éprouvette refroidie après le cycle de chauffage – refroidissement T_i .

2.4.2.3 Porosité

La technique utilisée est similaire à la porosimétrie par pesée hydrostatique recommandée par l'AFPC-AFREM [AFPC, 1997]. Elle donne la valeur globale de la porosité totale mais ne permet pas de caractériser la distribution des pores. La distribution des pores s'obtient par la porosimétrie au mercure. Les échantillons testés sont issus directement des éprouvettes après les essais mécaniques et, pour chaque champ de température, l'essai est réalisé sur une dizaine d'échantillons. Les échantillons sont conservés dans des sacs étanches puis mis dans une étuve à une température de 60°C jusqu'à ce que leur masse sèche devienne constante. Les échantillons testés sont ceux portés à des températures de 20°C, 150°C, 300°C et 450°C. Compte tenu de la friabilité des échantillons chauffés à la température de 600°C, nous nous limitons à la température 450°C.

Lorsque les échantillons sont entièrement secs, ils sont immergés dans de l'eau jusqu'à saturation complète. Des mesures de masse saturée sont effectuées au fil du temps jusqu'à la saturation complète au bout de huit jours. Des essais réalisés à quatre, huit et seize jours montrent une diminution de la masse saturée après huit jours (figure 2.9) d'immersion. On observe donc un phénomène de réhydratation au bout de seize jours. Une fois que l'échantillon est saturé, une pesée en état saturé immergé est réalisée puis elle est suivie de la pesée en état saturé après que l'échantillon soit essuyé avec un linge pour enlever le surplus d'eau de la surface.

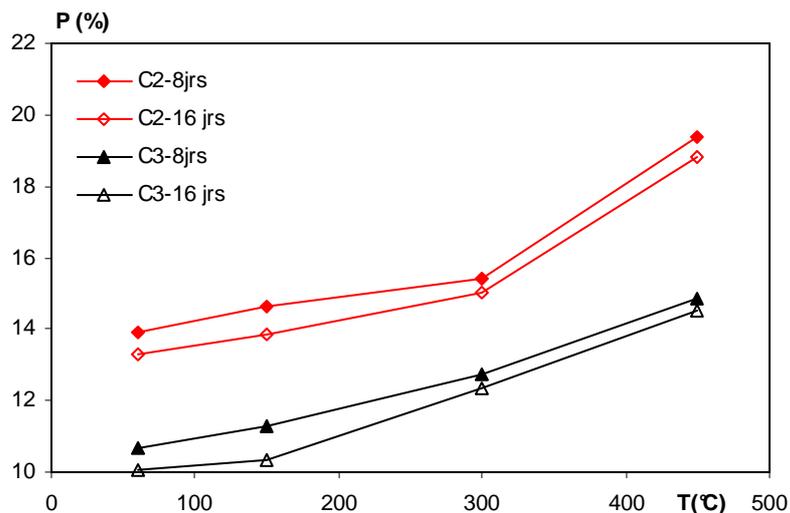


figure 2.9. Porosité à l'eau à huit et seize jours des bétons C2 et C3.

La porosité P exprimée en pourcentage volumique est donnée par l'équation suivante:

$$P = \frac{m_{sat} - m_{sec}}{m_{sat} - m_{sat}^{im}} \rho_e$$

avec m_{sat} la masse d'échantillon saturé séché en surface, m_{sec} la masse de l'échantillon sec après étuvage, m_{sat}^{im} la masse de l'échantillon saturé immergé et ρ_e la masse volumique de l'eau.

2.4.3 Mesure des propriétés mécaniques

Les différentes propriétés mécaniques étudiées sont : la résistance en compression, le module d'élasticité et la résistance en traction par flexion. Les essais sont réalisés sur des éprouvettes non chauffées et sur des éprouvettes ayant subi un traitement thermique. Les essais permettent d'étudier le comportement mécanique résiduel du béton porté à une température élevée. Les essais de résistances sont réalisés au moins sur trois éprouvettes pour chaque cycle de chauffage – refroidissement.

2.4.3.1 Essai de compression uniaxiale

Les essais sont réalisés sur quatre éprouvettes cylindriques 16 x 32 cm pour tous les cycles de chauffage. Les extrémités des éprouvettes sont rectifiées par surfacage au souffre conformément à la norme NF EN 12390-324 [Afnor, 2003]. L'éprouvette est placée et centrée sur une presse hydraulique INSTRON de 3000 kN puis soumise à un taux de chargement de 0.5 MPa.s^{-1} jusqu'à la rupture (figure 2.10). La charge maximale atteinte

est enregistrée et la contrainte de rupture en compression est obtenue par la formule suivante :

$$\sigma_c = \frac{4 * F_{\max}}{\pi D^2}$$

F_{\max} désigne la charge à la rupture en compression et D le diamètre de l'éprouvette.

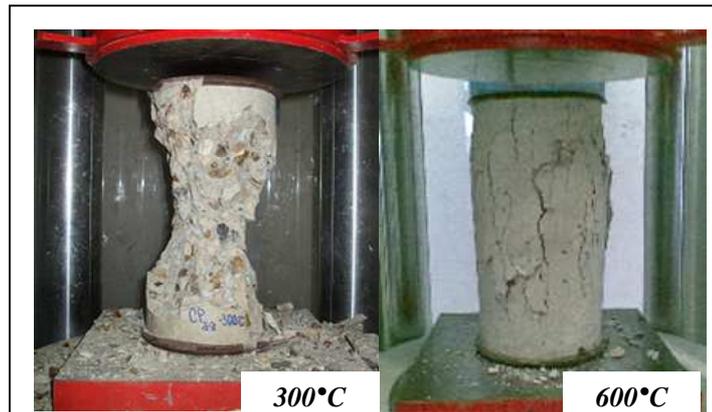


figure 2.10. Essais de résistance résiduelle en compression.

2.4.3.2 Mesure du module d'élasticité

Le mode opératoire utilisé est celui défini dans le bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées [Torr, 1999] relatif à la détermination du module d'élasticité du béton. Il est désigné comme le module sécant calculé après un nombre spécifique de cycles de chargement – déchargement. L'essai est réalisé sur trois éprouvettes cylindriques 16 x 32 cm. L'éprouvette est reliée au bâti extensométrique (figure 2.11 (a)) par le biais de six pointeaux à vis fixés sur les deux anneaux et faisant entre eux un angle de 120°. Les anneaux sont reliés par trois capteurs de type LVDT positionnés aussi à 120° autour de l'éprouvette. Les capteurs permettent de mesurer les déplacements verticaux avec une course de 2 mm d'une précision de 1 µm. La distance entre les deux anneaux est de 167 mm.

Après avoir déterminé le chargement maximal F_{\max} sur une autre éprouvette, trois cycles de chargement – déchargement (figure 2.11 (b)) sont effectués à un taux de chargement de 0.5 MPa.s^{-1} et à une charge limite de $0.3F_{\max}$. Les courbes contraintes-déplacements sont enregistrées pour chaque éprouvette provenant de la même formulation et ayant subi le même traitement thermique. Le calcul du module d'élasticité se fait à partir du second cycle tout en vérifiant que le module obtenu au troisième cycle ne diffère pas de plus de 10%.

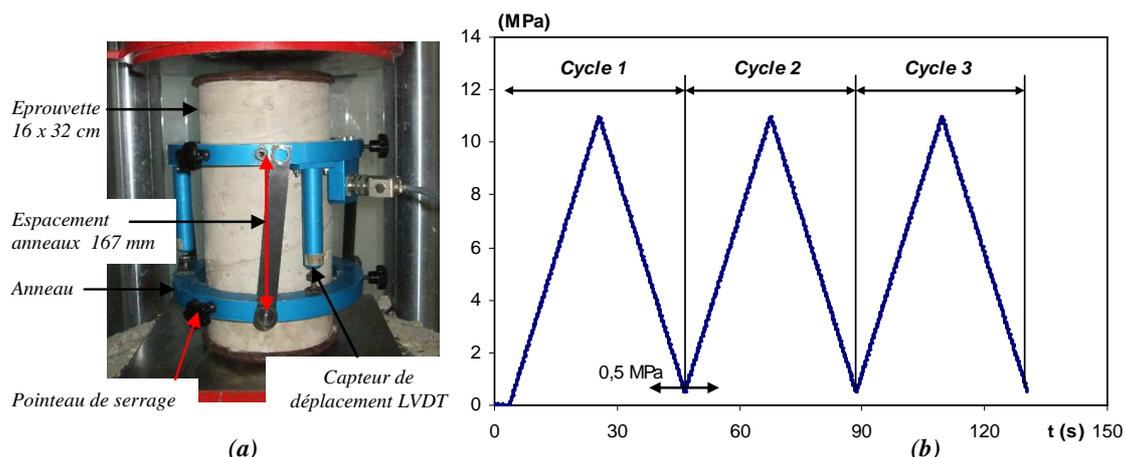


figure 2.11. Dispositif expérimental pour la mesure du module d'élasticité.

2.4.3.3 Essai de traction par flexion

Les essais sont menés sur des éprouvettes prismatiques de 10 x 10 x 40 cm. Les éprouvettes sont soumises jusqu'à la rupture à un moment de flexion par application d'une charge au moyen de deux rouleaux supérieurs et de deux rouleaux inférieurs (figure 2.12). Les éprouvettes sont placées soigneusement sur les deux rouleaux d'appui inférieurs distancés de $3a$ ($a = 10$ cm) et bien centrées de telle sorte que l'axe longitudinal des rouleaux (supérieurs et inférieurs) soit orthogonal à l'axe de l'éprouvette. Conformément à la norme NF EN 12390-525 [Afno, 2001], le chargement en deux points est effectué à une vitesse de 0.25 mm/mn jusqu'à la rupture. La charge maximale est enregistrée au cours de l'essai ainsi que la courbe contrainte-déplacement. La résistance en traction est obtenue par la formule suivante :

$$\sigma_t = \frac{3F}{a^2}$$

avec F désignant la valeur de la charge maximale appliquée à la rupture.

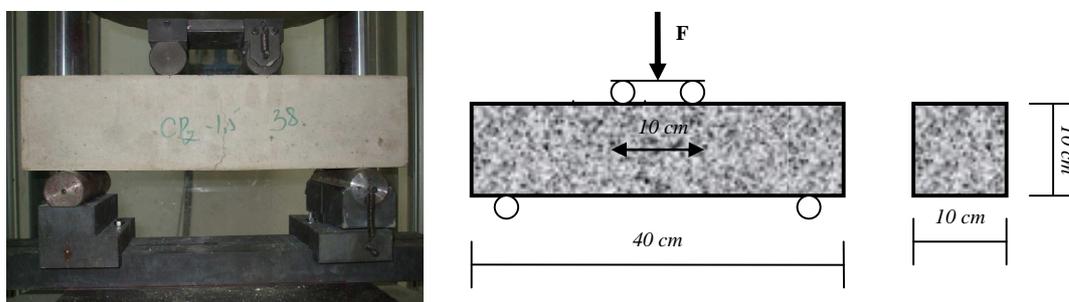


figure 2.12. Dispositif expérimental pour l'essai de traction par flexion.

Chapitre 3 - COMPORTEMENT DES BETONS SANS FIBRES

3.1 Introduction

Dans le présent chapitre, l'étude portera sur le comportement des bétons sans fibres soumis aux différents cycles de chauffage-refroidissement décrits dans le paragraphe 2.4.1. Trois familles de bétons sont confectionnées. Les rapports E/C des bétons varient de 0.61 (béton C1) à 0.30 (béton C3) avec un béton intermédiaire (béton C2) de rapport 0.45. Les essais de caractérisation physique et mécanique sont effectués et serviront de référence pour les autres familles de bétons contenant des fibres de polypropylène et/ou des fibres métalliques.

Les résultats concernent les différences de température au sein de l'éprouvette au cours du chauffage, la perte de masse, la porosité, la résistance en compression, la résistance en traction et le module d'élasticité des bétons chauffés et refroidis.

3.2 Evolution des propriétés physiques en fonction du chauffage

3.2.1 Différence de température entre la surface et le centre de l'éprouvette

Lors de la confection des éprouvettes de béton, un thermocouple est noyé au centre des éprouvettes cylindriques de dimensions 16 x 32 cm. Un autre thermocouple est positionné sur la surface des éprouvettes lors des cycles de chauffage-refroidissement. La mesure des températures de surface (T_{surf}) et au centre des éprouvettes (T_{centre}) a permis de déterminer la différence de température entre le centre et la surface de l'éprouvette en fonction de la température en surface de l'éprouvette ($\Delta T = T_{\text{surf}} - T_{\text{centre}}$). La figure 3.1 illustre l'évolution de la différence de température des bétons C2 (a) et bétons C3 (b).

Pour tous les bétons étudiés, la différence de température augmente, passe par un maximum puis diminue. Nous remarquons que plus la température du cycle de chauffage est élevée, plus la différence de température est importante. Le pic de la différence de température se déplace vers une température plus élevée lorsque la température de chauffage passe de 300°C à 450°C. Mais, pour les cycles de 450°C et 600°C, les pics de différence de température sont voisins. Ce phénomène est observé pour les trois familles de bétons. Le pic de différence de température peut être attribué à la migration et à la vaporisation de l'eau évaporable. Elle s'observe à une température de surface avoisinant 300°C. Cette température 300°C correspond au second point d'inflexion de la courbe de perte de masse lors du chauffage. A partir de cette température, la vitesse de perte de masse diminue et l'on remarque aussi une baisse de la différence de température après avoir atteint ce pic.

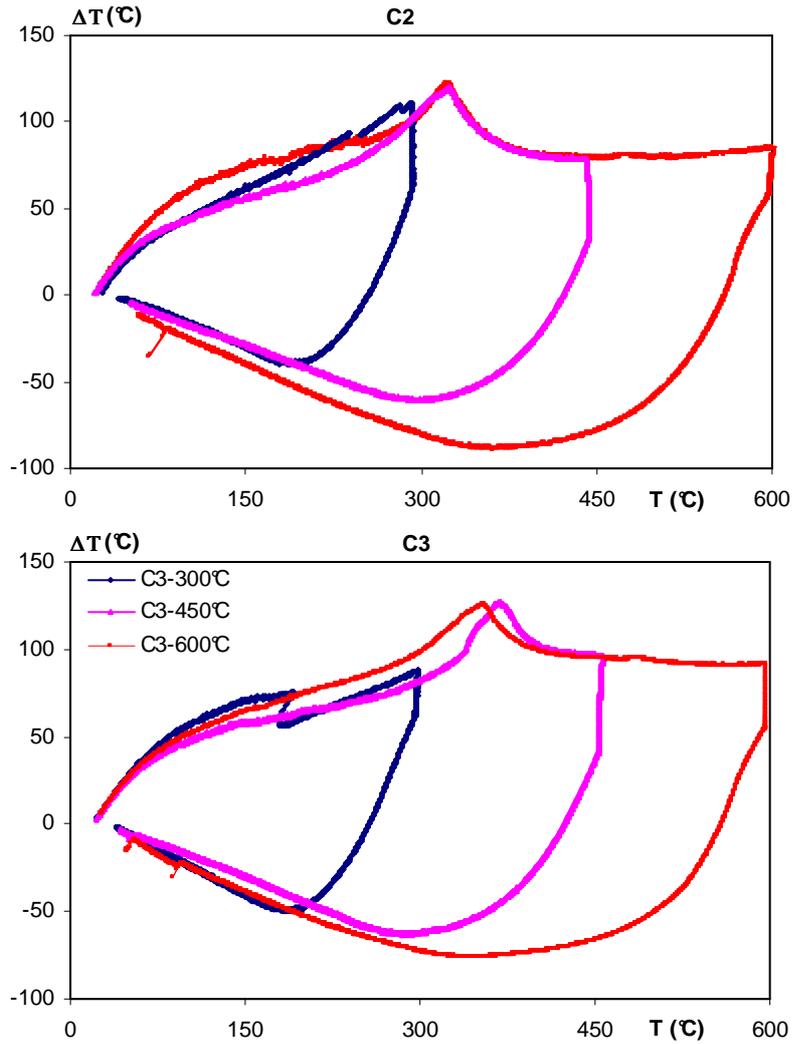


figure 3.1. Evolution de la différence de température entre la surface et le centre de l'éprouvette en fonction de la température de surface des bétons C2 et C3 sans fibres.

Le tableau 3.1 regroupe les valeurs maximales des différences de température pour tous les bétons ainsi que les températures de surface correspondantes. Le gradient thermique maximal obtenu y est aussi indiqué.

tableau 3.1 Différence de température (ΔT_{\max}) et gradient thermique ($\frac{\Delta T_{\max}}{\Delta r}$) maximaux des bétons sans fibres.

Bétons	ΔT_{\max} (°C)	$\frac{\Delta T_{\max}}{\Delta r}$ (°C.cm ⁻¹)	T_{surf} (°C)
C1	133	16.6	340
C2	123	15.4	324
C3	127	15.9	340

Nous observons que la différence de température maximale est d'environ 130°C. Pour l'ensemble des cycles thermiques, la différence de température atteint sa valeur maximale à une température de surface comprise entre 320°C et 340°C. Cette plage de température correspond à la zone d'apparition du second point d'inflexion (300°C - 350°C) de la perte de masse. On constate que les bétons C1 et C3 atteignent un gradient maximal (ou différence de température) à une même température de surface de 340°C. Le gradient thermique est légèrement plus élevé au sein des bétons C1. Il est de 16.6°C.cm⁻¹ pour le béton C1 et de 15.9°C.cm⁻¹ pour le béton C3. Le béton C1 (BO) est caractérisé par un rapport E/C élevé (0.61) et le béton C3 (BHP), par un rapport E/C faible (0.3). Ce fort gradient thermique obtenu pour le BO peut s'expliquer par sa teneur en eau initiale plus élevée que celle du BHP. Plus un béton contient de l'eau, plus la quantité de chaleur nécessaire pour augmenter sa température de 20°C à 350°C est élevée. La consommation de chaleur sous forme latente retarde alors le transfert de chaleur de la surface vers le centre de l'éprouvette, produisant ainsi des gradients thermiques élevés.

Le plus faible gradient thermique des BHP a aussi été observé par Kanéma [Kane, 2007] qui a réalisé une étude comparative entre bétons et mortiers de différents rapports E/C.

3.2.2 Perte de masse

La pesée de quatre éprouvettes cylindriques 16 x 32 cm avant et après chauffage montre que la masse des éprouvettes diminue en fonction du cycle de chauffage-refroidissement. Les résultats de calcul de la perte de masse (moyenne sur quatre éprouvettes) sont indiqués dans le tableau 3.2.

tableau 3.2 Pertes de masse moyenne des bétons sans fibres.

Bétons	Mesures	Cycles de chauffage - refroidissement			
		150°C	300°C	450°C	600°C
C1	Perte (%)	2.8	6.7	8.0	9.3
	Ecart type	0.0	0.0	0.0	0.0
C2	Perte (%)	2.5	6.0	7.0	8.1
	Ecart type	0.0	0.0	0.0	0.1
C3	Perte (%)	1.1	4.8	6.1	7.2
	Ecart type	0.0	0.0	0.0	0.0

L'évolution de la perte de masse en fonction de la température (figure 3.2) est liée au type de béton. Le béton ordinaire (C1) perd plus de masse que le béton à hautes performances (C3). Pour un chauffage à 600°C, la perte de masse est de 9.3 % pour le béton C1 et de 7.2 % pour le béton C3. Le béton C3 est caractérisé par un plus faible rapport E/C, d'où une perte de masse moins élevée. L'allure de la courbe de perte de masse est identique pour tous les bétons (figure 3.2). Elle ne dépend donc pas du rapport E/C. Pour les trois bétons étudiés, trois domaines s'observent comme l'ont remarqué certains auteurs : Khoury [Khou, 1988], Noumowé [Noum, 1995], Hager [Hage, 2004], Kanéma [Kane, 2007].

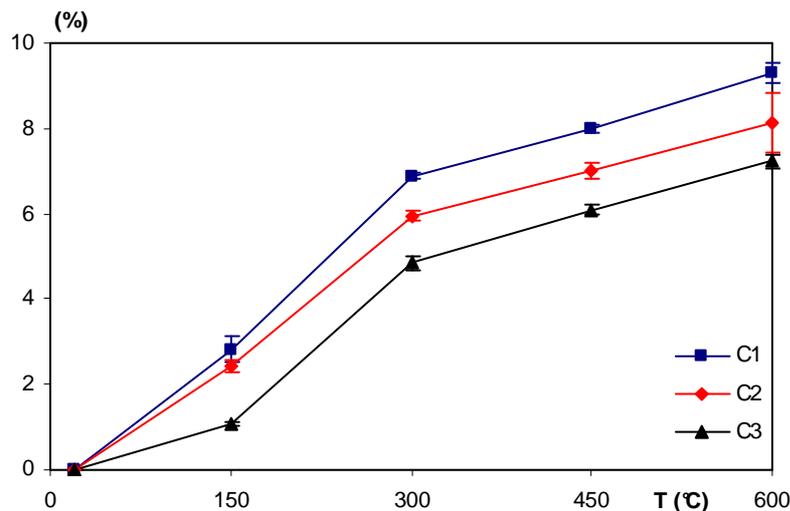


figure 3.2. Evolution de la perte de masse moyenne des bétons sans fibres en fonction de la température du cycle de chauffage-refroidissement.

Le premier domaine va de la température ambiante à la température de surface de 150°C. Il se caractérise par une faible variation de perte de masse (2.8 % pour C1 et 1.1 % pour C3). La différence de perte de masse s'explique par la quantité d'eau présente dans les deux bétons. L'eau arrive à s'échapper plus rapidement du béton ordinaire plus perméable que du béton à hautes performances. Le premier domaine marque donc le départ de l'eau libre dans le béton et de l'eau adsorbée à la surface des éléments solides.

Le deuxième domaine s'étend de la température 150°C à 300°C. Il est marqué par une forte augmentation de perte de masse. A 300°C, le béton C1 a perdu 6.7% de sa masse et le C3 4.8 %. Les courbes d'évolution de la perte de masse ont la même pente pour le béton C1 que pour le béton C3. Un résultat similaire a été montré par Noumowé [Noum, 1995]. L'auteur relie cette forte perte de poids 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.

Quant au troisième domaine, allant de la température 300°C à 600°C, il est caractérisé par une faible variation de perte de masse par rapport aux deux autres domaines. Ce domaine est marqué par la déshydroxylation de la portlandite. On constate que la pente pour les trois bétons est la même. La perte de masse totale est fonction de la composition du béton. Les différences de perte de masse entre les bétons C1, C2 et C3 peuvent être reliées à la quantité d'eau entrant dans la composition de ces bétons.

En comparant la quantité d'eau initialement contenue dans les éprouvettes de béton (tableau 3.3) à la perte de masse des éprouvettes à la température de 600°C, nous remarquons que les bétons étudiés perdent quasiment la totalité de leur eau initiale.

tableau 3.3 Quantité d'eau initiale moyenne et perte de masse à 600°C des bétons sans fibres.

Bétons	C1	C2	C3
Eprouvette. (g)	14722	14870	15220
Eau initiale(g)	1470	1320	1120
Perte de masse (g)	1367	1210	1100
Perte/Eau initiale (%)	93.0	91.7	98.2

Les différents phénomènes qui se produisent lors de la montée en température du béton entraînent un changement de ses propriétés microstructurales. Nous allons étudier l'impact de la perte de masse sur la porosité du béton.

3.2.3 Evolution de la porosité

Les résultats récapitulatifs de la porosité obtenus par pesée hydrostatique pour tous les bétons sans fibres sont reportés dans le tableau 3.4. Les valeurs citées sont des moyennes de mesures réalisées sur dix échantillons. Le tableau 3.5 montre à titre d'exemple le détail expérimental des mesures de porosité de la composition de béton C2.

La porosité relative est déterminée en pourcentage et est normalisée par rapport à la valeur initiale obtenue à la température initiale de 60°C.

tableau 3.4 Porosité moyenne des bétons sans fibres.

T (°C)	Bétons	Porosité		
		(%)	Ecart type	Relative
60	C1	13.9	1.4	100
	C2	13.9	0.9	100
	C3	10.7	1.2	100
150	C1	14.2	1.0	102
	C2	14.6	1.8	105
	C3	11.3	1.4	106
300	C1	16.2	1.6	116
	C2	15.4	2.1	111
	C3	12.8	0.9	120
450	C1	20.9	2.2	150
	C2	19.4	1.0	139
	C3	14.9	1.1	139

Comme attendu, la porosité des bétons étudiés (figure 3.3) augmente en fonction de la température de chauffage.

tableau 3.5 Détail expérimental de la détermination de la porosité des bétons C2.

Béton C2	m_s (g)	m_{sat} (g)	m_{sat}^{imm} (g)	$m_{sat} - m_{sat}^{imm}$ (g)	Porosité (%)
T = 60°C	70.082	74.268	41.307	32.0	13.3
1	39.91	42.66	23.91	18.8	14.7
2	47.93	50.78	28.8	22.0	13.0
3	36.77	39.18	22.29	16.9	14.3
4	55.84	59.08	33.79	25.3	12.8
5	102.26	108.5	61.42	47.1	13.3
6	37.12	39.58	22.38	17.2	14.3
7	70.67	74.38	42.83	31.6	11.8
8	76.03	80.78	45.95	34.8	13.6
9	69.76	74.28	32.87	-	-
10	164.53	173.46	98.83	74.6	12.0
T = 150°C	74.012	78.575	44.936	33.6	13.9
11	100.9	107.14	61.32	45.8	13.6
12	98.08	103.95	59.44	44.5	13.2
13	39.83	42.84	24.14	18.7	16.1
14	89.5	93.88	54.58	39.3	11.1
15	128.67	136.64	77.99	58.7	13.6
16	64.98	69.24	39.36	29.9	14.3
17	43.21	46.84	26.15	20.7	17.5
18	73.55	77.67	44.92	32.8	12.6
19	49.44	52.2	30.01	22.2	12.4
20	51.96	55.35	31.45	23.9	14.2
T = 300°C	80.178	85.64	48.796	36.8	15.0
21	82.83	89.28	50.69	38.6	16.7
22	111.46	119.47	67.64	51.8	15.5
23	67.14	71.64	40.83	30.8	14.6
24	39.13	42.61	23.66	19.0	18.4
25	61.73	66.41	37.32	29.1	16.1
26	65.26	70.53	39.71	30.8	17.1
27	92.16	97.86	56.13	41.7	13.7
28	109.58	116.44	66.99	49.5	13.9
29	55.16	57.97	33.84	24.1	11.6
30	117.33	124.19	71.15	53.0	12.9
T = 450°C	50.731	55.241	31.18	24.1	18.8
31	31.35	33.69	19.19	14.5	16.1
32	46.06	49.47	28.37	21.1	16.2
33	39.9	44.35	24.61	19.7	22.5
34	45.18	48.67	27.78	20.9	16.7
35	82.58	90.11	50.83	39.3	19.2
36	52.21	56.64	31.76	24.9	17.8
37	27.63	30.56	17.07	13.5	21.7
38	85.97	93.9	53.2	40.7	19.5
39	36.37	40.5	22.12	18.4	22.5
40	60.06	64.52	36.87	27.7	16.1

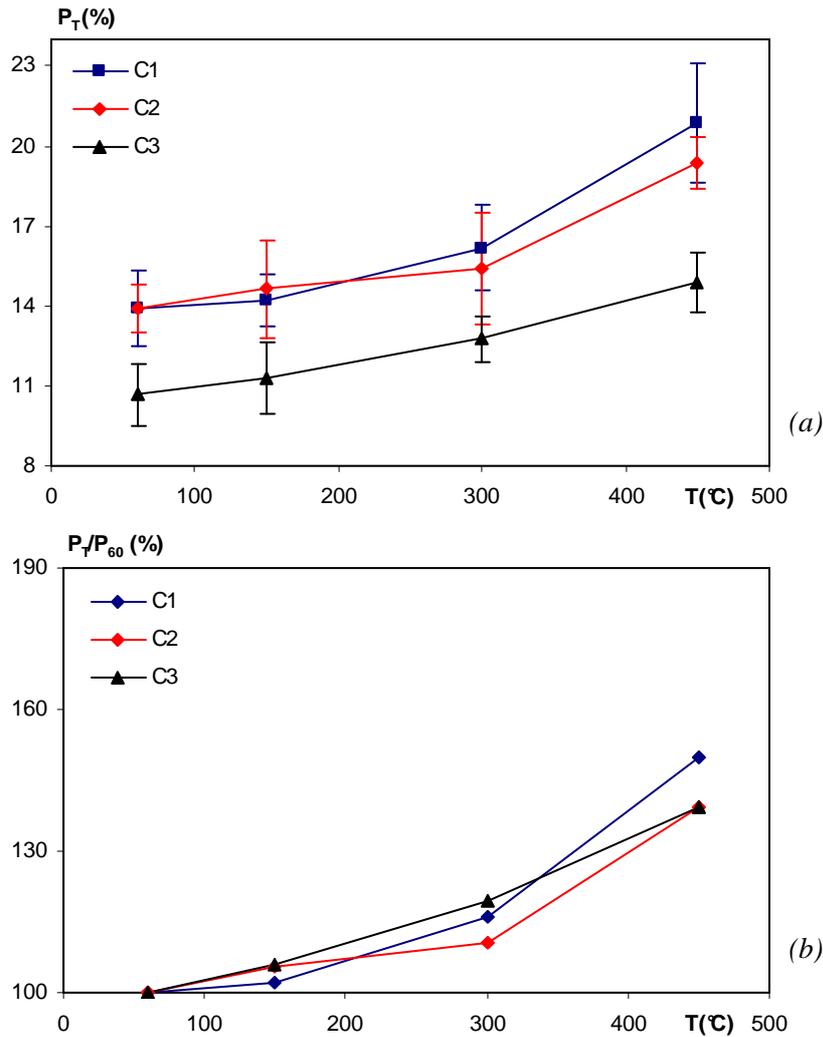


figure 3.3. Evolution de la porosité absolue (a) et porosité relative (b) des bétons sans fibres en fonction de la température du cycle de chauffage-refroidissement.

Entre 60°C et 300°C, la porosité relative augmente de 16% en moyenne pour tous les bétons et au-delà de cette température (300°C), on remarque une augmentation plus importante pour les bétons ordinaires. A 450°C, pour le béton C1, la porosité relative s'est accrue de 34 % par rapport au palier de 300°C tandis que pour le béton C3, l'augmentation est de 20%. Cette évolution ne suit pas la cinétique de la perte de masse. En effet, cette dernière augmente rapidement jusqu'à 300°C puis ralentit au-delà. On peut supposer que la porosité générée par le départ de l'eau liée chimiquement est une porosité de faible dimension. Elle n'est pas totalement accessible à l'eau et donc pas entièrement mesurable par cette technique.

Au-delà de 300°C, l'augmentation de porosité est majoritairement liée à l'ouverture de microfissures engendrée par la dilatation pâte-granulat puisqu'une grande partie de l'eau chimiquement liée est déjà partie. Cette porosité de taille plus importante et pouvant s'organiser en réseau est plus facilement quantifiable par la technique de mesure à l'eau. 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 » (front de vaporisation) décrit par certains auteurs comme facteur d'instabilité thermique du béton. Quelle que soit la température considérée, la porosité du BO est supérieure à celle du BHP.

Noumowé et al. [Noum, 1996] ont montré aussi une augmentation de la porosité au mercure à 300°C avec un accroissement de la taille des pores. Pour Ye et al. [Ye, 2007], 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 de Hager [Hager, 2004] confirment l'augmentation de la porosité en fonction de la température. Cependant, Hager 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. [Kali, 1998], 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.

3.3 Evolution des propriétés mécaniques résiduelles en fonction du chauffage

Les propriétés mécaniques des trois familles de bétons sans fibres sont déterminées à la température ambiante et aussi après les cycles de chauffage-refroidissement. Les propriétés mécaniques étudiées sont la résistance en compression, la résistance en traction par flexion et le module d'élasticité. L'effet de la sollicitation thermique sur ces caractéristiques mécaniques est ainsi déterminé.

3.3.1 Résistance en compression

Le tableau 3.6 présente les résultats de résistances en compression résiduelle et relative (en pourcentage et normalisée par rapport à la valeur initiale obtenue à la température ambiante) pour les bétons sans fibres étudiés.

tableau 3.6 Résistance en compression des bétons sans fibres.

Bétons	Unités	Températures (°C)				
		20	150	300	450	600
C1	MPa	36.5	32.4	35.4	17.6	5.0
	Ecart type	0.9	1.4	2.1	1.8	0.6
	(%)	100	89	97	48	14
C2	MPa	46.0	36.9	40.1	20.3	5.3
	Ecart type	2.2	0.9	4.1	0.4	0.6
	(%)	100	80	87	44	12
C3	MPa	70.2	62.6	59.6	26.9	9.3
	Ecart type	0.5	3.0	3.6	1.7	0.9
	(%)	100	89	85	38	13

La figure 3.4 montre l'évolution de la résistance résiduelle en compression en fonction de la température.

Pour tous les bétons étudiés, la résistance en compression diminue avec l'augmentation de la température. A toutes les températures, la résistance du BHP (béton C3) reste supérieure à celle du BO (C1). Les trois bétons montrent une faible diminution de la résistance entre les températures 20°C et 300°C. Pour le BO (C1) la perte de résistance relative est de 4% tandis que pour le BHP (C3) la perte est de 15%. De la température ambiante à la température de 150°C, les résistances des bétons C1 et C2 diminuent. A la température de 300°C, on constate un gain de résistance de 7% pour les deux bétons.

Sous l'effet de l'augmentation de la température, l'eau se dilate. Cette dilatation thermique de l'eau provoque un écartement des feuillets du gel C-S-H. Cet écartement entraîne une diminution des forces d'attraction entre les feuillets et engendre la naissance de microfissures occasionnant une diminution de la résistance des bétons jusqu'à 150°C [Khou, 1992].

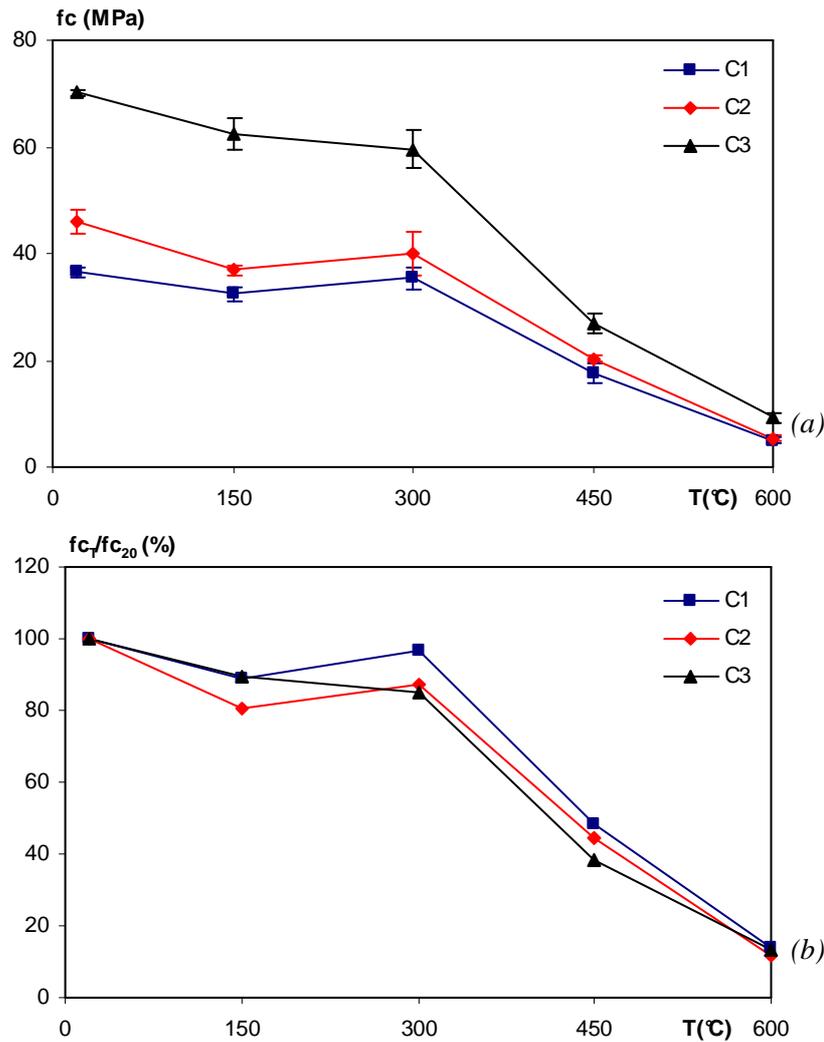


figure 3.4. Evolution de la résistance résiduelle (a) et relative (b) en compression des bétons sans fibres en fonction de la température du cycle de chauffage-refroidissement.

Puis, avec le chauffage, l'eau liquide devient eau vapeur et arrive à s'échapper du béton. Le gain de résistance, à la température 300-350°C, est dû au départ de l'eau permettant une réaugmentation des forces d'attraction et le rapprochement des feuillettes de C-S-H [Dias, 1990]. Pour le BHP (C3), on n'observe pas de gain de résistance autour de la température 300°C. Le BHP étant caractérisé par une faible teneur en eau et une forte compacité, cette reprise de résistance peut être retardée [Pimi, 2000]. Pour les trois bétons étudiés, la perte de résistance obtenue varie de 11 à 20% à 150°C. Les travaux menés par Pimienta et al. [Pimi, 2000] dans le cadre du projet national BHP 2000 montrent une perte de résistance en compression variant de 15 à 30% à une température de 120°C.

Au-delà de la température 300°C, la résistance résiduelle en compression décroît plus rapidement. A la température 450°C, tous les bétons perdent plus de 50% de leur résistance initiale. Cette perte varie suivant le béton : 62% pour le BHP et 52% pour le BO. On remarque donc que le BHP perd plus de résistance relative que le BO.

L'exposition à une haute température entraîne un affaiblissement de la matrice cimentaire due aux différentes réactions physico-chimiques, et éventuellement une décomposition des granulats. La redistribution des contraintes internes de la matrice vers les granulats est plus importante dans les BHP que dans les BO [Died, 1989]. Elle engendre une diminution plus importante des résistances relatives des BHP.

A la température 600°C, la perte de résistance résiduelle est similaire pour tous les bétons. Les résistances obtenues après chauffage sont toutes inférieures à 10 MPa quel que soit le rapport E/C. Cette forte baisse de résistance suppose l'endommagement du matériau dû à la dégradation de la matrice cimentaire et aussi à la désagrégation des granulats.

A travers l'ensemble des résultats, nous pouvons regrouper le comportement en compression selon deux domaines comme l'ont observé certains auteurs : Diederichs [Died, 1992], Phan [Phan, 2001], Kanéma [Kane, 2007]. Le premier domaine allant de la température ambiante à la température 300°C est caractérisé par une faible baisse et/ou amélioration de résistance et le second domaine au-delà de 300°C présente une importante diminution de résistance.

3.3.2 Résistance en traction par flexion

Les résultats de la résistance en traction par flexion sont présentés dans tableau 3.7.

tableau 3.7 Résistance en traction par flexion des bétons sans fibres.

Bétons	Unités	Températures (°C)				
		20	150	300	450	600
C1	MPa	3.6	2.4	2.4	1.1	0.1
	Ecart type	0.4	0.1	0.5	0.1	0.1
	(%)	100	67	68	32	5
C2	MPa	5.2	3.1	3.1	1.4	0.4
	Ecart type	0.4	0.3	0.2	0.2	0.1
	(%)	100	60	59	27	7
C3	MPa	7.3	5.4	4.6	2.8	0.7
	Ecart type	0.4	0.5	0.3	0.3	0.0
	(%)	100	74	63	38	9

La courbe de la résistance en traction en fonction de la température de chauffage (figure 3.5) montre une baisse de résistance résiduelle.

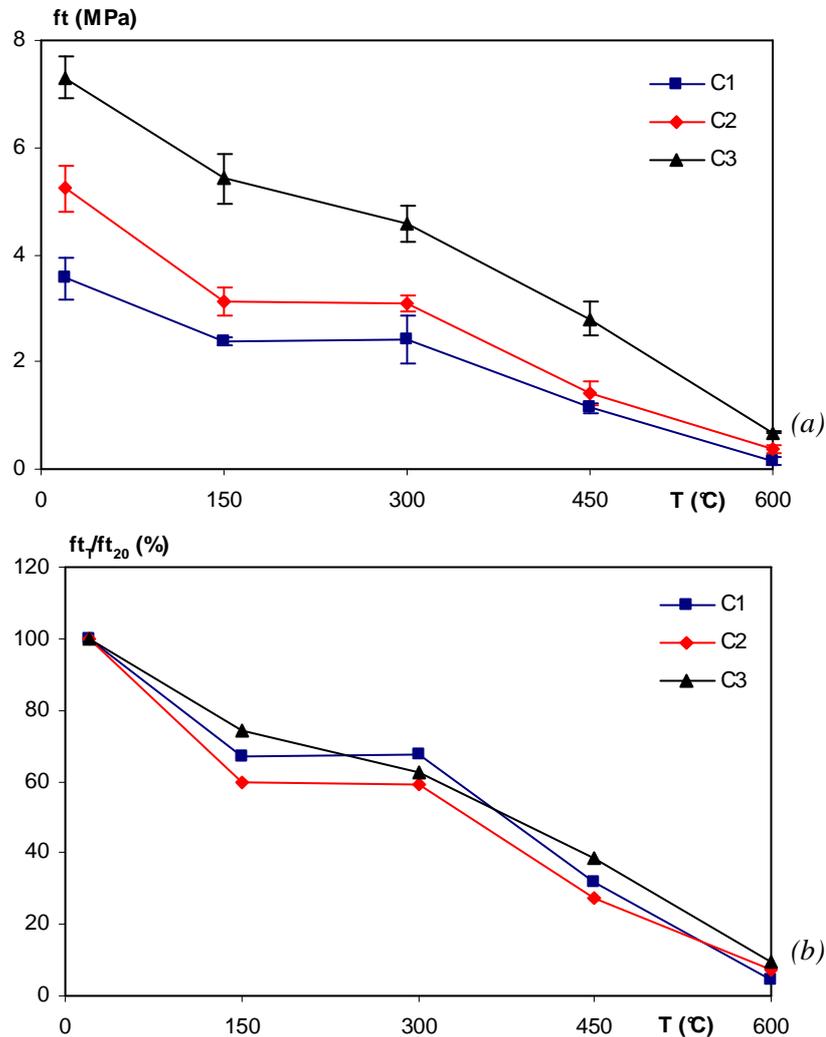


figure 3.5. Evolution de la résistance résiduelle (a) et relative (b) en traction des bétons sans fibres en fonction de la température du cycle de chauffage-refroidissement.

A 150°C, le BHP perd environ 26% de sa résistance relative tandis que le BO perd 33%. Entre les températures de 150 et 300°C, les bétons C1 et C2 ont une résistance quasiment constante contrairement au béton C3. A 300°C, on constate que le BHP (38%) perd plus de résistance que le BO (33%). Cette perte de résistance plus rapide pour le BHP est aussi relevée par d'autres auteurs comme Noumowé [Nou, 1995], Min Li [Min, 2004] et Kanéma [Kane, 2007]. Au-delà de 300°C, la baisse de résistance en traction devient plus forte et à 450°C, tous les bétons perdent plus de 60% de leur résistance initiale.

La baisse de résistance en traction est plus rapide que la baisse de résistance en compression, surtout entre les températures 20°C et 300°C.

Certains auteurs constatent une légère augmentation de la résistance en traction lors de la montée en température. Les travaux de Khoury [Khou, 1988] ont indiqué que la résistance en traction n'est pas sévèrement détériorée avec la haute température. Hager [Hage, 2004] constate même une remontée de résistance en traction pour des essais à chaud.

3.3.3 Module d'élasticité

Le tableau 3.8 résume les différentes valeurs de module d'élasticité obtenues et la figure 3.6 montre l'évolution du module d'élasticité en fonction de la température de chauffage.

tableau 3.8 Module d'élasticité des bétons sans fibres.

Bétons	Unités	Températures (°C)				
		20	150	300	450	600
C1	GPa	33.6	27.0	20.3	5.8	1.4
	Ecart	0.3	0.9	0.4	0.2	0.1
	(%)	100	81	60	17	4
C2	GPa	37.7	29.4	21.5	5.8	1.3
	Ecart	0.5	1.5	1.3	0.3	0.1
	(%)	100	78	57	15	3
C3	GPa	44.1	38.2	25.7	6.3	1.6
	Ecart	0.4	2.3	0.4	0.5	0.1
	(%)	100	87	58	14	4

Le module d'élasticité diminue sous l'effet du traitement thermique. Le comportement est similaire pour tous les bétons. D'autres auteurs comme Noumowé [Noum, 1995], Phan [Phan, 2001], Tolentino [Tole, 2002], Hager [Hage, 2004], Kanéma [Kane, 2007] ont déjà remarqué une évolution semblable du module d'élasticité pour différents bétons.

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 et l'apparition de microfissures que l'on observe sur les éprouvettes de

bétons chauffés à une température de 300°C. L'ouverture des fissures devient plus importante au-delà de cette température.

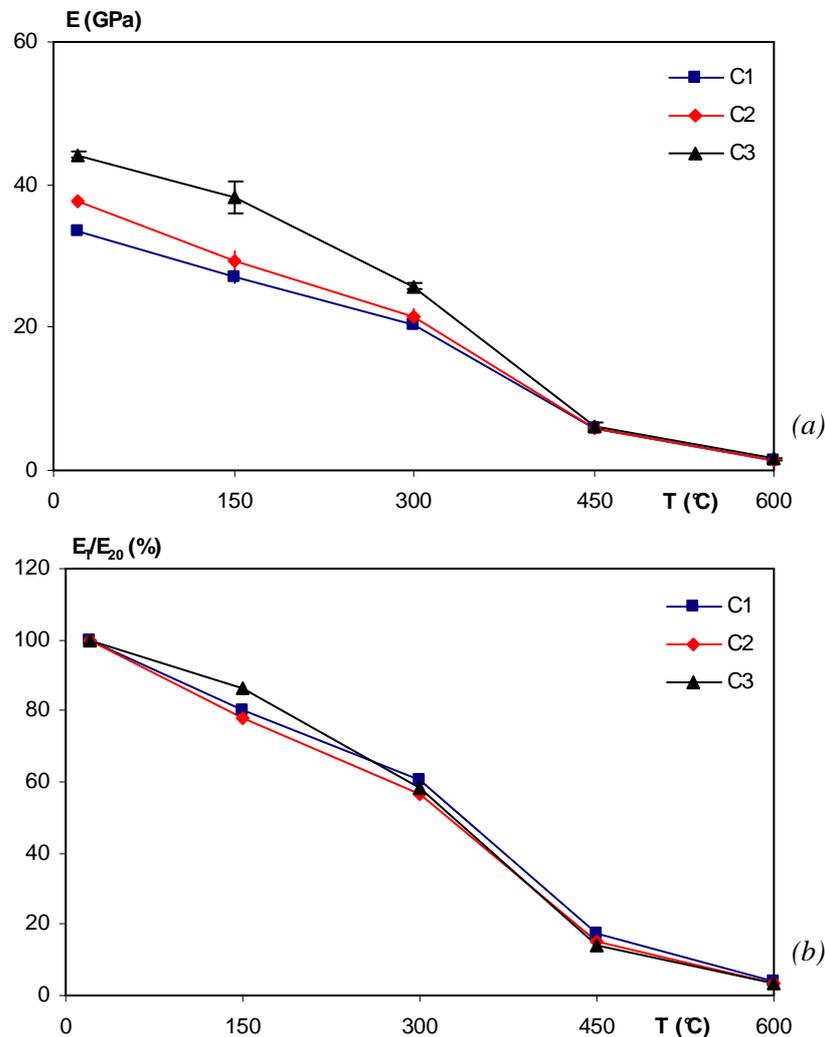


figure 3.6. Evolution du module d'élasticité résiduel (a) et relatif (b) des bétons sans fibres en fonction de la température du cycle de chauffage-refroidissement.

Au-delà de 300°C, le second domaine est caractérisé par une forte baisse du module d'élasticité jusqu'à 85% pour tous les bétons à 450°C. Phan [Phan, 2001] 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 [Kane, 2007] a trouvé une baisse de plus de 95% pour les BHP et 85% pour les autres bétons après un chauffage à 450°C. Cette forte baisse de module d'élasticité est due à l'endommagement (figure 3.7) que subissent les éprouvettes lors de la montée de température. Au-delà de la température de 450°C, la variation du module d'élasticité devient faible. A 600°C, la valeur du module d'élasticité est très faible : 1.4 GPa pour le BO et 1.6 GPa pour le BHP. Les deux valeurs sont proches l'une de l'autre et montrent que le BHP, ayant initialement une rigidité plus

grande que le BO, subit plus d'endommagement que le BO. Toutefois, quelle que soit la température d'exposition, le module d'élasticité du BO reste inférieur à celui du BHP.

La baisse du module d'élasticité est due à l'augmentation du volume poreux dans la matrice cimentaire et aussi à la fissuration de la zone d'interface pâte-granulats. La figure 3.7 montre sur le béton C3 une fissuration de la zone d'interface pâte-granulat, une fissuration de certains granulats (silex) et des fissurations dans le mortier du béton C3. Dans les bétons testés, la fissuration peut aussi être intra granulaire.

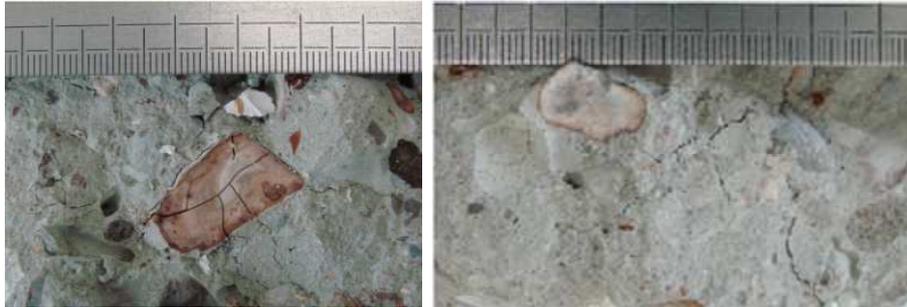


figure 3.7. Faciès de rupture observé au sein du béton C3 après le cycle de chauffage-refroidissement de 600°C

3.4 Relation entre porosité et résistance en compression

La résistance en compression du béton dépend du volume de vide présent. Plus le matériau est poreux, moins il est résistant. Certains auteurs ont défini des relations entre la porosité et la résistance en compression du béton. Roßler et Odler [Robl, 1985] ont montré pour des séries de bétons avec des rapports E/C différents que pour les porosités comprises entre 5 et 28%, les équations définies par Balshin (E1), Ryshkevich (E2), Schiller (E3) et Hasselmann (E4) sont utilisables. Les résultats exponentiels de Ryshkevich ont semblé adaptés [Kean, 2002].

$$f_c = f_{c,o} \cdot (1 - p)^n \quad (\text{E1})$$

$$f_c = f_{c,o} \cdot (e^{-k \cdot p}) \quad (\text{E2})$$

$$f_c = k_s \cdot \ln\left(\frac{p_o}{p}\right) \quad (\text{E3})$$

$$f_c = f_{c,o} - k_h \cdot p \quad (\text{E4})$$

f_c : résistance en compression pour une porosité p ,

$f_{c,o}$: résistance en compression pour une porosité nulle,

p_o : porosité pour une résistance en compression nulle,

n, k, k_s, k_h : valeurs à déterminer.

En regroupant les résultats de la porosité et de la résistance en compression de tous nos bétons sans fibres en fonction de la température (figure 3.8), les valeurs obtenues pour les différents coefficients des équations de Schiller, Hasselmann et Ryshkevich sont :

$k_s = 78,39$	$p_o = 24,408 \%$	avec	$R^2 = 0,840$	(Schiller)
$f_{c,o} = 274 \text{ MPa}$	$k = 0,1346$	avec	$R^2 = 0,866$	(Ryshkevich)
$f_{c,o} = 114,11 \text{ MPa}$	$k_h = 4,969$	avec	$R^2 = 0,786$	(Hasselmann)

L'équation proposée par Ryshkevich présente le mieux cette corrélation.

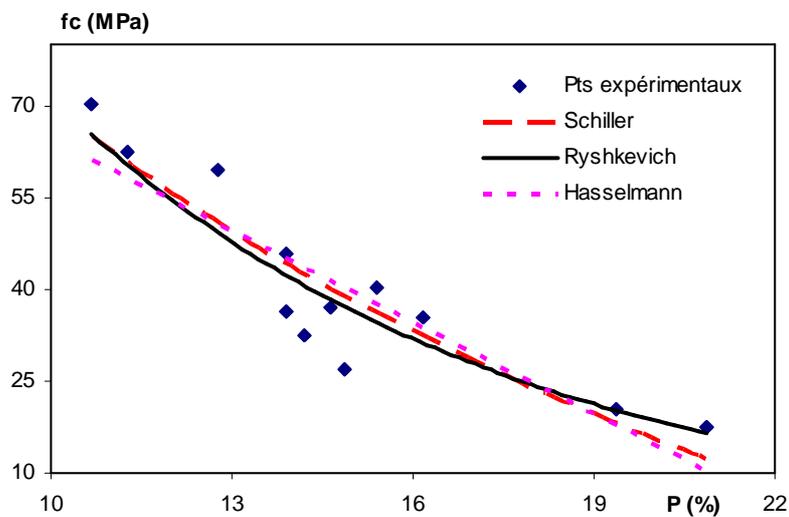


figure 3.8. Résistance résiduelle en compression en fonction de la porosité des bétons sans fibres.

Les résultats obtenus par Hager [Hage, 2004] sur la relation entre la porosité et la résistance en compression donnent :

$$f_{c,o} = 221 \text{ MPa}, k = 0,147 \text{ et } R^2 = 0,822$$

Nos résultats sont proches de cette relation.

3.5 Conclusion sur le comportement des bétons sans fibres

Les essais réalisés sur des éprouvettes de bétons ordinaires et de bétons à hautes performances montrent une dégradation et une baisse des propriétés résiduelles lors de la montée en température.

Les résultats de pesée des éprouvettes avant et après chaque cycle de chauffage montrent une diminution de la masse du béton avec l'augmentation de la température. Le BO perd plus de matière que le BHP. Cette diminution de masse se résume en trois

domaines. Le premier domaine, allant de la température ambiante à 150°C, marque le départ de l'eau libre. On note une faible perte de masse. Le second domaine de la température 150°C à 300°C présente une grande perte de matière liée au départ de l'eau contenue dans les hydrates. Au-delà de la température de 300°C marquant le début du troisième domaine, nous observons une faible perte de masse. Le taux de perte de masse est le même pour les trois familles de béton.

Les propriétés mécaniques résiduelles des éprouvettes ont aussi été déterminées. Nous constatons une perte importante des résistances en compression, en traction et du module d'élasticité à la température de 600°C. Les courbes d'évolution de résistance en fonction de la température de chauffage amènent à scinder le comportement mécanique en deux domaines. Le premier domaine, allant de la température ambiante à 300°C, est caractérisé par une faible baisse ou une amélioration de la résistance. Le second domaine, au-delà de 300°C, est marqué par une importante perte de résistance. Les éprouvettes issues d'un cycle de chauffage - refroidissement à 600°C présentent de très faibles résistances. De nombreuses fissures sont observées sur la surface des éprouvettes. La détermination des températures à la surface et au centre des éprouvettes montre l'existence d'un gradient thermique. Ce gradient thermique atteint sa valeur maximale entre les températures de surface de 300°C et 350°C lors de la montée en température. Le fort gradient thermique pourrait engendrer des contraintes thermiques à l'origine de la baisse de résistance.

Durant les différents cycles de chauffage-refroidissement, aucun éclatement d'éprouvette n'a été enregistré. La stabilité thermique des éprouvettes de béton n'a pas été mise à défaut dans ces conditions expérimentales. Un autre mode de conservation sera testé à un autre âge du béton dans le chapitre suivant pour étudier leur impact sur la stabilité thermique du béton. De plus, l'influence des fibres de polypropylène sur le comportement du béton porté à une température élevée constituera l'objectif principal de ce chapitre.

Chapitre 4 - COMPORTEMENT DES BETONS DE FIBRES DE POLYPROPYLENE

4.1 Introduction

L'étude de l'influence des fibres de polypropylène sur le comportement du béton porté à haute température fait l'objet de ce chapitre. Deux familles de bétons de fibres sont fabriquées. Il s'agit des bétons CP2 et CP3 de rapports E/C respectifs 0.45 et 0.30. Ces deux familles de bétons sont issues des compositions des bétons C2 et C3 auxquelles l'on ajoute trois dosages de fibres de polypropylène : 1.0, 1.5 et 2.0 kg/m³ (correspondant à une fraction volumique respective de 0.11, 0.17 et 0.22%). Les différentes éprouvettes confectionnées à partir de ces formulations de bétons sont conservées et testées au bout de quatre vingt dix jours.

4.2 Etude de la stabilité thermique

L'objectif de cette première partie est d'analyser l'influence des fibres de polypropylène, selon leur pourcentage volumique, sur la stabilité thermique des bétons à hautes performances. Aucun éclatement n'a été observé sur les bétons C3 conservés dans des sacs plastiques. Nous avons donc choisi de mener cette étude sur des éprouvettes présentant un état hydrique à priori plus défavorable. Cette étude est donc réalisée sur des éprouvettes de BHP issues des compositions C3, CP3-1, CP3-1.5 et CP3-2. L'essai consiste à étudier la stabilité thermique de ces bétons à l'état saturé. Les éprouvettes sont soumises au cycle de chauffage-refroidissement de 600°C, avec une vitesse de chauffage de 1°C.mn⁻¹.

Le test est réalisé, pour chaque composition de béton, sur six éprouvettes cylindriques 16 x 32 cm dont deux éprouvettes sont équipées d'un thermocouple au centre. Les éprouvettes sont démoulées au bout de vingt quatre heures. Elles sont pesées puis immergées dans l'eau. Au bout de vingt huit jours, les éprouvettes sont sorties de l'eau et nettoyées avec un linge propre et sec puis pesées. Laissées à l'air libre pendant quatre heures de temps, elles sont ensuite disposées dans le four pour le chauffage à 600°C. Le tableau 4.1 regroupe l'ensemble des masses moyennes des éprouvettes (quatre) sans thermocouple avant et après immersion ainsi que les masses avant et après chauffage avec la perte de masse équivalente.

tableau 4.1 Masses des éprouvettes de bétons avant et après immersion et chauffage à 600°C.

Bétons	Masse avant immersion (kg)	Masse après immersion (kg)	Eau Absorbée (kg)	Masse après cycle à 600°C (kg)	Perte de masse (kg)	Perte de masse (%)	
						Moy.	Ecart
C3	15.44	15.50	0.06	14.27	1.20	7.8	0.1
CP3-1	15.41	15.46	0.05	14.24	1.23	7.9	0.1
CP3-1.5	15.36	15.40	0.04	14.18	1.22	7.9	0.3
CP3-2	15.31	15.36	0.06	14.09	1.27	8.3	0.0

Après le cycle de chauffage-refroidissement de 600°C, un éclatement (25% des éprouvettes sans thermocouple) d'éprouvettes de béton C3 est observé. La figure 4.1 (a) montre la dispersion des morceaux dans le four. Cet éclatement est tellement violent qu'une partie d'éprouvette a été retenue par la porte du four. Ce morceau s'est retrouvé à environ 105 cm de sa position initiale. L'éclatement de l'éprouvette a eu lieu à une température de surface avoisinant 305°C. La reconstitution de l'éprouvette éclatée à partir des morceaux résiduels (figure 4.1 (b)) amène à conclure que la rupture de l'éprouvette s'est faite à partir du centre. La périphérie est rompue en plusieurs morceaux de bétons tandis que le centre s'est désintégré.



figure 4.1. Eclatement d'éprouvette de béton C3 conservée dans l'eau (a) et reconstitution de l'éprouvette à partir des morceaux résiduels (b).

La mesure de pression de vapeur dans le béton effectuée par Kalifa et al. [Kali, 2000] montre une forte pression de 38 bars pour un béton à hautes performances de résistance en compression de 91.8 ± 0.8 MPa. Les calculs thermo-hydriques et mécaniques effectués par Kanéma et al. [Kane, 2007(b)] et de Morais et al. [Mora, 2009] montrent le

développement d'une forte pression de vapeur accompagnée de valeurs élevées de contraintes d'origine thermique au centre de l'éprouvette autour d'une température de surface de 300°C. Les contraintes de traction au centre de l'éprouvette dépassent la résistance en traction du béton expliquant ainsi le mode de rupture observé.

Les éprouvettes issues de la même composition de béton C3 testées à 90 jrs (conservés dans des sacs étanches) ne présentent pas d'éclatement. La présence de l'eau libre joue un rôle important dans le béton soumis à une température élevée comme l'ont remarqué Bazant [Baza, 1978], Kalifa et al. [Kali, 2000], Hager [Hage, 2004] et d'autres auteurs.

Avec l'addition des fibres de polypropylène dans la composition du béton C3 (conservés dans l'eau et testés au bout de vingt huit jours), aucun éclatement n'a été enregistré. Les résultats montrent le rôle positif que jouent les fibres de polypropylène dans le béton. Elles augmentent la stabilité thermique du béton même à une proportion volumique de 0.11% pour les bétons étudiés.

Dans la suite de notre étude, les propriétés physiques et mécaniques des bétons de fibres de polypropylène après chauffage seront déterminées sur des éprouvettes ayant été conservées comme décrit dans le programme expérimental.

4.3 Evolution des propriétés physiques en fonction du chauffage

4.3.1 Différence de température entre la surface et le centre de l'éprouvette

Des thermocouples noyés au centre des éprouvettes cylindriques 16 x 32 cm et d'autres posés sur la surface ont permis de déterminer l'évolution de la différence de température des bétons contenant des fibres de polypropylène. La figure 4.2 montre l'évolution de la différence de température entre la surface et le centre des éprouvettes de bétons C2 - CP2 (a) et C3 - CP3 (b).

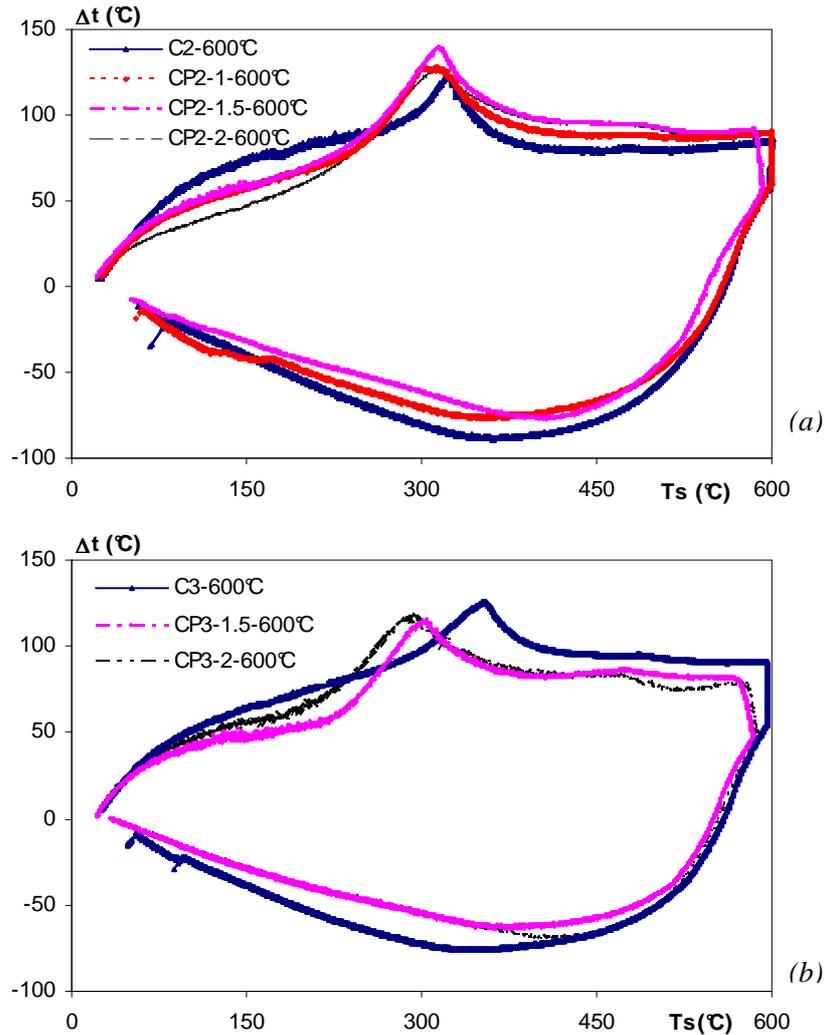


figure 4.2. Evolution de la différence de température en fonction de la température de surface de bétons avec et sans fibres de polypropylène.

Comme pour les bétons sans fibres, la mesure de température est réalisée sur les cycles de chauffage-refroidissement de 300°C, 450°C et 600°C. La figure n'illustre que la variation de la différence de température pour le cycle de chauffage-refroidissement de 600°C. On note un léger décalage du pic de différence de température en présence des fibres de polypropylène vers des températures plus basses et ce pic est plus visible sur le BHP (C3) que sur le BO (C2). Le pic s'observe toutefois après la fusion du polypropylène (160-165°C) et avant la température de vaporisation des fibres de polypropylène (340°C).

Le tableau 4.2 regroupe les valeurs maximales des différences de température, des gradients thermiques et la température de surface correspondante des bétons CP2 et CP3.

tableau 4.2 Différence de température et gradient thermique maximaux des bétons avec et sans fibres de polypropylène.

Bétons	ΔT_{\max} (°C)	$\frac{\Delta T_{\max}}{\Delta r}$ (°C.cm ⁻¹)	T_{surf} (°C)			
CP2-1	132	16.5	311			
CP2-1.5	139	132	17.4	16.6	315	312
CP2-2	126	15.8	311			
C2	123	15.4	324			
CP3-1	137	-	17.1	-	323	-
CP3-1.5	118	119	14.8	14.9	305	300
CP3-2	119	14.9	295			
C3	127	15.9	340			

Une baisse de la température de surface correspondant à la différence maximale de température est remarquée pour les deux groupes de bétons. La température de surface moyenne des bétons CP2 est de 312°C (C2: 324°C) et celle des bétons CP3 est de 300°C (C3: 340°C) lorsqu'apparaît le pic de différence de température. L'évolution de la différence de température varie peu en fonction du dosage en fibres de polypropylène.

Avec le BO (C2), nous observons une légère supériorité de la différence de température des bétons fibrés par rapport aux bétons non fibrés. Les différences de température maximales atteintes par les bétons C2 et CP2 sont respectivement de 123°C et 132 °C. Quant au BHP (C3), c'est le phénomène contraire qui se dessine. Une baisse moyenne de la différence de température maximale de l'ordre de 8°C est remarquée avec l'ajout de 1.5 kg/m³ et 2.0 kg/m³ de fibres de polypropylène. Cette différence de température maximale s'accompagne d'une baisse de la température de surface d'apparition du pic. Celle-ci pour les bétons C3 et CP3 est respectivement de 340°C et 300°C. Les températures au centre correspondantes sont de 213°C et 181°C. La baisse des températures d'apparition du pic et de la différence de température entre la surface et le centre des éprouvettes de béton CP3 est beaucoup plus importante que celle des bétons CP2. Les bétons CP3, caractérisés par un faible rapport E/C, ont une forte densité. La fusion des fibres de polypropylène a plus d'influence sur l'augmentation de la porosité d'un BHP par rapport à celle d'un BO, comme le montreront les résultats de porosité et des caractéristiques mécaniques résiduelles. Pour la formulation CP3-1, nous remarquons une augmentation du gradient thermique même par rapport au béton sans fibres (figure 4.2). Ce phénomène peut être lié aux conditions de mise en œuvre des éprouvettes.

Dans une étude précédente [Noum, 2003], les différences de température de bétons à hautes performances avec et sans fibres de polypropylène de rapport eau/liant de 0.30 ont montré une baisse de cette différence de température lorsqu'on ajoute 2 kg/m^3 de fibres de polypropylène. Les essais ont été réalisés sur des éprouvettes cylindriques de dimensions $16 \times 32 \text{ cm}$ soumises au cycle de chauffage-refroidissement de 200°C à une vitesse de chauffage de 1°C.mn^{-1} . La différence de température maximale relevée était respectivement de 92°C et 72°C pour les bétons sans fibres et les bétons contenant les fibres de polypropylène. Nos mesures corroborent ces premiers résultats mais la baisse de différence de température n'est pas autant élevée. Cette différence peut être liée à l'âge du béton qui était de trente jours tandis que nos bétons ont été testés au bout de quatre vingt dix jours.

L'analyse de la différence de température des bétons contenant des fibres de polypropylène montre une évolution identique à celle du béton sans fibres. Entre les températures 65°C et $260^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$, les valeurs de la différence de température (ou gradient thermique) des bétons fibrés restent inférieures à celles des bétons non fibrés pour les deux compositions. La formation de micropores entre les fibres et la pâte de ciment / granulats et la fusion des fibres autour de $160\text{-}165^\circ\text{C}$ créent des chemins facilitant le transfert de flux qui engendre cette baisse de différence de température. Le rapport E/C du béton joue aussi un rôle important dans le comportement des bétons de fibres. En fondant, les fibres présentent une augmentation de volume. Dans le béton ordinaire, la porosité plus importante laisse pénétrer une grande partie de la fibre. Dans les BHP, la porosité plus fine ne laisse pas pénétrer la fibre fondue, ce qui entraîne des contraintes à l'origine de fissurations. La présence des fibres de polypropylène a plus d'impact sur les bétons à faible rapport E/C.

4.3.2 Perte de masse

Comme dans le cas des bétons sans fibres, la pesée de quatre éprouvettes avant et après chaque cycle de chauffage-refroidissement a permis d'étudier l'évolution de la perte de masse des bétons de fibres de polypropylène en fonction de la température de chauffage. Le tableau 4.3 regroupe les pertes de masse moyenne en pourcentage des compositions de bétons.

tableau 4.3 Perte de masse moyenne des bétons avec et sans fibres de polypropylène.

Bétons	Mesures	Cycles de chauffage - refroidissement			
		150°C	300°C	450°C	600°C
C2	Perte (%)	2.5	6.0	7.0	8.1
CP2-1	Perte (%)	2.1	6.1	7.1	8.4
	Ecart type	0.3	0.2	0.2	0.1
CP2-1.5	Perte (%)	2.0	5.9	7.0	8.4
	Ecart type	0.1	0.1	0.2	0.2
CP2-2	Perte (%)	2.2	6.1	7.3	8.5
	Ecart type	0.1	0.1	0.2	0.1
C3	Perte (%)	1.1	4.8	6.1	7.2
CP3-1	Perte (%)	1.5	4.9	6.3	7.6
	Ecart type	0.1	0.1	0.2	0.2
CP3-1.5	Perte (%)	1.4	4.6	6.1	7.3
	Ecart type	0.1	0.1	0.2	0.2
CP3-2	Perte (%)	1.5	4.9	6.4	7.3
	Ecart type	0.1	0.1	0.1	0.1

Les figures 4.3 et 4.4 illustrent l'évolution de la perte de masse des bétons CP2 et CP3 pour les différents dosages en fibres. L'ajout des fibres de polypropylène ne modifie pas l'allure de la courbe d'évolution de la perte de masse. Les trois domaines observés pour les bétons ne contenant pas de fibres se retrouvent pour les bétons avec les fibres de polypropylène.

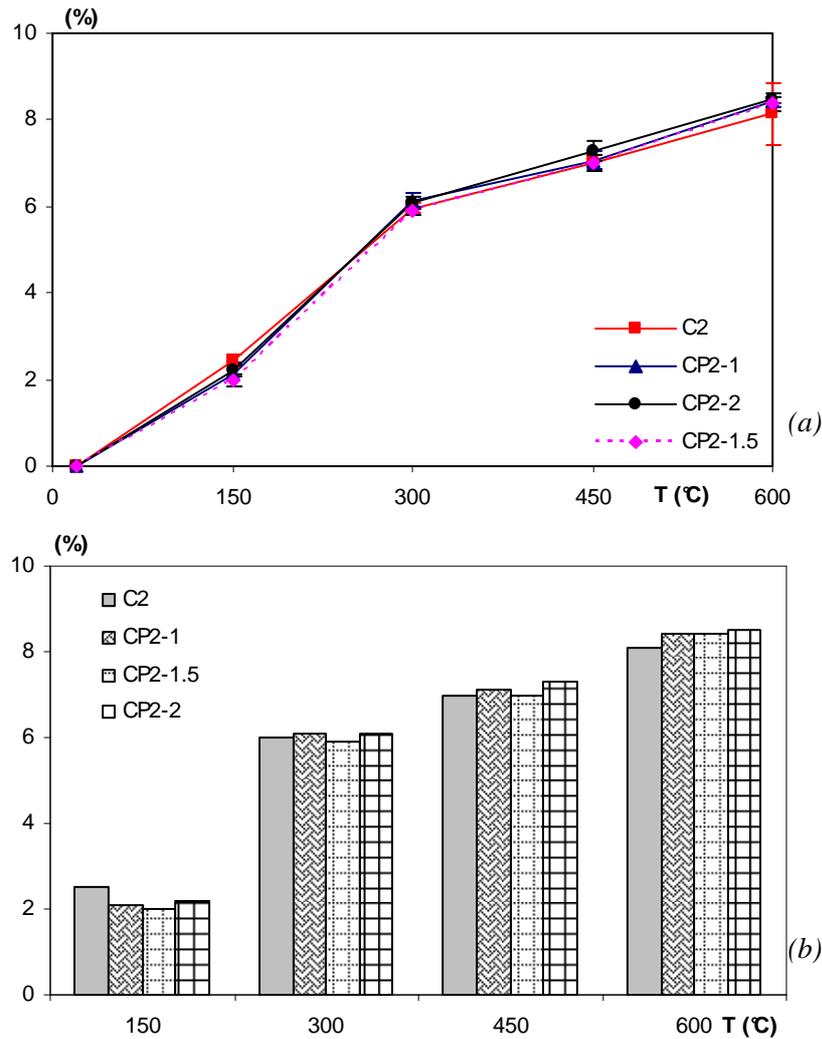


figure 4.3. Evolution de la perte de masse des bétons C2 et CP2 en fonction de la température du cycle de chauffage-refroidissement.

Nous remarquons pour les bétons de fibres de polypropylène une augmentation de la perte de masse légèrement supérieure à celle des bétons sans fibres. Après le cycle de chauffage-refroidissement de 600°C, la perte de masse des bétons C2 est de 8.1% tandis que la perte moyenne des bétons CP2 est de 8.4%. A la même température, le béton C3 perd 7.2% de sa masse initiale tandis que les bétons CP3 perdent en moyenne 7.4%. Les proportions massiques des fibres de polypropylène utilisées dans le béton sont 0.04%, 0.06 et 0.08%. La différence de perte de masse entre les bétons sans fibres et les bétons de fibres de polypropylène est de 0.2 à 0.3%, valeur largement supérieure aux taux de fibres dans les bétons. La vaporisation partielle ou totale des fibres n'explique pas à elle seule la perte de masse supplémentaire. La forte densité des fissures observées sur la surface des éprouvettes comme l'illustre la figure 4.5 pourrait être à l'origine de cette perte de masse supplémentaire. Ces ouvertures de fissures pourraient en effet s'accompagner de perte de matière qui influencerait sur la perte de masse totale de l'éprouvette.

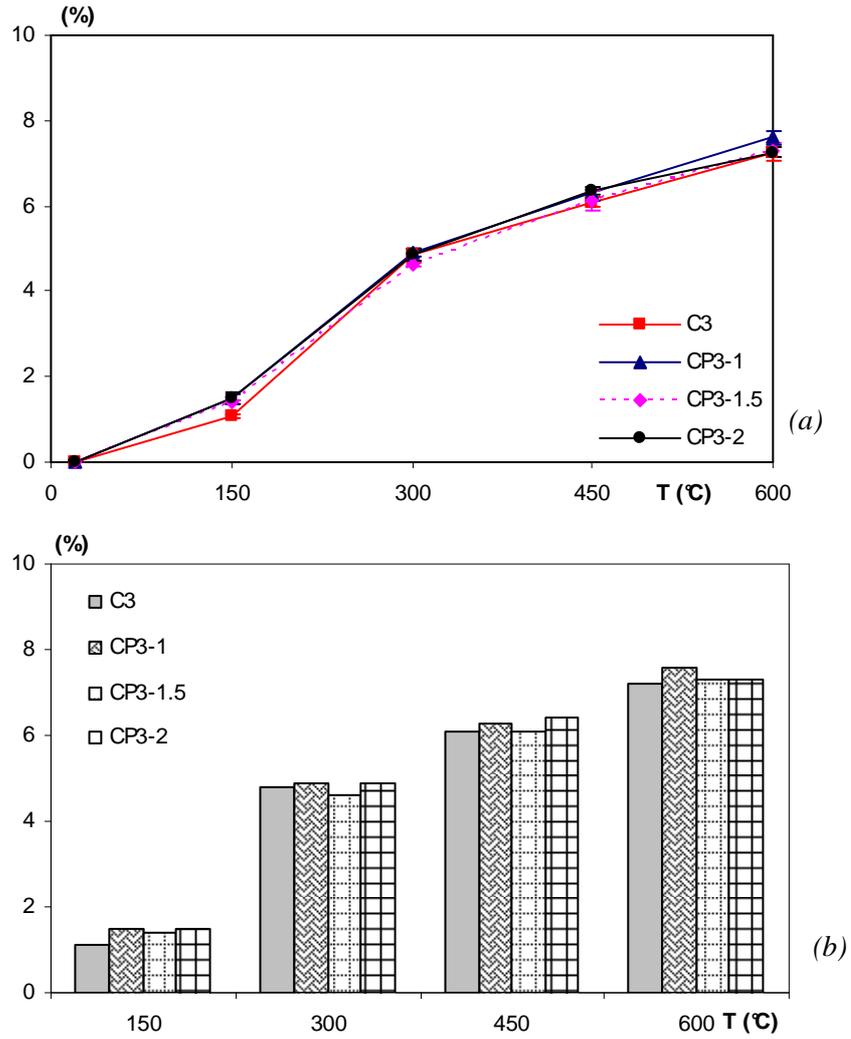


figure 4.4. Evolution de la perte de masse des bétons C3 et CP3 en fonction de la température du cycle de chauffage-refroidissement.

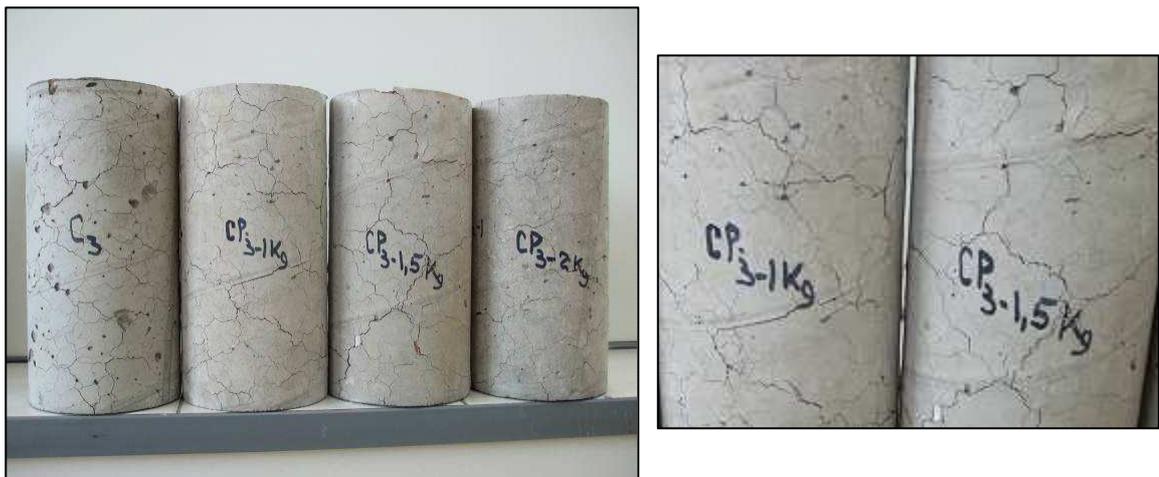


figure 4.5. Eprouvettes de bétons C3 et CP3 à la suite du cycle de chauffage-refroidissement de 600°C.

L'analyse de perte de masse au cours du chauffage effectuée par Hager [Hager, 2004] sur des bétons a conduit à une différence plus importante de perte de masse entre le béton sans fibre et le béton avec fibres. La perte de masse du béton M100 sans fibres au chauffage à 600°C était de 3.75%. Avec les dosages en fibres de polypropylène de 0.9 kg/m³ et 1.75 kg/m³, les pertes de masse de ces bétons étaient respectivement de 4.42% et 4.44%. Une augmentation de la cinétique de perte de masse des bétons fibrés avait donc été constatée par l'auteur.

La différence de perte de masse en fonction de la variation de la teneur en fibres n'est pas significative compte tenu des écarts types des résultats.

4.3.3 Evolution de la porosité

Les porosités obtenues par pesée hydrostatique pour tous les bétons de fibres de polypropylène sont reportées dans le tableau 4.4. Les figures 4.6 et 4.7 illustrent l'évolution de la porosité des bétons C2 et C3 contenant des fibres de polypropylène en fonction de la température de chauffage.

La porosité initiale varie peu avec l'ajout des fibres de polypropylène (figure 4.6 et figure 4.7 (a)). A la température 60°C, les porosités des bétons C2 et C3 sans fibres sont respectivement de 13.9% et 10.7%. Les bétons CP2-1.5 et CP3-1.5, avec des fibres de polypropylène, ont des porosités respectives de 13.1% et 10.1%.

tableau 4.4 Porosité moyenne des bétons avec et sans fibres de polypropylène.

T (°C)	Bétons	Porosité		
		(%)	Ecart type	Relative
60	C2	13.9	0.9	100
	CP2-1	12.9	2.1	100
	CP2-1.5	13.1	0.6	100
	CP2-2	14.0	0.9	100
	C3	10.7	1.2	100
	CP3-1	10.4	2.0	100
	CP3-1.5	10.1	1.2	100
	CP3-2	12.2	1.2	100
150	C2	14.6	1.8	105
	CP2-1	13.5	0.9	105
	CP2-1.5	14.7	1.9	113
	CP2-2	15.2	1.6	108
	C3	11.3	1.4	106
	CP3-1	11.6	1.6	112
	CP3-1.5	11.8	1.2	117
	CP3-2	13.7	1.9	112
300	C2	15.4	2.1	111
	CP2-1	15.8	1.2	123
	CP2-1.5	16.7	1.6	128
	CP2-2	18.6	1.4	132
	C3	12.8	0.9	120
	CP3-1	13.3	1.5	128
	CP3-1.5	15.3	1.5	158
	CP3-2	18.7	1.3	153
450	C2	19.4	1.0	139
	CP2-1	19.7	1.7	153
	CP2-1.5	19.8	1.8	151
	CP2-2	21.3	1.6	152
	C3	14.9	1.1	139
	CP3-1	16.4	1.9	158
	CP3-1.5	19.2	2.0	190
	CP3-2	20.5	1.3	167

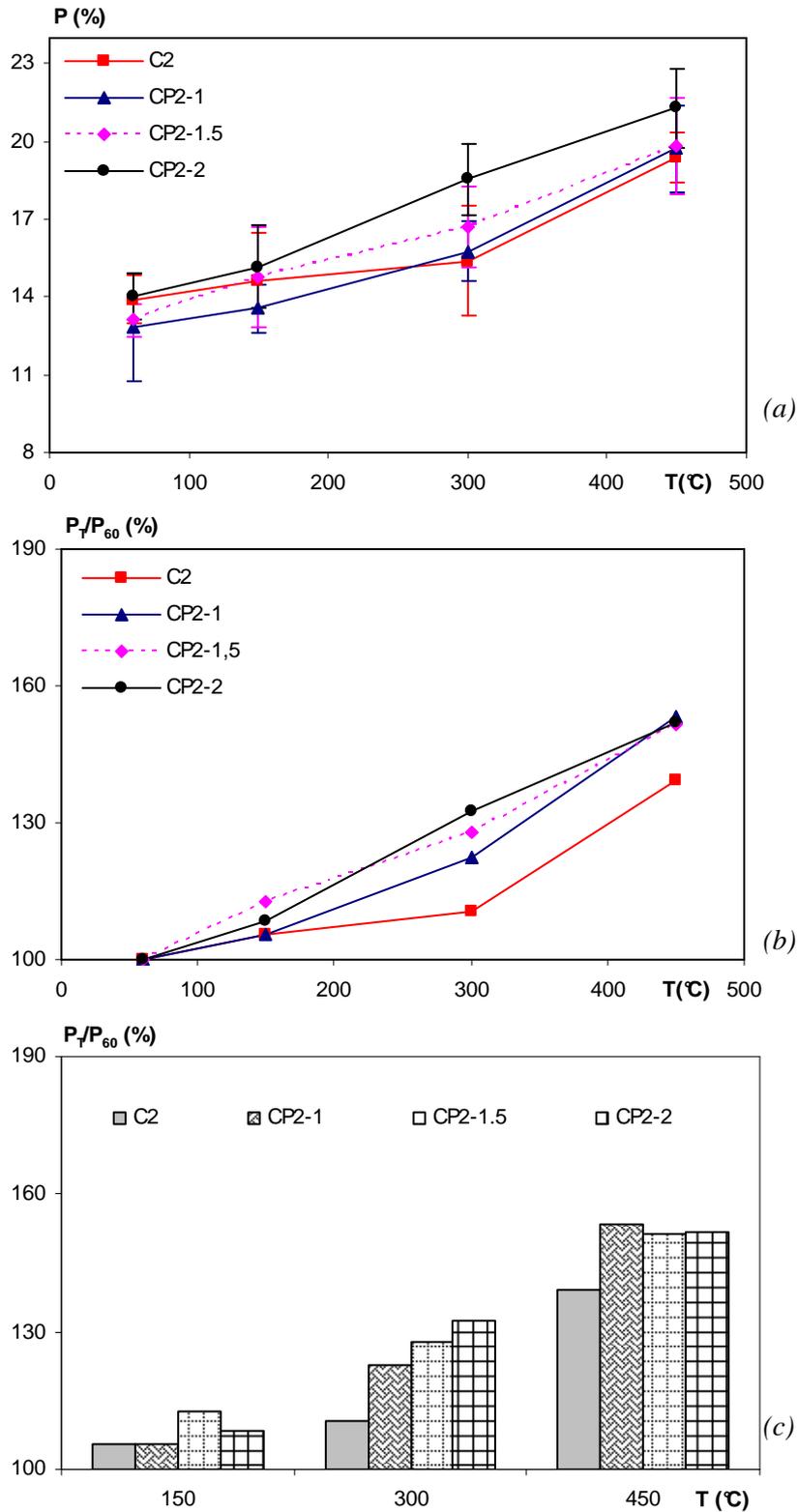


figure 4.6. Evolution de la porosité absolue (a) et porosité relative (b, c) des bétons C2 avec les fibres de polypropylène en fonction de la température du cycle de chauffage-refroidissement.

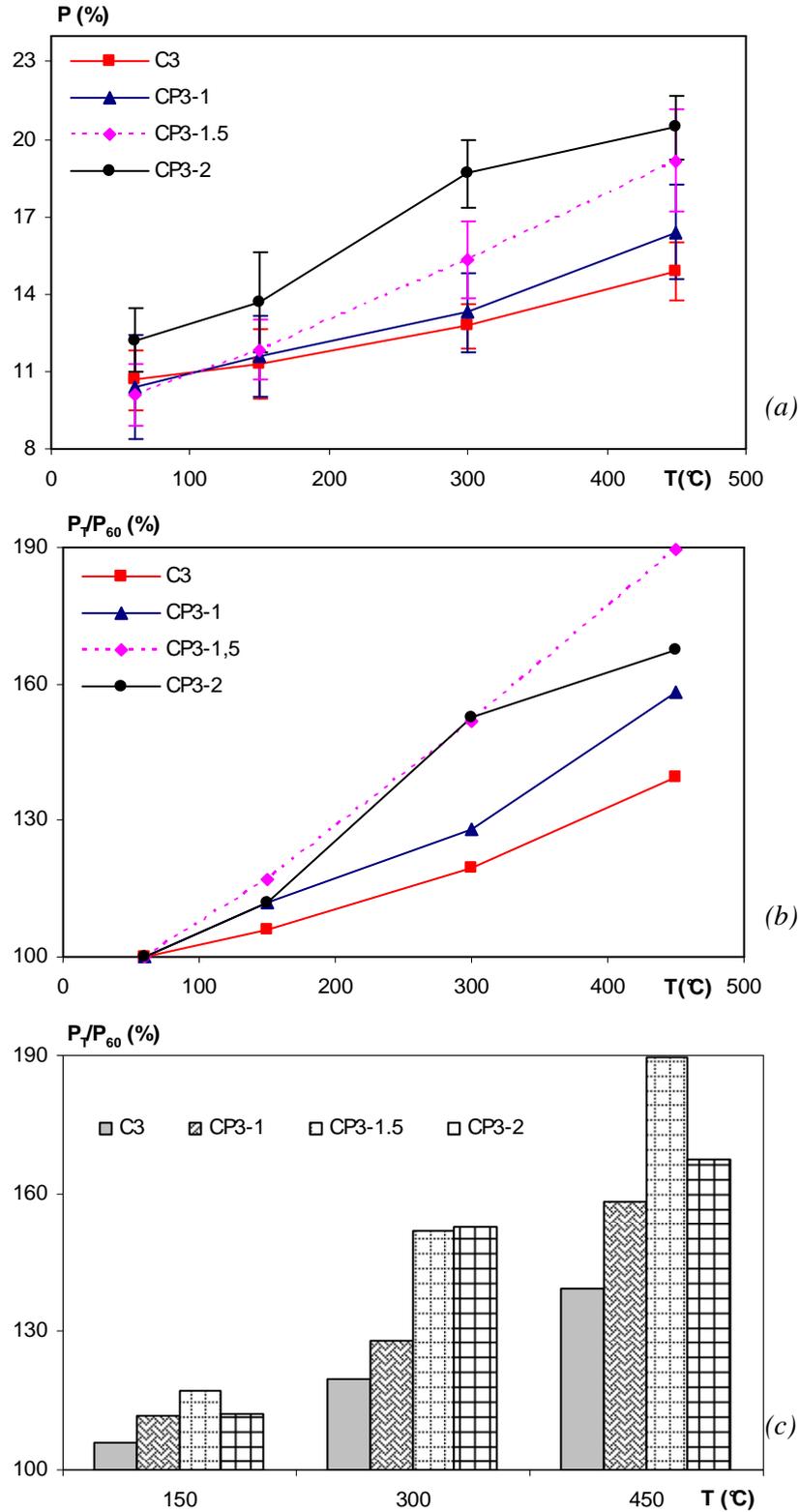


figure 4.7. Evolution de la porosité absolue (a) et porosité relative (b, c) des bétons C3 avec les fibres de polypropylène en fonction de la température du cycle de chauffage-refroidissement.

Avec l'augmentation de la température, la porosité des bétons de fibres de polypropylène s'accroît plus vite que celle des bétons sans fibres, pour les deux groupes de bétons. Pour les bétons sans fibres, une augmentation de porosité importante était remarquée au-delà de la température 300°C tandis que pour les bétons de fibres de polypropylène, cette augmentation est remarquée dès 150°C. Entre les températures 150°C et 300°C, l'augmentation de porosité est de 40% pour les bétons CP3-2 et 25% pour les bétons CP2-2. Avec les bétons sans fibres, la variation était de 14% pour le béton C3 et 5% pour le béton C2. 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.

En comparant les deux groupes de bétons caractérisés par des rapports E/C différents, la porosité relative des bétons CP3 est supérieure à celle des bétons CP2. A la température 300°C, la porosité relative du béton CP3-2 est de 153% tandis que celle du béton CP2-2 est de 132%. Cette différence de porosité traduit un endommagement plus important des bétons CP3. Plus le rapport E/C est faible, plus l'impact des fibres de polypropylène sur la modification de la microstructure du matériau est important.

Les dosages de 1.5 kg/m³ et 2 kg/m³ augmentent de façon notable la porosité du BHP soumis à une température élevée. Dès le chauffage à 150°C, le béton CP3-2 présente une porosité (13.7%) similaire à celle du béton C2 (13.9%) après le séchage à 60°C. A partir de la température de chauffage de 300°C, le béton CP3-1.5 a la même porosité que le béton ordinaire C2. Les porosités des deux compositions de bétons sont du même ordre de grandeur après les chauffages à 300°C et 450°C.

Les différences de température surface/centre maximales pour les bétons CP3-1.5 et CP3-2 étaient respectivement de 118°C et 119°C aux températures de surface 305°C et 295°C. La différence de température relevée au sein des bétons sans fibres (C3) est de 127°C. Cette baisse de différence de température entre la surface et le centre des éprouvettes de bétons fibrés s'explique par un meilleur transfert de la chaleur. La porosité ouverte liée à la fusion des fibres favorise le transfert de masse et par conséquent le transfert de chaleur par convection.

Les études réalisées par d'autres auteurs comme Kalifa et al. [Kali, 2001], Noumowé [Noum, 2002], Komonen et al. [Komo, 2003], Hage [Hage, 2004] et Mindéguia [Mind, 2009] sur la porosité des bétons contenant les fibres de polypropylène ont aussi montré à 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.

4.4 Evolution des propriétés mécaniques résiduelles en fonction du chauffage

Comme pour les bétons sans fibres, les propriétés mécaniques résiduelles des bétons de fibres de polypropylène sont déterminées. L'influence des fibres sur l'évolution des résistances en compression, en traction et sur le module d'élasticité en fonction de la température de chauffage est analysée.

4.4.1 Résistance en compression

Les résistances résiduelles en compression et relatives des bétons de différents teneurs en fibres de polypropylène sont regroupées dans le tableau 4.5.

Les figures 4.8 et 4.9 montrent l'évolution de la résistance résiduelle en compression (a) et relative (b et c) en fonction de la température de chauffage des bétons CP2 et CP3. La résistance en compression des bétons diminue avec la température, selon la même cinétique que pour les bétons non fibrés. Nous observons les deux domaines caractérisant le comportement en compression après chauffage.

A la température ambiante, la présence des fibres de polypropylène modifie peu la résistance en compression. Les résistances en compression des bétons C2 et CP2-2 sont respectivement de 46 ± 2.2 MPa et 50.2 ± 0.7 MPa. Avec le béton C3, une amélioration de résistance est constatée avec l'addition de 1.5 kg/m^3 de fibres. Cette augmentation peut être liée aux conditions expérimentales. Avec les dosages de 1 kg/m^3 et 2 kg/m^3 des gains beaucoup moins importants sont relevés.

tableau 4.5 Résistance en compression des bétons avec et sans fibres de polypropylène.

Bétons	Unités	Températures (°C)				
		20	150	300	450	600
C2	MPa	46.0	36.9	40.1	20.3	5.3
	MPa	48.6	39.0	43.4	21.0	7.0
CP2-1	Ecart type	1.5	1.9	2.2	0.2	0.5
	(%)	100	80	89	43	14
CP2-1.5	MPa	48.0	38.6	42.6	22.6	5.4
	Ecart type	3.8	0.5	1.6	1.5	0.3
	(%)	100	80	89	47	11
CP2-2	MPa	50.2	36.8	41.5	17.3	5.4
	Ecart type	0.7	3.9	1.6	0.8	0.3
	(%)	100	73	83	35	11
C3	MPa	70.2	62.6	59.6	26.9	9.3
	MPa	67.8	61.1	66.6	19.8	8.1
CP3-1	Ecart type	1.2	2.2	0.7	1.1	0.3
	(%)	100	90	98	29	12
CP3-1.5	MPa	85.8	68.1	70.0	28.2	8.3
	Ecart type	1.8	0.8	1.9	1.0	0.2
	(%)	100	79	82	33	10
CP3-2	MPa	78.9	59.9	59.6	21.9	8.6
	Ecart	4.7	2.0	1.1	3.5	0.3
	(%)	100	76	76	28	11

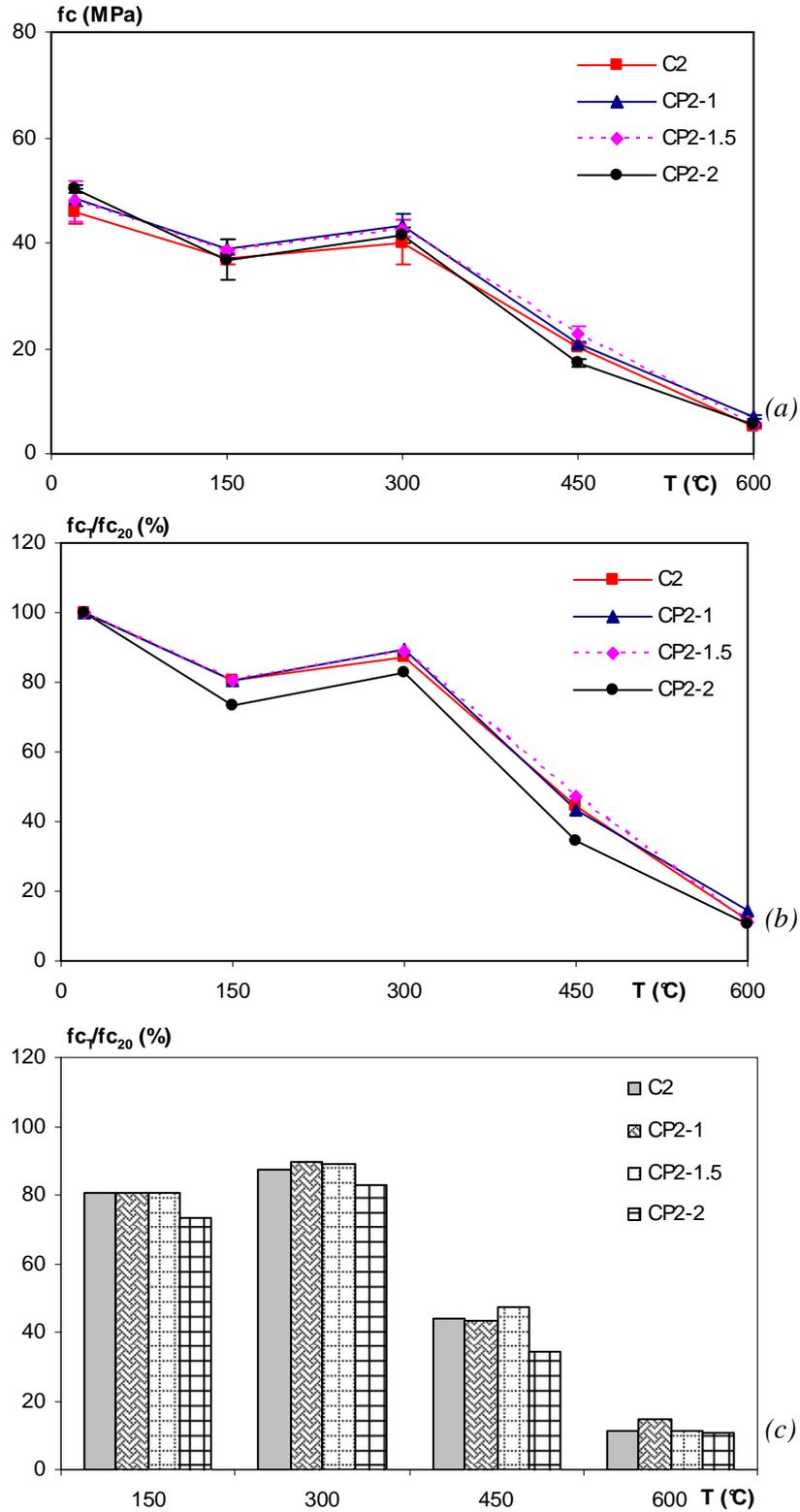


figure 4.8. Evolution de la résistance résiduelle en compression (a) et relative (b, c) des bétons C2 avec les fibres de polypropylène en fonction de la température du cycle de chauffage-refroidissement.

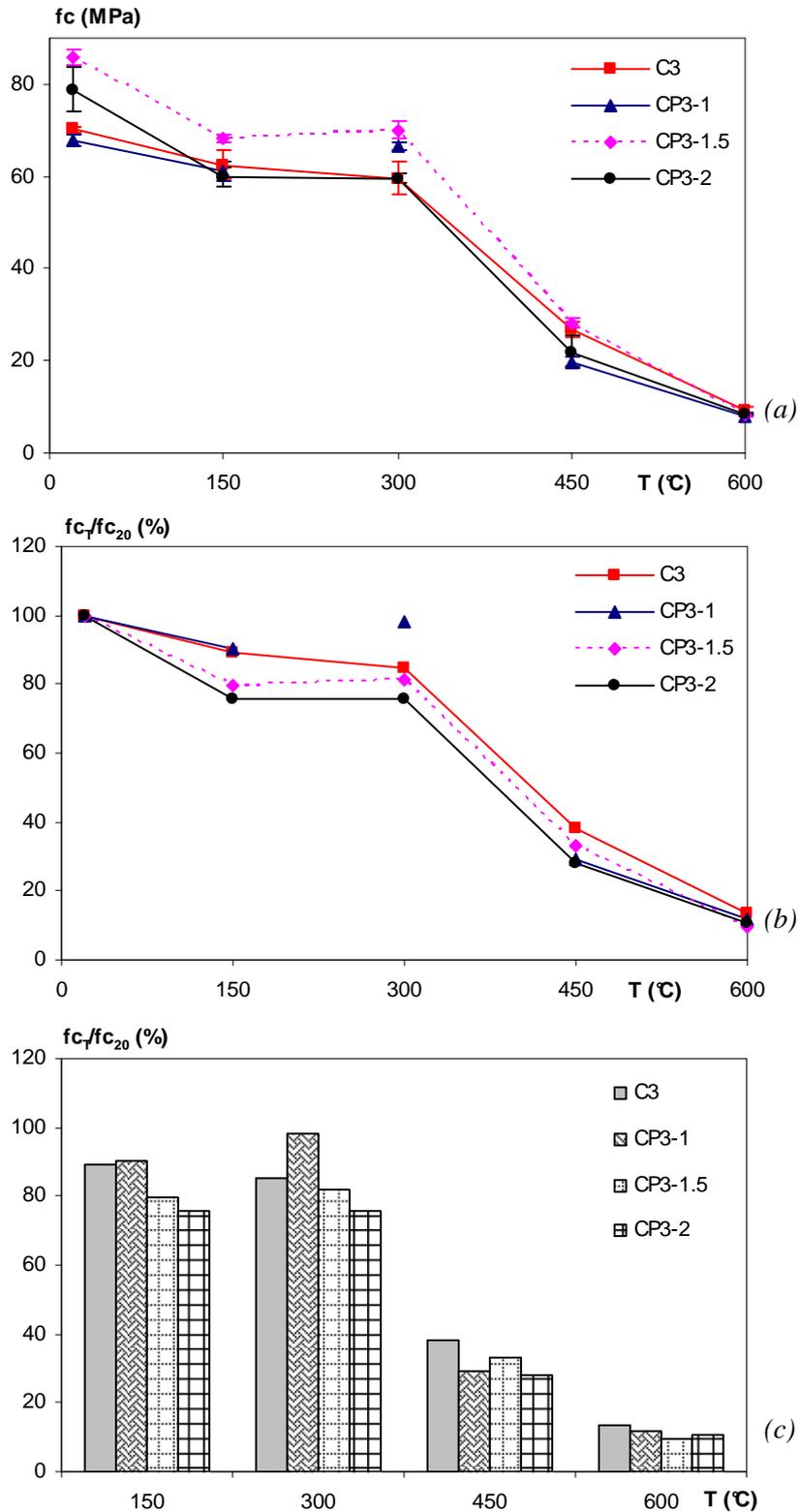


figure 4.9. Evolution de la résistance résiduelle en compression (a) et relative (b, c) des bétons C3 avec les fibres de polypropylène en fonction de la température du cycle de chauffage-refroidissement.

De la température ambiante à 300°C, une légère baisse et/ou amélioration de résistance est remarquée et, au delà de 300°C, la résistance baisse considérablement. La présence de fibres de polypropylène n'influe pas sur l'allure de la courbe de résistance en compression mais, de légères variations sont constatées sur les résistances résiduelles.

La résistance résiduelle relative en compression diminue avec l'ajout de fibres de polypropylène. Le dosage de 2 kg/m³ de fibres entraîne le plus de perte de résistance pour les deux groupes de bétons. Les résistances résiduelles relatives à la compression des bétons sans fibres C2 et C3 sont respectivement de 44% et 38% après un chauffage à 450°C. Les bétons CP2-2 et CP3-2 ont une résistance relative de 35% et 28%. Pour les deux bétons, la perte de résistance relative est d'environ 10% par rapport aux bétons non fibrés. A 600°C, les pertes de résistance sont proches et ne dépendent pas du dosage en fibres.

L'ajout des fibres de polypropylène n'améliore pas la résistance résiduelle relative en compression. Le dosage de 2 kg/m³ de fibres présente, pour les deux compositions de bétons, plus de perte de résistance résiduelle que les autres dosages. Les bétons CP3 perdent plus de résistance en compression que les bétons CP2. La résistance en compression du béton CP3 reste toutefois supérieure à celle du béton CP2. A 450°C, la résistance relative moyenne en compression des bétons CP2 est de 42% et celle des bétons CP3 est de 30%. Les porosités des bétons de fibres peuvent expliquer la baisse de résistance en compression notamment pour le dosage de 2 kg/m³. La porosité relative des bétons sans fibres C2 et C3, suite au traitement thermique à 450°C, est de l'ordre de 139%. Les porosités des bétons de fibres de polypropylène CP2-2 et CP3-2 sont respectivement de 152% et 167% pour la même température. Cette 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 baisse de résistance en compression des bétons BHP contenant ou non des fibres de polypropylène a été aussi notée par [Chan, 2000], [Hoff, 2000], [Noum, 2005], [Suha, 2006] et [Mind, 2009]. Les travaux de Suhaendi et al. [Suha, 2006] ont porté sur le comportement de bétons 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/m³ et 4.6 kg/m³). La diminution de résistance résiduelle était plus importante après chauffage à 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 plus forte perméabilité et porosité, certains auteurs observent une amélioration du comportement résiduel en compression du béton. Des améliorations de résistance en compression de bétons contenant des fibres de polypropylène ont été observées par [Chen, 2004], [Xiao, 2006] et [Behn, 2009]. Pour [Behn, 2009], la présence des fibres de polypropylène à

différentes teneurs (1, 2 et 3 kg/m³) n'influe pas sur la résistance relative résiduelle à la compression après chauffage à 100°C mais au-delà de cette température les fibres ont un effet favorable. Le dosage de 2 kg/m³ apparaît dans ses travaux comme étant le dosage optimum.

Les résultats des travaux de [Chen, 2004] sur un béton contenant 0.6% de fibres (soit 5.5 kg/m³) montrent que la résistance résiduelle à la compression des bétons fibrés varie peu par rapport à celle du béton non fibré après traitement thermique à 200°C. Mais, un gain de l'ordre de 20% de résistance relative est observé après un chauffage à 800°C.

Lors de la montée en température, les fibres de polypropylène fondent et peuvent être partiellement ou entièrement absorbées par le réseau poreux de la matrice cimentaire [Kali, 2001]. Le volume total des pores croît faiblement de 0.7% à 2% pour un chauffage de 150°C à 400°C, en fonction du volume de fibres. Au-delà de la température 300°C, on observe une densité de fissures qui augmente avec le volume de fibres. Les mesures de porosité montrent une porosité additionnelle due à la présence des fibres de polypropylène dans le béton. La résistance résiduelle en compression des bétons contenant les fibres de polypropylène peut être influencée, comme décrit dans la synthèse bibliographique, par les conditions expérimentales. Le mode de conservation (degré de saturation des éprouvettes), l'âge des éprouvettes et la vitesse de chauffage sont des paramètres qui peuvent influencer les résultats de la résistance en compression des bétons fibrés.

4.4.2 Résistance en traction par flexion

Comme pour la résistance en compression, l'impact des fibres sur la résistance en traction est étudié. Le tableau 4.6 regroupe les résistances résiduelles et relatives en traction par flexion des bétons de fibres de polypropylène en fonction des différents cycles de chauffage-refroidissement.

A la température ambiante, la présence des fibres de polypropylène modifie peu la résistance en traction. Les résistances en traction des bétons C2 et CP2-2 sont respectivement de 5.2 ± 0.4 MPa et 4.9 ± 0.4 MPa. Celles des bétons C3 et CP3-2 sont respectivement de 7.3 ± 0.4 MPa et 5.7 ± 0.5 MPa. On note une légère baisse de résistance avec les BHP. Comme en compression, une amélioration de résistance est constatée avec l'addition de 1.5 kg/m³ de fibres.

Les courbes d'évolution (figures 4.10 et 4.11) de la résistance en traction par flexion en fonction de la température de chauffage montrent une baisse de résistance en traction des bétons de fibres de polypropylène. L'allure de la courbe ne change pas avec la présence des fibres. On observe une baisse progressive de résistance en traction avec l'augmentation de la température de chauffage. L'impact des fibres de polypropylène sur la résistance résiduelle en traction varie selon le rapport E/C du béton.

tableau 4.6 Résistance en traction par flexion des bétons avec et sans fibres de polypropylène.

Bétons	Unités	Températures (°C)				
		20	150	300	450	600
C2	MPa	5.2	3.1	3.1	1.4	0.4
	MPa	5.1	3.5	2.9	1.4	0.5
CP2-1	Ecart type	0.5	0.3	0.1	0.5	0.1
	(%)	100	69	56	27	10
CP2-1.5	MPa	4.7	4.3	3.6	1.9	0.5
	Ecart type	0.7	0.2	0.6	0.2	0.1
	(%)	100	90	77	40	11
CP2-2	MPa	4.9	3.6	3.6	1.6	0.6
	Ecart type	0.4	0.3	0.4	0.5	0.1
	(%)	100	73	73	32	12
C3	MPa	7.3	5.4	4.6	2.8	0.7
	MPa	6.3	5.3	3.8	1.7	0.7
CP3-1	Ecart type	0.2	0.1	0.9	0.1	0.1
	(%)	100	83	61	27	10
CP3-1.5	MPa	7.4	5.0	4.8	2.7	0.7
	Ecart type	0.7	0.2	0.3	0.1	0.1
	(%)	100	69	65	37	10
CP3-2	MPa	5.7	4.0	3.5	1.4	0.6
	Ecart type	0.5	0.7	0.2	0.3	0.0
	(%)	100	70	60	25	10

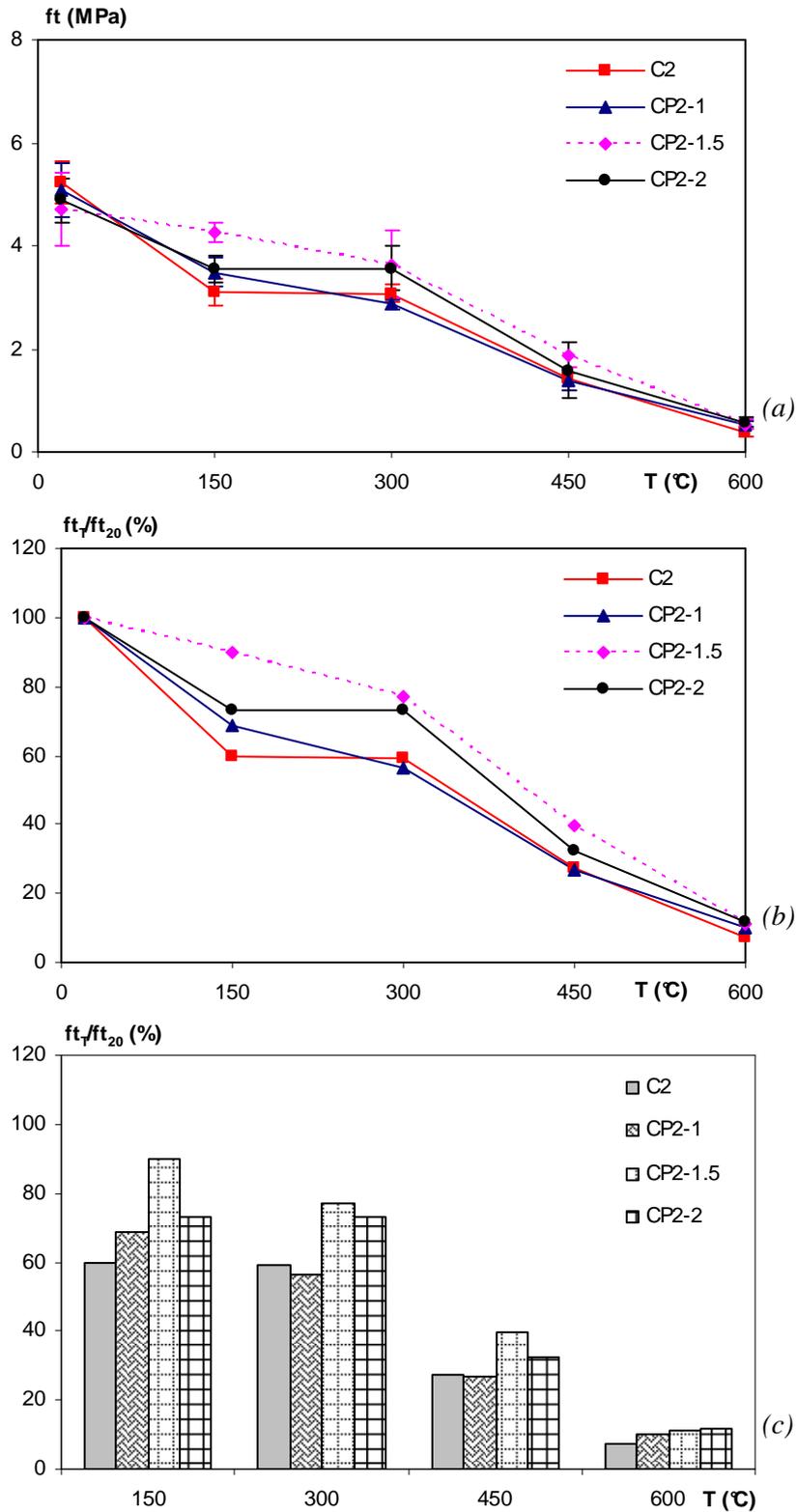


figure 4.10. Evolution de la résistance résiduelle en traction (a) et relative (b, c) des bétons C2 avec les fibres de polypropylène en fonction de la température du cycle de chauffage-refroidissement.

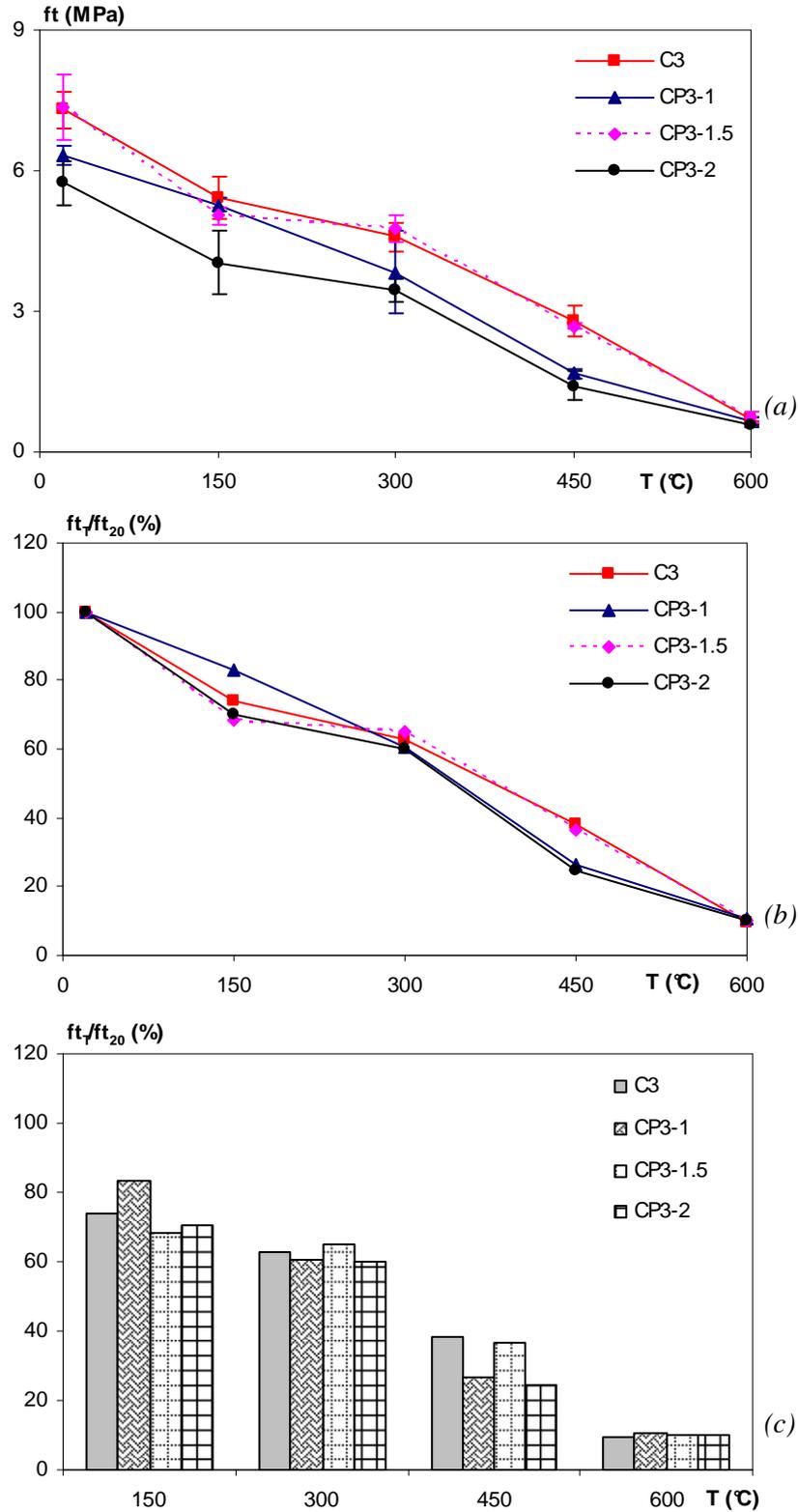


figure 4.11. Evolution de la résistance résiduelle en traction (a) et relative (b, c) des bétons C3 avec les fibres de polypropylène en fonction de la température du cycle de chauffage-refroidissement.

Pour le béton CP2 (figure 4.10) une amélioration de la résistance résiduelle en traction est notée jusqu'au cycle de chauffage-refroidissement de 600°C. En effet, les résistances résiduelles relatives des bétons de fibres de polypropylène sont en moyenne supérieures aux résistances des bétons sans fibres à partir du cycle de chauffage de 150°C. Après chauffage à 450°C, la résistance relative du béton C2 est de 27% et la résistance moyenne des bétons CP2 est de 33%. Après chauffage à 600°C, la résistance relative des bétons CP2 (11%) est toujours supérieure à celle des bétons C2 (7%). La perte de résistance en traction est toujours plus rapide que la perte de résistance en compression, malgré l'amélioration du comportement en traction. Après chauffage à 450°C, la résistance résiduelle relative en compression des bétons CP2 est de 42% tandis qu'en traction, elle est de 33%. Le dosage 1.5 kg/m³ de fibres conduit à la plus forte amélioration jusqu'à la température 450°C. A la température 600°C, on note un faible gain de résistance qui varie peu suivant le dosage en fibres.

L'impact des fibres de polypropylène sur la résistance résiduelle en traction avec les bétons CP3 diffère de celui des bétons CP2. Contrairement aux bétons CP2, la résistance résiduelle en traction des bétons CP3 diminue par rapport aux bétons sans fibres (figure 4.11). Cette baisse de résistance apparaît dès la température ambiante. A 450°C, la résistance résiduelle relative en traction du béton sans fibres C3 est de 38% tandis que la résistance moyenne des bétons CP3 est de 29%. Comme pour la compression, le béton CP3 perd proportionnellement plus de résistance en traction que le béton CP2. La perte de résistance résiduelle en traction des bétons CP3 est similaire à la perte de résistance résiduelle en compression. Après chauffage à 450°C, la résistance moyenne relative en traction est de 29% et la résistance relative en compression est de 30%. Pour les bétons CP3 comme pour les bétons CP2, les meilleures performances pour la résistance résiduelle à la traction sont obtenues avec un dosage de 1.5 kg/m³.

L'influence des fibres de polypropylène dans le béton porté à haute température dépend du rapport E/C du béton. Les fibres de polypropylène améliorent la résistance résiduelle en traction des bétons CP2 (E/C = 0.45) et diminuent celle des bétons CP3 (E/C = 0.3). L'amélioration du comportement en traction des bétons CP2 semble liée à la résistance en traction des fibres de polypropylène qui est de l'ordre de 300 MPa. Après fusion, les fibres remplissent les pores du béton au rapport E/C élevé et se resolidifient durant la phase de refroidissement des éprouvettes. Elles augmentent ainsi les forces de contact et les liaisons entre les différents grains. Le gain de résistance résiduelle observée après chauffage à 450°C (température supérieure à la température 340°C correspondant à la phase de vaporisation des fibres) indiquerait qu'une partie des fibres reste encore présente dans la matrice cimentaire améliorant ainsi ses performances mécaniques à la traction. Après le chauffage à 600°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. Avec les bétons à rapport E/C faible, caractérisés par 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 du

polypropylène avec la température, explique le fait que la résistance résiduelle en traction des BHP n'est pas améliorée.

Les deux compositions de béton présentent un même optimum pour le dosage en fibres de polypropylène conduisant à un meilleur comportement résiduel en traction. Suite au chauffage, les bétons CP3 perdent plus de résistance résiduelle en traction que les bétons CP2 mais leurs résistances restent toujours supérieures à celles des bétons CP2.

L'amélioration de la résistance résiduelle en traction des bétons fibrés a été aussi notée par Chen et al. [Chen, 2004] pour des températures de 600°C et 800°C pour des bétons à hautes performances. Pour Xiao et al. [Xiao, 2006], la variation de la résistance résiduelle en traction avec l'ajout des fibres de polypropylène n'est pas significative.

4.4.3 Module d'élasticité

Le tableau 4.7 regroupe les résultats du module d'élasticité résiduel et relatif obtenus sur les bétons de fibres de polypropylène pour chaque cycle de chauffage-refroidissement.

Les figures 4.12 et 4.13 illustrent respectivement l'évolution du module d'élasticité en fonction de la température de chauffage des bétons CP2 et CP3.

Le module d'élasticité diminue progressivement avec la montée en température avec un comportement similaire à celui des bétons sans fibres; la courbe se partageant en deux domaines de pentes distinctes.

Les modules d'élasticité résiduels sont peu influencés par l'ajout de fibres tant pour le béton CP2 (figure 4.12) que pour le béton CP3 (figure 4.13). Globalement, la présence des fibres de polypropylène entraîne une baisse du module d'élasticité. Cependant, de légers gains sur les modules d'élasticité résiduels sont à noter à la température 300°C pour les bétons CP3. Le module d'élasticité résiduel du béton CP3-2 est de 28.6 GPa tandis que celui de C3 est de 25.7 GPa après le chauffage à 300°C. Au-delà de la température 300°C, les modules d'élasticité résiduels des bétons avec et sans fibres de polypropylène voisins.

Les modules d'élasticité résiduels des bétons CP3 diminuent plus que ceux des bétons CP2. Les mesures de porosité ont montré un accroissement rapide de la porosité des bétons au-delà de 300°C et cette croissance est plus élevée pour les bétons CP3. Les bétons CP3 s'endommagent plus que les bétons CP2. Le module d'élasticité résiduel des bétons CP3 reste toutefois toujours supérieur au module d'élasticité résiduel des bétons CP2 pour une même température.

tableau 4.7 Module d'élasticité des bétons avec et sans fibres de polypropylène.

Bétons	Unités	Températures (°C)				
		20	150	300	450	600
C2	GPa	37.7	29.4	21.5	5.8	1.3
	GPa	39.1	29.1	20.7	5.4	1.5
CP2-1	Ecart type	1.5	0.6	0.6	0.3	0.1
	(%)	100	74	53	14	4
CP2-1.5	GPa	37.7	29.5	21.5	5.8	1.3
	Ecart type	2.7	1.3	0.0	0.3	0.0
	%	100	78	57	16	4
CP2-2	GPa	38.9	28.8	20.0	5.6	1.3
	Ecart type	1.6	1.1	2.0	0.3	0.1
	(%)	100	74	52	14	3
C3	GPa	44.1	38.2	25.7	6.3	1.6
	GPa	45.7	39.0	29.4	5.3	1.7
CP3-1	Ecart type	0.1	1.7	0.5	0.3	0.0
	(%)	100	86	64	12	4
CP3-1.5	GPa	45.8	38.9	28.6	6.7	1.7
	Ecart type	1.4	0.3	1.0	0.4	0.1
	(%)	100	85	62	15	4
CP3-2	GPa	49.5	39.6	28.6	5.3	1.7
	Ecart type	0.8	0.6	1.5	0.4	0.0
	(%)	100	80	58	11	4

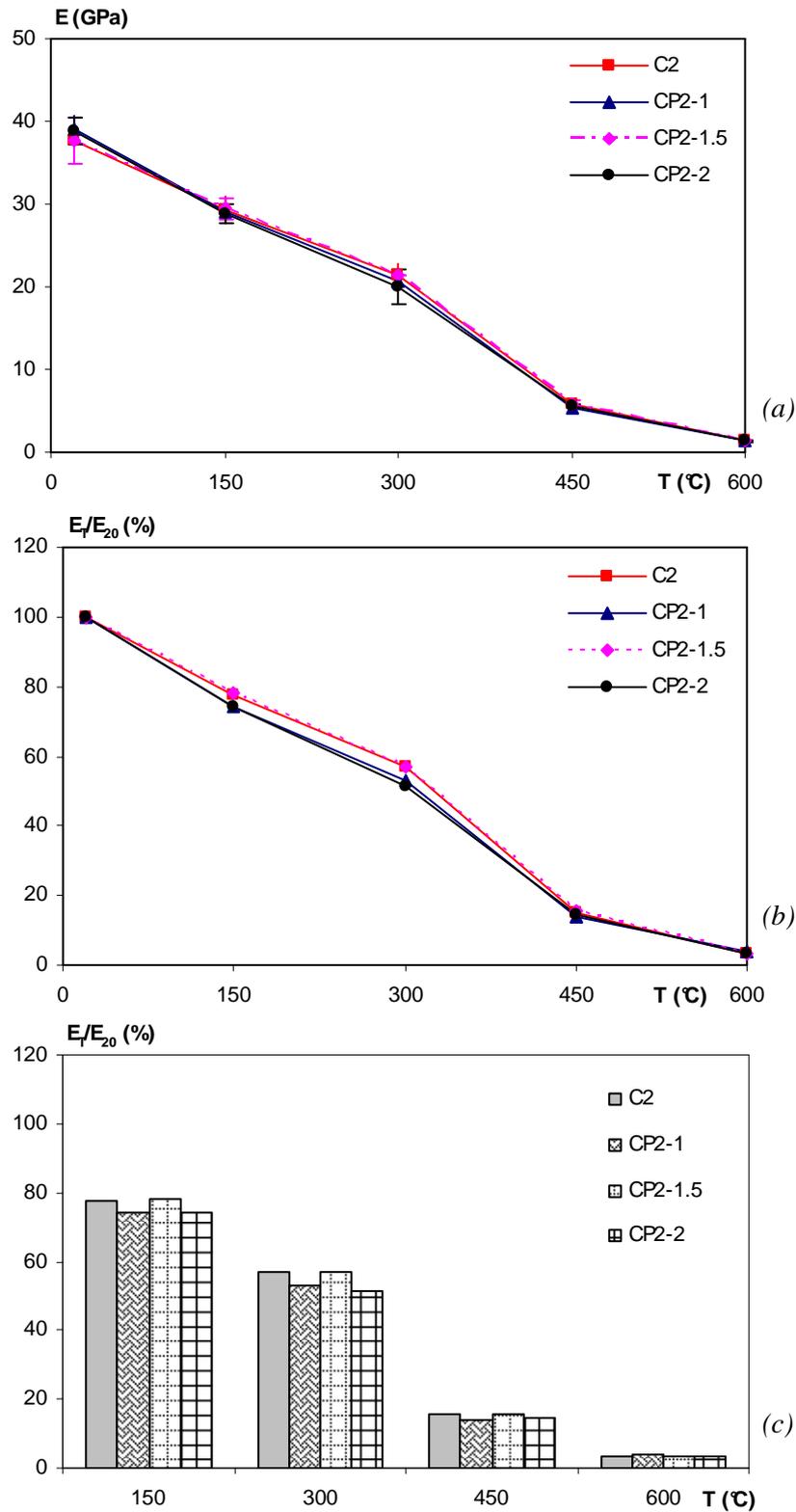


figure 4.12. Evolution du module d'élasticité résiduel (a) et relatif (b, c) des bétons C2 avec les fibres de polypropylène en fonction de la température du cycle de chauffage-refroidissement.

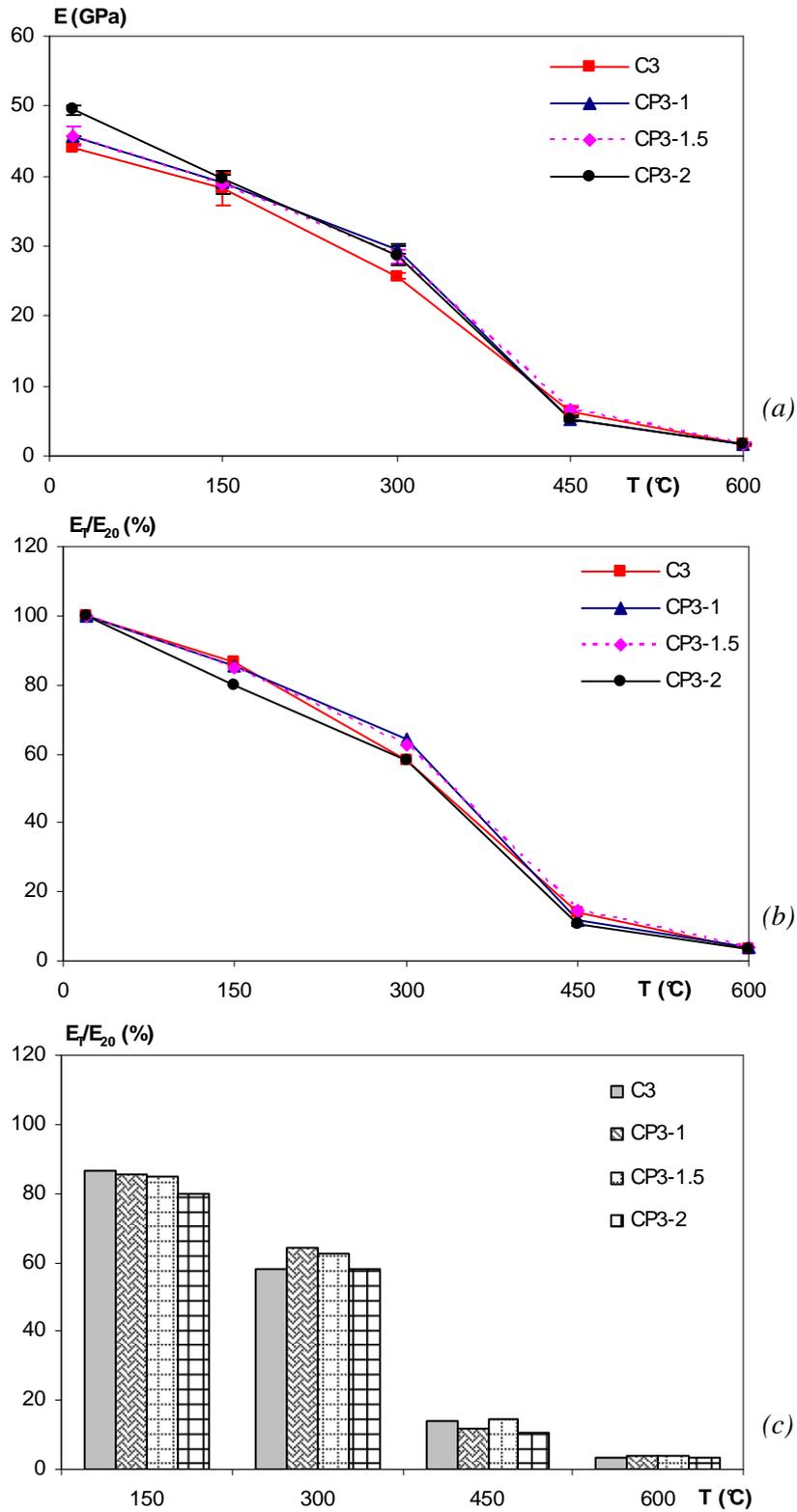


figure 4.13. Evolution du module d'élasticité résiduel (a) et relatif (b, c) des bétons C3 avec les fibres de polypropylène en fonction de la température du cycle de chauffage-refroidissement.

Les pertes de module d'élasticité relatif sont plus élevées que les pertes de résistances en compression et en traction. Après le chauffage à 450°C, le module d'élasticité résiduel relatif moyen des bétons CP3 est de 12% tandis que les résistances résiduelles relatives moyennes en compression et en traction sont respectivement de 30% et 29%. Comme les résistances en compression et en traction, le module d'élasticité des bétons CP3 diminue proportionnellement plus que celui des bétons CP2. A 450°C, le module d'élasticité résiduel relatif des bétons CP2 est de 15% tandis que celui des bétons CP3 est de 12%.

Les travaux de recherche de [Suha, 2006] montrent une diminution du module d'élasticité résiduel avec l'augmentation de fibres de polypropylène. Suite à un chauffage à 400°C, les auteurs observent 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%.

Les mesures de porosité ont montré que l'addition de fibres de polypropylène une plus forte porosité, notamment à partir de la température 300°C. Les baisses de module d'élasticité observées sont donc en adéquation avec la modification de la microstructure constatée.

4.5 Relation entre porosité et résistance en compression

La figure 4.14 regroupe les résultats de la porosité et de la résistance en compression de tous les bétons contenant des fibres de polypropylène pour tous les cycles de température. Les valeurs obtenues pour les coefficients des équations de Schiller, Hasselmann et Ryshkevitch sont les suivantes :

$k_s = 73,082$	$p_o = 28,767 \%$	avec	$R^2 = 0,6315$	(Schiller)
$f_{c,o} = 252,05 \text{ MPa}$	$k = 0,1151$	avec	$R^2 = 0,6471$	(Ryshkevitch)
$f_{c,o} = 120,56 \text{ MPa}$	$k_h = 4,757$	avec	$R^2 = 0,6218$	(Hasselmann)

Les équations de Schiller, de Ryshkevitch et de Hasselmann présentent des coefficients de corrélation plus faibles pour les bétons avec les fibres de polypropylène que ceux des bétons sans fibres. Les équations proposées sont supposées valables pour une porosité comprise entre 5% et 28%. La porosité des bétons de fibres de polypropylène étant comprise entre 10% et 22%, on aurait pu s'attendre à de meilleurs coefficients de corrélation. Ces équations s'adaptent moins bien aux bétons contenant des fibres de polypropylène.

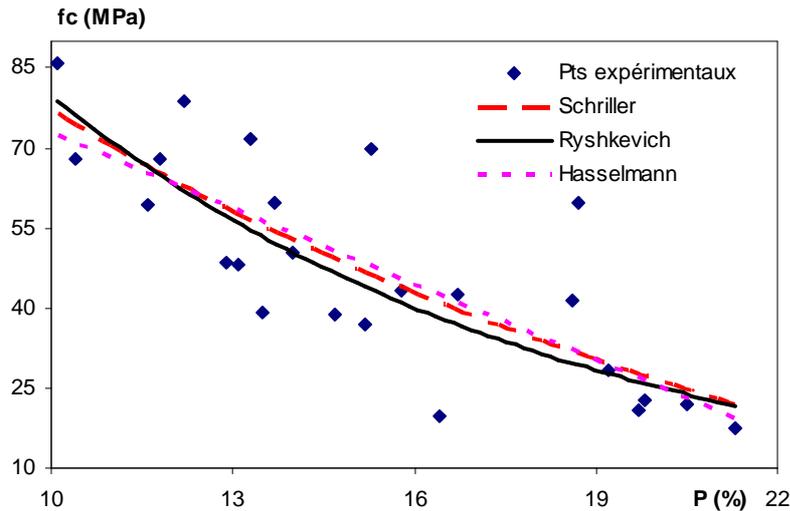


figure 4.14. Résistance résiduelle en compression en fonction de la porosité des bétons de fibres de polypropylène.

4.6 Conclusion sur le comportement des bétons de fibres de polypropylène

Les essais réalisés sur les bétons contenant les fibres de polypropylène ont confirmé qu'elles améliorent la stabilité thermique du béton. Les BHP, contenant les fibres même à l'état saturé, n'éclatent pas tandis que les bétons sans fibres ont éclaté. Le dosage de 1 kg/m^3 suffit à empêcher l'éclatement du BHP testé (CP3).

La mesure de la différence de température entre la surface et le centre de l'éprouvette a montré une baisse de la température d'apparition du pic, notamment plus pour le béton CP3. La formation de micropores entre les fibres et la pâte de ciment/granulats, la fusion du polypropylène créent des chemins facilitant le transfert de flux. Le comportement des deux bétons n'est pas le même. La présence des fibres a entraîné une baisse du gradient thermique au sein des bétons CP3 et une faible augmentation avec les bétons CP2.

L'ajout des fibres de polypropylène n'entraîne pas de modification de la cinétique de perte de masse avec la température. La perte de masse des bétons augmente avec la température selon trois domaines de pentes différentes. Nous remarquons une perte de masse supplémentaire sur les bétons de fibres de polypropylène. La perte de masse, comme dans le cas des bétons sans fibres, dépend du rapport E/C. Les bétons ordinaires (CP2) ont une perte de masse plus grande que celle des bétons à hautes performances (CP3).

Les résultats des mesures de porosité montrent une augmentation de la porosité plus rapide pour les bétons contenant des fibres que pour les bétons sans fibres. La porosité des deux compositions de béton avec fibres s'accroît très vite au-delà de la

température 300°C, notamment pour le BHP. Cette augmentation rapide de la porosité des bétons CP3 s'accompagne d'une baisse plus importante de résistances mécaniques résiduelles. Les résultats des essais de compression, de traction et du module d'élasticité ont montré que les bétons CP3 perdent plus de résistance résiduelle que les bétons CP2 mais, à chaque température, les résistances résiduelles des bétons CP3 restent supérieures aux résistances résiduelles des bétons CP2.

La résistance en compression et le module d'élasticité des bétons de fibres de polypropylène évoluent en fonction de la température selon deux domaines de pentes distinctes, comme c'était le cas pour les bétons sans fibres. Le premier domaine, de la température ambiante à 300°C, est caractérisé par une baisse et/ou amélioration de résistance. Le second domaine, au-delà de la température 300°C, est marqué par une baisse rapide de la résistance. L'ajout des fibres de polypropylène dans le béton entraîne d'une façon générale une baisse de résistance résiduelle en compression surtout pour le dosage de 2 kg/m³.

Les essais de détermination du module d'élasticité montrent de légères variations de module d'élasticité résiduel jusqu'à 300°C. Au-delà de cette température, les modules d'élasticité des bétons fibrés sont voisins de ceux des bétons non fibrés. L'influence des fibres sur le module d'élasticité résiduel dépend du rapport E/C du béton.

L'influence des fibres sur le comportement résiduel en traction dépend aussi du rapport E/C du béton. Le béton CP2 présente de meilleures résistances résiduelles en traction que le béton C2 tandis que pour le béton CP3, les fibres entraînent une diminution de la résistance résiduelle en traction.

Parmi les dosages de fibres de polypropylène étudiés, nous remarquons que le dosage de 1.5 kg/m³ conduit à de meilleures performances mécaniques résiduelles pour les deux compositions de bétons.

Les résultats présentés dans ce chapitre ont confirmé l'influence favorable des fibres de polypropylène sur la stabilité thermique des bétons à hautes performances. L'augmentation significative de la porosité mesurée après les différents cycles de chauffage, suite à l'ajout de fibres de polypropylène, corrobore les hypothèses d'une meilleure évacuation de la vapeur d'eau et par conséquent d'une diminution des pressions de vapeur d'eau au cours du chauffage. Les mesures de différence de température entre la surface et le centre de l'éprouvette ont montré l'influence positive des fibres de polypropylène sur la diminution du gradient thermique des bétons CP3. Quel serait le comportement des deux compositions de béton si on ajoutait plutôt des fibres métalliques ? L'étude du comportement des bétons de fibres métalliques soumis à haute température fait l'objet du chapitre suivant.

Chapitre 5 - COMPORTEMENT DES BETONS DE FIBRES METALLIQUES

5.1 Introduction

Les fibres métalliques sont utilisées dans le béton pour limiter la propagation des fissures et améliorer la ductilité du béton. Le but du présent chapitre est d'étudier le comportement des bétons renforcés de fibres métalliques soumis à une température élevée. Les fibres métalliques ont été ajoutées aux compositions des bétons C2 et C3 ; deux familles de bétons fibrés sont ainsi élaborées : les bétons CS2 et CS3. Les proportions de fibres métalliques utilisées sont 20, 30 et 40 kg/m³ (correspondant à une fraction volumique respective de 0.25, 0.38 et 0.51%). Comme dans le cas des études précédentes, des éprouvettes ont été confectionnées et conservées comme décrit dans le chapitre 2. Les éprouvettes ont été soumises aux mêmes cycles de chauffage-refroidissement et les propriétés physiques et mécaniques ont été déterminées.

5.2 Evolution des propriétés physiques en fonction du chauffage

5.2.1 Différence de température entre la surface et le centre de l'éprouvette

La figure 5.1 montre l'évolution de la différence de température entre la surface et le centre des éprouvettes de bétons de fibres métalliques. Seules les courbes du béton C3 avec et sans fibres métalliques sont présentées compte tenu des irrégularités observées avec le béton C2.

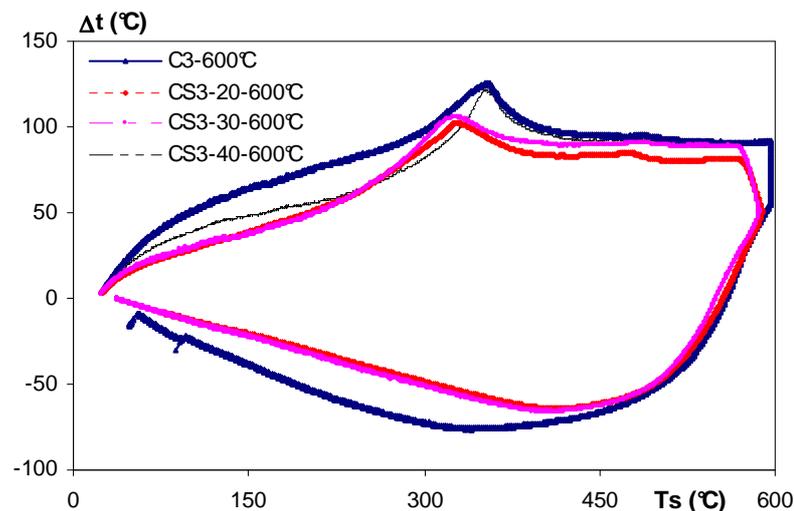


figure 5.1. Evolution de la différence de température en fonction de la température de surface de bétons de fibres métalliques au cours du cycle de chauffage à 600°C.

L'ajout de fibres métalliques dans le béton ne modifie pas l'évolution globale de la différence de température au cours du chauffage. La température de surface à laquelle se

produit le pic de différence de température est proche de celle mesurée pour les bétons sans fibres.

Le tableau 5.1 présente les valeurs maximales de différence de température centre/surface, le gradient thermique et la température de surface correspondante pour les deux familles de bétons. Ces valeurs sont comparées à celles obtenues avec le béton sans fibres et le béton de fibres de polypropylène.

tableau 5.1 Différence de température et gradient thermique maximaux des bétons de fibres métalliques.

Bétons	ΔT_{\max} (°C)	$\frac{\Delta T_{\max}}{\Delta r}$ (°C.cm ⁻¹)	T_{surf} (°C)
CS2-20	146	18.3	347
CS2-30	125 135	15.6 16.9	326 336
CS2-40	134	16.9	334
C2	123	15.4	324
CP2	132	16.6	312
CS3-20	103	12.9	329
CS3-30	116 114	14.5 14.2	338 340
CS3-40	122	15.3	352
C3	127	15.9	340
CP3	119	14.9	300

Du fait d'une certaine imprécision sur les mesures, l'évolution des températures en fonction de la quantité de fibres métalliques n'est pas significative. On ne retiendra qu'une valeur moyenne pour chaque famille de béton. La moyenne de la différence de température maximale des bétons CS2 est de 135°C à la température de surface de 336°C. La valeur moyenne de la différence de température maximale relevée pour les bétons CS3 est de 114°C à une température de surface de 340°C.

Comme pour les bétons de fibres de polypropylène, l'influence des fibres métalliques sur le gradient de température au sein de l'éprouvette diffère selon la famille de béton. Dans le cas des bétons CS2, les fibres métalliques augmentent la différence de température entre le centre et la surface de l'éprouvette. Pour les bétons CS3, c'est le phénomène contraire qui s'observe. Les fibres métalliques entraînent dans leur cas, comme pour les fibres de polypropylène, une diminution du gradient thermique.

5.2.2 Perte de masse

Les pertes de masse moyenne des éprouvettes de bétons de fibres métalliques sont recensées dans le tableau 5.2. La valeur présentée pour chaque formulation est une moyenne réalisée sur quatre éprouvettes.

tableau 5.2 Pertes de masse moyenne des bétons avec et sans fibres métalliques.

Bétons	Mesures	Cycles de chauffage - refroidissement			
		150°C	300°C	450°C	600°C
C2	Perte (%)	2.5	6.0	7.0	8.1
	Ecart type	0.1	0.1	0.1	0.1
CS2-20	Perte (%)	1.3	5.7	6.9	8.3
	Ecart type	0.1	0.1	0.1	0.1
CS2-30	Perte (%)	1.4	5.5	6.9	8.2
	Ecart type	0.2	0.3	0.6	0.6
CS2-40	Perte (%)	1.1	4.9	6.2	7.5
	Ecart type	0.0	0.2	0.1	0.1
C3	Perte (%)	1.1	4.8	6.1	7.2
	Ecart type	0.1	0.1	0.3	0.4
CS3-20	Perte (%)	0.7	4.2	5.5	6.9
	Ecart type	0.1	0.1	0.3	0.4
CS3-30	Perte (%)	0.7	4.1	5.3	6.8
	Ecart type	0.1	0.1	0.1	0.1
CS3-40	Perte (%)	0.8	4.4	5.6	7.1
	Ecart type	0.1	0.1	0.1	0.2

La figure 5.2 illustre l'évolution de la perte de masse des bétons C2 (figure 5.2 (a)) et bétons C3 (figure 5.2 (b)) pour les différents dosages de fibres métalliques en fonction de la température de chauffage.

La présence de fibres métalliques dans le béton ne modifie pas l'allure de la courbe de la perte de masse du matériau. Comme pour les bétons sans fibres et les bétons de fibres de polypropylène, on distingue sur la courbe trois domaines différents : une faible perte de masse entre 20°C et 150°C et entre 300°C et 600°C, une perte de masse importante entre 150°C et 300°C.

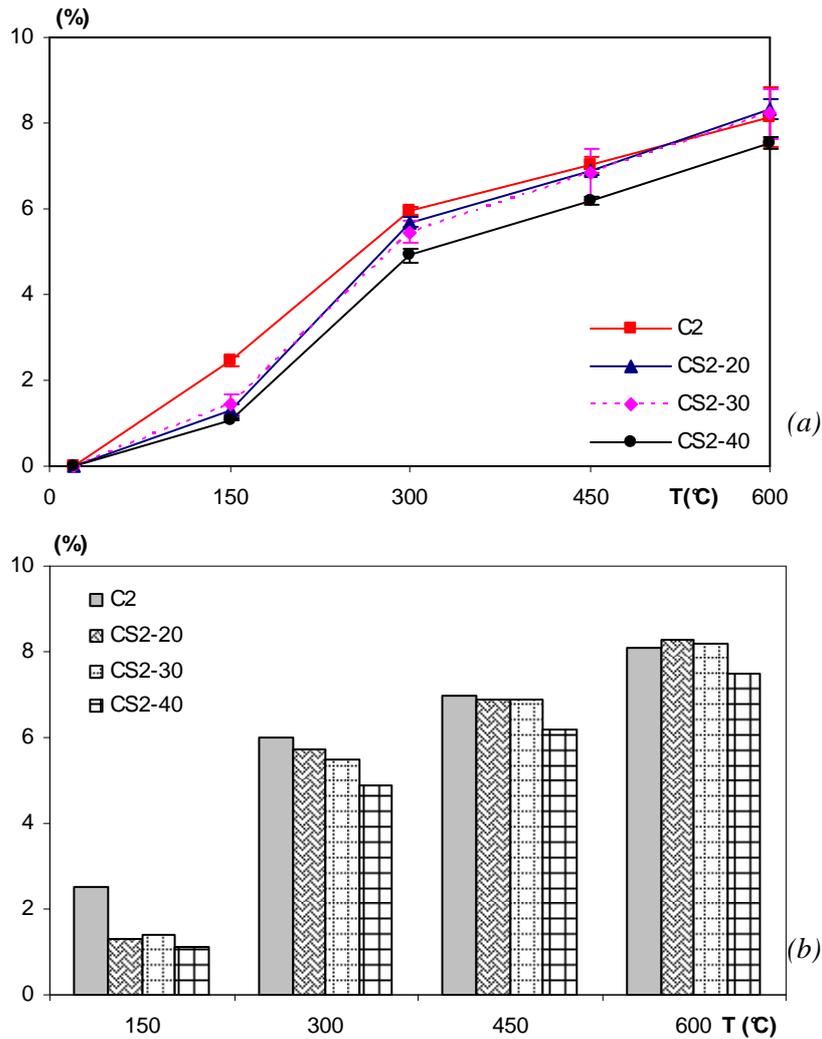


figure 5.2. Evolution de la perte de masse des bétons C2 et CS2 en fonction de la température du cycle de chauffage-refroidissement.

Avec l'ajout de fibres métalliques, la perte de masse diminue par rapport à celle du béton sans fibres. On observe une diminution plus importante après le chauffage à 150°C ; la perte de masse des bétons C2 et CS2-20 est respectivement 2.5% et 1.3%. Cette variation peut être due à la précision de la température de chauffage du four (au palier de 150°C).

Au-delà de la température 150°C, on remarque toujours une diminution de perte de masse des bétons de fibres métalliques mais moins importante. Après le chauffage à 600°C, les pertes de masse des bétons C2, CS2-20, C3 et CS3-20 sont respectivement 8.1%, 8.3%, 7.2% et 6.9%. Cette variation de perte de masse semble être liée à la quantité de fibres. La composition des bétons de fibres métalliques est obtenue par substitution volumique d'une partie des granulats. Les granulats sont humides au moment de la fabrication du béton. Le remplacement d'une partie des granulats par les fibres métalliques a donc diminué la quantité d'eau libre ou adsorbée. La quantité d'eau pouvant être absorbée par les granulats substitués varie de 0.1 à 0.2% pour le béton C2 et de 0.2 à 0.4% pour le béton C3. La

baisse de perte masse au-delà du chauffage à 150°C se retrouve dans cet ordre de grandeur.

La perte de masse des bétons CS3 est inférieure à celle des bétons CS2. A la température 600°C, la perte de masse du béton CS3-30 est de 6.8% et celle du béton CS2-30 est de 8.2%.

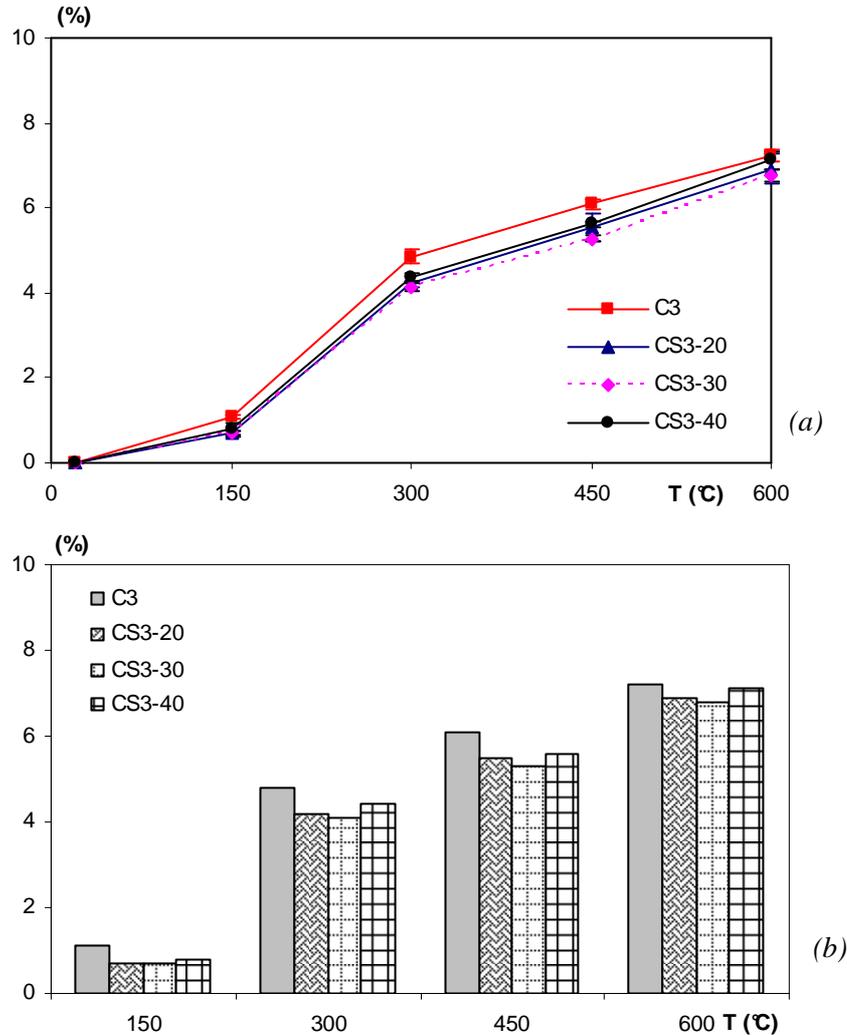


figure 5.3. Evolution de la perte de masse des bétons C3 et CS3 en fonction de la température du cycle de chauffage-refroidissement.

5.2.3 Evolution de la porosité

Les porosités obtenues par pesée hydrostatique pour tous les bétons de fibres métalliques sont reportées dans le tableau 5.3. Les valeurs reportées sont une moyenne obtenue sur dix échantillons.

tableau 5.3 Porosité moyenne des bétons avec et sans fibres métalliques.

T (°C)	Bétons	Porosité		
		(%)	Ecart type	Relative
60	C2	13.9	0.9	100
	CS2-20	13.4	1.4	100
	CS2-30	14.2	1.1	100
	CS2-40	15.3	2.5	100
	C3	10.7	1.2	100
	CS3-20	10.1	0.9	100
	CS3-30	11.2	0.4	100
	CS3-40	12.2	1.4	100
150	C2	14.6	1.8	105
	CS2-20	14.2	1.2	106
	CS2-30	14.8	1.0	104
	CS2-40	15.4	1.4	101
	C3	11.3	1.4	106
	CS3-20	10.7	1.3	106
	CS3-30	11.3	0.5	100
	CS3-40	12.7	2.0	105
300	C2	15.4	2.1	111
	CS2-20	16.0	0.9	120
	CS2-30	15.5	0.9	109
	CS2-40	16.3	1.4	106
	C3	12.8	0.9	120
	CS3-20	12.6	0.7	124
	CS3-30	13.4	1.0	120
	CS3-40	13.1	0.3	107
450	C2	19.4	1.0	139
	CS2-20	18.8	1.1	141
	CS2-30	20.8	2.1	146
	CS2-40	22.3	0.9	146
	C3	14.9	1.1	139
	CS3-20	16.0	1.4	158
	CS3-30	19.2	0.8	171
	CS3-40	18.2	0.2	149

L'évolution de la porosité à l'eau des bétons C2 et C3 contenant des fibres métalliques est illustrée à travers les figures 5.4 et 5.5. La porosité des bétons de fibres métalliques augmente avec la montée en température.

Pour les deux compositions de béton, la porosité des bétons de fibres métalliques varie peu par rapport aux bétons sans fibres jusqu'à un chauffage à 300°C. La porosité relative des bétons CS2-30 est de 109% (C2 : 111%) et celle des bétons CS3-30 est de 120% (C3 : 120%). Contrairement aux fibres de polypropylène qui génèrent une porosité supplémentaire dès le chauffage à 150°C, les fibres métalliques modifient peu la porosité du béton jusqu'à 300°C.

Au-delà de la température 300°C, l'accroissement rapide de porosité remarqué avec les bétons sans fibres s'observe aussi avec les bétons contenant les fibres métalliques. La porosité des bétons de fibres métalliques augmente plus rapidement que celle des bétons sans fibres. Les figures 5.4 et 5.5 illustrent les différences de porosité entre les bétons sans fibres et les bétons de fibres métalliques. Après chauffage à 450°C, les porosités relatives des bétons CS2-30 et CS3-30 sont respectivement de 146% (C2 : 139%) et de 171% (C3 : 139%). La porosité supplémentaire des bétons de fibres métalliques à cette température peut s'expliquer par un affaiblissement de la liaison pâte de ciment / fibres consécutive à la déshydratation des C-S-H. Les micropores existants entre fibres et matrice prennent des tailles plus importantes. Lors des essais, nous avons remarqué pour les cycles de chauffage-refroidissement de 450°C et 600°C, que les fibres métalliques étaient plus faciles à décoller de la matrice, traduisant ainsi un affaiblissement de la liaison pâte/fibres.

En comparant l'effet des fibres de polypropylène à celui des fibres métalliques, nous constatons que les bétons de fibres de polypropylène sont plus poreux que les bétons de fibres métalliques après le chauffage. La porosité relative des bétons CP2-1 (0.11% de fibres de polypropylène) est de 153% tandis que celle des bétons CS2-20 (0.25% de fibres métalliques) est de 141% après traitement thermique à 450°C. Après chauffage à 450°C, il semble que la porosité augmente avec le dosage en fibres; peu pour les bétons CS2 et de façon plus significative pour les bétons CS3 (CS3-20 et CS3-30).

La porosité des bétons CS3 augmente plus rapidement que celle des bétons CS2. Le béton à faible rapport E/C montre un plus fort endommagement suite à une exposition à des températures élevées. Toutefois, la porosité des bétons CS2 reste toujours supérieure à celle des bétons CS3, quel que soit le cycle de chauffage.

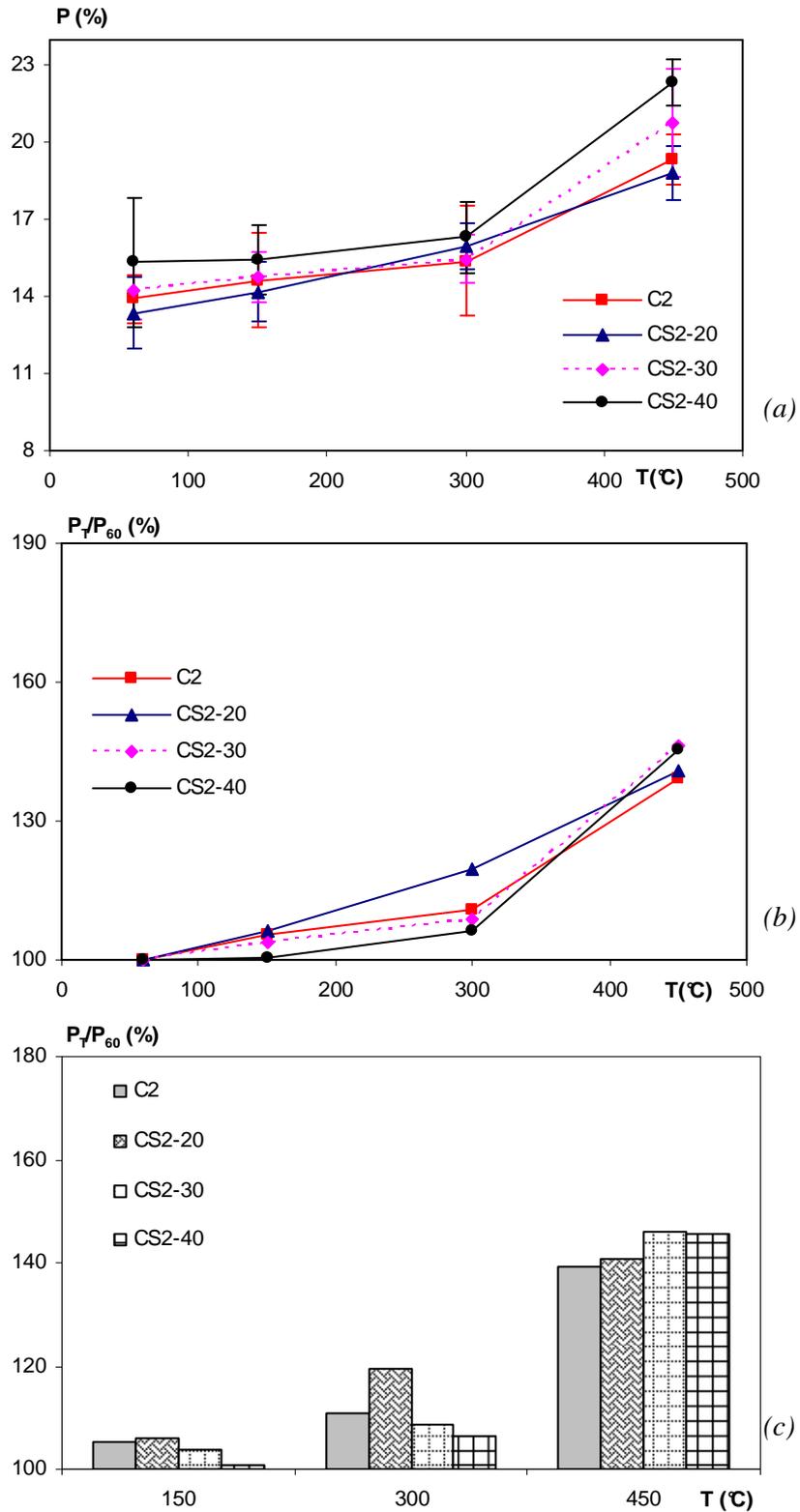


figure 5.4. Evolution de la porosité absolue (a) et porosité relative (b, c) des bétons C2 avec les fibres métalliques en fonction du cycle de chauffage-refroidissement.

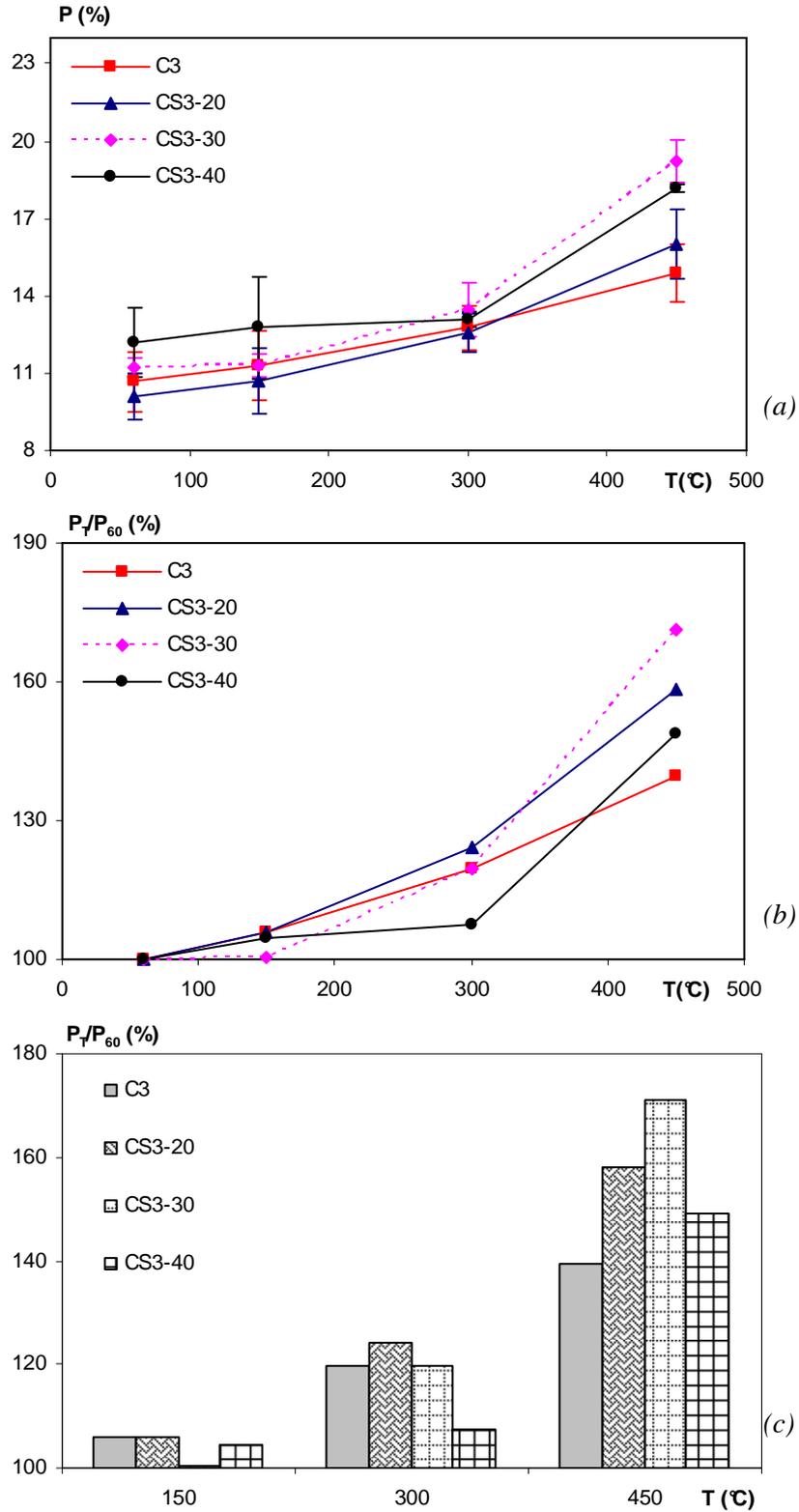


figure 5.5. Evolution de la porosité absolue (a) et porosité relative (b, c) des bétons C3 avec les fibres métalliques en fonction du cycle de chauffage-refroidissement.

5.3 Evolution des propriétés mécaniques résiduelles en fonction du chauffage

Des essais mécaniques sont réalisés sur les éprouvettes de bétons renforcés de fibres métalliques après les différents cycles de chauffage. Les résultats permettent de caractériser l'influence des fibres métalliques sur les propriétés mécaniques résiduelles : résistance à la rupture, module d'élasticité, ductilité.

5.3.1 Résistance en compression

Le tableau 5.4 résume les valeurs des résistances résiduelles et relatives en compression des différents bétons de fibres métalliques CS2 et CS3. Chaque valeur est la moyenne réalisée sur trois éprouvettes.

Les figures 5.6 et 5.7 montrent l'évolution de la résistance en compression en fonction de la température de chauffage des bétons CS2 et CS3. La résistance en compression des bétons de fibres métalliques baisse avec l'augmentation de la température de la même manière que pour les bétons sans fibres et avec les fibres de polypropylène : peu de perte, voire un gain de résistance avant 300°C, puis une chute rapide de résistance.

Les bétons de fibres métalliques présentent de meilleures résistances résiduelles en compression à la température ambiante que le béton sans fibres. Ce gain de résistance est plus remarquable avec les bétons CS3. On note une influence de la variation de la proportion de fibres. Cette amélioration de la résistance en compression des bétons de fibres métalliques est observée pour tous les cycles de chauffage-refroidissement. Les résistances des bétons C2 et C3 restent toujours inférieures à celles des bétons CS2 et CS3 (figure 5.6 (a) et figure 5.7 (a)).

Après chauffage à 450°C, contrairement aux bétons sans fibres ou avec les fibres de polypropylène, les bétons de fibres métalliques conservent plus de 50% de leur résistance initiale. La résistance résiduelle relative moyenne des bétons CS2 est de 65% et celle des bétons CS3 est de 57% (C2 : 44% et C3 : 38%). Le gain de résistance résiduelle en compression est quasiment du même ordre de grandeur pour les deux familles de bétons de rapports E/C différents. Le gain de résistance relative est de 21% pour le béton CS2 et 18% pour le béton CS3 après chauffage à 450°C.

Après chauffage à 600°C, la résistance relative des bétons CS2-20 et CS3-20 est respectivement de 16% et 19%. Avec un dosage minimum de 20 kg/m³ de fibres métalliques, la résistance résiduelle s'améliore (C2 : 12% et C3 : 13%). La résistance résiduelle augmente avec le dosage en fibres. La résistance résiduelle relative des bétons CS2-40 à la même température est de 25%.

tableau 5.4 Résistances en compression des bétons avec et sans fibres métalliques.

Bétons	Unités	Températures (°C)				
		20	150	300	450	600
C2	MPa	46.0	36.9	40.1	20.3	5.3
	MPa	57.9	51.2	56.0	36.3	9.0
CS2-20	Ecart type	2.0	1.8	3.9	2.8	0.5
	(%)	100	89	97	63	16
CS2-30	MPa	57.7	46.8	54.8	37.5	10.2
	Ecart type	3.3	1.5	0.9	0.4	0.1
	(%)	100	81	95	65	18
CS2-40	MPa	55.9	44.8	52.1	37.7	13.9
	Ecart type	0.4	1.8	1.4	0.8	0.3
	(%)	100	80	93	67	25
C3	MPa	70.2	62.6	59.6	26.9	9.3
	MPa	69.7	69.9	71.3	43.5	13.4
CS3-20	Ecart type	4.9	3.4	3.1	2.7	0.3
	(%)	100	100	102	62	19
CS3-30	MPa	74.7	67.8	73.8	36.8	15.1
	Ecart type	1.6	0.8	0.5	2.4	1.1
	(%)	100	91	99	49	20
CS3-40	MPa	77.9	69.4	79.1	46.5	14.6
	Ecart type	2.0	1.7	1.9	2.6	0.3
	(%)	100	89	102	60	19

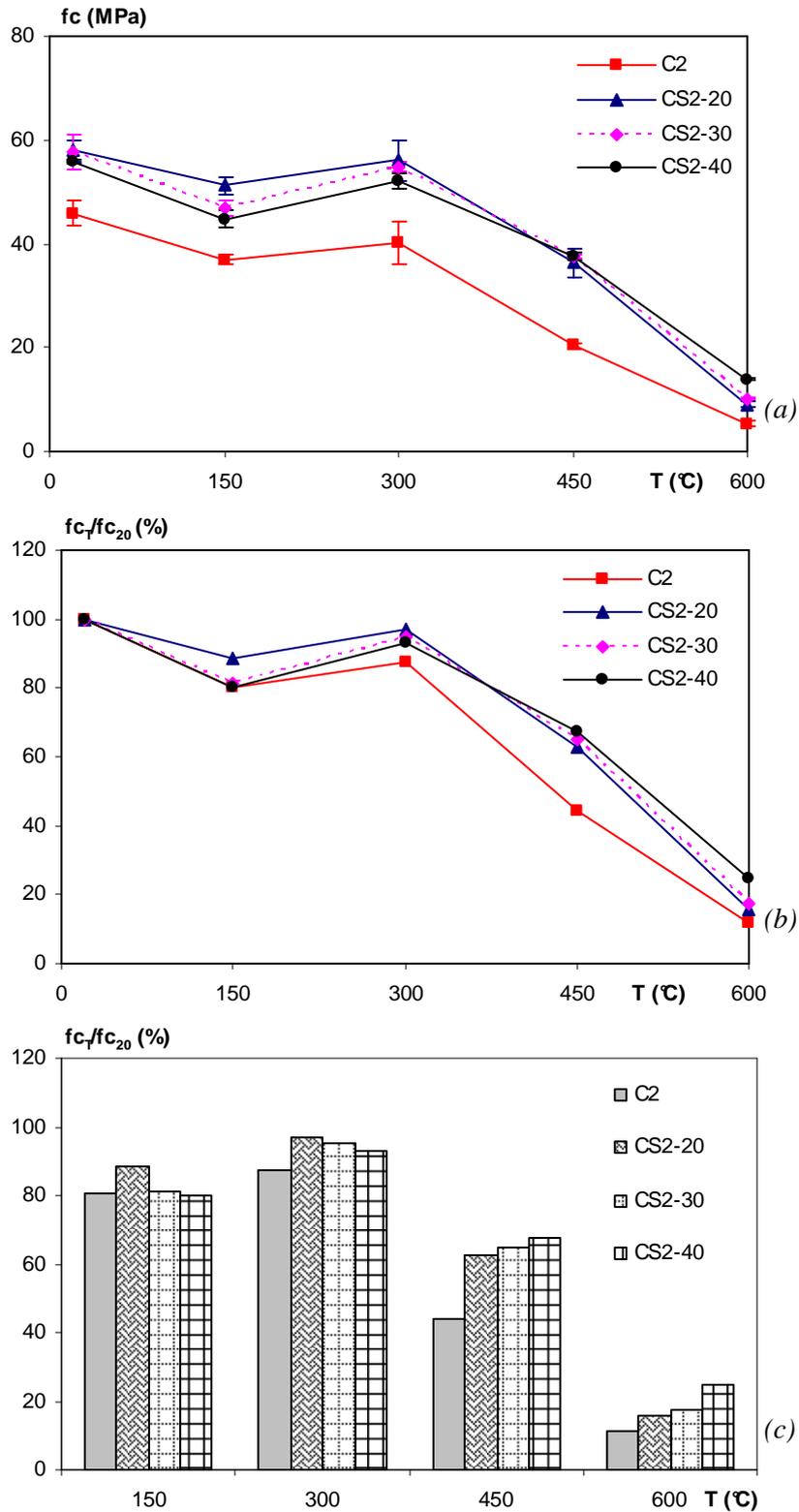


figure 5.6. Evolution de la résistance résiduelle en compression (a) et relative (b, c) des bétons C2 avec les fibres métalliques en fonction de la température du cycle de chauffage-refroidissement.

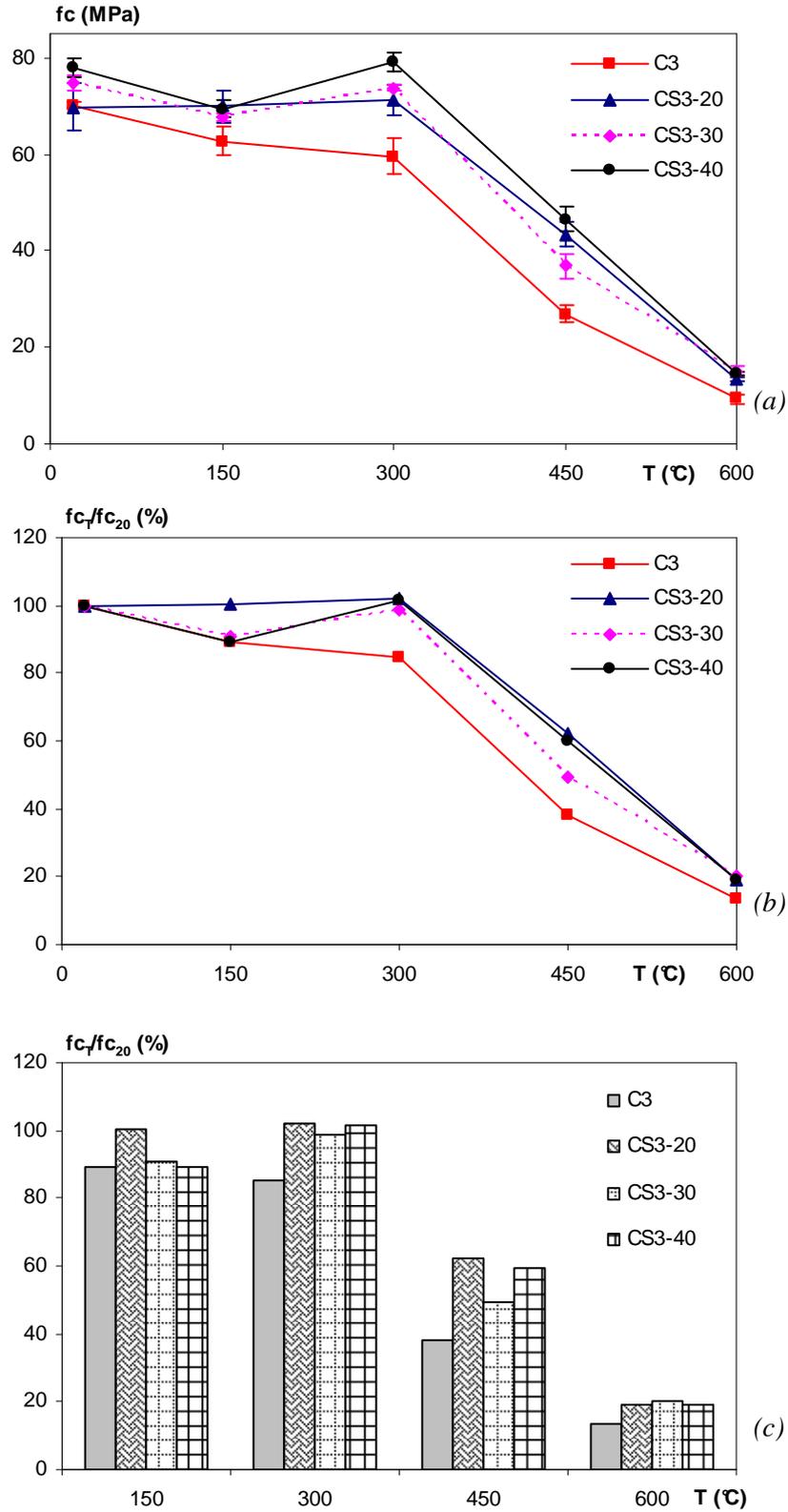


figure 5.7. Evolution de la résistance résiduelle en compression (a) et relative (b, c) des bétons C3 avec les fibres métalliques en fonction de la température du cycle de chauffage-refroidissement.

Entre la température ambiante et après le chauffage à 300°C, la résistance résiduelle en compression des bétons CS2 baisse peu (baisse de résistance résiduelle relative de 5%) tandis que celle des bétons CS3 reste la même (baisse de résistance résiduelle relative de 0%). On peut noter donc, entre 20°C et 300°C, une plus grande résistance résiduelle relative en compression des bétons de fibres métalliques comparativement aux bétons avec et sans les fibres de polypropylène (baisse de résistance résiduelle relative des bétons C2 et C3 : 17% et 15%). Par contre, entre 300°C et 600°C, la perte de résistance est plus rapide pour les bétons de fibres métalliques. La perte de résistance en compression des bétons sans fibres C2 et C3 est de 76% et 72% respectivement. Les bétons CS2-20, CS3-20 et CS3-40 perdent respectivement 81%, 83% et 83% de leur résistance. Cette perte de résistance plus élevée entre 300°C et 600°C corrobore l'augmentation plus rapide de la porosité à cette même plage de température.

Malgré une perte de résistance un peu plus élevée des bétons de fibres métalliques après 300°C, la résistance en compression des bétons de fibres métalliques demeure plus grande que celle des bétons non fibrés. Les fibres métalliques dans le béton gardent leur effet favorable sur la résistance en compression même après les cycles de chauffage-refroidissement. Les bétons CS3 subissent plus de perte de résistance que les bétons CS2 entre 300°C et 450°C mais, leur résistance résiduelle en compression s'avère toujours supérieure à celle des bétons CS2.

Les différentes études menées par Chen et al. [Chen, 2004], Cheng et al. [Cheng, 2004], Poon et al. [Poon, 2004], Lau et al. [Lau, 2006] montrent aussi une amélioration de résistance résiduelle à la compression des bétons contenant des pourcentages volumiques de fibres métalliques compris entre 0.5 et 1% jusqu'à une température de 1200°C. Suhaendi et al. [Suha, 2006] observent une diminution de l'efficacité des fibres lorsque le pourcentage volumique augmente de 0.25% à 0.50% après un chauffage à 200°C. Après un chauffage à 150°C, nos résultats montrent de même le meilleur comportement résiduel des bétons contenant 0.25% (20 kg/m³) de fibres par rapport à ceux contenant 0.38 et 0.51% (30 et 40 kg/m³) de fibres. En effet, la baisse de résistance des bétons contenant 0.25% et 0.51% est de 11% et 20% pour les bétons CS2. En ce qui concerne les bétons CS3, la diminution de résistance relative est de 11% lorsque le volume de fibres métalliques varie de 0.25% à 0.51%.

Après le chauffage à 300°C, les gains de résistance sont quasiment les mêmes pour les trois pourcentages de fibres. Après le chauffage à 450°C, de meilleures performances résiduelles sont observées lorsque le dosage en fibres métalliques augmente. Le gain de résistance est cependant de faible amplitude, de quelques pourcents et est surtout visible pour les bétons CS2.

Cette étude montre qu'un pourcentage de fibres supérieur à 0.25% (20 kg/m³) n'apporte pas de réels bénéfices sur la résistance résiduelle en compression, quel que soit le cycle de chauffage.

L'utilisation des fibres métalliques dans le béton permet de rendre le matériau plus ductile. Les différents essais de compression de la température ambiante jusqu'au cycle de

chauffage-refroidissement de 600°C montrent une conservation de la ductilité des bétons de fibres. Le mode de rupture brutale caractérisant les bétons à hautes performances lors des essais de compression n'est plus observé. La figure 5.8 montre des éprouvettes cylindriques de bétons CP3-2 et CS3-30 lors du test de compression après traitement thermique à 300°C.



Béton CP3-2 après cycle de chauffage-refroidissement de 300°C.



Béton CS3-30 après cycle de chauffage-refroidissement de 300°C.

figure 5.8. *Test de compression de bétons de fibres de polypropylène et métalliques après traitement thermique à 300°C.*

5.3.2 Résistance en traction par flexion

Le tableau 5.5 rassemble les valeurs moyennes des résistances résiduelles et relatives en traction par flexion mesurées sur des éprouvettes prismatiques de section 10 x 10 x 40 cm.

Les figures 5.9 et 5.10 traduisent l'évolution de la résistance en traction des bétons CS2 et CS3 de fibres métalliques en fonction de la température de chauffage. A travers ces figures, nous retenons comme pour les bétons sans fibres ou les bétons de fibres de polypropylène que la résistance résiduelle en traction baisse de façon progressive avec la montée en température. L'allure générale de la courbe n'est pas modifiée par l'ajout de fibres métalliques.

tableau 5.5 Résistances en traction par flexion des bétons avec et sans fibres métalliques.

Bétons	Unités	Températures (°C)				
		20	150	300	450	600
C2	MPa	5.2	3.1	3.1	1.4	0.4
	MPa	5.1	4.3	4.6	2.6	1.4
CS2-20	Ecart type	0.7	0.2	0.7	0.3	0.2
	(%)	100	84	91	52	28
CS2-30	MPa	6.4	4.4	4.8	4.0	1.7
	Ecart type	0.1	0.1	0.8	0.1	0.1
	(%)	100	69	75	62	27
CS2-40	MPa	5.8	5.3	5.3	3.5	2.4
	Ecart type	0.8	0.9	1.7	0.1	0.4
	(%)	100	92	91	60	41
C3	MPa	7.3	5.4	4.6	2.8	0.7
	MPa	7.2	5.6	6.2	3.8	2.5
CS3-20	Ecart type	0.1	0.4	0.5	0.5	0.4
	(%)	100	77	86	52	35
CS3-30	MPa	6.7	6.9	5.4	3.1	2.4
	Ecart type	0.1	0.4	0.2	0.0	0.4
	(%)	100	103	82	46	37
CS3-40	MPa	7.2	7.9	5.9	5.2	2.7
	Ecart type	0.1	0.9	0.9	0.7	0.3
	(%)	100	109	83	73	38

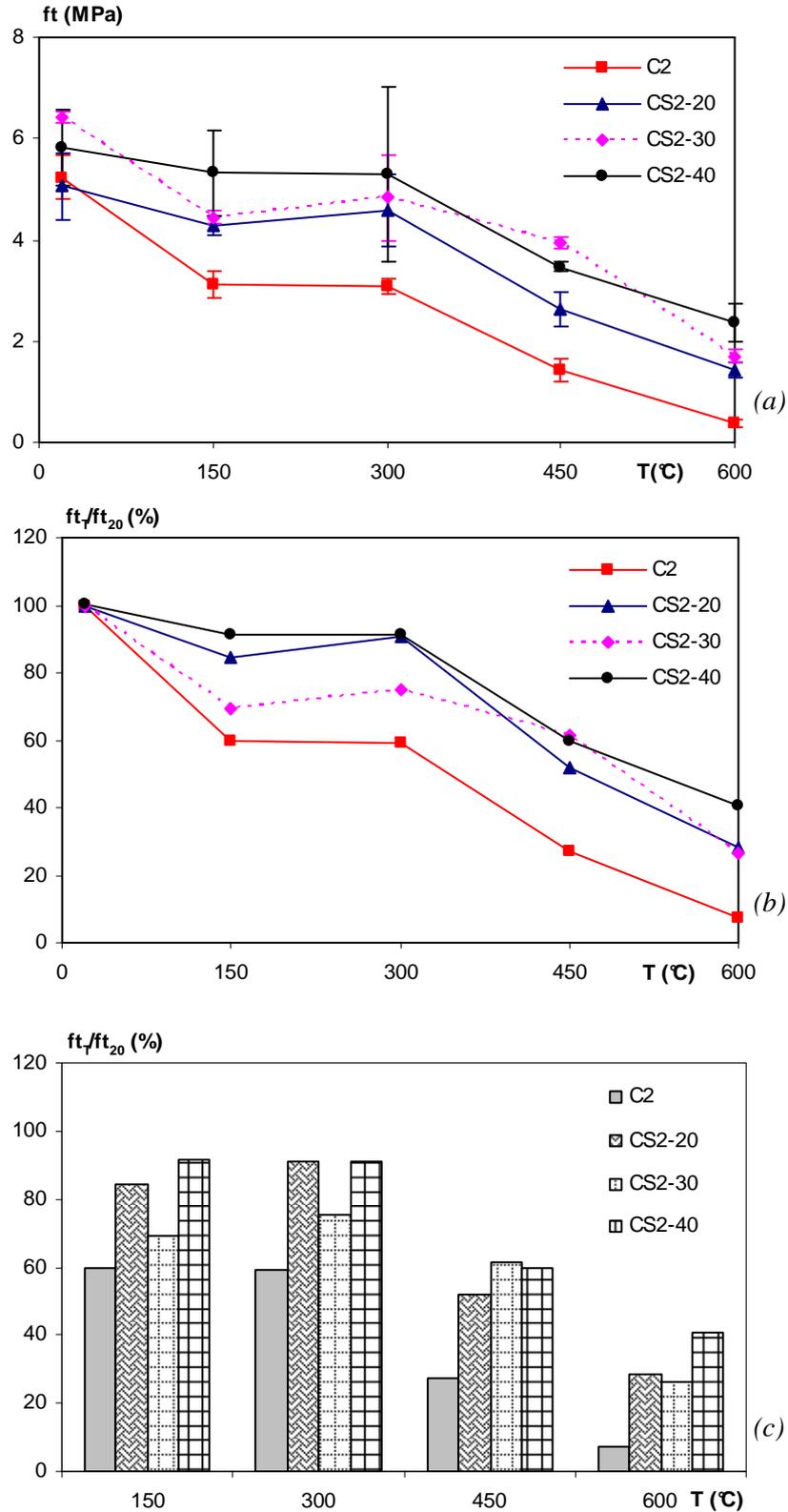


figure 5.9. Evolution de la résistance résiduelle en traction (a) et relative (b, c) des bétons C2 avec les fibres métalliques en fonction de la température du cycle de chauffage-refroidissement.

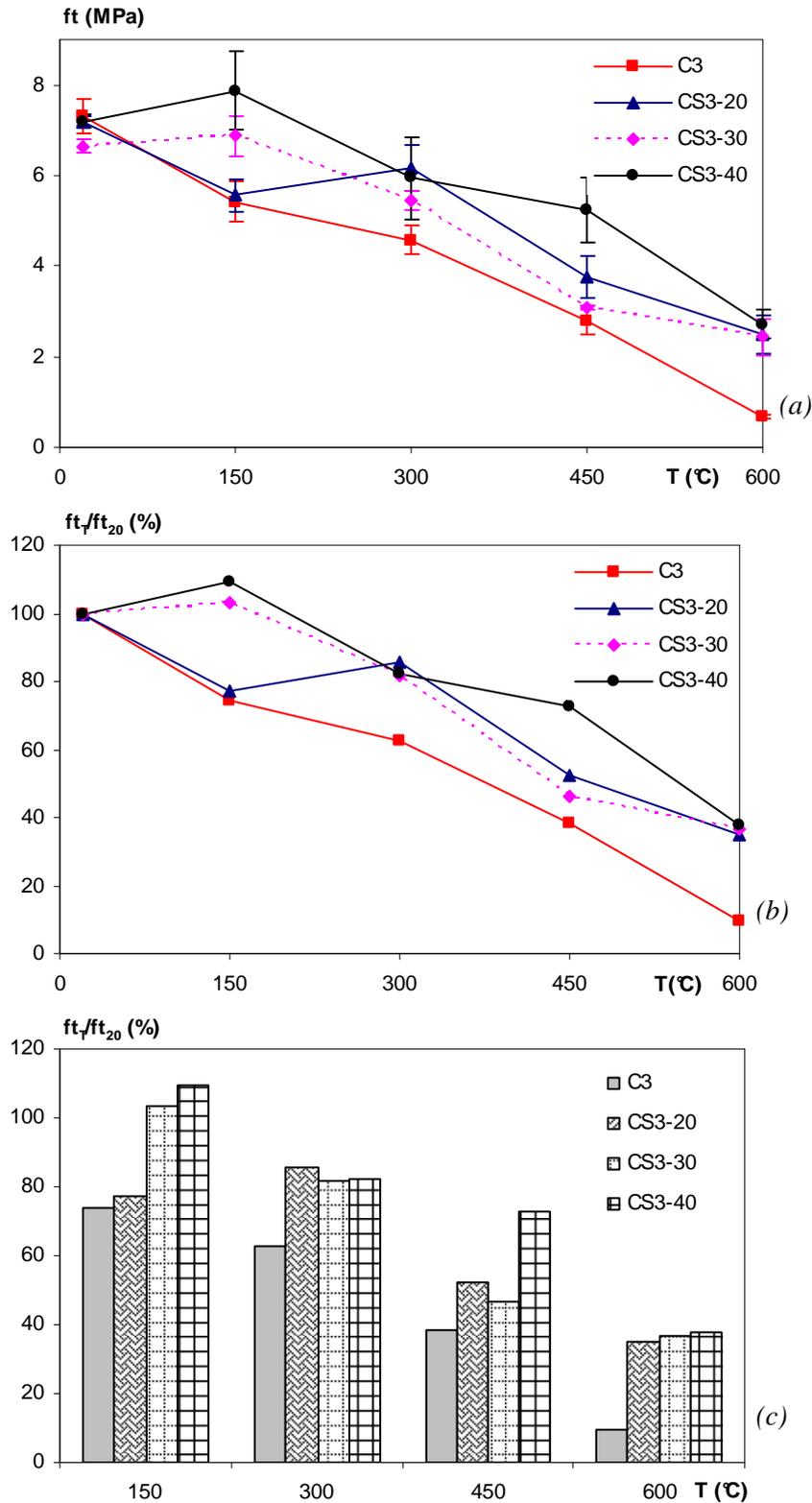


figure 5.10. Evolution de la résistance résiduelle en traction (a) et relative (b, c) des bétons C3 avec les fibres métalliques en fonction de la température du cycle de chauffage-refroidissement.

A la température ambiante, la résistance en traction des bétons de fibres métalliques varie peu par rapport à celle des bétons sans fibres. Les bétons CS2 présentent de meilleures résistances en traction que les bétons CS3. La résistance en traction du béton CS2-30 est de 6.4 MPa (C2 : 5.2 MPa) et celle du béton CS3-30 est de 6.7 MPa (C3 : 7.3 MPa). Les fibres métalliques sont utilisées dans le béton pour limiter la propagation de la fissuration et empêcher ou retarder l'apparition des macrofissures. Les fissures apparaissent moins vite au sein du béton à hautes performances que du béton normal compte tenu de sa résistance élevée en traction. De plus, la répartition ainsi que la disposition des fibres dans le béton est un facteur très important dans le comportement des bétons de fibres métalliques. Les résultats ne montrent pas d'impact significatif de la proportion de fibres sur la résistance à la traction par flexion des bétons testés.

La figure 5.11 illustre le comportement post fissuration des bétons de fibres métalliques et des bétons sans fibres. On observe un comportement ductile des bétons de fibres métalliques.

A chacun des cycles thermiques, une amélioration notable des résistances résiduelles se remarque. Le dosage en fibres métalliques influe sur cette amélioration. Le gain de résistance résiduelle en traction est supérieur au gain de résistance en compression. Après un chauffage à 600°C, les résistances résiduelles relatives moyennes en traction des bétons CS2 et CS3 sont respectivement de 32% et de 36%, soit un gain moyen de résistance relative de 25% et 27% par rapport aux bétons sans fibres (C2 et C3). Le gain de résistance résiduelle relative en compression était de 8% et 6% pour les bétons CS2 et CS3.

Entre les températures 300°C et 600°C où la perte de résistance est la plus rapide, les fibres métalliques limitent notablement la diminution des résistances résiduelles en traction. Les bétons sans fibres C2 et C3 ont perdu respectivement 52% et 53% de résistance relative entre les températures 300°C et 600°C. La baisse de résistance résiduelle relative des bétons CS2-20, CS2-40, CS3-20 et CS3-40 est respectivement de 63%, 50%, 51% et 45%. Contrairement à ce qui a été observé pour les bétons sans fibres, les bétons C3 avec fibres métalliques présentent de meilleures résistances relatives en traction que les bétons C2. Les fibres métalliques apparaissent plus efficaces en traction par flexion avec une matrice cimentaire plus dense assurant une meilleure adhérence fibre/matrice.

A la température ambiante, on remarque que le dosage en fibres a peu d'influence sur l'amélioration de la résistance en traction. Après les chauffages à 450°C et 600°C, on note une amélioration du comportement résiduel en traction avec l'augmentation du volume de fibres pour les deux familles de béton.

Les résultats sur l'étude de la résistance en traction des bétons chauffés contenant des fibres métalliques obtenus dans le cadre de cette étude vont dans le même sens que ceux de [Chen, 2004] et [Lau, 2006]. Les fibres métalliques dans le béton porté à une haute température ont une influence plus importante sur la résistance en traction qu'en

compression. Le gain de résistance relative des bétons de fibres métalliques s'observe dès le chauffage à 150°C à travers cette étude tandis que les travaux menés par [Lau, 2006] (1% de fibres) et [Suha, 2006] (0.25% et 0.50% de fibres) ne montrent pas d'apport significatif avant la température 400°C. De plus, Lau et al. [Lau, 2006] notent un bon apport des fibres jusqu'à la température de 1000°C. Au-delà de cette température, il n'y a plus de différence entre le béton sans fibres et le béton de fibres. Ces essais ont été réalisés pour une proportion volumique de fibres de 1%.

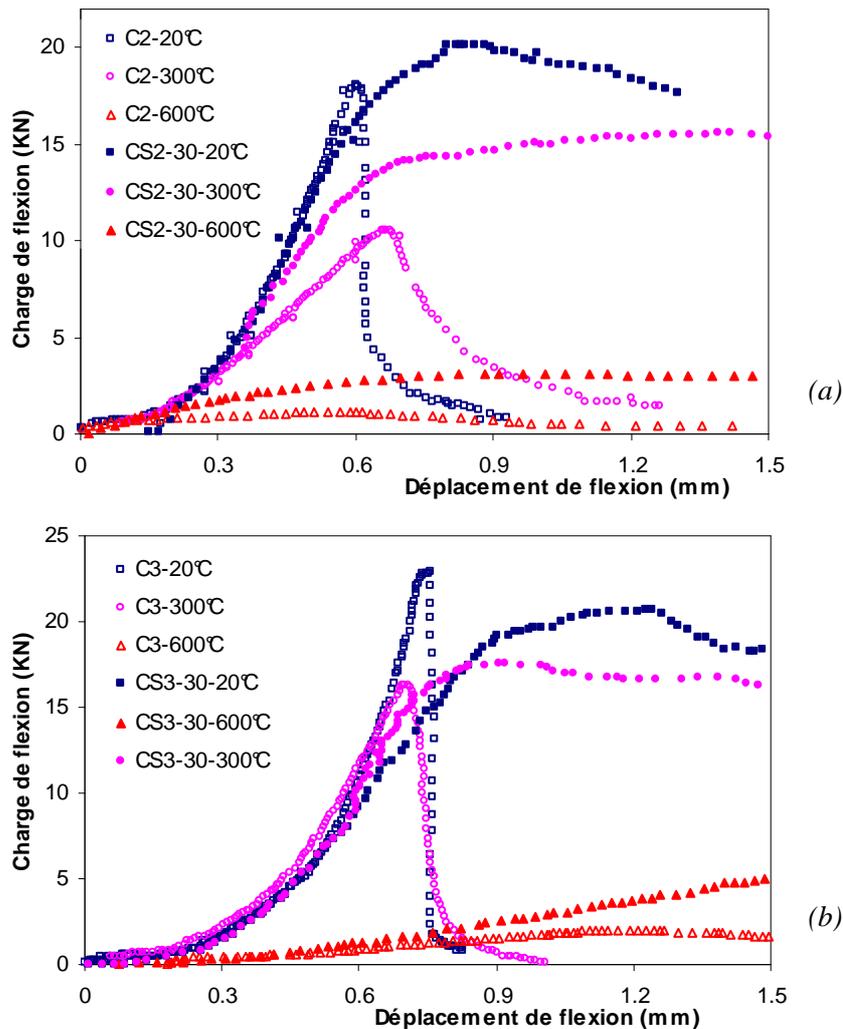


figure 5.11. Charges de flexion en fonction du déplacement des bétons C2 (a) et C3 (b) contenant des fibres métalliques.

A la température ambiante, les bétons de fibres métalliques présentent un comportement ductile. Après les différents cycles de chauffage-refroidissement, le comportement post fissuration reste ductile. La figure 5.11 montre le comportement des bétons C2 (a) et C3 (b) avec et sans fibres métalliques lors des essais de traction par flexion, après les différents cycles thermiques. On observe un pic de charge de flexion qui apparaît pour un même déplacement pour un chauffage inférieur à 300°C. A 600°C, le pic de charge de flexion est peu marqué. Toutefois, les résistances en traction des bétons

fibrés restent plus élevées que celles des bétons non fibrés. Cela traduit la reprise des efforts de traction par les fibres malgré les fissures du béton.

L'effet des fibres métalliques dans le béton C2 s'observe bien à travers les courbes d'évolution de la charge de flexion en fonction du déplacement (figure 5.11 (a)). On remarque une augmentation de l'intensité du pic de la charge de flexion des bétons de fibres métalliques par rapport aux bétons non fibrés pour tous les chauffages. Par contre, cette influence positive des fibres sur le pic de charge de flexion n'est pas remarquée pour le béton C3 (figure 5.11 (b)).

L'utilisation des fibres métalliques dans le béton peut générer quelques questions : l'homogénéité du béton, l'orientation des fibres afin qu'elles soient sollicitées de la façon la plus efficace possible, la formation d'oursins pouvant engendrer des zones de contraintes plus importantes que d'autres. Ces différents paramètres peuvent être à l'origine des résultats contradictoires parfois observés lorsqu'on passe d'une composition de béton à une autre (soit en variant le volume de fibres, soit en changeant le rapport E/C).

5.3.3 Module d'élasticité

Les résultats de la détermination du module d'élasticité résiduel et relatif des bétons contenant les fibres métalliques sont résumés dans le tableau 5.6.

L'évolution du module d'élasticité en fonction de la température de surface des bétons CS2 et CS3 est respectivement montrée à travers les figures 5.12 et 5.13.

tableau 5.6 Module d'élasticité des bétons avec et sans fibres métalliques.

Bétons	Unités	Températures (°C)				
		20	150	300	450	600
C2	GPa	37.7	29.4	21.5	5.8	1.3
	GPa	39.7	33.2	27.1	9.0	1.9
CS2-20	Ecart type	0.2	0.7	1.3	1.0	0.2
	(%)	100	84	68	23	5
CS2-30	GPa	39.2	32.0	26.6	9.0	1.8
	Ecart type	0.0	0.9	1.3	0.5	0.0
	(%)	100	82	68	23	5
CS2-40	GPa	37.6	31.7	24.8	10.0	2.1
	Ecart type	0.4	0.8	0.7	0.4	0.2
	(%)	100	84	66	27	6
C3	GPa	44.1	38.2	25.7	6.3	1.6
	GPa	43.7	39.6	30.6	9.9	2.5
CS3-20	Ecart type	1.0	1.3	0.7	0.5	0.1
	(%)	100	91	70	23	6
CS3-30	GPa	45.3	38.2	30.8	7.3	1.8
	Ecart type	0.4	0.7	0.9	0.9	0.0
	(%)	100	84	68	16	4
CS3-40	GPa	44.9	38.7	32.1	9.1	1.8
	Ecart type	1.1	0.5	1.1	0.3	0.0
	(%)	100	86	71	20	4

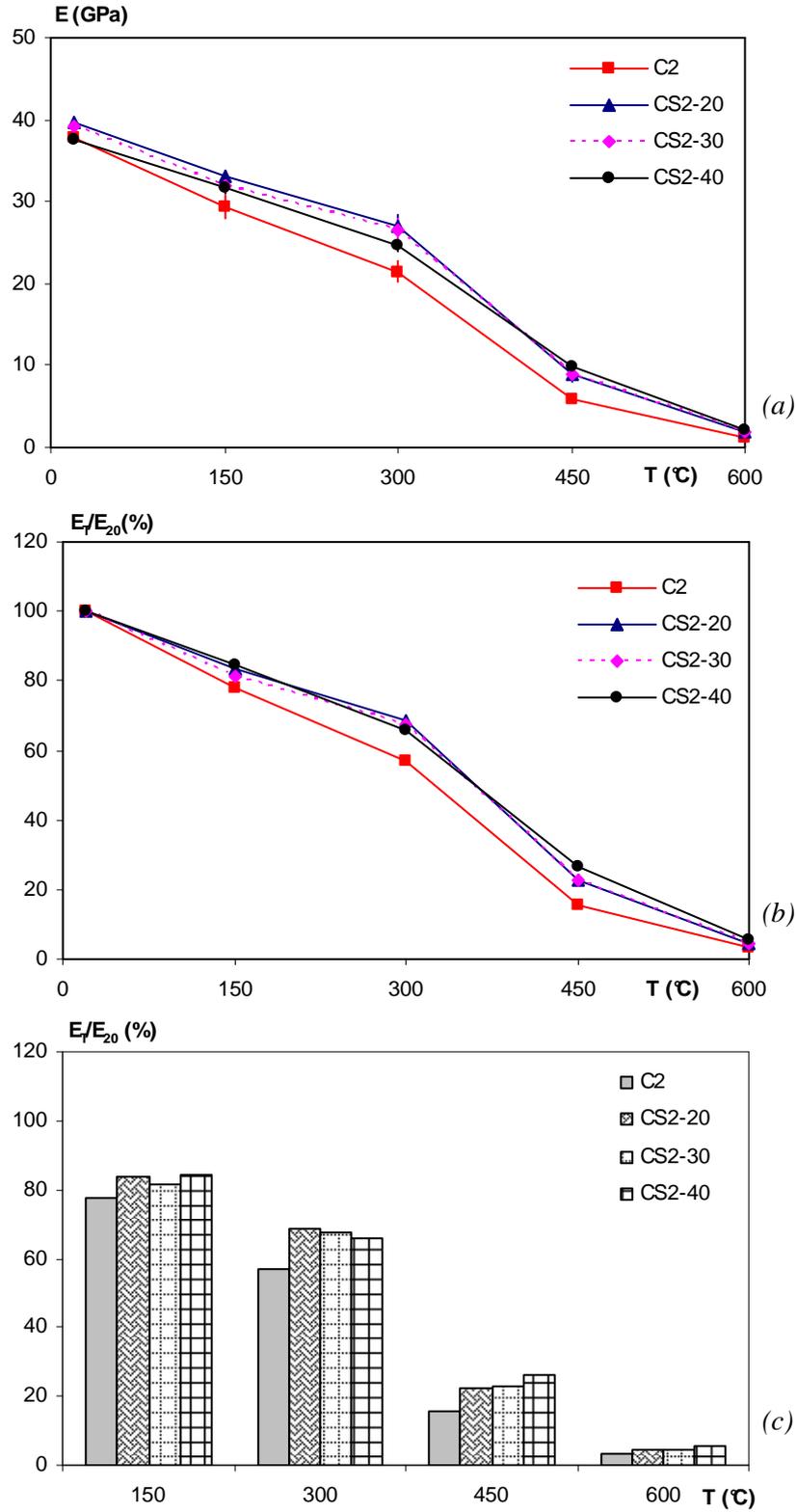


figure 5.12. Evolution du module d'élasticité résiduel (a) et relatif (b, c) des bétons C2 avec les fibres métalliques en fonction de la température du cycle de chauffage-refroidissement.

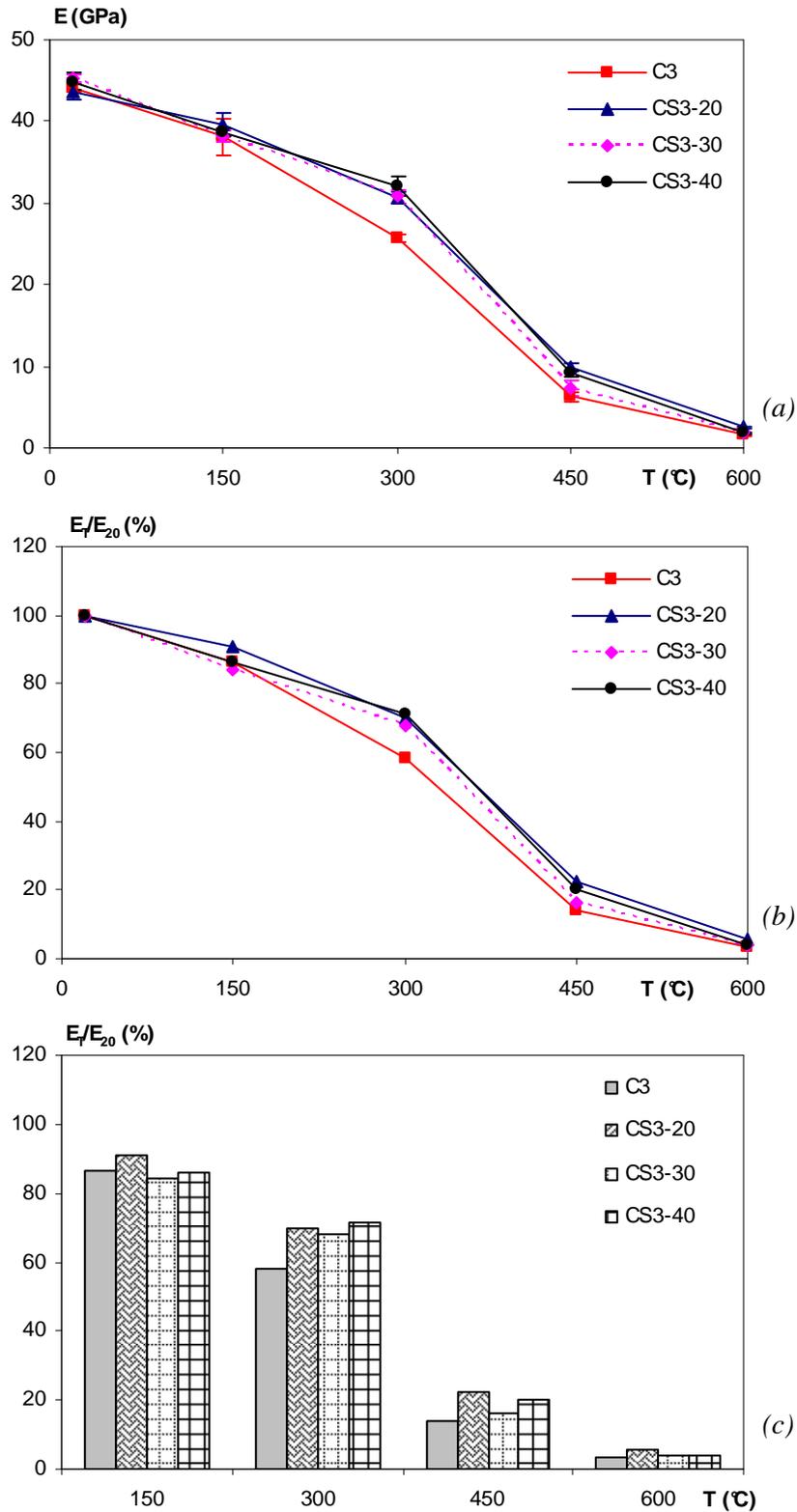


figure 5.13. Evolution du module d'élasticité résiduel (a) et relatif (b, c) des bétons C3 avec les fibres métalliques en fonction de la température du cycle de chauffage-refroidissement.

A la température ambiante, on n'observe pas une influence positive des fibres métalliques sur le module d'élasticité. Le module d'élasticité des bétons C2, CS2-40, C3 et CS3-40 est respectivement 37.7 ± 0.5 GPa, 37.6 ± 0.4 GPa, 44.1 ± 0.4 GPa et 44.9 ± 1.1 GPa. Avec la montée de la température, le module d'élasticité résiduel baisse de façon progressive. L'allure de la courbe est la même pour les deux compositions de bétons avec et sans fibres métalliques. Les deux domaines caractérisant l'évolution du module d'élasticité en fonction de la température sont conservés.

Avec les fibres de polypropylène, une faible baisse de module d'élasticité résiduel est observée, tandis qu'avec les fibres métalliques une augmentation du module d'élasticité résiduel est observée aux différents cycles de chauffage-refroidissement : 150°C, 300°C et 450°C. Le gain de module relatif est d'environ 11% pour les deux bétons CS2 et CS3 après chauffage à 300°C et à 450°C. Ce gain varie avec le rapport E/C. Le gain moyen du béton CS3 est de 5% tandis que celui du béton CS2 est de 9% après chauffage à 450°C. Après chauffage à 600°C, la différence entre le béton sans fibres et le béton avec les fibres métalliques n'existe quasiment plus, quel que soit le dosage.

Les mesures de porosité montrent une faible porosité des bétons de fibres métalliques jusqu'au chauffage à 300°C. On remarque un accroissement moins rapide du volume poreux. Les fibres métalliques retardent voire empêchent l'ouverture et la propagation des fissures. Ce faible volume poreux corrobore la faible perte de module d'élasticité des bétons de fibres métalliques jusqu'à 300°C. Au-delà de la température 300°C, les mesures de porosité montrent un accroissement rapide de la porosité des bétons de fibres métalliques, tandis que les modules d'élasticité résiduels des bétons de fibres métalliques restent toutefois supérieurs aux modules d'élasticité résiduels des bétons sans fibres. La bonne adhérence entre la pâte et les fibres confèrent à la structure sa rigidité. La perte d'adhérence pourra engendrer une baisse de rigidité de la structure et les résultats voisins du module d'élasticité, après chauffage à 600°C, entre le béton de fibres et le béton sans fibres le montrent.

Entre 20°C et 300°C, le module d'élasticité résiduel des bétons CS3 reste supérieur à celui des bétons CS2. Pour les températures 450°C et 600°C, les modules d'élasticité résiduels des deux familles de bétons sont voisins.

Ces résultats de l'étude de l'influence des fibres métalliques sur le comportement du module d'élasticité corroborent ceux obtenus par Cheng et al [Cheng, 2004]. Ces auteurs ont aussi observé un effet positif de 0.54% de fibres métalliques pour des températures allant de 20°C à 400°C. Au-delà de cette plage de température, l'apport des fibres métalliques n'est plus significatif. Entre les températures 400°C et 600°C, la perte de module d'élasticité relatif des bétons contenant les fibres métalliques est plus grande que celle des bétons sans fibres.

5.4 Relation entre porosité et résistance en compression

En regroupant les résultats de la porosité et de la résistance en compression de tous les bétons de fibres métalliques en fonction de la température (figure 5.14), les coefficients des équations de Schiller, Hasselmann et Ryshkevitch sont les suivants :

$k_s = 58,53$	$p_o = 38,676 \%$	avec	$R^2 = 0,7569$	(Schiller)
$f_{c,o} = 160,04 \text{ MPa}$	$k = 0,0713$	avec	$R^2 = 0,7881$	(Ryshkevitch)
$f_{c,o} = 113,94 \text{ MPa}$	$k_h = 3,8173$	avec	$R^2 = 0,7498$	(Hasselmann)

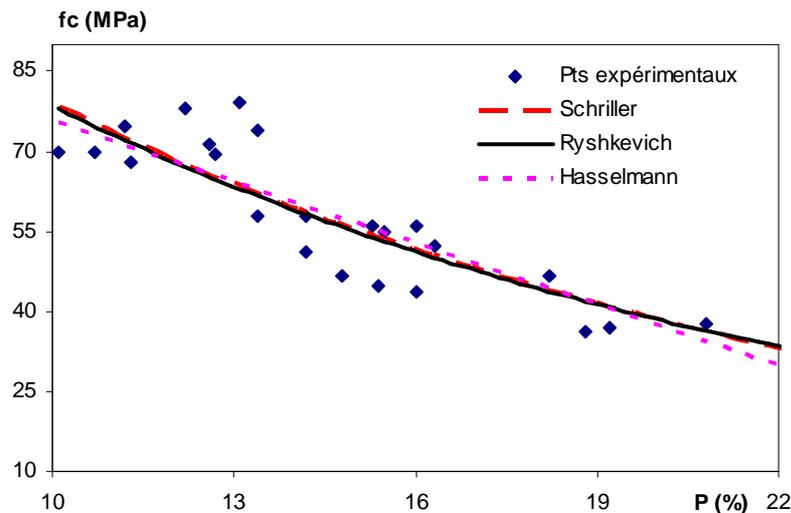


figure 5.14. Résistance résiduelle en compression en fonction de la porosité des bétons de fibres métalliques.

Avec les fibres métalliques, les équations de Schiller, Ryshkevitch et Hasselmann donnent des coefficients de corrélation plus faibles pour les bétons avec des fibres métalliques que pour des bétons sans fibres. Ces coefficients sont supérieurs à ceux des bétons de fibres de polypropylène. Comme dans les autres cas, l'équation proposée par Ryshkevitch présente la corrélation la plus adaptée. La dispersion des points expérimentaux semble traduire une certaine hétérogénéité due à la dispersion des fibres métalliques dans le béton.

5.5 Conclusion sur le comportement des bétons de fibres métalliques

Deux compositions de bétons avec trois proportions de fibres métalliques ont fait l'objet de ce chapitre. Les éprouvettes issues de ces compositions ont été soumises à différents cycles de chauffage-refroidissement puis les propriétés physiques et les caractéristiques mécaniques résiduelles ont été déterminées. Lors des cycles de chauffage, aucune éprouvette de béton contenant des fibres métalliques n'a éclaté. La mesure de la différence de température conduit, comme pour le cas des bétons de fibres de

polypropylène, à une influence des fibres métalliques sur le gradient thermique liée à la famille du béton. Dans le cas des bétons CS2, le gradient thermique a augmenté et avec les bétons CS3, une baisse du gradient est remarquée.

La perte de masse des bétons augmente avec la température selon les trois domaines précédemment décrits pour les bétons sans fibres. Nous remarquons une baisse de perte de masse avec l'addition de fibres, liée à la substitution de granulats humides par les fibres. Les bétons CS2 ont présenté une perte de masse plus élevée que celle des bétons CS3.

La porosité à l'eau des bétons de fibres métalliques varie peu jusqu'à la température 300°C. La présence de fibres métalliques entraîne une augmentation de la porosité à partir du cycle de 450°C. Par rapport aux bétons de fibres de polypropylène, la porosité supplémentaire induite par la présence des fibres métalliques est faible. Après le chauffage à 450°C, la porosité des bétons CP3-2 (0.22% de fibres de polypropylène) a augmenté de 6% par rapport à celle du béton sans fibres tandis que celle des bétons CS3-20 (0.25% de fibres métalliques) croît de 1%. L'augmentation de la porosité des bétons CS2 est peu sensible tandis que celle des bétons CS3 est plus importante. Elle traduit ainsi un plus grand endommagement des bétons CS3 dû à la présence de fibres. La porosité des bétons CS3 reste toutefois inférieure à celle des bétons CS2, quel que soit le cycle de chauffage.

L'évolution des résistances en compression et du module d'élasticité en fonction de la température de chauffage des bétons de fibres métalliques peuvent être regroupées en deux domaines comme pour les bétons sans fibres et les bétons de fibres de polypropylène. L'ajout des fibres métalliques dans le béton entraîne d'une façon générale une amélioration des propriétés mécaniques à la température ambiante et jusqu'au dernier cycle testé, 600°C. Le gain sur la résistance en traction est meilleur que sur la résistance en compression et le module d'élasticité. Après le chauffage à 600°C, le gain de résistances résiduelles relatives en traction et en compression et du module d'élasticité relatif des bétons CS3 est respectivement de 27%, 6% et 1%. On note que l'influence des fibres métalliques sur la résistance en compression et le module d'élasticité diminue fortement après le chauffage à 600°C tandis que sur la résistance en traction, elle demeure importante. L'amélioration du comportement résiduel en traction avec l'augmentation du volume en fibres métalliques est aussi remarquée notamment pour les chauffages à 450°C et 600°C. La ductilité post fissuration des bétons de fibres métalliques est conservée après les cycles de chauffage-refroidissement.

A travers ce chapitre, nous avons montré l'amélioration des propriétés mécaniques résiduelles des bétons contenant des fibres métalliques. La stabilité thermique des éprouvettes n'est pas modifiée. Dans le chapitre précédent, il a été montré l'amélioration de la stabilité thermique des bétons en leur ajoutant des fibres de polypropylène. Mais, les propriétés mécaniques de ces bétons baissent d'une façon générale avec le dosage en fibres de polypropylène. Dans le chapitre suivant, nous étudierons l'effet combiné des

fibres de polypropylène et métalliques sur la stabilité thermique et les propriétés mécaniques résiduelles des bétons.

Chapitre 6 - COMPORTEMENT DES BETONS DE COCKTAIL DE FIBRES

6.1 Introduction

Les essais réalisés sur les bétons contenant les fibres de polypropylène soumis à une température élevée ont montré une amélioration de la stabilité thermique du béton avec l'ajout des fibres. L'étude des propriétés physiques et mécaniques des bétons de fibres de polypropylène a montré une augmentation du volume poreux avec la montée en température et une baisse de résistance mécanique résiduelle. Les mêmes études réalisées sur des bétons de fibres métalliques ont montré une amélioration des performances mécaniques résiduelles.

Le but du présent chapitre est de comparer le comportement à haute température du béton contenant à la fois des fibres de polypropylène et des fibres métalliques à ceux des bétons sans fibres, des bétons avec fibres de polypropylène et des bétons avec fibres métalliques. L'étude concerne le béton C3 caractérisé par un faible rapport E/C, présentant un plus grand risque d'éclatement que le béton C2. Les dosages de fibres de polypropylène utilisés sont de 1 kg/m^3 et 2 kg/m^3 (correspondant à une fraction volumique respective de 0.11 et 0.22%) tandis que ceux des fibres métalliques sont de 30 kg/m^3 et 40 kg/m^3 (correspondant à une fraction volumique respective de 0.38 et 0.51%). Les combinaisons de fibres testées nommées comme dans le Chapitre 2 -sont les suivantes : 30 x 1, 30 x 2, 40 x 1 et 40 x 2 (fibres de polypropylène x fibres métalliques ' kg/m^3 '). Les éprouvettes issues de ces compositions de bétons sont conditionnées comme décrit dans le chapitre 2 et testées au bout de quatre vingt dix jours. Les essais de caractérisation sont effectués à la température ambiante (20°C) et à la suite des cycles de chauffage-refroidissement de 300°C et 600°C . Nous nous sommes limités à ces deux cycles de chauffage-refroidissement car ces températures représentent les bornes des domaines de l'évolution de la résistance en compression, du module d'élasticité et de la perte de masse au cours du chauffage.

6.2 Evolution des propriétés physiques en fonction du chauffage

6.2.1 Différence de température entre la surface et le centre de l'éprouvette

Les thermocouples au centre et à la surface des éprouvettes ont permis de tracer la courbe de différence de température des bétons de cocktail de fibres au cours du cycle de chauffage-refroidissement de 600°C . L'évolution de la différence de température pour les différents dosages des bétons de cocktails de fibres est illustrée sur la figure 6.1. Pour tous les bétons, l'évolution de la différence de température est la même quel que soit le dosage du cocktail de fibres. Nous remarquons une légère variation de la valeur maximale de la différence de température en fonction de la composition du cocktail de fibres.

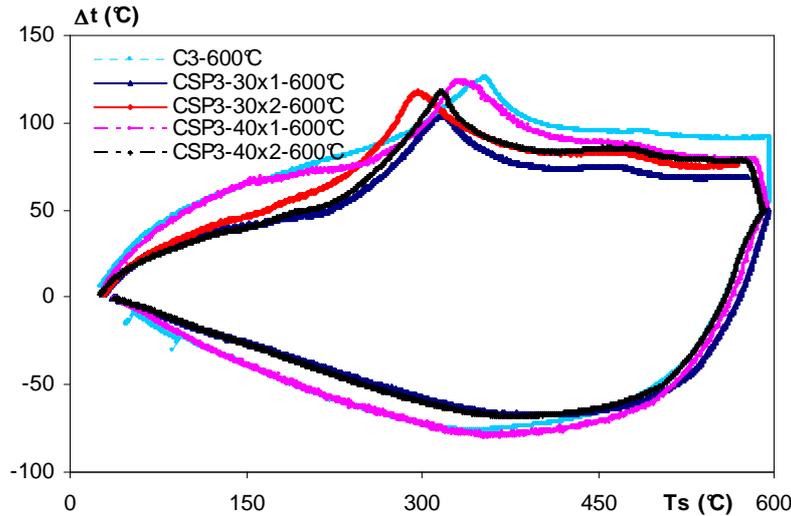


figure 6.1. Evolution de la différence de température centre/surface en fonction de la température de surface des éprouvettes de bétons de cocktail de fibres, pour le cycle de chauffage à 600°C.

Le tableau 6.1 présente les valeurs maximales de la différence de température, du gradient thermique et de la température de surface d'apparition du pic de différence de température des bétons de cocktail de fibres étudiés.

tableau 6.1 Différence de température et gradient thermique maximaux des bétons de cocktail de fibres comparés à ceux des bétons avec et sans fibres de polypropylène et fibres métalliques.

Bétons	ΔT_{\max} (°C)	$\frac{\Delta T_{\max}}{\Delta r}$ (°C.cm ⁻¹)	T_{surf} (°C)
CSP3-30x1	104	13.0	317
CSP3-30x2	118	14.8	297
CSP3-40x1	124	15.5	336
CSP3-40x2	118	14.8	315
C3	127	15.9	340
CP3-1	137	17.1	323
CP3-2	119	14.9	295
CS3-30	116	14.5	338
CS3-40	122	15.3	352

La différence de température atteint sa valeur maximale autour d'une température de 300°C. Nous remarquons une légère variation de cette différence de température avec la proportion de fibres du cocktail. Cette variation s'accompagne d'une baisse de la température de surface d'apparition du pic par rapport aux bétons contenant uniquement les fibres métalliques. Ceci confirme l'impact des fibres de polypropylène sur le transfert de chaleur au sein du béton à hautes performances comme le montraient les résultats sur les bétons CP3 (Chapitre 4).

Les différences de gradient thermique entre les formulations des bétons de cocktail de fibres sont peu significatives compte tenu de l'incertitude de la mesure. Il semble d'une façon générale que la différence de température maximale dans ces bétons soit inférieure à celle des bétons sans fibres.

6.2.2 Perte de masse

Les résultats des pertes de masse des bétons de cocktail de fibres sont recensés dans le tableau 6.2. La figure 6.2 montre l'évolution de la perte de masse des bétons C3 et CSP3 en fonction de la température de chauffage.

La perte de masse des bétons CSP3 varie peu par rapport à celle des bétons C3 (figure 6.2 (b)). Après le chauffage à 300°C, la perte de masse des bétons C3 est de 4.8% et celle des bétons CSP3-30x1 et CSP3-40x1 est de 4.7%. Les pertes de masse des bétons CP3-1 et CP3-2 étaient en effet de l'ordre de 9%. L'ajout des fibres de polypropylène dans le béton induisait une légère augmentation de la perte de masse. Cet accroissement de perte de masse n'est pas observé lorsqu'il s'agit du cocktail de fibres. De moindres pertes de masse liées à la substitution des granulats ont été observées avec les bétons de fibres métalliques comparativement aux bétons sans fibres. La perte de masse des bétons CS3-30 et CS3-40, après chauffage à 300°C, était respectivement de 4.1% et 4.4%. Le béton de cocktail de fibres subit une perte de masse plus grande que les bétons de fibres métalliques.

Au delà de 300°C, la pente de la courbe de la perte de masse est quasiment la même (figure 6.2 (a)) pour les bétons avec et sans cocktail de fibres. Les résultats de perte de masse montrent l'influence du dosage des fibres métalliques (figure 6.2 (b)) dans le cocktail de fibres ainsi que l'effet favorable des fibres de polypropylène dans le transport d'humidité.

tableau 6.2 Perte de masse moyenne des bétons de cocktail de fibres comparée à celle des bétons avec et sans fibres de polypropylène et fibres métalliques.

Bétons	T (°C)	Mesures	
		Perte (%)	Ecart type
CSP3-30x1	300	4.7	0.1
	600	6.8	0.0
CSP3-30x2	300	4.6	0.1
	600	6.7	0.1
CSP3-40x1	300	4.7	0.1
	600	7.2	0.0
CSP3-40x2	300	4.9	0.1
	600	7.4	0.2
C3	300	4.8	0.0
	600	7.2	0.0
CP3-1	300	4.9	0.1
	600	7.6	0.2
CP3-2	300	4.9	0.1
	600	7.3	0.1
CS3-30	300	4.1	0.1
	600	6.8	0.1
CS3-40	300	4.4	0.1
	600	7.1	0.2

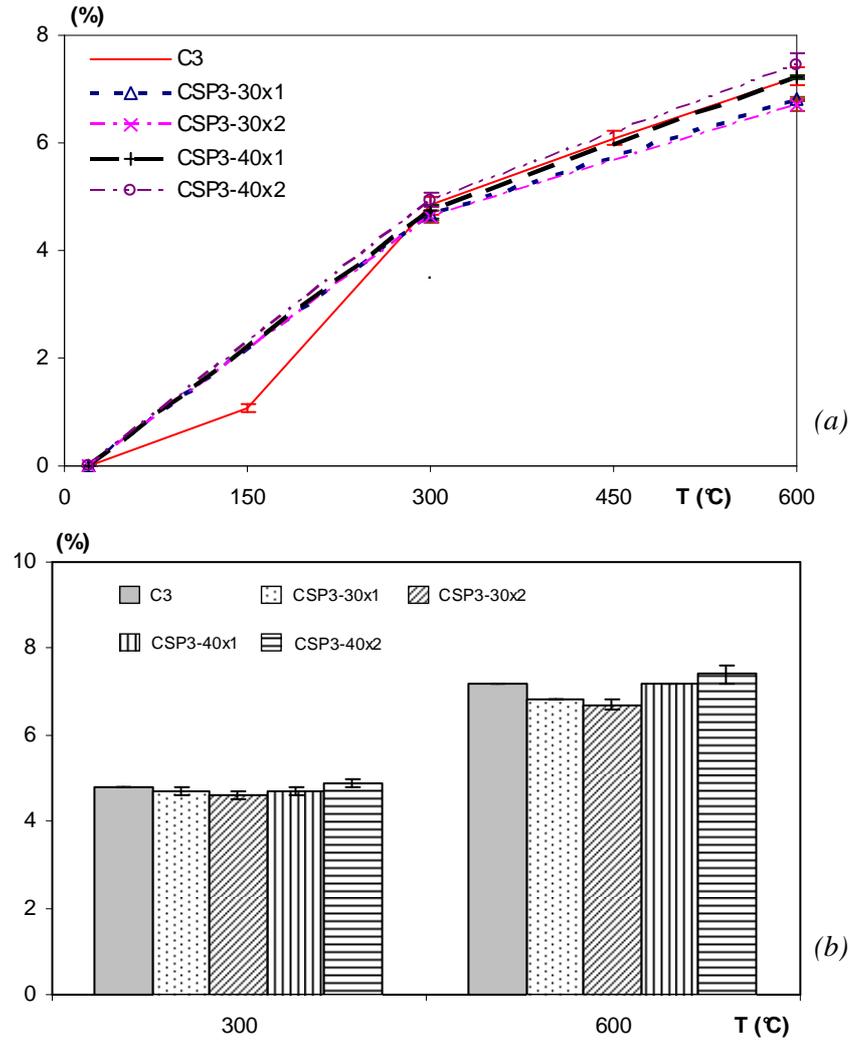


figure 6.2. Evolution de la perte de masse des bétons de cocktail de fibres en fonction de la température du cycle de chauffage-refroidissement.

6.2.3 Evolution de la porosité

Les résultats récapitulatifs de la porosité des bétons de cocktail de fibres sont reportés dans le tableau 6.3. Nous présentons les résultats de porosité pour les températures 60°C et 300°C.

tableau 6.3 Porosité moyenne des bétons de cocktail de fibres comparée à celle des bétons avec et sans fibres de polypropylène et fibres métalliques.

T (°C)	Bétons	Porosité		
		(%)	Ecart type	Relative
60	CSP3-30x1	9.8	1.1	100
	CSP3-30x2	11.3	1.2	100
	CSP3-40x1	9.7	1.2	100
	CSP3-40x2	12.8	1.5	100
	C3	10.7	1.2	100
	CP3-1	10.4	2.0	100
	CP3-2	12.2	1.2	100
	CS3-30	11.2	0.4	100
	CS3-40	12.2	1.4	100
	300	CSP3-30x1	13.6	0.8
CSP3-30x2		13.1	0.9	116
CSP3-40x1		14.0	1.5	144
CSP3-40x2		14.2	1.1	111
C3		12.8	0.9	120
CP3-1		13.3	1.5	128
CP3-2		18.7	1.3	153
CS3-30		13.4	1.0	120
CS3-40		13.1	0.3	107

La figure 6.3 illustre l'évolution de la porosité des bétons de cocktail de fibres comparée à celle des bétons avec et sans fibres de polypropylène et fibres métalliques.

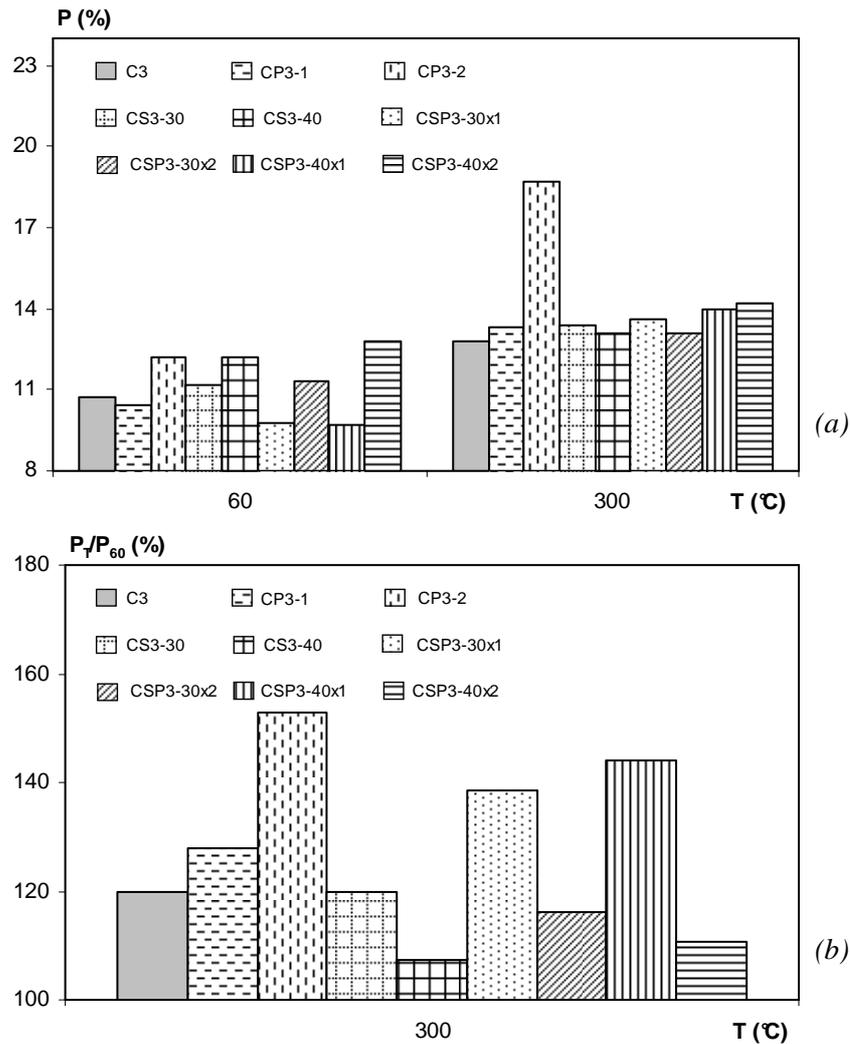


figure 6.3. Evolution de la porosité absolue (a) et porosité relative (b) de bétons de cocktail de fibres en fonction du cycle de chauffage-refroidissement.

À la température 60°C, une légère baisse de porosité des bétons de cocktail de fibres est notée avec le dosage 1 kg/m³ de fibres de polypropylène dans le mélange (CSP3-30x1 : 9.8%, CSP3-40x1 : 9.7%) par rapport au béton avec et sans les fibres de polypropylène (C3 : 10.7%, CP3-1 : 10.4%). Par contre, l'ajout de 2 kg/m³ de fibres de polypropylène dans le mélange entraîne une augmentation de la porosité comme dans le cas des bétons CP3. La porosité variait de 10.4%, pour le béton CP3-1, à 12.2%, pour le béton CP3-2. Les bétons de cocktail de fibres contenant 2 kg/m³ de fibres de polypropylène ont une porosité respective de 11.3% et 12.8% pour le CSP3-30x2 et le CSP3-40x2. La porosité initiale des bétons de cocktail de fibres diffère peu de celle des bétons de fibres de polypropylène.

Après chauffage à 300°C, les résultats précédents montraient que les fibres métalliques ne généraient pas de grande porosité supplémentaire dans le béton contrairement aux fibres de polypropylène. Les porosités relatives des bétons CP3-1 (CP3-2) et des bétons CS3-30 (CS3-40) étaient respectivement de 128% (153%) et 120%

(107%). Avec les bétons de cocktail de fibres, la porosité des bétons contenant 1 kg/m³ de fibres de polypropylène croit beaucoup plus vite que celle des bétons contenant 2 kg/m³ de fibres de polypropylène. La porosité relative du béton CSP3-40x1 est de 144% tandis que celle du béton CSP3-40x2 est de 111%. Ce phénomène s'observe pour les deux dosages en fibres métalliques. Les porosités des bétons de cocktail de fibres contenant 2 kg/m³ de fibres de polypropylène sont nettement inférieures à celles des bétons CP3-2 après chauffage à 300°C. La présence des fibres métalliques limite l'apparition de porosité supplémentaire induite par les fibres de polypropylène à cette température. On pourrait s'attendre, conformément aux résultats de porosité des bétons CS3 qu'à partir de la température 450°C, cette tendance disparaisse.

6.3 Evolution des propriétés mécaniques résiduelles en fonction du cycle de chauffage

Les propriétés mécaniques résiduelles des bétons de cocktail de fibres sont mesurées et comparées aux propriétés des bétons sans fibres, des bétons contenant les fibres de polypropylène et des bétons contenant les fibres métalliques. Cette étude permet de distinguer l'apport de chaque type de fibre dans le béton de cocktail de fibres soumis à une température élevée.

6.3.1 Résistance en compression

Le tableau 6.4 résume les valeurs des résistances résiduelles et relatives en compression des bétons de cocktail de fibres.

La figure 6.4 montre l'évolution de la résistance relative des bétons de cocktail de fibres en fonction de la température de chauffage. La résistance en compression baisse avec la température selon les deux mêmes domaines caractéristiques au comportement des bétons à haute température. Les différents teneurs en fibres de polypropylène et métalliques ne changent pas la cinétique de la perte de résistance en compression. De légères baisses ou améliorations de résistance se remarquent selon le dosage en fibres.

tableau 6.4 Résistance en compression des bétons de cocktail de fibres comparée à celle des bétons avec et sans fibres de polypropylène et fibres métalliques.

Bétons	Unités	Températures (°C)		
		20	300	600
CSP3-30x1	MPa	73.5	71.9	14.0
	Ecart type	4.1	2.7	0.1
	(%)	100	98	19
CSP3-30x2	MPa	72.9	73.9	15.4
	Ecart type	1.9	2.5	0.7
	(%)	100	101	21
CSP3-40x1	MPa	79.6	76.6	17.8
	Ecart type	0.7	4.9	0.3
	(%)	100	96	22
CSP3-40x2	MPa	77.1	71.3	17.0
	Ecart type	0.7	1.1	1.6
	(%)	100	92	22
C3	(MPa)	70.2	59.6	9.3
CP3-1	(MPa)	67.8	66.6	8.1
CP3-2	(MPa)	78.9	59.6	8.6
CS3-30	(MPa)	74.7	73.8	15.1
CS3-40	(MPa)	77.9	79.1	14.6

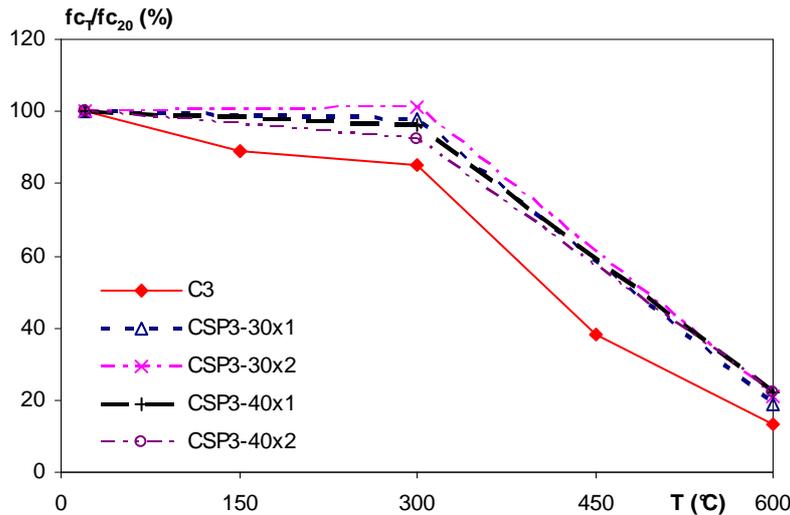


figure 6.4. Evolution de la résistance résiduelle relative en compression des bétons C3 et CSP3 en fonction de la température du cycle de chauffage-refroidissement.

6.3.1.1 Comparaison béton sans fibres / béton de cocktail de fibres

La figure 6.5 illustre l'évolution de la résistance résiduelle (a) et relative (b) en compression des bétons sans fibres (C3) et des bétons contenant le cocktail de fibres (CSP3). L'ajout du cocktail de fibres conduit à une amélioration des résistances en compression du béton.

Entre les températures 20°C et 300°C, le béton C3 perd 15% de sa résistance initiale tandis que les bétons CSP3 n'en perdent en moyenne que 3%. Les bétons de cocktail de fibres perdent moins rapidement de résistance que les bétons sans fibres. Le taux de perte de résistance relative des bétons C3 est de $0.05\% \cdot C^{-1}$ tandis que celui des bétons CSP3 est de $0.01\% \cdot C^{-1}$.

Entre les températures 300°C et 600°C, les pertes de résistance des bétons C3 et CSP3 sont respectivement de 72% et 76%. Nous remarquons cette fois un peu plus de perte de résistance pour le béton avec le cocktail de fibres que pour le béton sans fibres. Les taux de perte de résistance relative équivalents sont respectivement de $0.24\% \cdot C^{-1}$ et $0.25\% \cdot C^{-1}$ pour les bétons C3 et CSP3. Cette perte additionnelle de résistance des bétons de cocktail de fibres est en accord avec les valeurs de la porosité. Malgré la perte un peu plus élevée de résistance des bétons de cocktail de fibres, la résistance résiduelle en compression de ces bétons reste toujours meilleure. Après chauffage à 600°C, la résistance résiduelle relative en compression des bétons C3, CSP3-30x1 et CSP3-40x2 sont respectivement de 13%, 19% et 22%.

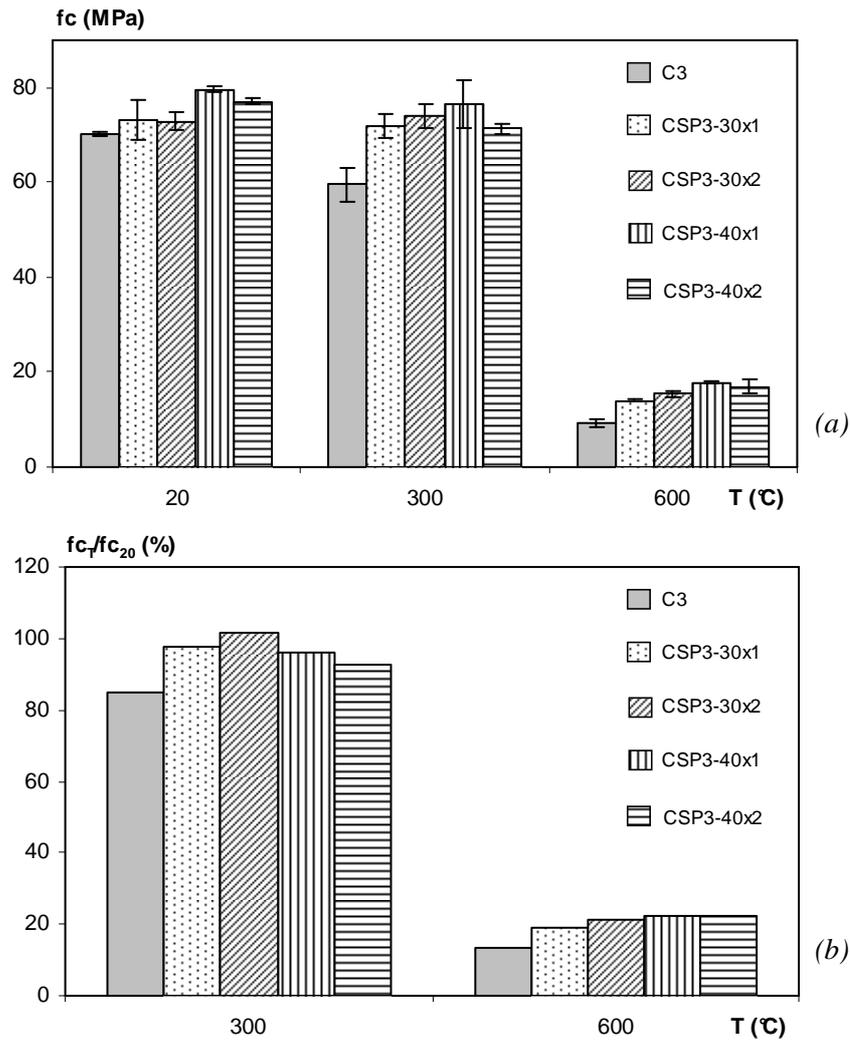


figure 6.5. Résistance résiduelle (a) et relative (b) en compression du béton sans fibres et des bétons de cocktail de fibres en fonction de la température du cycle de chauffage-refroidissement.

6.3.1.2 Comparaison béton de fibres de polypropylène / béton de cocktail de fibres

La figure 6.6 illustre l'évolution de la résistance résiduelle (a) et relative (b) en compression des bétons de fibres de polypropylène (CP3) et des bétons contenant le cocktail de fibres (CSP3). Les bétons de cocktail de fibres possèdent une meilleure résistance résiduelle que les bétons de fibres de polypropylène.

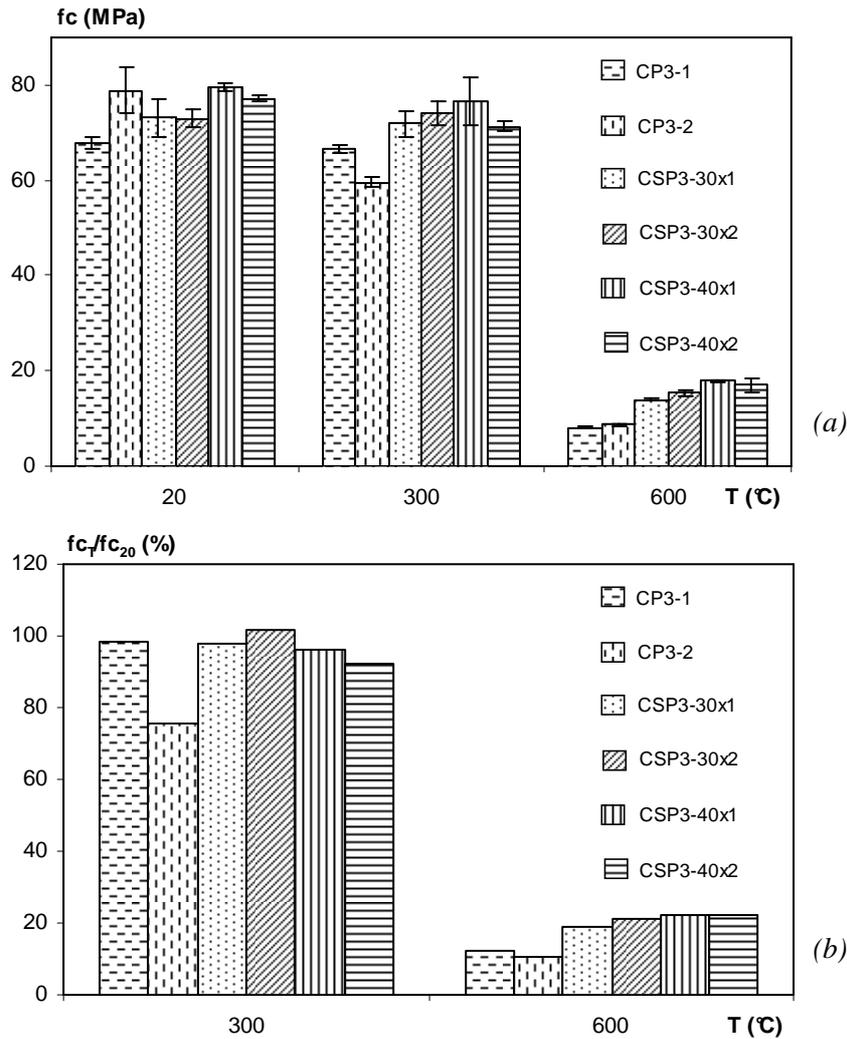


figure 6.6. Résistance résiduelle (a) et relative (b) en compression des bétons de fibres de polypropylène et des bétons de cocktail de fibres en fonction de la température du cycle de chauffage-refroidissement.

Entre les températures 20°C et 300°C, la perte moyenne de résistance résiduelle relative des bétons CP3-1 et CP3-2 était de 13%. L'ajout uniquement de 30 kg/m³ de fibres métalliques dans le mélange limite cette perte à 1%. Le dosage de 40 kg/m³ n'apporte pas une amélioration supplémentaire significative.

Entre les températures 300°C et 600°C, les pertes de résistance relative moyenne des bétons CP3 et CSP3 sont de même grandeur et égales à 76%. Le taux de perte de résistance résiduelle relative des deux groupes de béton est le même (0.25%.C⁻¹). Les résistances résiduelles des bétons de cocktail de fibres restent meilleures après chauffage à 600°C.

D'une manière générale, l'impact de la proportion de fibres de polypropylène n'est pas aussi significatif dans le béton de cocktail de fibres que dans le béton contenant uniquement les fibres de polypropylène. L'augmentation de la quantité de fibres de

polypropylène de 1 à 2 kg/m³ conduit à une baisse de résistance résiduelle relative en compression de 23% tandis qu'avec le cocktail de fibres cette baisse est de l'ordre de 4% après chauffage à 300°C.

6.3.1.3 Comparaison béton de fibres métalliques / béton de cocktail de fibres

La figure 6.7 montre l'évolution de la résistance résiduelle (a) et relative (b) en compression des bétons de fibres métalliques (CS3) et des bétons contenant le cocktail de fibres (CSP3). De légères différences de résistances résiduelles en compression sont à noter entre les bétons de fibres métalliques et les bétons de cocktail de fibres.

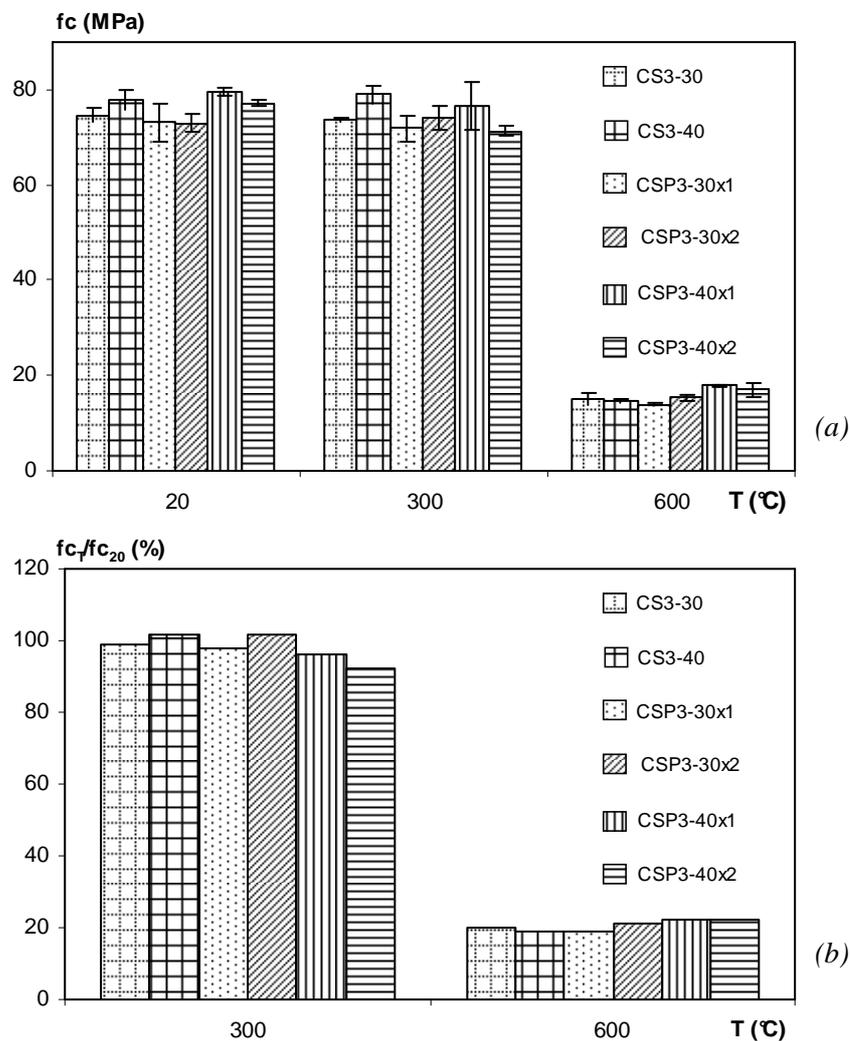


figure 6.7. Résistance résiduelle (a) et relative (b) en compression des bétons de fibres métalliques et des bétons de cocktail de fibres en fonction de la température du cycle de chauffage-refroidissement.

Entre les températures 20°C et 300°C, la résistance résiduelle relative en compression des bétons CS3-30 et CS3-40 ne variait quasiment pas tandis que celle des

bétons CSP3 diminue en moyenne de 3%. Le taux de perte de résistance relative des bétons de cocktail de fibres dépasse donc celle des bétons de fibres métalliques. Cette perte supplémentaire de résistance est liée à la présence de fibres de polypropylène dans le béton. Les résultats de résistance résiduelle en compression sont en accord avec les mesures de porosité des bétons de cocktail comparés à ceux des bétons de fibres métalliques. Après chauffage à 300°C, la porosité relative des bétons CS3-30, CS3-40, CSP3-30x1 et CSP3-40x1 est respectivement de 120%, 107%, 139% et 144%.

Entre les températures 300°C et 600°C, les pertes de résistance relative moyenne des bétons CS3 et CSP3 sont respectivement de 81% et 76%. Contrairement à ce que l'on observe entre les températures 20°C et 300°C, la perte de résistance est ensuite moins rapide pour le béton de cocktail de fibres. La présence combinée de fibres de polypropylène et métalliques semble limiter légèrement la perte de résistance en compression par rapport à la présence de fibres métalliques seules. Il est à noter que les fibres de polypropylène n'induisaient pas d'amélioration de comportement en compression par rapport au béton sans fibres. Il se pourrait que l'orientation des fibres métalliques puisse aussi influencer les résultats. Les résistances résiduelles des bétons de cocktail de fibres sont voisines des résistances des bétons contenant uniquement des fibres métalliques après chauffage à 600°C.

6.3.1.4 Synthèse sur l'évolution de la résistance résiduelle en compression des bétons de cocktail de fibres

L'étude de la résistance résiduelle en compression des bétons de cocktail de fibres de polypropylène et métalliques montre une amélioration de cette propriété par rapport au béton sans fibres, aux bétons de fibres de polypropylène et une légère baisse par rapport aux bétons de fibres métalliques à 300°C. La résistance des bétons de cocktail de fibres est beaucoup plus proche de celle des bétons de fibres métalliques que celle des bétons de fibres de polypropylène. Les résultats issus du présent travail corroborent ceux de la littérature. Le gain de résistance des bétons de cocktail de fibres par rapport au béton sans fibres a aussi été observé par [Chen, 2004], [Poon, 2004] et [Suha, 2006]. Poon et al. ont observé un gain de résistance du béton allant jusqu'à 40% après un chauffage à 800°C pour un cocktail de fibres contenant, en volume, 0.3% de fibres de polypropylène et 0.3% de fibres métalliques. Après un chauffage à 600°C, le gain de résistance du béton relevé dans notre étude était de l'ordre de 7% pour un cocktail de 0.38% de fibres métalliques avec 0.11 ou 0.22% de fibres de polypropylène.

La résistance en compression du béton semble plus liée à la teneur en fibres métalliques. En testant différents volumes de fibres de polypropylène et de fibres métalliques, Suhaendi et al. ont constaté une baisse de résistance du béton de cocktail de fibres contenant 0.25% de fibres métalliques et 0.5% de fibres de polypropylène par rapport au béton sans fibres. Avec 0.5% de fibres métalliques et 0.25% de fibres de polypropylène, les résistances en compression sont meilleures. D'après nos résultats, que ce soit avec un dosage de 0.38 ou 0.51% de fibres métalliques, l'ajout de 0.11 ou 0.22%

de fibres de polypropylène ne diminue que très faiblement la résistance résiduelle en compression à 300°C et n'a pas d'influence après le chauffage à 600°C.

Les résistances résiduelles relatives en compression des bétons de cocktail de fibres sont comparées à la moyenne de résistance des bétons de fibres de polypropylène et des bétons de fibres métalliques. Le tableau 6.5 regroupe les résistances résiduelles relatives moyennes théoriques et expérimentales en compression des compositions de béton CP3, CS3 et CSP3.

tableau 6.5 Résistances résiduelles relatives moyennes théoriques et expérimentales en compression des bétons de cocktail de fibres.

Bétons	Unités	Températures (°C)	
		300	600
CP3	(%)	87	11
CS3	(%)	100	19
<i>F_c théorique</i>	(%)	93	15
F_c expérimentale	(%)	97	21

Les tendances montrent de meilleures résistances résiduelles des bétons de cocktail de fibres par rapport aux moyennes théoriques de résistances attendues. Cette tendance est illustrée à travers la figure 6.8.

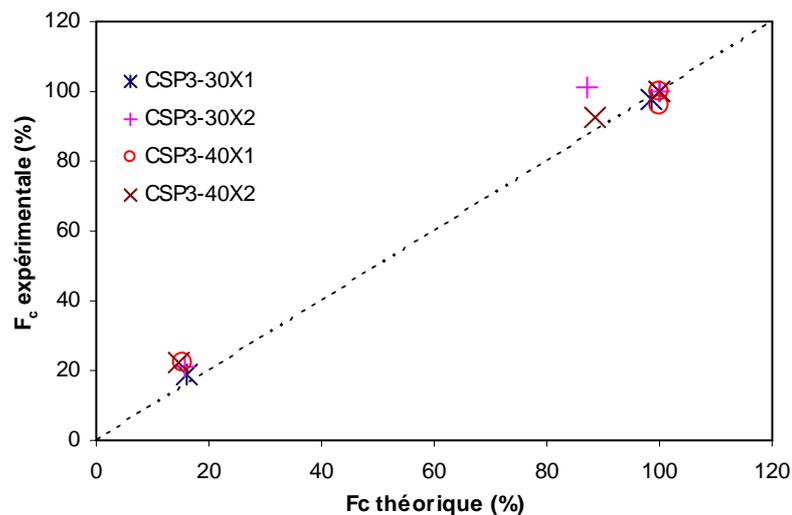


figure 6.8. Evolution comparée de la résistance résiduelle relative expérimentale et théorique en compression des bétons de cocktail de fibres.

6.3.2 Résistance en traction par flexion

Le tableau 6.6 rassemble les résistances moyennes résiduelles et relatives en traction par flexion des bétons de cocktail de fibres.

La figure 6.9 montre l'évolution de la résistance relative en traction des bétons de cocktail de fibres en fonction de la température de chauffage.

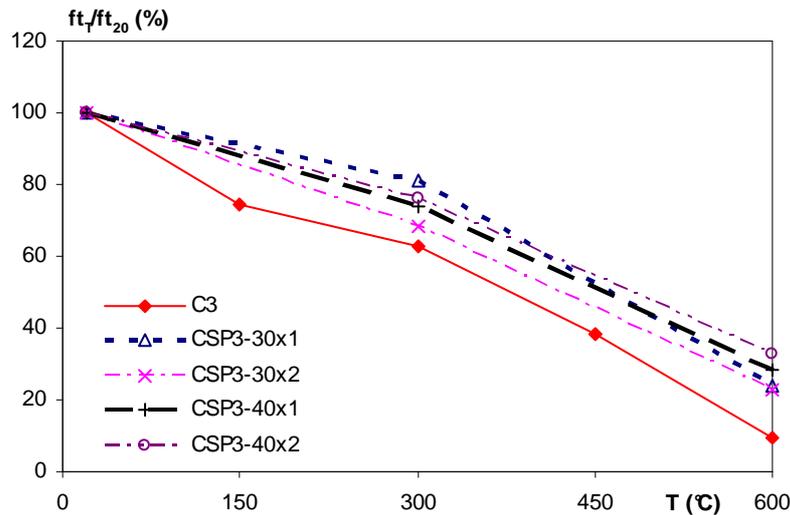


figure 6.9. Evolution de la résistance résiduelle relative en traction des bétons C3 et CSP3 en fonction de la température du cycle de chauffage-refroidissement.

La résistance en traction baisse avec la température et le comportement est le même pour les deux groupes de béton. La variation de la teneur en fibres de polypropylène et métalliques ne modifie pas l'allure de la courbe.

tableau 6.6 Résistance en traction des bétons de cocktail de fibres comparée à celle des bétons avec et sans fibres de polypropylène et fibres métalliques.

Bétons	Unités	Températures (°C)		
		20	300	600
	MPa	6.3	5.1	1.5
CSP3-30x1	Ecart type	0.5	0.2	0.2
	(%)	100	81	24
	MPa	7.2	4.9	1.7
CSP3-30x2	Ecart type	0.2	0.8	0.4
	(%)	100	68	23
	MPa	7.4	5.5	2.1
CSP3-40x1	Ecart type	0.2	0.9	0.2
	(%)	100	74	28
	MPa	7.8	5.9	2.5
CSP3-40x2	Ecart type	0.5	0.4	0.1
	(%)	100	76	33
C3	(MPa)	7.3	4.6	0.7
CP3-1	(MPa)	6.3	3.8	0.7
CP3-2	(MPa)	5.7	3.5	0.6
CS3-30	(MPa)	6.7	5.4	2.4
CS3-40	(MPa)	7.2	5.9	2.7

6.3.2.1 Comparaison béton sans fibres / béton de cocktail de fibres

La figure 6.10 illustre l'évolution de la résistance résiduelle (a) et relative (b) en traction des bétons sans fibres (C3) et bétons contenant le cocktail de fibres (CSP3). La résistance résiduelle relative des bétons est améliorée avec l'ajout de cocktail de fibres de polypropylène et métalliques.

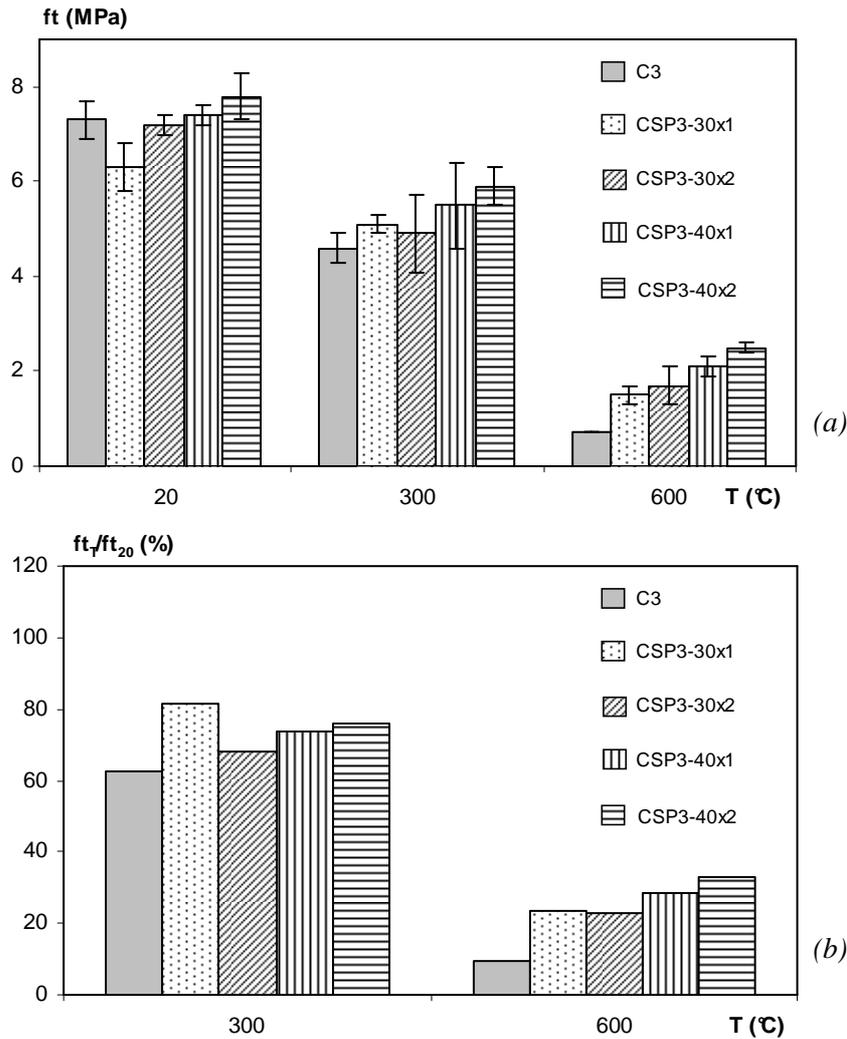


figure 6.10. Résistance résiduelle (a) et relative (b) en traction du béton sans fibres et des bétons de cocktail de fibres en fonction de la température du cycle de chauffage-refroidissement.

Entre les températures 20°C et 300°C, le béton C3 perd 37% de sa résistance résiduelle initiale et les bétons CSP3 n'en perdent en moyenne que 25%. Les bétons de cocktail de fibres perdent moins rapidement de résistance que les bétons sans fibres. Le taux de perte de résistance relative du béton C3 est de $0.13\%.C^{-1}$ tandis que celui des bétons CSP3 est de $0.09\%.C^{-1}$. Le gain de résistance résiduelle en traction apporté par le cocktail de fibres est de 12%.

Entre les températures 300°C et 600°C, les pertes de résistance résiduelle des bétons C3 et CSP3 sont en moyenne de 53% et 48%. Le cocktail de fibres permet de limiter les pertes par rapport aux bétons sans fibres mais dans de moindres proportions, 5% au lieu de 12% avant 300°C. Les taux de perte de résistance résiduelle relative sont en moyenne respectivement de $0.18\%.C^{-1}$ et $0.16\%.C^{-1}$ pour C3 et CSP3. Après chauffage à 600°C, la résistance résiduelle relative en traction des bétons C3 et CSP3 sont respectivement de 9% et 27%, soit un gain de 18% obtenu avec le cocktail de fibres.

Les fibres métalliques sont utilisées dans le béton pour améliorer sa ductilité à température ambiante. Les essais réalisés en compression comme en traction montrent un bon comportement ductile du béton contenant le cocktail de fibres non seulement à température ambiante mais aussi à la suite des différents cycles de chauffage-refroidissement.

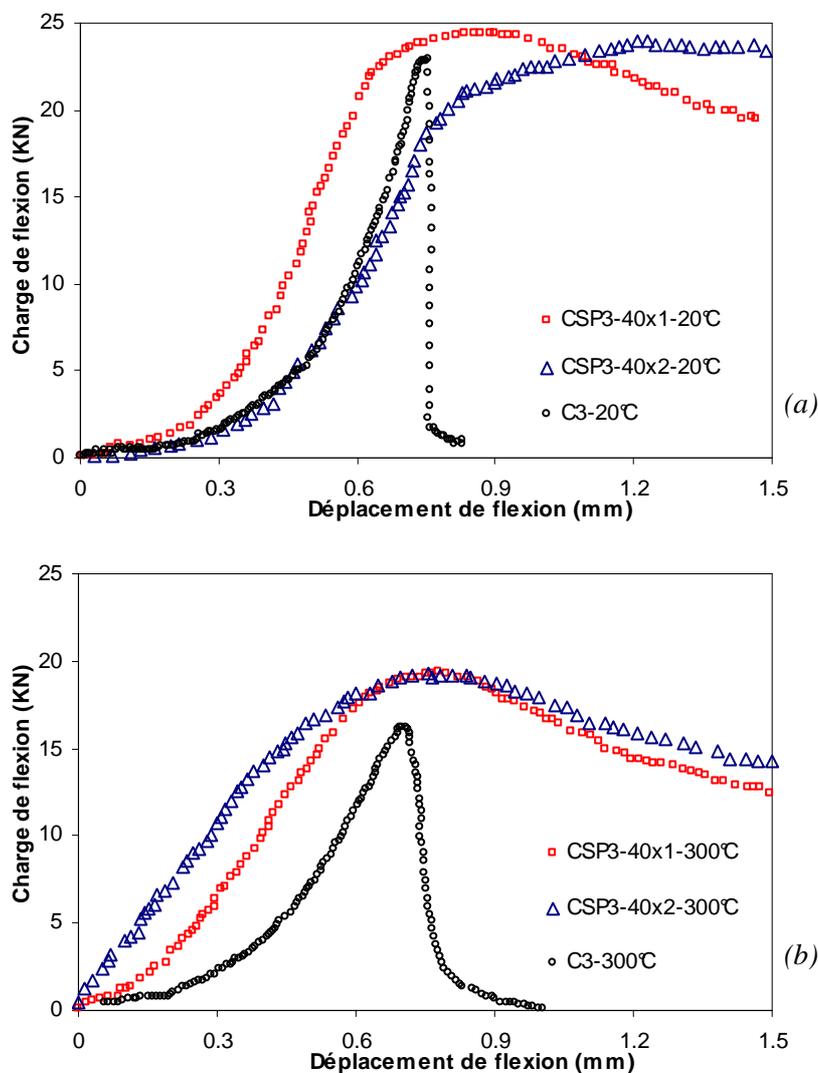


figure 6.11. Charge de flexion en fonction du déplacement des bétons C3 et CSP3 à la température ambiante (a) et après le cycle de chauffage-refroidissement de 300°C (b).

La figure 6.11 illustre le comportement post pic en traction des bétons CSP3 et C3. L'effet du cocktail de fibres sur le comportement de post fissuration du béton pendant les essais de flexion est observé. La forme de la courbe charge-déplacement change lorsqu'un cocktail de fibres est ajouté au béton. La pente descendante de la partie post pic est fortement modifiée. Le béton présente alors un comportement plus ductile.

6.3.2.2 Comparaison béton de fibres de polypropylène / béton de cocktail de fibres

La figure 6.12 illustre l'évolution de la résistance résiduelle (a) et relative (b) en traction des bétons de fibres de polypropylène (CP3) et des bétons contenant le cocktail de fibres (CSP3). La résistance résiduelle relative des bétons de cocktail de fibres est meilleure que celle des bétons de fibres de polypropylène.

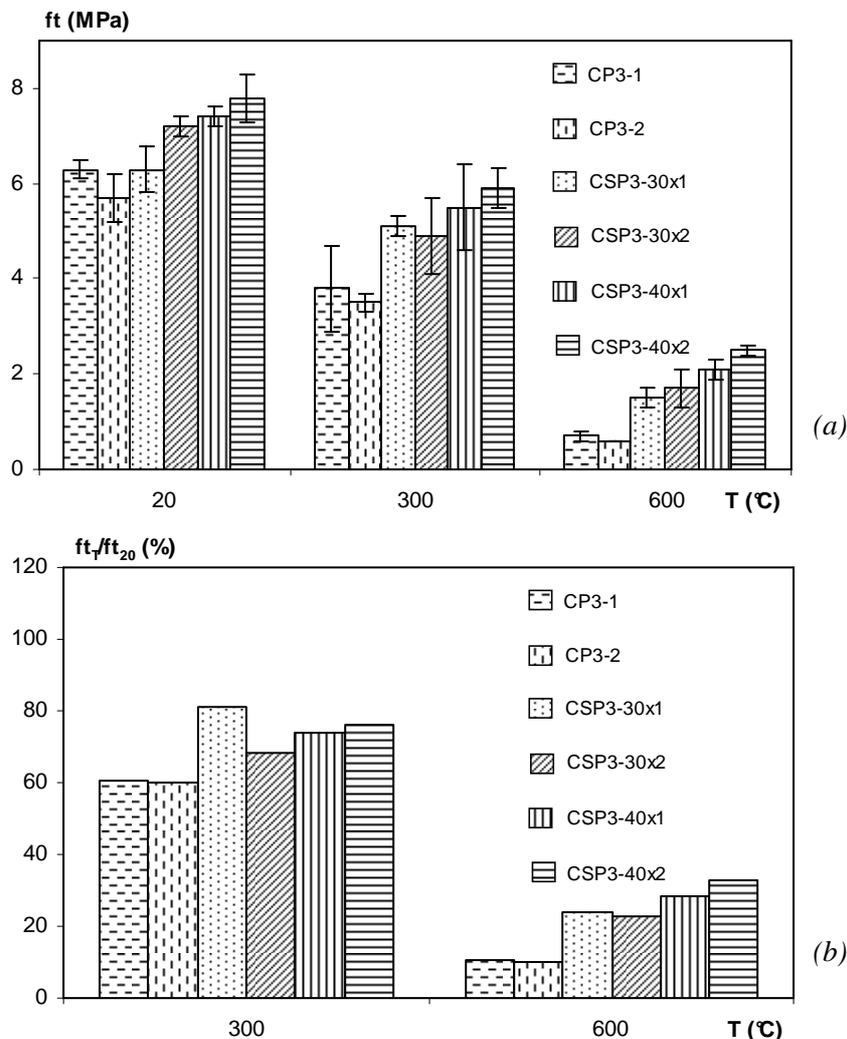


figure 6.12. Résistance résiduelle (a) et relative (b) en traction des bétons de fibres de polypropylène et des bétons de cocktail de fibres en fonction de la température du cycle de chauffage-refroidissement.

Entre les températures 20°C et 300°C, les bétons CP3 perdent en moyenne 40% de leur résistance initiale tandis que les bétons CSP3 n'en perdent en moyenne que 25%. Les bétons de cocktail de fibres perdent moins rapidement de résistance en traction que les bétons de fibres de polypropylène. Le taux de perte de résistance résiduelle relative des bétons CP3 est de 0.14%.C⁻¹ tandis que celui des bétons CSP3 est de 0.09%.C⁻¹. Sur cette plage de température, le gain de résistance résiduelle en traction est de 15% pour les

bétons CSP3 par rapport aux bétons CP3. Un gain similaire (12%) avait été enregistré entre les bétons CSP3 et C3.

Entre les températures 300°C et 600°C, les pertes de résistance résiduelle des bétons CP3 et CSP3 sont respectivement de 50% et 48%. La différence de perte de résistance entre les bétons n'est pas aussi importante qu'entre 20°C et 300°C. Les taux de perte de résistance résiduelle relative des deux bétons de fibres sont similaires et sont de 0.16%.C⁻¹. Après chauffage à 600°C, la résistance résiduelle relative des bétons CP3 est en moyenne de 10%. Le gain de résistance résiduelle relative en traction des bétons CSP3 est de 17% sur les bétons CP3.

Le comportement des bétons de cocktail de fibres diffère de celui des bétons de fibres de polypropylène. Lorsqu'on ajoute des fibres métalliques, on ne note plus de diminution de la résistance en traction avec l'augmentation des fibres de polypropylène à température ambiante, mais plutôt une augmentation. Après chauffage, on distinguait peu de différences de perte relative de résistance en traction entre les bétons CP3-1 et CP3-2. En présence des fibres métalliques, cette tendance se conserve, à l'exception de la perte de résistance du béton CSP3-30x2 un peu plus forte que celle du béton CSP3-30x1 après le chauffage à 300°C.

6.3.2.3 Comparaison béton de fibres métalliques / béton de cocktail de fibres

La figure 6.13 illustre l'évolution de la résistance résiduelle (a) et relative (b) en traction des bétons de fibres métalliques (CS3) et des bétons contenant le cocktail de fibres (CSP3). La résistance en traction à température ambiante des bétons de cocktail de fibres est supérieure à celle des bétons de fibres métalliques. Cette constatation met en évidence l'apport des fibres de polypropylène à la résistance du matériau béton à température ambiante. Cette amélioration croît avec le pourcentage de fibres de polypropylène. Du fait de la fusion / vaporisation de la fibre de polypropylène, ce gain n'est plus observé après un chauffage à 300°C. La résistance résiduelle relative en traction du béton de cocktail de fibres devient plus faible que celle du béton de fibres métalliques.

Entre les températures 20°C et 300°C, les bétons CS3 perdent 18% environ de leur résistance initiale. Avec le cocktail de fibres, nous remarquons une perte supplémentaire de 7%. Le taux de perte de résistance relative des bétons CS3 et CSP3 est le même et est de 0.09%.C⁻¹.

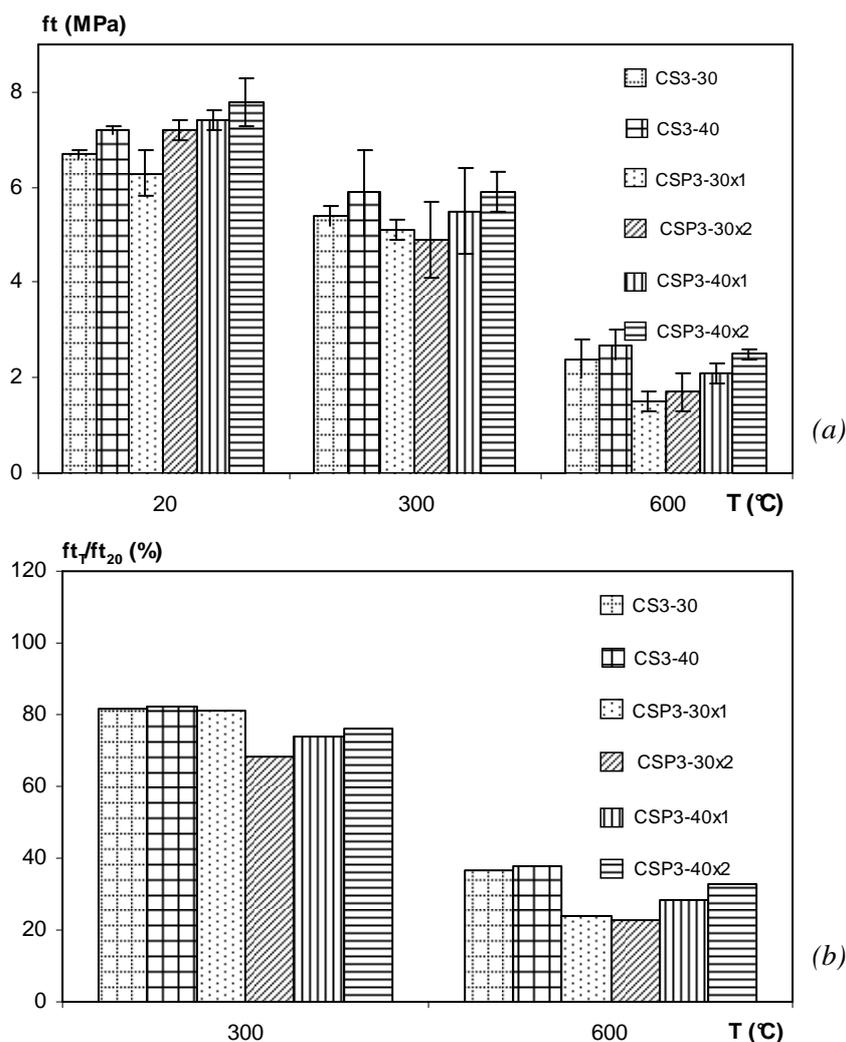


figure 6.13. Résistance résiduelle (a) et relative (b) en traction des bétons de fibres métalliques et des bétons de cocktail de fibres en fonction de la température du cycle de chauffage-refroidissement.

Entre les températures 300°C et 600°C, la perte de résistance résiduelle en traction des bétons CS3 est de 45% tandis que celle des bétons CSP3 est de 48%. Le taux de perte de résistance relative des deux bétons est de 0.15%.C⁻¹. Après chauffage à 600°C, la résistance relative des bétons CS3 est de 37%. La perte supplémentaire des bétons de cocktail de fibres est de 10%. Les bétons CSP3 contenant 40 kg/m³ de fibres métalliques présentent une meilleure résistance résiduelle en traction que ceux contenant 30 kg/m³ de fibres métalliques.

La courbe déplacement-charge de flexion des bétons de cocktail de fibres est comparée à celle des bétons avec et sans fibres métalliques à travers la figure 6.14. On remarque que la pente descendante de la partie post pic est réduite en présence du cocktail de fibres.

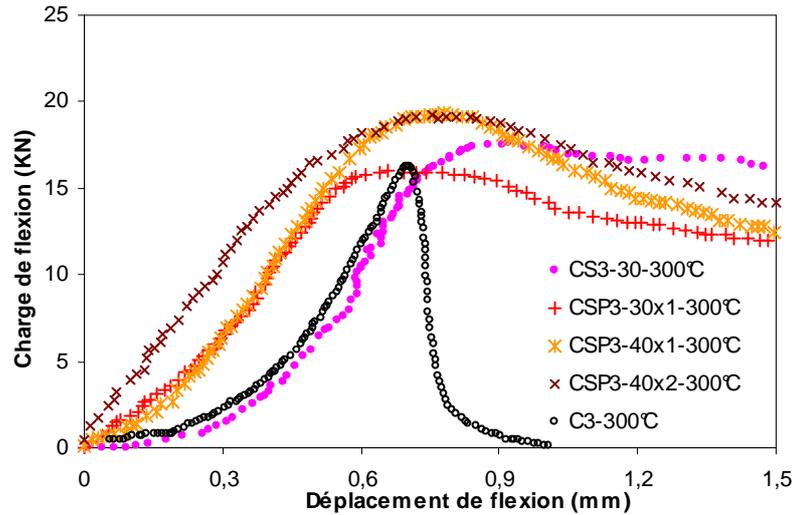


figure 6.14. Charge de flexion en fonction du déplacement des bétons C3, CS3 et CSP3 après le cycle de chauffage-refroidissement de 300°C.

6.3.2.4 Synthèse sur l'évolution de la résistance résiduelle en traction des bétons de cocktail de fibres

L'étude de la résistance résiduelle en traction des bétons de cocktail de fibres de polypropylène et métalliques montre une amélioration de cette propriété par rapport au béton sans fibres et au béton de fibres de polypropylène. Par rapport aux bétons de fibres métalliques, la résistance résiduelle en traction est plus faible, soit une baisse de l'ordre de 10% après le chauffage à 600°C. Cette baisse de résistance résiduelle en traction des bétons de cocktail de fibres par rapport aux bétons de fibres métalliques a aussi été observée dans les études de [Peng, 2006], [Suha, 2006] et [Chen, 2004].

Pour les pourcentages de fibres de polypropylène (0.11% et 0.22%) testés dans notre étude, le comportement résiduel en traction des bétons de cocktail de fibres est principalement lié à la quantité de fibres métalliques dans le cocktail. La proportion de fibres métalliques semble jouer un rôle important sur le comportement des bétons de cocktail de fibres.

Comme en compression, les résistances résiduelles relatives en traction des bétons de cocktail de fibres sont comparées à celles obtenues théoriquement en faisant une moyenne arithmétique des résistances de bétons de fibres de polypropylène et des bétons de fibres métalliques. Le tableau 6.7 regroupe les résistances résiduelles en traction théorique et expérimentale des compositions de béton CP3, CS3 et CSP3.

tableau 6.7 Résistances résiduelles relatives moyennes théoriques et expérimentales en traction des bétons de cocktail de fibres.

Bétons	Unités	Températures (°C)	
		300	600
CP3	(%)	60	10
CS3	(%)	82	37
<i>F_c théorique</i>	(%)	71	24
F_c expérimentale	(%)	75	27

Comme en compression, la résistance résiduelle relative en traction des bétons de cocktail de fibres n'est pas une moyenne arithmétique de résistance de bétons de fibres de polypropylène et de bétons de fibres métalliques comme l'illustre la figure 6.15. La baisse de résistance résiduelle des bétons en présence de fibres de polypropylène est plus prononcée que celle du béton contenant le cocktail de fibres de polypropylène et de fibres métalliques.

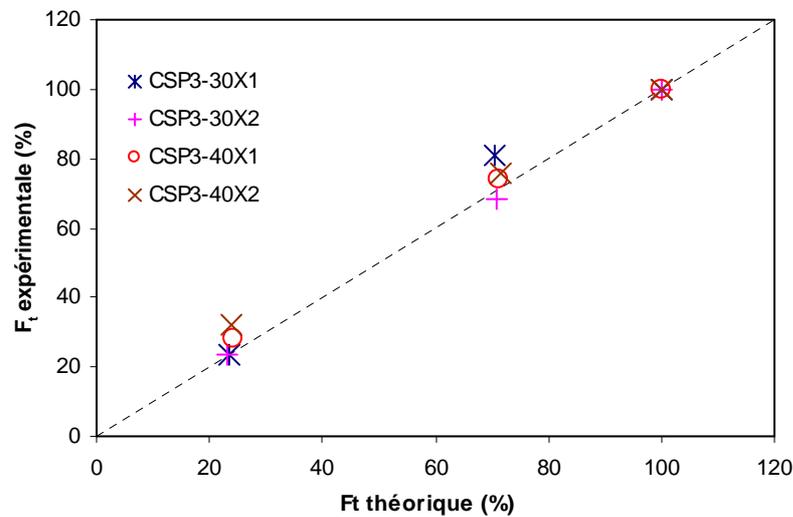


figure 6.15. Evolution comparée de la résistance résiduelle relative expérimentale et théorique en traction des bétons de cocktail de fibres.

6.3.3 Module d'élasticité

Les résultats du module d'élasticité résiduel et relatif des bétons contenant le cocktail de fibres sont résumés dans le tableau 6.8.

tableau 6.8 Module d'élasticité des bétons de cocktail de fibres comparés à celui des bétons avec et sans fibres de polypropylène et fibres métalliques.

Bétons	Unités	Températures (°C)		
		20	300	600
	GPa	43.3	27.0	1.8
CSP3-30x1	Ecart type	0.6	1.3	0.2
	(%)	100	62	4
	GPa	44.9	27.5	1.9
CSP3-30x2	Ecart type	1.0	1.0	0.0
	(%)	100	61	4
	GPa	43.9	30.4	2.1
CSP3-40x1	Ecart type	0.9	0.3	0.1
	(%)	100	69	5
	GPa	41.4	27.6	2.1
CSP3-40x2	Ecart type	0.1	1.3	0.1
	(%)	100	67	5
C3	(GPa)	44.1	25.7	1.6
CP3-1	(GPa)	45.7	29.4	1.7
CP3-2	(GPa)	49.5	28.6	1.7
CS3-30	(GPa)	45.3	30.8	1.8
CS3-40	(GPa)	44.9	32.1	1.8

La figure 6.16 illustre l'évolution du module d'élasticité résiduel relatif des bétons de cocktail de fibres en fonction de la température de chauffage. Le module d'élasticité diminue progressivement avec la température et le comportement est similaire à celui du béton sans fibres. Les deux domaines caractérisant l'évolution du module d'élasticité du béton chauffé sont conservés. Le module d'élasticité résiduel à 300°C dépend du dosage respectif des fibres tandis qu'après chauffage à 600°C, les modules d'élasticité résiduels des différentes formulations sont quasi-identiques.

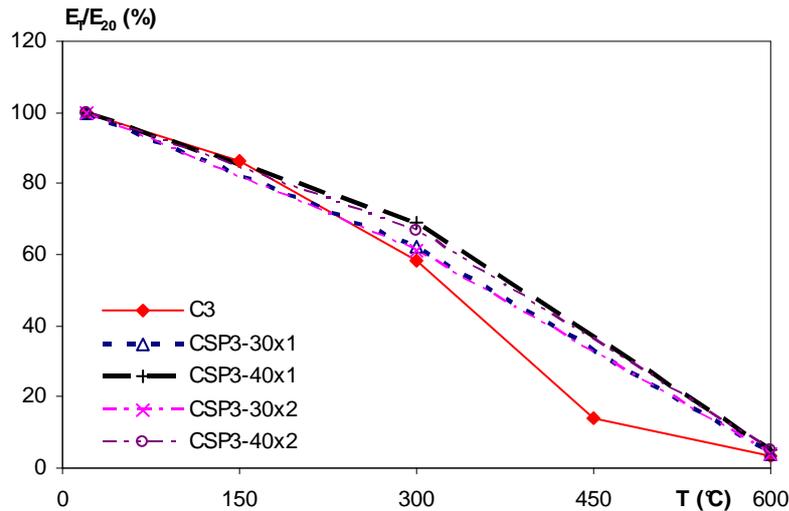


figure 6.16. Evolution du module d'élasticité résiduel relatif des bétons C3 et CSP3 en fonction de la température du cycle de chauffage-refroidissement.

6.3.3.1 Comparaison béton sans fibres / béton de cocktail de fibres

La figure 6.17 illustre l'évolution du module d'élasticité résiduel (a) et relatif (b) des bétons sans fibres (C3) et des bétons contenant le cocktail de fibres (CSP3). Le module d'élasticité relatif est légèrement amélioré avec la présence des fibres de polypropylène et métalliques.

Entre les températures 20°C et 300°C, la perte du module d'élasticité relatif du béton C3 est de 42 % tandis que celle des bétons CSP3 est en moyenne de 35%. Les bétons de cocktail de fibres perdent donc moins rapidement de rigidité. Le taux de perte du module d'élasticité relatif du béton C3 est de $0.15\% \cdot C^{-1}$ tandis que celui des bétons CSP3 est de $0.12\% \cdot C^{-1}$. Le gain de module d'élasticité relatif est de 7%, après chauffage à 300°C.

Entre les températures 300°C et 600°C, les pertes du module d'élasticité résiduel des bétons C3 et CSP3 sont respectivement de 55% et 60%. On remarque une perte plus importante pour le béton de cocktail de fibres. Cette perte semble liée au comportement des fibres de polypropylène dans le béton. La vaporisation des fibres de polypropylène, la dilation thermique différentielle entre pâte-granulats-fibres induisant une perte d'adhérence peuvent être à l'origine de l'accélération de la perte de rigidité après 300°C. Les taux de perte de module d'élasticité résiduel relatif sont respectivement de $0.18\% \cdot C^{-1}$ et $0.20\% \cdot C^{-1}$ pour le béton C3 et en moyenne pour les bétons CSP3. Toutefois, les modules d'élasticité relatifs des bétons CSP3 restent supérieurs à ceux des bétons C3. Après chauffage à 600°C, les modules d'élasticités résiduels relatifs des bétons CSP3 et C3 sont respectivement de 5% et 4%. Le gain de module d'élasticité engendré par le cocktail de fibres est largement inférieur au gain de résistance en compression et en traction.

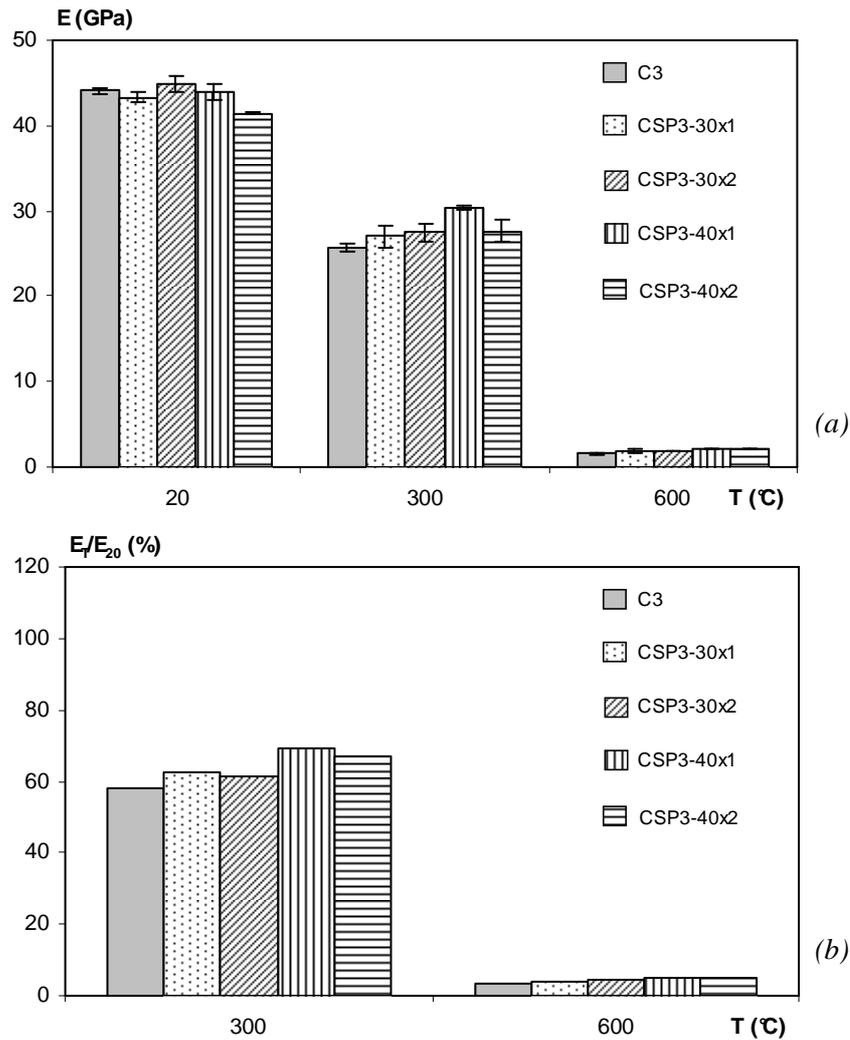


figure 6.17. Module d'élasticité résiduel (a) et relatif (b) du béton sans fibres et des bétons de cocktail de fibres en fonction de la température du cycle de chauffage-refroidissement.

6.3.3.2 Comparaison béton de fibres de polypropylène / béton de cocktail de fibres

La figure 6.18 illustre l'évolution du module d'élasticité résiduel (a) et relatif (b) des bétons de fibres de polypropylène (CP3) et des bétons contenant le cocktail de fibres (CSP3).

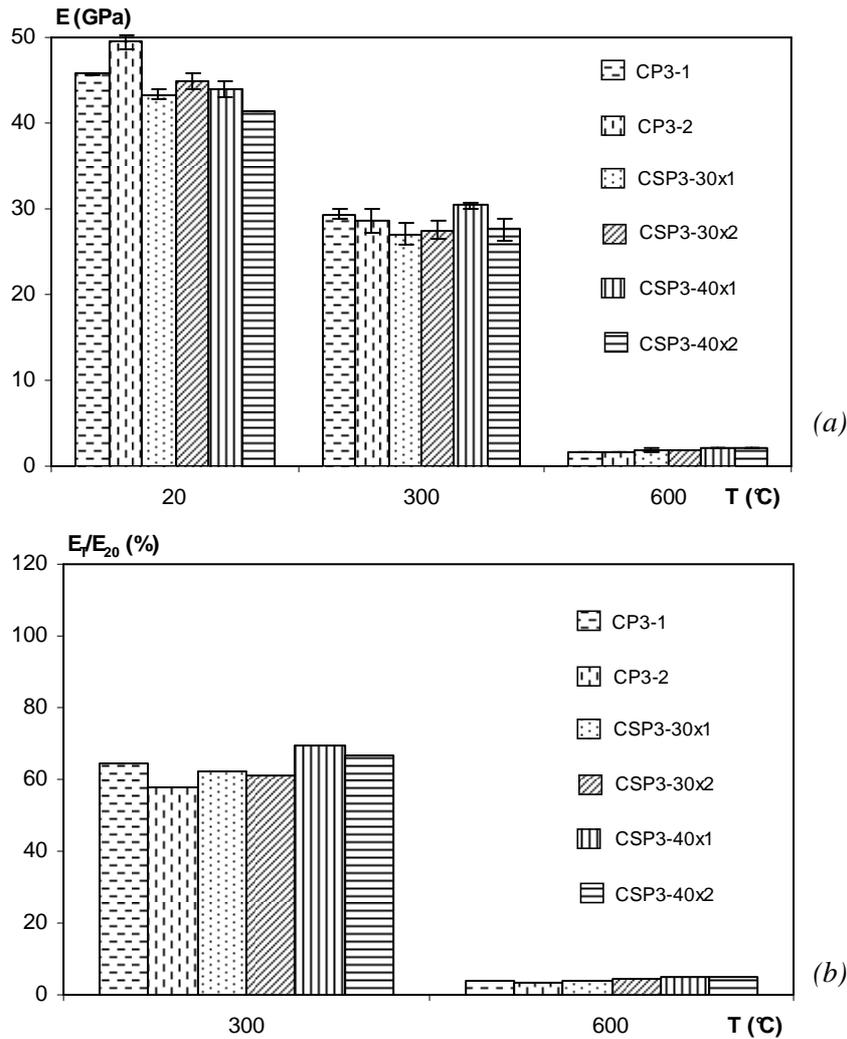


figure 6.18. Module d'élasticité résiduel (a) et relatif (b) des bétons de fibres de polypropylène et des bétons de cocktail de fibres en fonction de la température du cycle de chauffage-refroidissement.

A la température ambiante, le module d'élasticité des bétons de fibres de polypropylène est plus grand que celui des bétons de cocktail de fibres. Le module d'élasticité des bétons CP3-1 et CP3-2 est en moyenne de 48 GPa tandis que celui des bétons CSP3 est de 43 GPa. Les mesures de porosité ne montrent pas une augmentation significative de la porosité des bétons CSP3.

Entre les températures 20°C et 300°C, les bétons CP3 perdent en moyenne 39% de module d'élasticité. La présence des fibres métalliques dans le mélange a permis de réduire cette perte à 1% et 7% pour un dosage respectif de 30 et 40 kg/m³. Le taux de perte du module d'élasticité des bétons CSP3 est de 0.13%.C⁻¹ tandis que celui des bétons CP3 est de 0.22%.C⁻¹.

Entre les températures 300°C et 600°C, la perte de module d'élasticité des bétons CSP3 est en moyenne de 60% au lieu de 58% pour les bétons CP3. Le taux de perte de

module d'élasticité des deux bétons sont voisins ($0.20\%.C^{-1}$ pour les bétons CSP3 et $0.19\%.C^{-1}$ pour les bétons CP3). Après chauffage à $600^{\circ}C$, le module d'élasticité des bétons CSP3 est légèrement supérieur à celui des bétons CP3 comme dans le cas des bétons sans fibres C3. Les modules d'élasticité résiduels relatifs moyens des bétons CSP3 et des bétons CP3 sont respectivement de 5 % et 4%. On observe un gain de module de 1% de celui des bétons sans fibres.

6.3.3.3 Comparaison béton de fibres métalliques / béton de cocktail de fibres

La figure 6.19 illustre l'évolution du module d'élasticité résiduel (a) et relatif (b) des bétons de fibres métalliques (CS3) et des bétons contenant le cocktail de fibres (CSP3). D'une manière générale, le module d'élasticité résiduel des bétons de cocktail de fibres est inférieur à celui des bétons de fibres métalliques.

Entre les températures $20^{\circ}C$ et $300^{\circ}C$, le module d'élasticité relatif des bétons CSP3 diminue de 35%, soit 5% de plus que celui des bétons CS3. Les taux de perte de module d'élasticité relatif des deux bétons sont voisins ($0.12\%.C^{-1}$ pour les bétons CSP3 et $0.11\%.C^{-1}$ pour les bétons CS3).

Entre les températures $300^{\circ}C$ et $600^{\circ}C$, on remarque que les bétons de cocktail de fibres ont une perte moins importante que celle des bétons de fibres métalliques. La diminution du module d'élasticité des bétons CSP3 est de 60% tandis que celle des CS3 est de 66%. Le taux de perte de module d'élasticité des bétons CSP3 est de $0.20\%.C^{-1}$, voisin de celui des bétons CS3 qui est de $0.22\%.C^{-1}$. Après chauffage à $600^{\circ}C$, le module d'élasticité résiduel relatif des bétons CSP3 et CS3 sont voisins, 5% pour les bétons CSP3 et 4% pour les bétons CS3. L'amélioration du module d'élasticité résiduel suite à l'augmentation du dosage en fibres métalliques est plus visible sur les bétons CSP3 que sur les bétons CS3. L'impact de la variation du dosage des fibres de polypropylène dans le mélange n'est pas significatif.

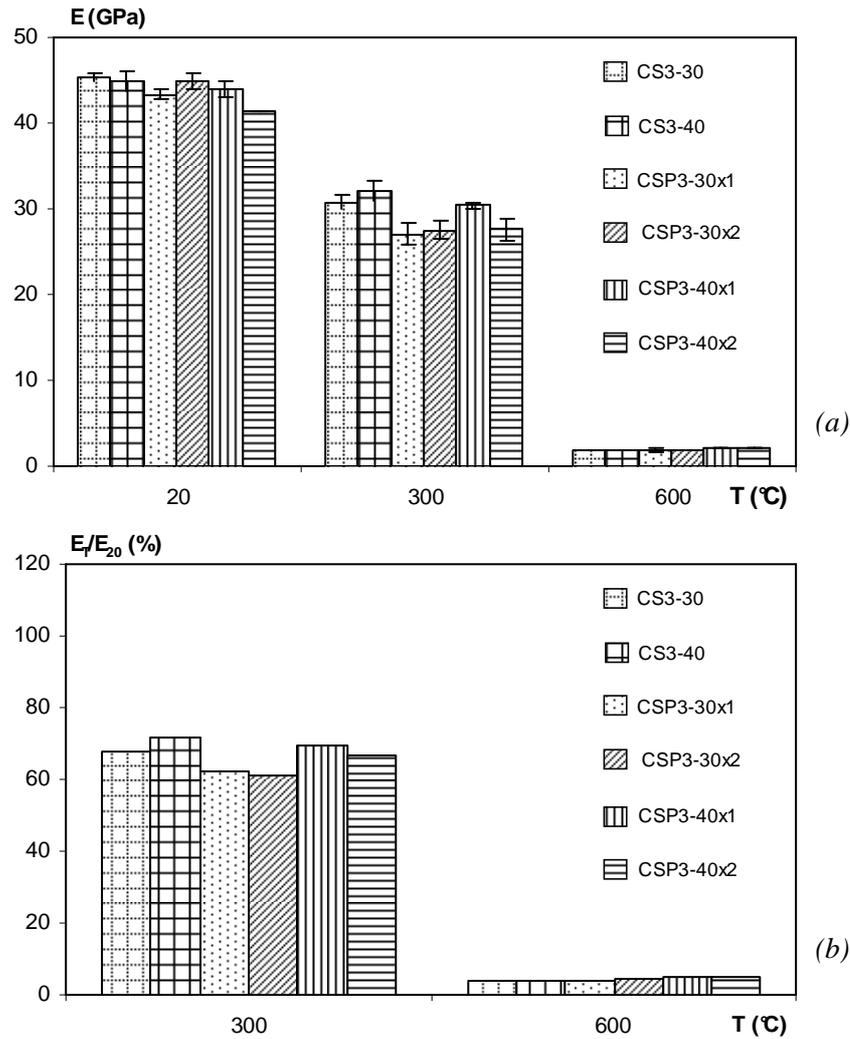


figure 6.19. Module d'élasticité résiduel (a) et relatif (b) des bétons de fibres métalliques et des bétons de cocktail de fibres en fonction de la température du cycle de chauffage-refroidissement.

6.3.3.4 Synthèse sur l'évolution du module d'élasticité résiduel des bétons de cocktail de fibres

L'étude du module d'élasticité résiduel des bétons de cocktail de fibres de polypropylène et métalliques montre une amélioration de cette propriété par rapport au béton sans fibres et aux bétons de fibres de polypropylène. On remarque, par rapport aux bétons de fibres métalliques, une baisse du module d'élasticité résiduel des bétons de cocktail de fibres après chauffage à 300°C. Après chauffage à 600°C, les modules d'élasticité résiduels des bétons de cocktail de fibres sont légèrement supérieurs à ceux des bétons de fibres métalliques. Les dosages respectifs des deux fibres ont une légère incidence sur le module d'élasticité résiduel notamment après le chauffage à 300°C.

6.4 Conclusion sur le comportement des bétons de cocktail de fibres

La campagne d'essais réalisée sur l'effet du cocktail de fibres sur le comportement du béton porté à une température élevée a permis de comparer ce groupe de bétons aux bétons sans fibres et aux bétons contenant uniquement l'un des deux types de fibres. Aucune instabilité thermique des bétons de cocktail de fibres n'a été observée durant les cycles de chauffage-refroidissement comme ce fut le cas pour les autres bétons. L'ajout du cocktail de fibres dans le béton ne modifie pas la forme des courbes d'évolution de la différence de température, de la perte de masse et des propriétés mécaniques résiduelles.

La perte de masse des bétons de cocktail de fibres augmente aussi avec la montée en température. Seules deux températures de chauffage ont été testées et cela ne permet pas de décrire précisément la cinétique de perte de masse. Cependant, il est à noter que les pertes de masse des bétons de cocktail de fibres sont inférieures à celles des bétons avec et sans fibres de polypropylène mais supérieures à celles des bétons de fibres métalliques, après chauffages à 300°C et 600°C.

La résistance résiduelle en compression des bétons de cocktail de fibres est très proche de celle des bétons contenant les fibres métalliques seules. Les fibres de polypropylène génèrent une plus forte perte de résistance dans les bétons CP3. Après chauffage à 600°C, les modules d'élasticité résiduels des bétons de cocktail de fibres sont même légèrement supérieurs à ceux des bétons de fibres métalliques. On serait tenté de dire que l'influence des fibres de polypropylène dans les bétons de cocktail de fibres est moins défavorable que dans les bétons de fibres de polypropylène seuls. Il faudrait toutefois noter que la mise en œuvre des fibres métalliques dans le béton est un peu complexe. La répartition et l'orientation des fibres dans l'éprouvette peuvent varier d'un gâchage à un autre quelles que soient les dispositions prises.

Pour les pourcentages de fibres de polypropylène (0.11% et 0.22%) et fibres métalliques (0.38% et 0.51%) testés, la résistance résiduelle en traction des bétons de cocktail de fibres est surtout influencée par la quantité de fibres métalliques dans le cocktail. La proportion de fibres métalliques semble jouer un rôle plus important dans les bétons de cocktail de fibres. Les résistances résiduelles en traction des bétons de cocktail de fibres restent supérieures à celles des bétons avec et sans fibres de polypropylène.

Les résultats expérimentaux obtenus montrent qu'il ne suffit pas d'additionner le comportement des bétons de fibres de polypropylène et celui des bétons de fibres métalliques aux mêmes dosages pour obtenir le comportement à haute température des bétons de cocktail de fibres. La combinaison des deux fibres confère au béton un comportement qui lui est particulier.

Chapitre 7 - FEUX EXPERIMENTAUX DANS UN IMMEUBLE

7.1 Objectif de l'étude

L'étude est destinée à faire évoluer à la fois les connaissances et les techniques de simulation numérique en les confrontant aux mesures obtenues lors d'expérimentation de feux dans des conditions réelles. Notre travail s'est inscrit dans le cadre du Projet National sur l'Ingénierie de la Sécurité Incendie [PN ISI]. Le présent chapitre ne présente pas les résultats du PN ISI (projet en cours dont les conclusions seront publiées ultérieurement) mais il souhaite faire le lien entre les travaux en laboratoire de la thèse et les mesures effectuées sur le site expérimental lors des travaux du PN ISI.

Les feux expérimentaux d'Arcueil ont été pilotés par le Laboratoire Central de la Préfecture de Police [LCPP] en collaboration avec d'autres laboratoires et partenaires. Les travaux ont porté sur une expérimentation en grandeur réelle de feu dans un immeuble voué à la démolition. Il s'agissait d'un immeuble situé sur l'avenue Laplace à Arcueil. Cet immeuble était constitué de deux cages d'escalier dont l'une de dix niveaux et l'autre de onze niveaux avec un sous sol pour chaque bloc (figure 7.1).



figure 7.1. Immeuble voué à la démolition, Cité de la Vache Noire, 20 rue Laplace.

Quatre types de feux ont été testés. Il s'agit du feu d'appartement, d'ERP (Etablissement Recevant du Public), de cage d'escalier et d'investigations destinés à la formation des enquêteurs sur scène d'incendie. Les mesures effectuées au cours de cette expérimentation sont :

- le taux de toxiques dans les fumées,
- la visibilité,

- la température,
- les flux thermiques.

Les feux se développent librement sur une durée de vingt minutes pour les scénarii d'habitation, d'ERP et de cage d'escalier. Pour les feux d'investigation, la durée du feu est de dix minutes. Afin d'avoir des résultats fiables, les essais ont été réalisés deux à trois fois suivant le type de feu.

Le Laboratoire de Mécanique et Matériaux du Génie Civil s'était donné pour mission de mesurer la température de surface des éléments en béton lors des essais de feux d'appartement et de feux de cage d'escalier ayant pour source le local poubelle. Seuls nos résultats sont présentés dans ce chapitre.

7.2 Description des locaux et potentiel calorifique

7.2.1 Appartement

Il s'agit d'un local d'une surface de 15 m² environ équipé de :

- 1 matelas en mousse monté sur deux palettes standards,
- 1 fauteuil en mousse monté sur une armature métallique,
- 3 plaques de contreplaqué au mur,
- 1 meuble en contreplaqué symbolisant la table basse.

La figure 7.2 indique l'état du local avant l'incendie.



figure 7.2. Disposition du potentiel calorifique dans le local avant la mise à feu.

7.2.2 Cage d'escalier

Le feu de cage d'escalier a pour origine un local poubelle d'une surface de 9 m² environ. Le local est constitué de :

- 2 conteneurs de 770 l en polyéthylène. Ces conteneurs sont garnis de bois, papiers, journaux et de cartons (masse 100 kg). Le couvercle est maintenu ouvert lors des essais.
- 2 poussettes de bébé,
- 1 palette en bois,
- contreplaqués et planches de bois fixés dans les escaliers.

La figure 7.3 illustre les potentiels utilisés dans le cas du feu d'escalier.



figure 7.3. *Potentiels calorifiques pour le feu de cage d'escalier.*

7.3 Scénarii

7.3.1 Appartement

Les locaux d'habitation représentent la majorité des incendies enregistrés. Le plus grand nombre de victimes recensées est également issu de ce type de locaux et concerne soit les occupants eux-mêmes, soit le voisinage immédiat du bâtiment par propagation. Les causes de sinistre sont multiples et le potentiel calorifique est souvent élevé. L'absence de dispositif d'alerte (détection automatique d'incendie par exemple) ou

d'alarme sonore conduit à ne pas préconiser l'évacuation générale des personnes. L'objectif de ce scénario est de tester une configuration de petit volume fortement chargé en combustible, en atmosphère sous ventilée, et d'envisager une propagation vers le palier d'étage et l'escalier en laissant la porte d'entrée de l'appartement ouverte.

Ce scénario de feu est réalisé avec le contrôle de la ventilation du local. L'ouverture de la fenêtre est pilotée depuis le PC mesures au bout de huit minutes après l'allumage. L'allumage est fait à l'aide d'un allume-feu sur le centre de la literie. Le feu se développe librement pendant une durée de vingt minutes avant l'intervention des services de secours.

Les trois feux expérimentaux d'appartement sont réalisés respectivement au 4^{ème}, 5^{ème} et 6^{ème} étage de l'immeuble.

7.3.2 Cage d'escalier

Les feux de cages d'escaliers peuvent faire des victimes lors de l'évacuation d'un immeuble. Ils se propagent rapidement du fait de la présence d'aménagements combustibles sur les parois verticales ou stockés au rez-de-chaussée ou sur les paliers. Ce scénario a été réalisé deux fois (un feu dans chaque cage d'escalier). Une des cages d'escalier a été testée en étant équipée d'un contreplaqué mince représentant les aménagements. L'autre cage a été testée sans ces aménagements.

L'allumage des feux d'escalier s'est fait par le biais d'un bac rempli de 50 cl d'alcool à brûler. Chaque feu s'est déroulé librement pendant vingt minutes. L'ouverture de l'exutoire du désenfumage était contrôlée depuis le poste de mesures.

7.4 Mise en place de l'instrumentation

L'instrumentation mise en place avait pour but de mesurer la température en surface des éléments en béton. Des thermocouples de même type que ceux décrits dans le chapitre 2 ont été utilisés. Les thermocouples sont fixés sur les parois en béton : le plafond, le plancher, les poteaux et poutres. Dans le cas où la surface du béton n'est pas nue, la couche de revêtement (peinture, carrelage, protection...) est enlevée afin d'avoir accès directement au béton. La figure 7.4 illustre quelques mises à nue de la surface en béton.

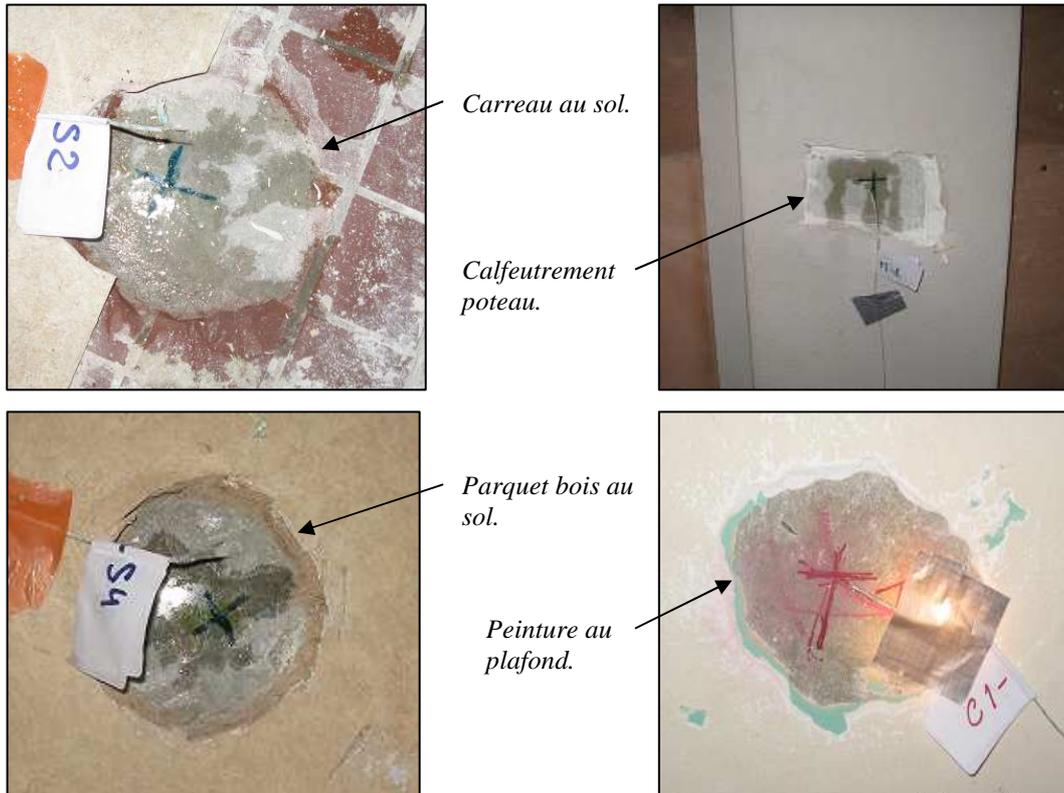


figure 7.4. Préparation du support des thermocouples de mesure de température.

Sur la surface du béton, le thermocouple est fixé provisoirement avec des attaches sommaires (scotch) puis recouvert d'une couche de mortier pour son maintien durant les essais comme le présente la figure 7.5.

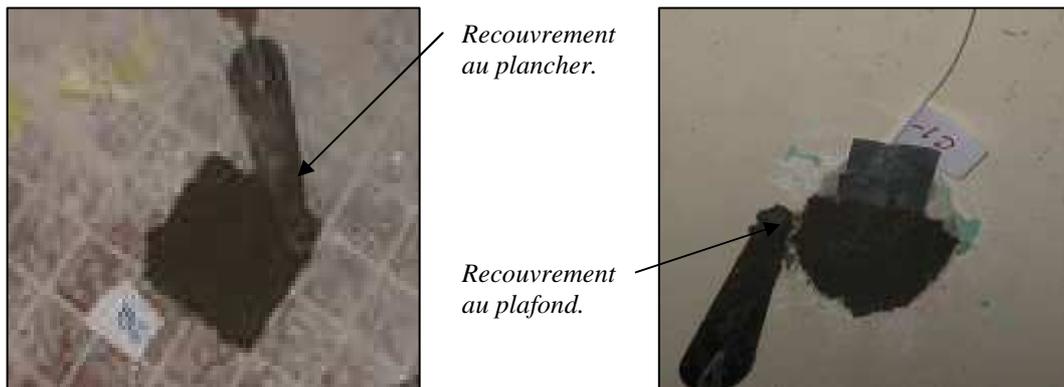


figure 7.5. Fixation finale des thermocouples de mesure de température

7.4.1 Appartement

Les positions des thermocouples dans le cas du feu d'appartement sont présentées sur la figure 7.6. Quatre thermocouples sont utilisés sur le plancher, quatre autres au plafond et deux autres contre les éléments verticaux. Les thermocouples fixés au sol sont

désignés par Si, ceux au plafond par Pi et ceux contre les éléments verticaux par Mi. Le thermocouple S est placé à la tête du lit, point origine du feu.

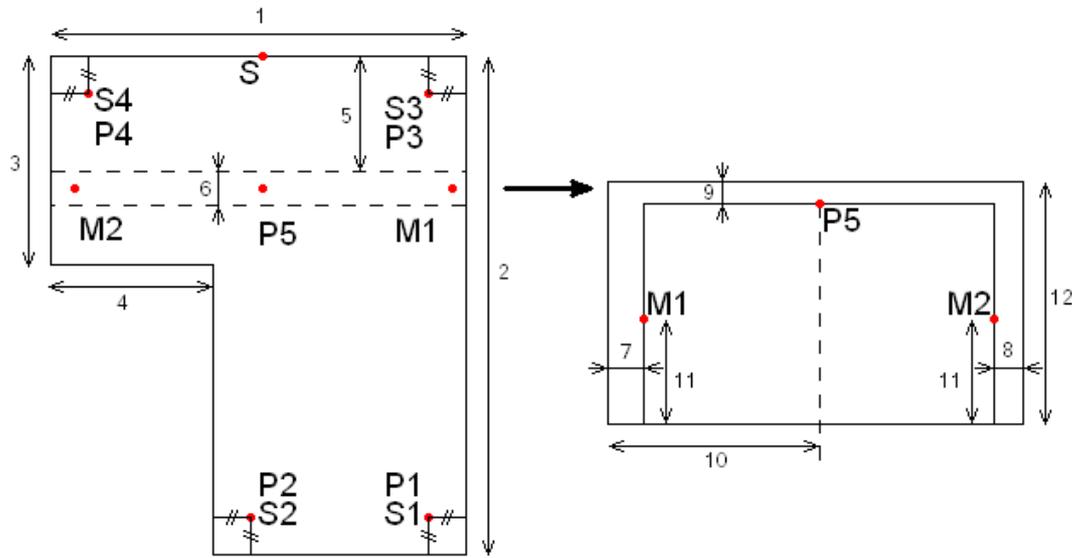


figure 7.6. Positions des thermocouples dans le cas du feu d'appartement.

Les dimensions citées sur les plans sont référencées dans le tableau 7.1, pour les trois appartements testés B1, B2 et B3.

tableau 7.1 Valeur des côtes citées sur la figure 7.6.

Dimensions (cm)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	#
B1	315	585	275	125	165	29	32	10	9	170	120	250	50
B2	318	580	277	125	166	28	41	17	8	171	120	250	50
B3	319	587	280	124	165	27	39	15	8.5	171	120	250	50

7.4.2 Cage d'escalier

Les positions des thermocouples sur les éléments en béton dans le local poubelle sont illustrées sur la figure 7.7. Les notations sont les mêmes que celles utilisées dans les appartements. Les dimensions sont référencées dans le tableau 7.2 pour les deux feux de cage d'escalier.

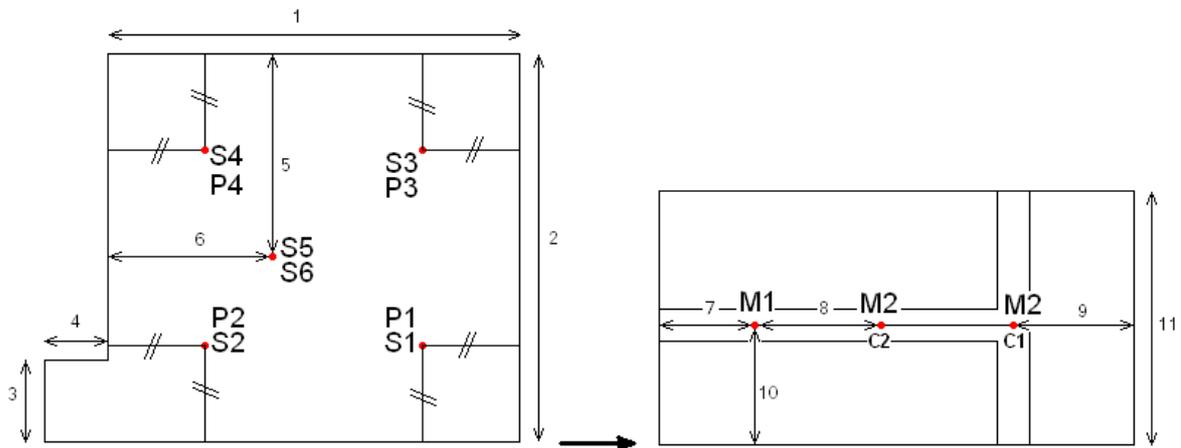


figure 7.7. Positions des thermocouples dans le local poubelle, cas du feu de cage d'escalier.

tableau 7.2 Valeur des côtes citées sur la figure 7.7.

Dimensions (cm)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	#
C1	251	307	43	29	-	-	50	-	100	120	250	50
C2	248	305	45	30	130	90	50	80	-	120	250	50

7.5 Evolution des températures durant les feux

Ce paragraphe regroupe l'évolution des températures de surface des éléments en béton en fonction du temps lors des essais de feu d'appartement et de cage d'escalier.

7.5.1 Feu d'appartement

Pour les feux des trois appartements B1, B2 et B3, quelques différences sont à noter dans le déroulement des essais par rapport au protocole expérimental défini.

- **Feu B1** : ce feu est le premier essai de la campagne expérimentale. Il a été plus violent que prévu (dégât matériel, Fluxmètre hors service...). En effet, la porte de l'appartement normalement fermée durant l'essai a été détériorée et détruite. Ceci a entraîné un apport d'air supplémentaire non prévu. La fenêtre est tombée huit minutes après le début de l'incendie.

- **Feu B2** : le feu B2 n'a pas respecté toutes les clauses du protocole expérimental. La fenêtre est tombée plus tôt soit environ deux minutes juste après le début de l'incendie.

- **Feu B3** : en dehors du problème d'humidité du plafond (extinction du feu B2), le protocole expérimental est respecté.

Du fait que les trois appartements B1, B2 et B3 se trouvaient l'un au-dessus de l'autre et que le feu B1 fut le premier, l'extinction du feu de l'appartement B1 a entraîné une quantité d'eau supplémentaire sur son plancher (dalle correspondant au plafond de B2). De même, l'extinction du feu de l'appartement B2 a entraîné une quantité d'eau supplémentaire sur le plafond de l'appartement B3. Seul le plafond de l'appartement B1 est supposé rester sec.

Les figures 7.8, 7.9 et 7.10 illustrent respectivement l'évolution de la température de surface du plafond, du sol et du mur en fonction du temps durant les feux des trois appartements.

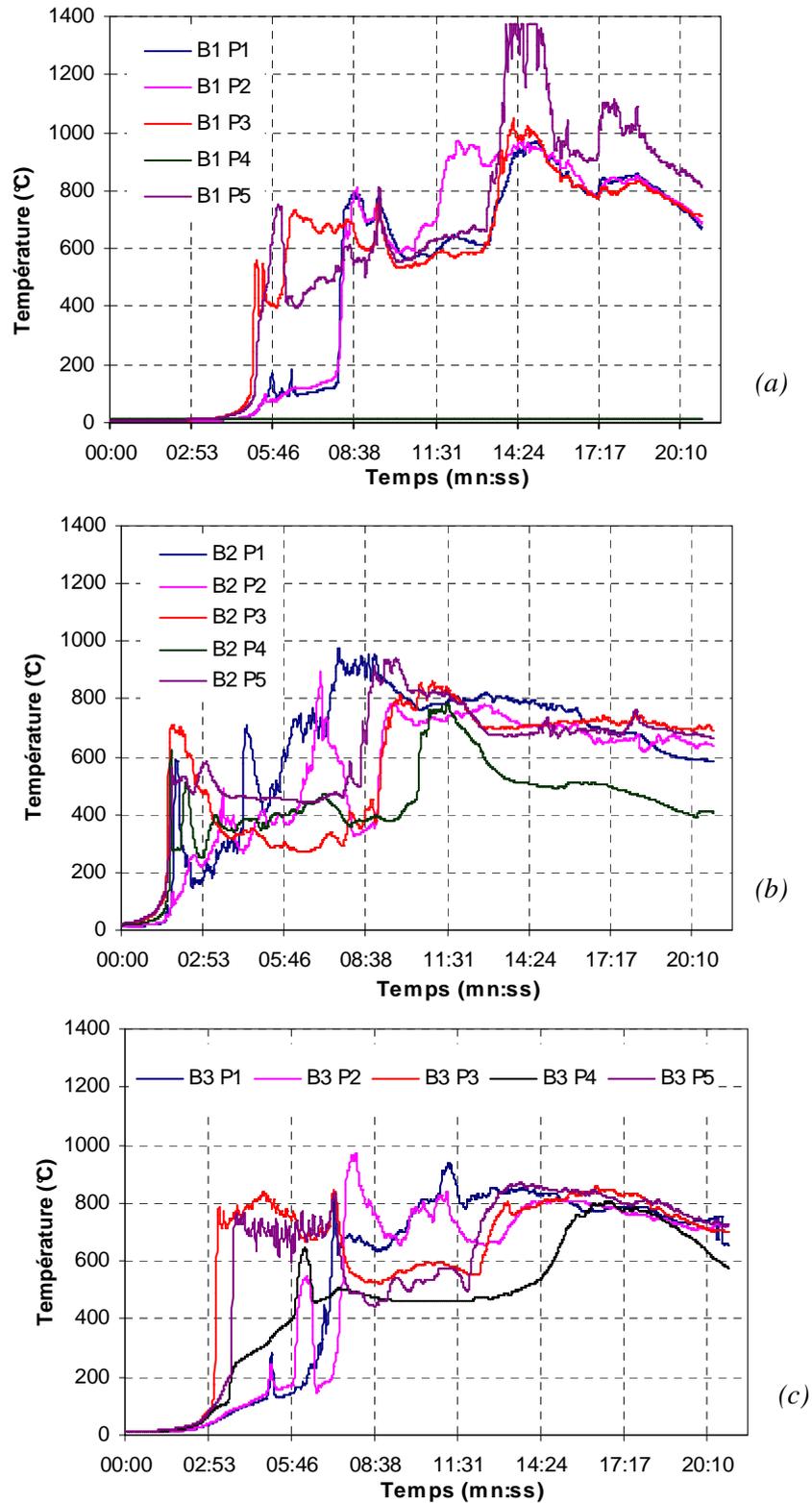


figure 7.8. Evolution des températures de surface du plafond en fonction du temps lors des essais de feux appartements B1 (a), B2 (b) et B3 (c).

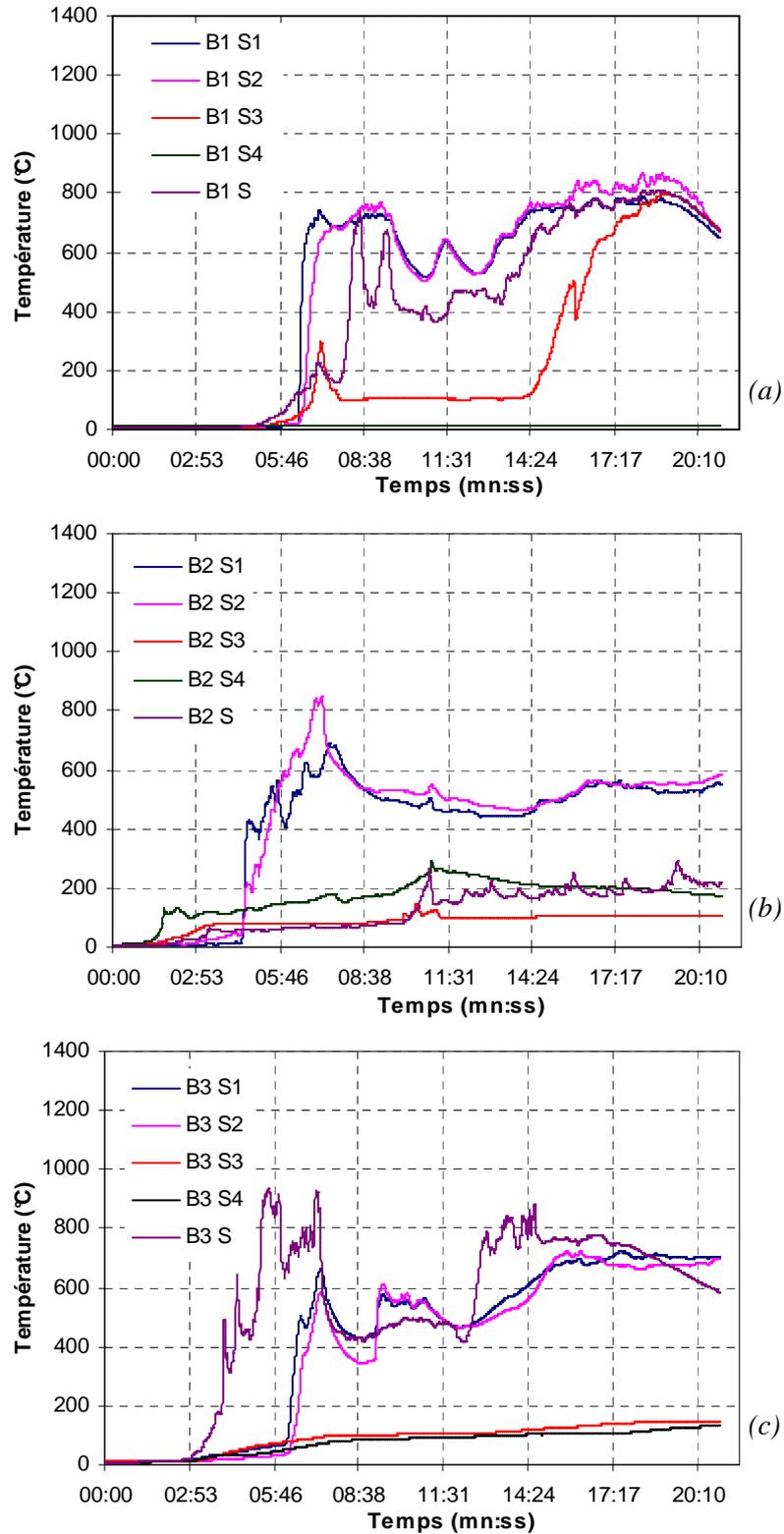


figure 7.9. Evolution des températures de surface du sol en fonction du temps lors des essais de feux appartements B1 (a), B2 (b) et B3 (c).

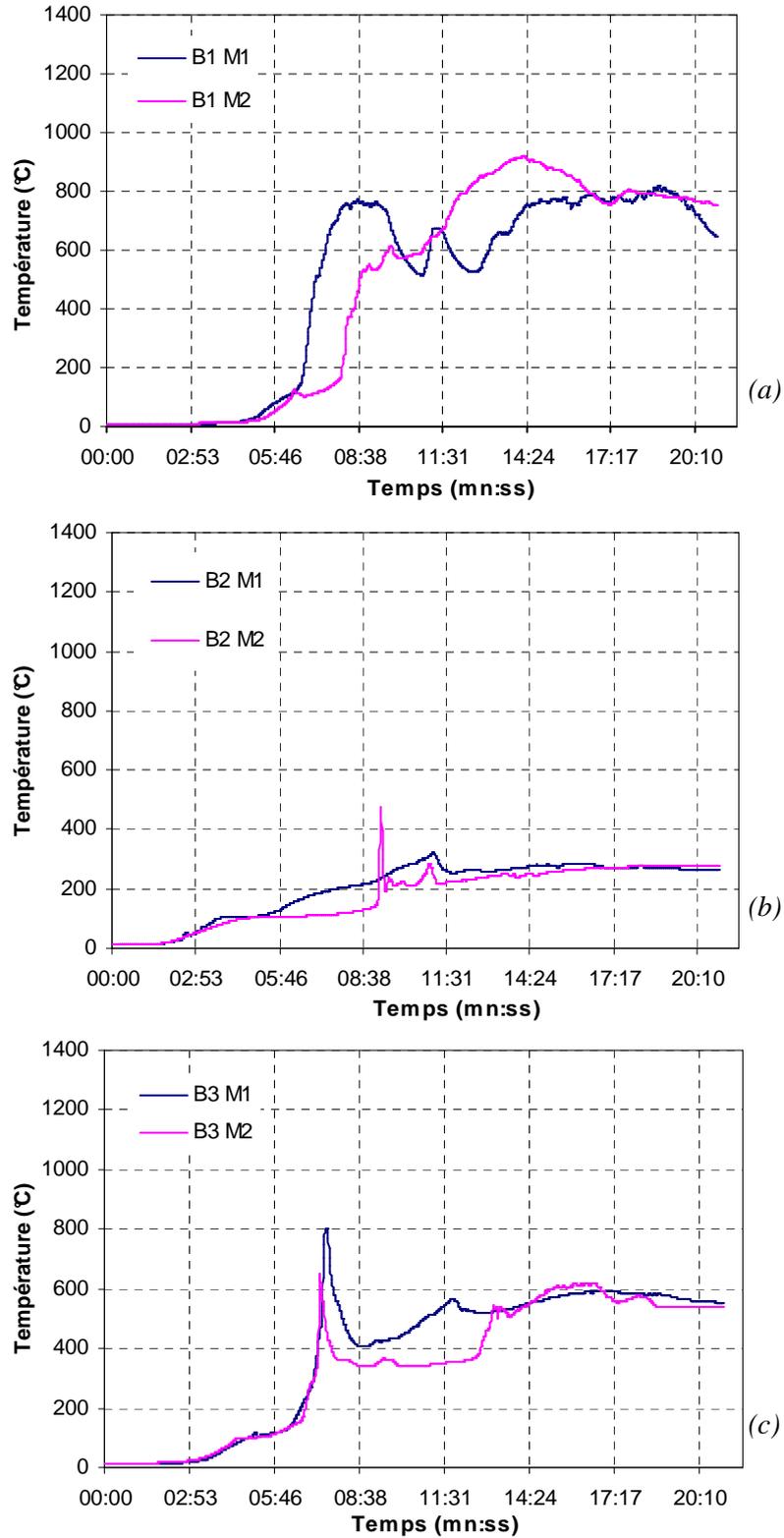


figure 7.10. Evolution des températures de surface du mur en fonction du temps lors des essais de feux appartements B1 (a), B2 (b) et B3 (c).

Les valeurs des températures de surface maximales mesurées lors des essais d'incendie sont résumées dans le tableau 7.3 avec le temps correspondant.

tableau 7.3 Températures de surface maximales avec le temps équivalent pour les appartements B1, B2 et B3.

	B1		B2		B3	
	T (°C)	t (mn)	T (°C)	t (mn)	T (°C)	t (mn)
S1	788	18' 14"	690	7' 29"	728	21' 54"
S2	868	18' 55"	850	7' 09"	723	15' 42"
S3	801	18' 56"	147	10' 23"	146	19' 53"
S4	HS	HS	292	10' 54"	133	22' 01"
S	812	18' 47"	293	19' 22"	936	5' 34"
P1	969	15' 00"	973	7" 39"	940	11" 16"
P2	977	14' 36'	896	7' 00"	967	7' 59"
P3	1050	14' 15"	859	10' 58"	855	16' 20"
P4	HS	HS	784	11' 28"	805	16' 48"
P5	1372	14' 00"	939	9' 39"	873	13' 41"
M1	818	18' 54"	322	11' 01"	802	7' 30"
M2	912	14' 17"	477	9' 13"	648	7' 16"

La figure 7.11 indique les températures maximales de surface aux endroits de mesure de chaque appartement testé. Pour chaque appartement, nous représentons les points de mesure du plafond puis, la projection dans le sens de la hauteur des positions des trois types de thermocouple (plafond, sol, mur).

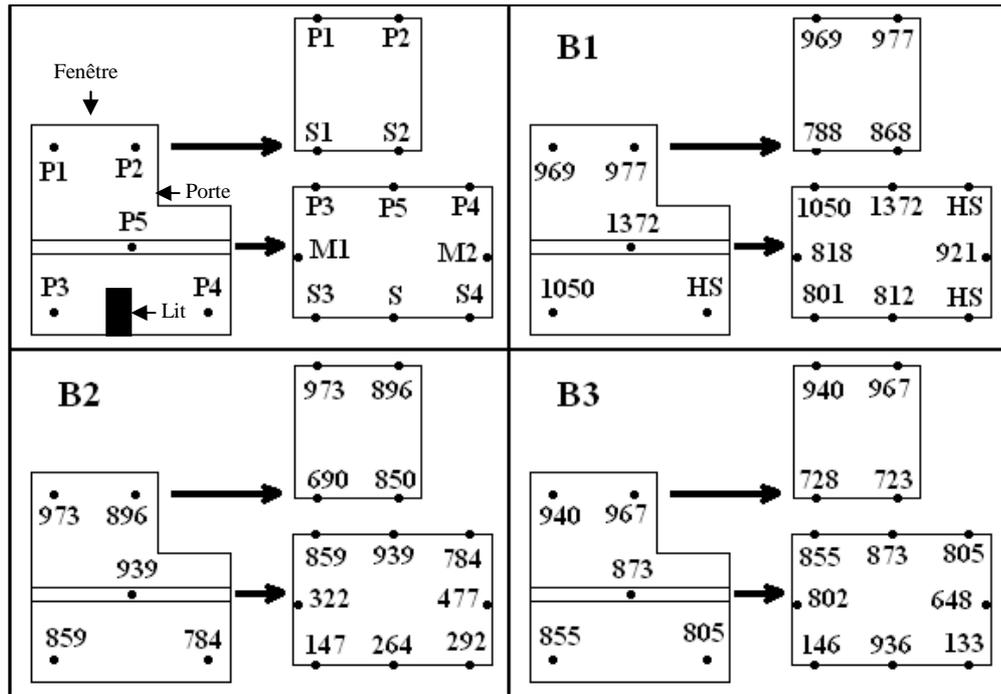


figure 7.11. Températures maximales aux différents points de mesure des appartements B1, B2 et B3.

On note une disparité des résultats de mesures d'un feu d'appartement à un autre. Cette disparité est liée au problème d'humidité lors de l'extinction des feux d'appartements B1 et B2. On observe une faible température des plafonds des appartements B2 et B3 voire même celle du sol comparativement aux mesures effectuées pour l'appartement B1 (figure 7.11). Les températures du feu d'appartement B1 étant les plus élevées, nous ciblons notre analyse sur celui-ci.

Les mesures de température montrent que l'augmentation de température s'effectue plus rapidement dans la zone des thermocouples P3, P4 et P5 (figure 7.8 (a)). Ces thermocouples indiquent une montée rapide en température par rapport aux autres points ; l'origine du feu est dans cette zone en bas du lit. La température augmente rapidement pour les points P3, P5 (figure 7.8 (a)), M1 et M2 (figure 7.10 (a)). La zone [P3, P4, S3, S4, S] (tête du lit) s'échauffe plus vite que la zone où se trouve la fenêtre [P1, P2, S1, S2]. Il faut toutefois noter que la charge calorifique est plus importante dans la zone [P3, P4, S3, S4, S] (deux palettes, matelas en mousse) que dans la zone [P1, P2, S1, S2].

A la suite de l'ouverture de la fenêtre, soit au bout de huit minutes, on observe que les thermocouples P1 et P2 (proches de la fenêtre) indiquent une montée brutale de la température (figure 7.8 (a)). L'ouverture de la fenêtre provoque un appel d'air et donc cette augmentation rapide de la température. Les températures des points P3 et P5 commencent à augmenter vite et atteignent rapidement une température voisine de 800°C. Les points S1 et S2 connaissent un déphasage d'une minute pour une même augmentation (figure 7.9 (a)). Le point S3 présente un comportement différent des autres points. La

température baisse et reste quasiment constante puis augmente au bout de six minutes environ après l'ouverture de la fenêtre.

Nous remarquons que les températures aux différents points du sol atteignent quasiment au même moment la valeur maximale. Les mesures indiquent une température maximale de 868°C au point S2.

Au niveau du plafond, le scénario est identique. La température maximale est atteinte aux différents points au même moment, soit 3 ou 4 minutes avant le sol. La valeur maximale relevée est de 1372°C au point P5, point le plus proche de l'origine du feu.

7.5.2 Feux de cages d'escalier

Notons deux différences dans le déroulement des feux de cages d'escalier C1 et C2. la charge calorifique dans le local source n'est pas la même pour les deux feux. La durée du feu C2 est de quarante minutes environ contre vingt minutes pour les autres essais. Nous commentons le feu de cage d'escalier C1.

Les figures 7.12 et 7.13 illustrent l'évolution de la température de surface du plafond, du sol et du mur en fonction du temps durant les feux des deux cages d'escalier C1 et C2.

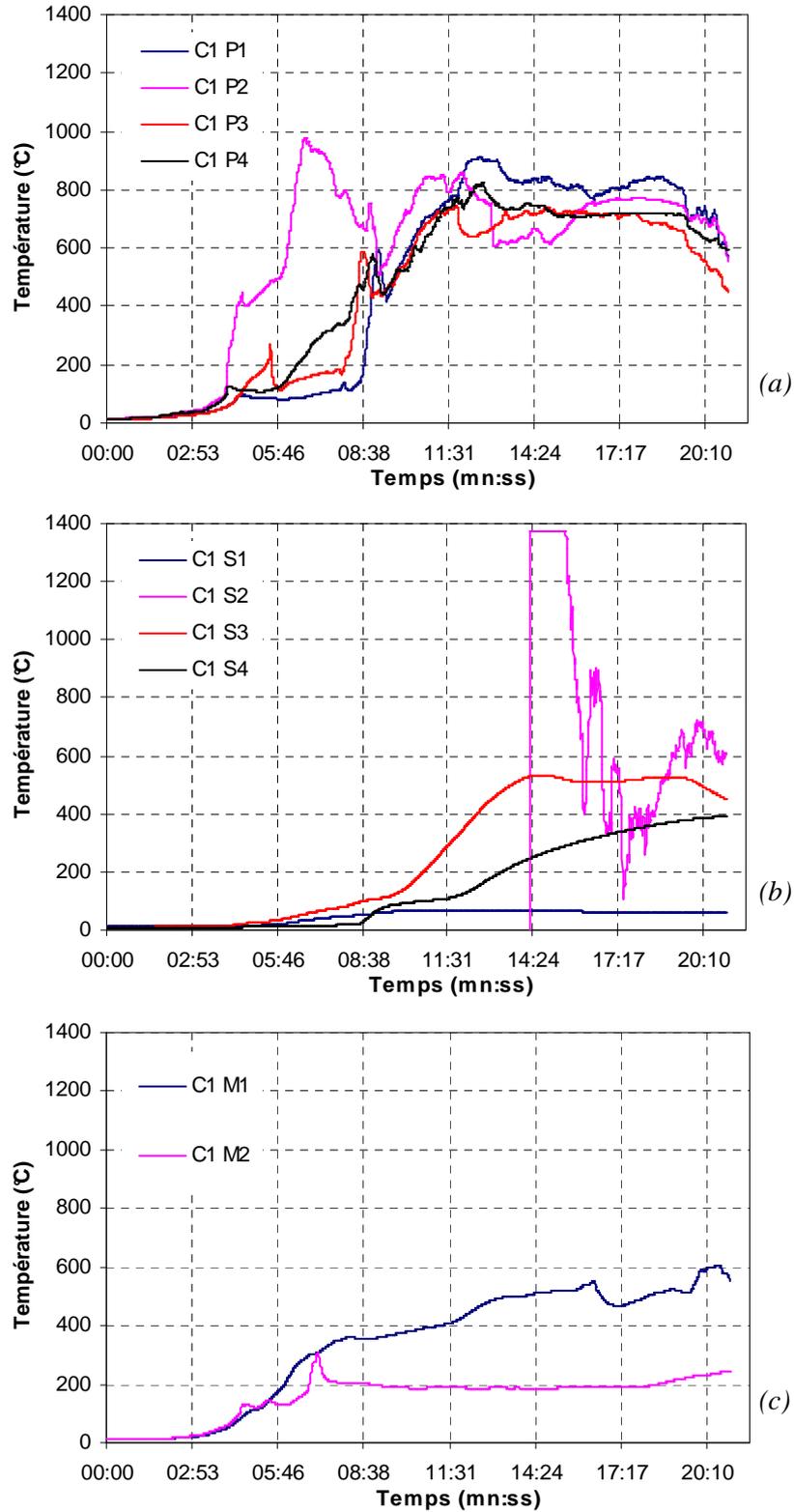


figure 7.12. Evolution des températures de surface en fonction du temps lors de l'essai de feu de cage d'escalier C1 [Plafond (a), Sol (b), Mur (c)].

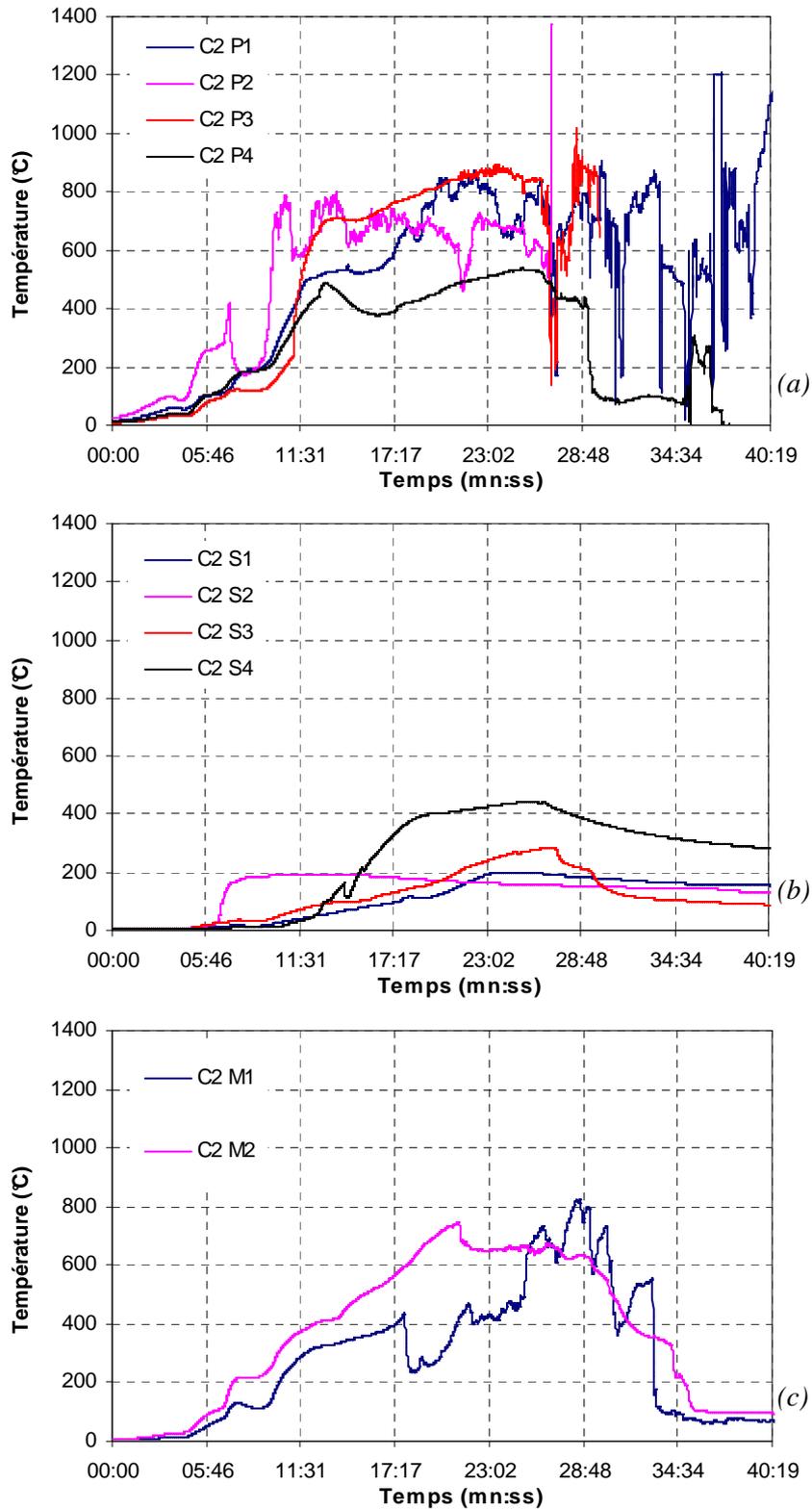


figure 7.13. Evolution des températures de surface en fonction du temps lors de l'essai de feu de cage d'escalier C2 [Plafond (a), Sol (b), Mur (c)].

Les feux de cages d'escalier ont un déroulement classique. Le départ du feu se produit à la verticale du point P2 (figure 7.12 (a)). Ensuite, les températures des points P1, P3 et P4 ont à peu près la même évolution. La température maximale mesurée sur le plafond est de 979°C. Les températures au sol (figure 7.12 (b)) sont faibles (températures inférieures à 600°C) par rapport aux températures au plafond, et aussi par rapport aux températures relevées au sol lors des essais de feux d'appartement. Ceci peut être en partie lié à la présence d'un vide d'environ 15 cm entre le fond de la benne (constituant la charge) et le sol.

7.6 Analyse des résultats

La courbe ISO 834 permet de modéliser l'élévation de température en fonction du temps. Elle est utilisée pour les essais en laboratoire. La mesure de la température de surface des éléments en béton lors des essais d'incendie permet de comparer la courbe réglementaire utilisée en laboratoire à des mesures in-situ. Nous remarquons d'une manière générale que la tendance entre la courbe ISO et le feu réel est presque similaire comme l'illustre la figure 7.14.

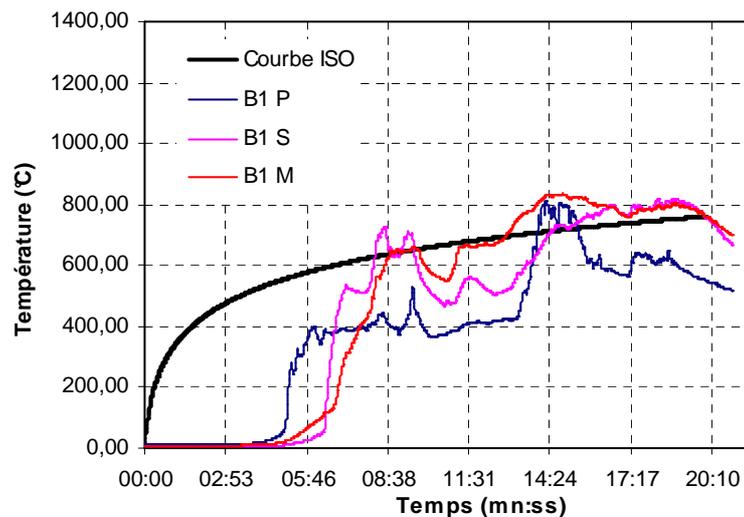


figure 7.14. Comparaison des courbes expérimentales de feu d'appartement à la courbe ISO.

Les températures moyennes au sol, au mur et au plafond des feux d'appartement B1 et cage d'escalier C1 sont comparées aux températures de la courbe ISO 834 pour les temps 5, 10, 15 et 20 minutes. Le tableau 7.4 regroupe les températures expérimentales et les températures obtenues par la courbe ISO 834.

tableau 7.4 Températures expérimentales et températures obtenues par la courbe ISO.

Feux	Temps (mn)	0	5	10	15	20
Appartement B1	Sol	7	11	531	723	752
	Mur	9	23	594	828	758
	Plafond	10	69	384	796	547
Cage d'escalier C1	Sol	9	18	114	401	443
	Mur	11	117	282	351	409
	Plafond	11	196	583	724	660
Courbe ISO	-	-	556	658	719	761

Les valeurs obtenues expérimentalement cinq minutes après le début de chauffage sont très inférieures à celles indiquées par la courbe ISO. C'est la phase de démarrage de l'incendie. Un feu est caractérisé par une phase de démarrage où le combustible commence par brûler. Cette phase, qui n'est pas présente sur la courbe ISO, se remarque à travers nos résultats pour les cinq premières minutes des feux.

Entre cinq et quinze minutes de feu, la température augmente rapidement en tous les points. La température maximale atteinte aux plafonds est même supérieure à celle de la courbe ISO. Cette phase de montée rapide en température correspond aux phases de propagation de feu et d'embrassement.

Au delà de quinze minutes, la température du plafond a baissé mais celle du sol reste élevée. On note une diminution progressive du combustible qui entraîne la baisse de la violence du feu. La courbe ISO indique une augmentation de la température beaucoup moins rapide qu'au début du feu.

Après extinction des feux, il a été observé quelques dégradations en surface des éléments en béton. En quelques points, on a pu noter un éclatement de surface, un éclatement d'angle et quelques fissurations sur les poteaux, dalles et poutres (figure 7.15). Cependant, ces éléments de structure en béton étaient très peu endommagés. Le bâtiment étant vieux de plus d'une cinquantaine d'années, le béton utilisé était du béton ordinaire, peu susceptible d'instabilité thermique au cours d'une élévation de température.



Eclatement de surface



Eclatement d'angle



Béton fissuré

figure 7.15. *Quelques dégradations observées sur la surface du plafond.*

7.7 Conclusion sur les feux expérimentaux dans un immeuble

Les feux expérimentaux réalisés nous ont permis de comparer la température à la surface d'un élément en béton lors d'un incendie à celle définie par la courbe ISO. On remarque une certaine hétérogénéité dans les résultats liée aux conditions expérimentales.

L'analyse des courbes de température montre une phase de démarrage du feu, d'embrasement général, puis la diminution du feu. Le démarrage du feu expérimental est beaucoup moins rapide que celui de l'incendie conventionnel ISO. Au bout de cinq minutes, l'incendie conventionnel atteint une température avoisinant 556°C tandis que les résultats expérimentaux montrent une température bien inférieure à 200°C. Après le démarrage du feu, on remarque que l'évolution de la courbe ISO est moins rapide que celle des mesures effectuées. Les températures mesurées diminuent à partir d'un certain temps. Cette baisse de température est liée à la diminution de la quantité de combustible présente dans le local. Les éléments en béton de poteaux, poutres et dalles ont été très peu endommagés au cours de ces feux expérimentaux.

CONCLUSION GENERALE

L'objectif de la présente étude était d'approfondir la connaissance du comportement des éléments en béton portés à une température élevée. L'étude a porté sur des voies d'amélioration du béton vis-à-vis de son instabilité thermique et de ses performances mécaniques résiduelles. L'utilisation de fibres de polypropylène et de fibres métalliques a été envisagée. Nous avons étudié l'influence de chacune des natures de fibres, en faisant varier leur fraction volumique pour différentes formulations de matrice. Puis l'influence couplée des deux types de fibres a été envisagée pour différentes combinaisons de fractions volumiques. Des bétons sans fibres, des bétons contenant des fibres de polypropylène, des bétons contenant des fibres métalliques et des bétons contenant un cocktail de fibres de polypropylène et métalliques ont été confectionnés et conservés dans des conditions bien définies. Les rapports E/C des compositions de béton étaient de 0.30, 0.45 et 0.61. Les propriétés physiques telles que la perte de masse, la porosité, les gradients thermiques ; les propriétés mécaniques telles que la résistance en compression, la résistance en traction par flexion et le module d'élasticité ont été étudiées. Ces propriétés ont été déterminées à la température ambiante et après un traitement thermique. Le traitement thermique a consisté à soumettre les éprouvettes de bétons à quatre cycles de chauffage-refroidissement de la température ambiante à 150°C – 300°C - 450°C ou 600°C. La vitesse de chauffage était de 1°C/min. Plusieurs points sont à retenir à l'issue de cette étude.

Trois compositions de bétons (du béton ordinaire au béton à hautes performances) sans fibres ont été étudiées. Les résultats montrent une dégradation et une baisse de propriétés résiduelles lors de la montée en température. La masse des éprouvettes diminue avec la température. La perte de masse est plus importante pour le béton ordinaire que le béton à hautes performances. Une baisse des propriétés mécaniques résiduelles est observée. Cette baisse de propriétés est attribuée à la transformation physico-chimique de la matrice cimentaire ainsi qu'à la dilation thermique différentielle entre la pâte de ciment et les granulats. De plus, la mesure de la différence de température entre le centre et la surface des éprouvettes révèle l'existence d'un fort gradient thermique qui pourrait induire d'importantes contraintes thermiques dans les éprouvettes. Les contraintes thermiques contribueraient à la baisse des propriétés mécaniques. Les résultats de mesures de porosité confirment que les bétons à hautes performances sont plus endommagés que les bétons ordinaires.

L'addition des fibres de polypropylène dans le béton permet d'améliorer sa stabilité thermique. Des bétons sans fibres à faible rapport E/C, conservés dans des sacs plastiques ou dans l'eau ont été testés. Les éprouvettes conservées dans l'eau et chauffées jusqu'à 600°C ont présenté des éclatements tandis que celles conservées dans des sacs plastiques n'ont pas éclaté. Avec les fibres de polypropylène, pour des dosages de 1, 1.5 et 2 kg/m³, les bétons conservés dans les mêmes conditions (dans l'eau ou dans des sacs plastiques) et soumis au même cycle de chauffage n'ont pas éclaté. Ce résultat corrobore

ceux de la littérature sur l'amélioration de la stabilité thermique des bétons avec les fibres de polypropylène.

L'étude des propriétés physiques et mécaniques des bétons de fibres de polypropylène a porté sur deux compositions de béton. Trois dosages en fibres, 0.11%, 0.17% et 0.22% en proportion volumique (soit 1, 1.5 et 2 kg/m³), ont été utilisés. Les trois domaines définis dans le cas du béton sans fibres se retrouvent sur les courbes. Le béton à faible rapport E/C perd toujours moins de masse. Mais, nous avons noté une perte de masse supplémentaire générée par la présence des fibres de polypropylène. Une augmentation plus importante de porosité est aussi mesurée, à partir de 300°C. La porosité supplémentaire induite par les fibres est d'autant plus importante que le rapport E/C est faible. Cette différence de comportement est liée à la microstructure de la matrice cimentaire. En fondant à 160-165°C, les fibres présentent une augmentation de volume. Dans le béton ordinaire, la porosité plus importante laisse pénétrer une grande partie des fibres. Dans les bétons à hautes performances, la porosité plus fine ne laisse pas pénétrer la fibre fondue, ce qui génère des contraintes à l'origine de la fissuration. Pour le béton à hautes performances (CP3 avec E/C = 0.30) la porosité croît avec le volume de fibre. A partir de 300°C, l'ajout de 1.5 kg/m³ de fibres de polypropylène dans le béton à hautes performances amène la porosité de ce dernier à une valeur identique à celle du béton ordinaire (C2 avec E/C = 0.45) chauffé à la même température.

La mesure de la différence de température entre la surface et le centre de l'éprouvette a montré une baisse de la température d'apparition du pic lorsque l'on ajoute des fibres de polypropylène au béton, notamment plus pour le béton à hautes performances. La formation de micropores entre les fibres et la pâte de ciment/granulats, la fusion des fibres de polypropylène créent des chemins facilitant le transfert de flux. Le comportement des deux bétons n'est pas le même. La présence des fibres a entraîné une baisse du gradient thermique au sein des bétons à hautes performances et une faible augmentation avec les bétons ordinaires.

L'influence des fibres de polypropylène sur les performances mécaniques résiduelles dépend du rapport E/C du béton. Pour le béton à hautes performances (béton CP3), la résistance en compression, la résistance en traction et le module d'élasticité résiduels diminuent avec l'ajout de fibres. Les écarts les plus importants se situent entre les températures 300°C et 450°C. Après le chauffage à 600°C, nous ne notons plus de différences de caractéristiques mécaniques résiduelles entre les bétons avec ou sans fibres de polypropylène. Pour le béton ordinaire (béton CP2), seul le dosage à 2 kg/m³ entraîne une diminution de résistance résiduelle en compression. Les résistances résiduelles en traction sont, quant à elles, meilleures lorsque des fibres de polypropylène sont ajoutées. Le dosage à 1.5 kg/m³ semble conduire aux meilleures résistances résiduelles.

Les fibres métalliques sont utilisées dans le béton pour limiter la propagation des fissures et produire un matériau plus ductile. L'utilisation des fibres métalliques dans le béton porté à une température élevée a aussi fait l'objet de cette étude. Deux compositions de béton ont été testées avec trois dosages en fibres : 20, 30 et 40 kg/m³ (soit 0.25, 0.38 et 0.51% en proportion volumique). Pour les trois proportions de fibres métalliques étudiées,

aucun éclatement d'éprouvette n'a été enregistré au cours des cycles de chauffage-refroidissement.

L'addition des fibres métalliques dans le béton ne change pas l'allure des courbes d'évolution des propriétés étudiées. La mesure de la différence de température montre, comme pour le cas des bétons de fibres de polypropylène, que l'influence des fibres métalliques sur le gradient thermique est liée à la famille du béton. Dans le cas des bétons ordinaires (béton CS2), le gradient thermique a augmenté et avec les bétons à hautes performances (béton CS3), une baisse du gradient est remarquée. L'influence des fibres métalliques sur la porosité dépend aussi du rapport E/C du béton. La porosité des bétons de fibres métalliques varie peu jusqu'à la température 300°C puis, elle évolue rapidement à partir du cycle de chauffage à 450°C. La porosité supplémentaire des bétons de fibres métalliques à cette température peut s'expliquer par un affaiblissement de la liaison pâte de ciment / fibres consécutive à la déshydratation des C-S-H. Les micropores existants entre fibres et matrice prennent des tailles plus importantes. L'augmentation de la porosité des bétons ordinaires (béton CS2) est peu sensible tandis que celle des bétons à hautes performances (béton CS3) est plus importante. Elle traduit encore l'endommagement important des bétons à hautes performances. Les valeurs de porosité des bétons à hautes performances restent toutefois inférieures à celles des bétons ordinaires. Par rapport aux bétons de fibres de polypropylène, la porosité supplémentaire induite par les fibres métalliques est faible. Après le chauffage à 450°C, la porosité des bétons CP3-2, contenant 0.22% de fibres de polypropylène, a augmenté de 6% par rapport à celle des bétons sans fibres. Pour un même chauffage et un béton contenant 0.25% de fibres métalliques, la porosité des bétons CS3-20 croît seulement de 1%.

Les propriétés mécaniques résiduelles des bétons de fibres métalliques sont améliorées dès le chauffage à 150°C. Le gain moyen des performances mécaniques résiduelles des bétons CS3, après chauffage à 600°C, en traction, en compression et du module d'élasticité est respectivement de 27%, 6% et 1%. Nous remarquons une meilleure amélioration en traction qu'en compression et du module d'élasticité. L'influence de la variation du volume de fibres métalliques est surtout observée en traction, notamment pour les chauffages à 450°C et 600°C. Elle montre une bonne reprise des efforts de traction par les fibres malgré les ouvertures de fissures importantes dans le béton. La ductilité post fissuration des bétons de fibres métalliques est conservée après les cycles de chauffage-refroidissement.

L'étude de la combinaison des fibres de polypropylène et métalliques a aussi été menée, l'objectif étant d'améliorer à la fois la stabilité thermique et les propriétés mécaniques résiduelles. Quatre combinaisons de cocktails de fibres ont été définies en utilisant 1 et 2 kg/m³ (soit 0.11 et 0.22% en proportion volumique) de fibres de polypropylène et 30 et 40 kg/m³ (soit 0.38 et 0.51% en proportion volumique) de fibres métalliques. L'étude est menée sur le béton à hautes performances (béton C3) pour les cycles de chauffage-refroidissement à 300°C et 600°C.

L'analyse de la différence de température entre la surface et le centre de l'éprouvette montre une faible variation du gradient thermique avec la proportion de fibres du cocktail.

Cette variation s'est accompagnée de la baisse de la température d'apparition du pic comparativement aux bétons de fibres métalliques. Elle traduit ainsi le rôle du polypropylène dans le transfert de chaleur au sein du béton.

Nous remarquons une faible variation de la perte de masse (de l'ordre de 0.1%) avec la proportion de fibres de polypropylène dans le béton de cocktail de fibres. La perte de masse des bétons de cocktail de fibres reste toutefois supérieure à celle des bétons de fibres métalliques.

Les résistances mécaniques des bétons de cocktail de fibres présentent une amélioration de la résistance initiale ou résiduelle par rapport aux bétons avec ou sans les fibres de polypropylène. La résistance résiduelle des bétons de cocktail de fibres est plus proche de celle des bétons contenant les fibres métalliques. De légères baisses de résistances résiduelles sont à noter par rapport aux bétons de fibres métalliques. Après chauffage à 300°C, la résistance résiduelle en compression des bétons CSP3 a baissé de 3% par rapport à celle des bétons de fibres métalliques. Mais, à 600°C, les résistances des deux compositions de bétons sont voisines. En traction, une baisse de résistance résiduelle de l'ordre de 10% des bétons de cocktail de fibres par rapport aux bétons de fibres métalliques est remarquée. La ductilité post fissuration des bétons de cocktail de fibres est remarquée et conservée après les cycles de chauffage-refroidissement.

Pour les pourcentages de fibres de polypropylène de 0.11% et 0.22% testés dans cette étude, le comportement mécanique des bétons de cocktail de fibres est principalement lié à la quantité de fibres métalliques du cocktail. La proportion de fibres métalliques semble jouer un rôle important sur le comportement des bétons de cocktail de fibres. Il faut toutefois noter que la taille de l'éprouvette, la vitesse de chauffage et le mode de conservation sont des paramètres importants dans l'étude du comportement du béton soumis à une température élevée. Les résultats obtenus dans le cadre de cette étude peuvent dépendre des contextes expérimentaux définis.

Enfin, des essais de feux expérimentaux dans un immeuble ont été réalisés au cours de cette thèse. Ces travaux ont été menés dans le cadre du Projet National sur l'Ingénierie de la Sécurité Incendie. L'étude était destinée à faire évoluer à la fois les connaissances et les techniques de simulation numérique en les confrontant aux mesures obtenues lors d'expérimentation de feux dans des conditions réelles. Notre principale mission était de mesurer la température de surface des éléments en béton de feux d'appartement et de cage d'escalier. L'évolution de la température de ces éléments lors de l'incendie a été comparée à la courbe conventionnelle ISO 834.

Le démarrage du feu expérimental est beaucoup moins rapide que celui de l'incendie conventionnel ISO. La température atteinte par le feu expérimental (valeur inférieure à 200°C), au bout de cinq minutes, est largement inférieure à celle de la température conventionnelle (556°C). Après le démarrage, l'embrassement général, une diminution du feu est observée. Cette baisse de l'intensité du feu, liée à la quantité du combustible dans le local, s'accompagne d'une diminution de température. Cette baisse de température du feu expérimental ne s'observe pas sur la courbe d'évolution de la température conventionnelle.

L'observation de la surface des éléments en béton (poteaux, poutres, dalles) a montré leur faible endommagement au cours des essais, malgré la température élevée atteinte. La vétusté du bâtiment permet de lier ce comportement à la présence de béton ordinaire peu susceptible d'instabilité thermique au cours de la montée en température.

PERSPECTIVES

Karl Jaspers disait : «faire de la philosophie, c'est être en route. Les questions, en philosophie, sont plus essentielles que les réponses, et chaque réponse devient une nouvelle question». A travers cette étude, nous avons montré comment les fibres de polypropylène et métalliques peuvent améliorer le comportement des éléments en béton soumis à une température élevée. Cette étude a mis en évidence l'interaction entre les fibres et la microstructure du béton. Des observations microscopiques seraient utiles pour mieux étayer nos premières conclusions. De plus, des essais supplémentaires sur les bétons de cocktail de fibres à d'autres cycles de chauffage-refroidissement permettront de compléter les résultats de la porosité.

Les dosages en fibres métalliques utilisés dans le cadre de cette recherche n'ont pas conduit à une instabilité thermique du béton. Les travaux de Peng et al., sur l'utilisation de 100 kg/m³ de fibres métalliques, ont abouti à des éclatements d'éprouvettes. Existerait-il une fraction volumique, seuil à partir duquel les fibres métalliques deviennent défavorables vis-à-vis de la stabilité thermique du béton ? Des travaux complémentaires sur la proportion volumique et l'état hydrique du béton permettront de préciser l'influence des fibres métalliques sur le comportement à haute température du béton.

Les essais réalisés ont permis de caractériser le béton jusqu'à la température 600°C à une vitesse de chauffage plus faible que celle d'un incendie réel ou de la courbe ISO ou HCM (HydroCarbure Majoré). Il serait nécessaire d'élargir l'étude à des vitesses de chauffage plus élevées et à des structures de grandes dimensions.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [Afno, 2001] NF EN 12390-5 AFNOR, Essai pour béton durci – Partie 5: Résistance à la flexion des éprouvettes, Indice de classement: P 18-433, Octobre 2001.
- [Afno, 2003] NF EN 12390-3, AFNOR, Essai pour béton durci – Partie 3: Résistance en compression des éprouvettes, Indice de classement: P 18-455, Février 2003.
- [AFPC, 1997] AFPC-AFREM, sur la durabilité des bétons, Méthodes recommandées pour la mesure des grandeurs associées à la durabilité des bétons, INSA-LMDC, Toulouse, Décembre 1997.
- [Aïtcin, 2000] Aïtcin, P.C., Bétons Haute Performance, Editions Eyrolles, 2000.
- [Alar, 2005] Alarcon-Ruiz, L., Platret, G., Massieu, E., Ehrlacher, A., The use of thermal analysis in assessing the effect of temperature on a cement paste, *Cement and Concrete Research*, Vol. 35, 2005, pp. 609-613.
- [Alon, 2004] Alonso, C., Fernandez, L., Deshydration and rehydration processes of cement paste exposed to high temperature environments, *Journal of Materials Sciences*, Vol. 39, 2004, pp. 3015-3024.
- [Ande, 1997] Anderberg, Y., Spalling phenomena of HPC and OC, International workshop on fire performance of high-strength concrete, NIST, Gaithersburg, M D, 13-14 February 1997.
- [Arup, 2005] ArupFire, HSE, Fire resistance of concrete enclosures, Work Package 1: data collection, Work Package 2: spalling categories, Work Package 5 and 6: Heat transfer modeling in response to two of the HSE design fires, Work Package 7: look-up tables, Work Package 8: spalling guidance, Rev B, 2005.
- [Atki, 2004] Atkinson, T., Polypropylene fibers control explosive spalling in high-performance concrete, *Concrete*, Vol. 38, 2004, pp. 69-70.
- [Aydi, 2008] Aydin, S., Yazici, H., Baradan, B., High temperature resistance of normal strength and autoclaved high strength mortars incorporated polypropylene and steel fibers, *Construction and Building Materials*, Vol. 22, 2008, pp. 504-512.
- [Bato, 2010] Batoz, J-F., Behloul, M., Développement des BFUP au cours des deux dernières décennies: aperçu général, La Technique Française Du Béton, The 3rd International fib Congress, Washington, 29 May-2 June 2010.

- [Baya, 2002] Bayasi, I.Z., Al Dhaheiri, M., Effect of exposure to elevated temperature on polypropylene fiber-reinforced concrete, *ACI Materials Journal*, Vol. 99, n° 1, 2002, pp. 22-26.
- [Baza, 1978] Bazant, Z.P., Pore pressure and drying of concrete at high temperatures, *J. Enging. Mech. Div.*, Vol 104, 1978, pp. 1059-1079.
- [Baza, 1997] Bazant, Z.P., Kaplan, M.F., *Concrete at high temperature, Material properties and mathematical models*, Longman House, Burnt Mill, England, 1997.
- [Behl, 2010] Behloul, M., *Modèle général de comportement au feu pour les bétons BHP et BFUP*, La Technique Française Du Béton, The 3rd International fib Congress, Washington, 29 May-2 June 2010.
- [Behn, 2009] 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.
- [Bilo, 2004] Bilodeau, A., Kodur, V.K.R., 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, 2004, pp. 163-174.
- [Boro, 2006] Borot, G., Larive, C., Feron, C., Apports des essais incendie pour la détermination de la tenue au feu des structures, *Tunnels et ouvrages souterrains*, n° 198, Novembre/Décembre 2006, pp. 365-366.
- [Both, 2004] Both, R., The behaviour of unprotected loaded concrete tunnel linings subjected to RWS hydrocarbon fire, TNO report 2000-R01360, 2000.
- [Brei, 1996] Breitenbucker, R., High strength concrete C105 with increased fire – resistance due to polypropylene fibres, 4th International Symposium on Utilization of High – Strength/High – Performance Concrete, Paris, France, 1996, pp. 571-577.
- [Casa, 1996] Casanova, P., *Bétons renforcés de fibres métalliques du matériau à la structure*, Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, 1996.
- [Cast, 1990] Castillo, C., Durrani, A.J., Effect of transient high temperature on high-strength concrete, *ACI Materials Journal*, title n°87-M7, 1990, pp. 47-53.

- [Cast, 2004] Castellote, M., Alonso, C., Andrade, C., Tirillas, X., Campo, J., Composition and microstructural changes of cement pastes upon heating, as studied by neutron diffraction, *Cement and Concrete Research*, Vol. 34, 2004, pp. 1633-1644.
- [Chan, 2000] 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, 2000, pp. 247-251.
- [Chang, 2006] 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, 2006, pp. 1993-2005.
- [Chen, 2004] Chen, B., Liu, J., Residual strength of hybrid-fiber reinforced high strength concrete after exposure to high temperature, *Cement and Concrete Research*, Vol. 34, 2004, pp. 1065-1069.
- [Cheng, 2004] Cheng, F-P., Kodur, V.K.R., Wang, T-C., Stress-strain for high strength concrete at elevated temperatures, *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol. 16, 2004, pp. 84-90.
- [Choi, 2006] Choinska, M., Effets de la température, du chargement mécanique et de leurs interactions sur la perméabilité du béton de structure, thèse de doctorat, Université de Nantes, 2006.
- [Cruz, 1980] Cruz, C.R., Gillen, M., Thermal expansion of portland cement paste, mortar and concrete at high temperature, *Fire and Materials*, Vol. 4, 1980, pp. 66-70.
- [Debu, 2005] www.debunking911.com/madrid.htm.
- [Desa, 2007] De Sa, C., Etude hydro-mécanique et thermo-mécanique du béton: influence des gradients et des incompatibilités de déformation, Thèse de doctorat, Ecole Normale Supérieure de Cachan, 2007.
- [Diam, 1986] Diamond, S., The microstructure of cement paste in concrete, in proceeding of the 8th international on the chemistry of cement, Rio de Janeiro, Brasil, Vol. 1, 1986, pp. 122-147.
- [Diam, 2004] Diamond, S., The microstructure of cement paste and concrete-a visual primer, *Cement and Concrete Composites*, Vol. 26, 2004, pp. 919-933.
- [Dias, 1990] Dias, W.P.S, Khoury, G.A, Sullivan, P.J.E, Mechanical properties of hardened cement paste exposed to temperature up to 700°C, *ACI Materials Journal*, title n°87-M18, 1990.

- [Died, 1989] Diederichs, U., Jumppanen, U. M., Pentalla, V., Behaviour of high strength concrete at elevated temperatures, Espoo 1989, Helsinki University of Technology, Department of structural Engineering, report 92, pp. 72.
- [Died, 1992] Diederichs, U., Jumppanen, U.M., High temperature properties and spalling behaviour of high-strength concrete, Verlog für architektur und techn.wissencheften, Ernst & schn, 1992, pp. 191-197.
- [Died, 1994] Diederichs, U., Jumppanen, U.M., Morita, T., Nause, P., Schneider, U., Zum, abplatzverhalten von Stutzen aus hochfestem Normalbeton unter Brandbeanspruchung, Concerning Spalling Behaviour of High Strength Concrete Columns under Fire Exposure, Technische Universitate Braunschweig, 1994.
- [Dreu, 1998] Dreux, G., Festa, J., Nouveau guide du béton et de ses constituants, Editions Eyrolles, 1998.
- [Dupa, 1995] Dupain, R., Lanchon, R., Saint-Arroman, J-C., Granulats, sols, ciments et bétons, Caractérisation des matériaux de génie civil par les essais de laboratoire, Editions Casteilla, 1995.
- [Euro, 2004] CEN TC 250, Eurocode 2: Design of concrete structures – Part 1-2: General rules – Structural fire design, 2004.
- [Fare, 2009] Farès, H., Propriétés mécaniques et physico-chimiques de bétons autoplaçants exposés à une température élevée, Thèse de doctorat, Université de Cergy Pontoise, 2009.
- [Gron, 2005] Grondin, F.A., Modélisation multi-échelles du comportement thermo-hydro-mécanique des matériaux hétérogènes, applications aux matériaux cimentaires sous sollicitations sévères, Thèse de doctorat, Université de Paris 6, 2005.
- [Hadd, 2007] Haddad, R.H., Al-Saleh, R.J., Al-Akhras, N.M., Effect of elevated temperature on bond between steel reinforcement and fiber reinforced concrete, Fire Safety Journal, doi:10.1016/j.firesaf.2007.11.002, 2007.
- [Hage, 2004] Hager, I., Comportement à haute température des bétons à haute performance-évolution des principales propriétés mécaniques, Thèse de doctorat, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées et Ecole Polytechnique de Croatie, 2004.

- [Hage, 2009] Hager, I., Tracz, T., Residual transport properties of heated HPC modified with polypropylenes fibres, 1st International Workshop on Concrete Spalling due to Fire Exposure, Proceedings, F. Dehn, E.A.B. Koenders, 2009, pp. 221-228.
- [Hamm, 1992] Hammer, TA., High strength concrete, phase 3, SP6 fire resistance report 6.2, Spalling reduction through material design, SINTEF report STF70 F92156, Trondheim, Norway, 1992.
- [Hara, 1970] Harada, T., Takeda, J., Yamane, S., Furumura, F., Strength, elasticity and thermal properties of concrete subjected to elevated temperatures, International seminar on concrete for nuclear reactors, Germany, Vol. 1, 5 October 1970, pp. 377-406.
- [Hara, 1972] Harada, T., Takeda, J., Yamane, S., Furumura, F., Strength, elasticity and thermal properties of concrete subjected to elevated temperatures, Concrete for nuclear reactors, American Concrete Institute, SP 39, 1973, pp. 179-203.
- [Harm, 1964] Harmathy, T.Z., Moisture in materials in relation to fire test, ASTM, Special Technical Publication, n° 385, 1964, pp. 74-95.
- [Harm, 1965] 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 1965, Canada.
- [Hert, 1984] Hertz, K., Heat induced explosion of dense concretes, Technical University of Denmark, Institute of Building Design, Report 166, 1984.
- [Hert, 1992] Hertz, K., Danish investigations on silica fume concretes at elevated temperatures, ACI Materials Journal, Vol. 89, 1992, pp. 345-347.
- [Hert, 1998] Hertz, K., Limits of spalling of fire concrete, Dep. of building and energy technical university of Denmark, Nov 1998.
- [Hert, 2003] Hertz K., limits of spalling of fire – exposed concrete. Fire Safety Journal, Vol. 38, 2003, pp. 103-116.
- [Hoff, 2000] Hoff, G., Bilodeau, A., Malhotra, V. M., Elevated temperature effects on HSC residual strength, Concrete International., Vol. 22 (4), 2000, pp. 41-47.
- [Hori, 2002] Horiguchi, T., Takano, T., Saeki, N., Lin TD., Effect of fibre reinforcement on residual properties of high strength concrete under elevated temperature, ACI SP-209, 2002, pp. 53-64.

- [Hoss, 2006] Hossain, K.M.A., High strength blended cement concrete incorporating volcanic ash: performance at high temperatures, *Cement and Concrete Composite*, Vol. 28, 2006, pp. 535-545.
- [Huse, 2006] Husem, M., The effects of high temperature on compressive and flexural strengths of ordinary and high performance concrete, *Fire Safety Journal*, Vol. 41, 2006, pp. 155-163.
- [Jahr, 1989] Jahren, P.A., Fire resistance of high strength/dense concrete with particular reference to the use of condensed silica fume, A review. Proc. of Trondheim (Norway) conference, 1989, pp. 1013-1049.
- [Jans, 2009] Jansson, R., Bostrom, L., Fire spalling, The moisture effect, 1st International Workshop on Concrete Spalling due to Fire Exposure, Proceedings, F. Dehn, E.A.B. Koenders, 2009, pp. 120-129.
- [Jona, 2005] Jonatka, I., Nürnbergerova, T., Effect of temperature on structure quality of cement paste and high-strength concrete with silica fume, *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 235, 2005, pp. 2019-2032.
- [Jump, 1986] Jumppanen, U.M., Diederichs, U., Hinrichsmeyer, K., Material properties of F-concrete at high temperatures, Espoo 1986, Vation teknillinen tutkimuskeskus, Tutkimuksia-statens tekniska forskningscentral, forskningsrapporte. Technical Research Centre of Finland, Research Reports 452, pp. 60.
- [Jump, 1989] Jumppanen, U.M., Effect of strength on fire behavior of concrete, *Nordic Concrete Research*, N° 8, 1989, pp. 116-127.
- [Kali, 2000] Kalifa, P., Menneteau, F.D., Quenard, D., Spalling and pore pressure in HPC at high temperatures, *Cement and Concrete Research*, Vol. 30, 2000, pp. 1-13.
- [Kali, 2001] Kalifa, P., Chéné, G., Gallé, C., High-temperature behaviour of HPC with polypropylene fibres from spalling, *Cement and Concrete Research*, Vol. 31, 2001, pp. 1487-1499.
- [Kali, 2002] Kalifa, P., Pardon, D., Menneteau, F-D., Gallé, C., Chéné, G., Pimienta P., Comportement à haute température des bétons à haute performances : de l'éclatement à la microstructure, *Cahier du CSTB*, n°3435, Décembre 2002.
- [Kane, 2007(a)] Kanéma, M., Influence des paramètres de formulation sur le comportement à haute température des bétons, Thèse de doctorat, Université de Cergy Pontoise, 2007.

- [Kane, 2007(b)] Kanéma, M., de Morais, M.V.G., Noumowé, A., Gallias, J.L, Cabrillac, R., Thermo-hydrous transfers in a concrete element exposed to high temperature: experimental and numerical approaches, *Heat and Mass Transfers*, 44(2), 2007, pp. 149-164.
- [Kear, 2002] Kearsley, E.P., Wainwright, P.J, The effect of porosity on the strength of foamed concrete, *Cement and Concrete Research*, Vol. 32, 2002, pp. 233-239.
- [Khan, 2006] Khandaker, M., Hossain, A., High strength blended cement concrete incorporating volcanic ash: performance at high temperatures, *Cement and Concrete Composites*, Vol. 28, 2006, pp. 535-545.
- [Khou, 1986] Khoury, G.A., Grainger, B.N., Sullivan P.J.E., Strain of concrete during first cooling from 600°C under load, *Magazine of Concrete Research*, Vol. 38, 1986, pp. 3-12.
- [Khou, 1988] Khoury, G.A., Sullivan, P.J.E., Research at imperial college on the effect of elevated temperatures on concrete, *Fire safety journal*, Vol. 13, 1988, pp. 69-72.
- [Khou, 1992] Khoury, G. A., Compressive strength of concrete at high temperatures: a reassessment, *Magazine of Concrete Research* 44, n°161, 1992, pp. 291-309.
- [Kodu, 2004] Kodur, V.K.R, Wang, T.C., Cheng, F.P., Predicting the fire resistance behaviour of high strength concrete columns, *Cement and Concrete Composites*, Vol. 26, 2004, pp. 141-143.
- [Komo, 2003] Komonen, J., Penttala, V., Effect of high temperature on the pore structure and strength of plain and polypropylene fiber reinforced cement pastes, *Fire Technol* 2003, 39(1), pp. 23-34.
- [Lau, 2006] Lau, A., Anson, M., Effect of high temperatures on high performance steel fiber reinforced concrete, *Cement and Concrete Research*, Vol. 36, 2006, pp. 1698-1707.
- [LCPP] http://www.prefecturedepolice.interieur.gouv.fr/content/download/.../DP_lcphp.pdf.
- [Lejd, 2008] www.lejdd.fr/Societe/Images/Galerie-du-8-Decembre-au-14-Decembre-2008/tunnel-manche-travaux-incendie-35953/.
- [Lie, 1996] Lie, T.T., Kodur, V.K.R., Thermal and mechanical properties of steel – fibre - reinforced concrete at elevated temperatures, *Canadian Journal of Civil Engineering*, Vol. 23, 1996, pp. 511-517.

- [Lion, 2004] Lion, M., Influence de la température sur le comportement poromécanique ou hydraulique d'une roche carbonate et d'un mortier. Etudes expérimentales, Thèse de doctorat, Université des sciences et technologies de Lille, 2004.
- [Liu, 2006] Liu, X., Ye, G., de Schutter, G., Yuan, Y., Taerwe, L., Physicochemical change of cement pastes at elevated temperatures, 2nd International Symposium on Advances in Concrete through science and Engineering, Quebec, Canada, 11-13 September 2006.
- [Lu, 2006] Lu, X., Hsu, C-T., Behavior of high strength concrete with and without steel fiber reinforcement in triaxial compression, Cement and Concrete Research, 36, 2006, pp. 1679-1685.
- [Meno, 2004] Menou, A., Etude du comportement thermomécanique des bétons à haute température: approche multi échelles de l'endommagement thermique, Thèse de doctorat, Université de Pau et des Pays de l'Adour, 2004.
- [Meth, 1986] Metha, P. K., concrete structure, properties, and materials. Englewood cliff, New Jersey: Prentice-Hall, 1986.
- [Min, 2004] Min, Li, Chun xiang, Q., Sun, W., Mechanical properties of high-strength concrete after fire, Cement and Concrete Research, Vol. 34, 2004, pp. 1001-1005.
- [Mind, 2009] 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.
- [Mora, 2009] de Morais, M.V.G., Pliya, P., Noumowé, A., Beaucour, A-L., Ortola, S., Contribution à l'explication de l'éclatement de certains éléments en béton soumis à une température élevée, European Journal of Environmental and Civil Engineering, Vol. 13, N° 1, 2009, pp. 71-90.
- [Mora, 2010] de Morais, M.V.G., Pliya, P., Noumowé, A., Beaucour, A-L., Ortola, S., Contribution to the explanation of the spalling of small specimen without any mechanical restraint exposed to high temperature. Nuclear Engineering and Design, 240, 2010, pp. 2655–2663.
- [Mour, 1999] 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, 1999, pp. 369-375.

- [Msaa, 2005] Msaad, Y., Analyse des mécanismes d'écaillage du béton soumis à des températures élevées, Thèse de doctorat, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées/Institut Navier, 2005.
- [Nech, 2000] Nechnech, W., Contribution à l'étude numérique du comportement du béton et des structures en béton armé soumises à des sollicitations thermiques et mécaniques couplées : une approche thermo-elasto-plastiques endommageable, Thèse de doctorat, Institut National des Sciences Appliquées, Lyon, 2000.
- [Nish, 1995] Nishida, A., Yamazaki, N., Inoue, H., Schneider, U., Diederichs, U., Study on the properties of high-strength concrete with short polypropylene fibre for spalling resistance, Proceedings of international conference on concrete under severe conditions, Consec'95, V.2, August 1995, Sapporo, Japan, pp.1141-1150.
- [Nona, 2008] Nonat, A., L'hydratation des ciments, La durabilité des bétons, Presse de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 2008, pp. 25-50.
- [Noum, 1995] 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.
- [Noum, 1996] Noumowé, N.A., Clastres, P., Debicki, G., Costaz, J.L., Transit heating effect on high strength concrete, Nuclear Engineering and Design, Vol. 166. 1996, pp. 99-108.
- [Noum, 2002] 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°2/2002, pp. 301-313.
- [Noum, 2003] Noumowé, N., Temperature Distribution and Mechanical Properties of High-Strength Silica Fume Concrete at Temperatures up to 200°C, ACI Materials Journal, Title n° 100-M39, pp. 326-330.
- [Noum, 2005] Noumowé, N.A., Mechanical properties and microstructure of high strength concrete containing polypropylene fibres exposed to temperatures up to 200°C, Cement and Concrete Research, Vol. 35, 2005, pp. 2192-2198.
- [Noum, 2009] Noumowé, N.A., Siddique, R., Debicki, G., Permeability of high-performance concrete subjected to elevated temperature (600°C), Construction and Building Materials, Vol. 23, 2009, pp. 1855-1861.

- [Peng, 2006] Peng, G-F., Yang, W-W., Zhao, J., Liu Y-F., Bian, S-H., Zhao, L-H., Explosive spalling and residual mechanical properties of fiber-toughened high-performance concrete subjected to high temperatures, *Cement and Concrete Research*, Vol. 36, 2006, pp. 723-727.
- [Peng, 2007] Peng, G-F., Bian, S-H., Guo, Z-Q., Zhao, J., Peng, X-L., Jing, Y-C., Effect of thermal shock due to rapid cooling on residual mechanical properties of fiber concrete exposed to high temperatures, *Construction and Building Materials* (2007), doi:10.1016/j.conbuildmat.2006.12.002.
- [Perr, 1999] Perraton, D., Aïtcin, P. C., Carles-Gilbergues, A., Mesure de la perméabilité aux gaz des bétons : perméabilité apparente et perméabilité intrinsèque. Partie II – étude de l'influence de la taille des éprouvettes et de la variabilité des résultats dans le cas d'un BHP, *Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, Vol. 221, 1999, pp. 79-87.
- [Phan, 2001] Phan, L.T., Lawson, J.R., Davis, F.L., Effects of elevated temperature exposure on heating characteristics, spalling, and residual properties of high performance concrete, *Materials and Structures*, Vol. 34, 2001, pp. 83-91.
- [Phan, 2002] Phan, L.T., High-strength concrete at high temperature- an overview, National institute of standards and technology, High performance concrete 6th International symposium proceeding, Vol. 1, 2002.
- [Phan, 2003] 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, 2003, pp. 91-98.
- [Pias, 1989] Piasta, J., Heat deformation of cement phases and microstructure of cement paste, *Materials and Structures: research and testing. RILEM. Paris*. Vol. 17, n° 102, pp. 415-420.
- [Pige, 1998] Pigeon, M., Cantin, R., Flexural properties of steel fiber-reinforced concretes at low temperature, *Cement and Concrete Composites*, 20, 1998, pp. 365-375.
- [Pimi, 2000] Pimienta, P., Le comportement au feu des BHP, Synthèse des travaux du projet national BHP 2000 sur les bétons à hautes performances, Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, pp. 77-124.

- [Pliy, 2008] Pliya, P., Beaucour, A-L., Noumowé, A., Influence des fibres de polypropylène sur le comportement de bétons soumis à une température élevée, Colloque international sur la caractérisation et la modélisation des matériaux et structures, Tizi-Ouzou, Algérie 2008.
- [Pliy, 2009] Pliya, P., Beaucour, A-L., Noumowé, A., Strength and porosity of concrete incorporating polypropylene and steel fibres subjected to high temperature, 20th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology, Espoo, Finland 2009.
- [Pliy, 2010(a)] Pliya, P., Beaucour, A-L., Noumowé, A., A way to improve the behaviour of concrete at high temperature: addition of a cocktail of polypropylene and steel fibres, International fib Congress and PCI Annual Convention/Exhibition, Washington, 2010.
- [Pliy, 2010(b)] Pliya, P., Beaucour, A-L., Noumowé, A., How the steel fibres improve the residual properties of concrete subjected to high temperature, Sixth International Conference Structures in Fire (SiF 10), Michigan, 2010.
- [Pliy, 2010(c)] 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, doi:10.1016/j.conbuildmat.2010.11.064, 2010.
- [PN ISI] <http://pnisi.cstb.fr/default.aspx>.
- [Pont, 2004] Pont, S.D., Lien entre la perméabilité et l'endommagement dans les bétons à haute température, Thèse de doctorat, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 2004.
- [Poon, 2004] Poon, C.S., Shui, Z.H., Lam, L., Compressive behavior of fiber reinforced high-performance concrete subjected to elevated temperatures, Cement and Concrete Research, Vol. 34, 2004, pp. 2215-2222.
- [Prom, 2009] Promat, CSTB, Séminaire protection des bétons contre les feux violents, Fédération Française du Bâtiment, Paris 2009.
- [Qian, 2000] Qian, C., Stroeven, P., Fracture properties of concrete reinforced with steel-polypropylene hybrid fibres, Cement Concrete Composites, Vol. 22, 2000, pp. 343-351.
- [Quan, 2005] Quanbing, Y., Beirong, Z., Effect of steel fiber on the deicer-scaling resistance of concrete, Cement and Concrete Research, 35, 2005, pp. 2360-2363.

- [Rego, 1975] Regourd, M., Hornain, H., Applications de la microscopie électronique à balayage, *Revue des Matériaux de Construction*, n° 693, 1975, pp.73-87.
- [Rego, 1982] Regourd, M., Le béton hydraulique, chapitre l'eau, *Presse de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées*, 1982, pp. 59-68.
- [Rile, 1995] Rilem Technical Committee 129-MHT, Test methods for mechanical properties of concrete at high temperatures, Part 1: Introduction, Part 2: Stress-strain relation, Part 3: Compressive strength for service and accident conditions, *Materials and Structures*, Vol. 28-181, 1995, pp. 410-414.
- [Rile, 2007] Recommendation of RILEM TC 200-HTC: Mechanical concrete properties at high temperatures - modelling and application, *Materials and Structures*, Vol. 40, 2007, pp. 449-458
- [Riva, 2006] de Rivaz, B., Les performances techniques des bétons renforcés de fibres métalliques et polymères, *Tunnels et ouvrages souterrains*, n° 198, Novembre/Décembre 2006, pp. 367-371.
- [Riva, 2008] de Rivaz, B., Utilisation des bétons de fibres métalliques dans les voussoirs préfabriqués de tunnel, *Journée technique sur l'utilisation des bétons de fibres métalliques dans le domaine des structures, éléments structuraux et produits, initialement armés ou précontraints*, Paris, France, 25 Juin 2008, pp. 39-55.
- [Robe, 2008] Robert, F., Colina, H., Debicki, G., La durabilité des bétons face aux incendies. La durabilité des bétons, *Presse de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées*, 2008, pp. 707-765.
- [Robe, 2009] Robert, F., Colina, H., The influence of aggregates on the mechanical characteristics of concrete exposed to fire, *Magazine of Concrete Research*, 2009, 61, n°5, June, 311-321, doi: 10.1680/macr.2007.00121.
- [Robl, 1985] Roßler, M., Odler, I., Investigations on the relationship between porosity, structure and strength of hydrated Portland cement pastes: I. Effect of porosity, *Cement and Concrete Research*, Vol. 15, 1985, pp. 320-300.
- [Romu, 1963] Romualdi, JP., Batson, GB., Mechanics of crack arrest in concrete, *Journal of Engineering Mechanics Division*, Vol. 89, 1963, pp. 147-168.
- [Ross, 1998] Rossi, P., Les bétons de fibres métalliques, *Presse de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées*, 1998.

- [Ross, 2002] Rossi, P., Le développement industriel des bétons de fibres métalliques, Projet national BEFIM, Presse de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 2002.
- [Ross, 2007] Rossi, P., L'atout « développement durable des fibres », Bétons-le magazine, n°13 Novembre/Décembre 2007.
- [Ross, 2008] Rossi, P., Etat de l'art sur les bétons de fibres métalliques fortement dosés en fibres, Journée technique sur l'utilisation des bétons de fibres métalliques dans le domaine des structures, éléments structuraux et produits, initialement armés ou précontraints, Paris, France, 25 Juin 2008, pp. 5-15.
- [Sabe, 2006] Sabeur, H., Etude du comportement du béton à hautes températures, une nouvelle approche thermo-hydro-mécanique couplée pour une modélisation du fluage thermique transitoire, Thèse de doctorat, Université de Marne La Vallée, 2006.
- [Sabe, 2007] 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, 2007, pp. 559-566.
- [Sarv, 1992] Sarvaranta, L., Jarvela, E., Mikkola, E., Fibre mortar composites under thermal exposure, in pluiralis (Ed), Proceedings of second international symposium on textiles composites in building construction, Lyon, France, 23 – 25 June 1992, pp. 47- 56.
- [Sarv, 1994] Sarvaranta L., Mikkola E, Fibre mortar composites in fire conditions, Fire Materials, Vol. 18, 1994, pp. 45 – 50.
- [Savv, 2005] Savva, A., Manita, P., Sideris, K., Influence of elevated temperatures on the mechanical properties of blended cement concretes prepared with limestone and siliceous aggregates. Cement & Concrete Composites, Vol. 27, 2005, pp. 239-248.
- [Schn, 1981] Schneider, U., Diederich, U., EHM, C., Effect of temperature on steel and concrete for PCRVS, Nuclear engineering and design, Vol. 67, 1981, pp. 245-258.
- [Schn, 2002] Schneider, U., Horvath, J., Behaviour of ordinary concrete at high temperature, distributed by Vienna University of Technology, Institute of Building Materials Building Physics and fire Protection, Vienna, Australia, December 2002.
- [Shut, 1997] Shuttleworth, P., Fire performance of concrete for tunnel linings, Channel Tunnel Rail Link Technical Report, Arup, 1997.

- [Sint, 1992] SINTEF, Fire testing of concrete element, 1992.
- [Skro, 1980] Skrovaneck, S.D., Herron, R.H., High temperature mechanical properties of stainless-steel fiber-reinforced castables, *Ceramic Bulletin*, Vol. 59, N° 7, 1980, pp. 742-745.
- [Suha, 2004] Suhaendi, S.L., Horiguchi, T., Saeki, N., Permeability of heated fibre reinforced high strength concrete after heat exposition, *Pro. JCI* 26. 2004, pp. 315-320.
- [Suha, 2006] 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, 2006, pp. 1672-1678.
- [Tole, 2002] Tolentino, E., Lameiras, 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, 2002, pp. 301-307.
- [Torr, 1999] Torrenti, J.M., Dantec, P., Boulay, C., Semblat, J.F., Projet de processus d'essai pour la détermination du module de déformation longitudinale du béton, notes techniques, *Bulletin Des Laboratoires Des Ponts et Chaussées*, 220 NT 4263, 1999, pp.79-81.
- [Tsim, 1998] Tsimbrovska, M., Dégradation des bétons à hautes performances soumis à des températures élevées, évolution de la perméabilité en liaison avec la microstructure, Thèse de doctorat, Université Joseph Fourier, Grenoble, 1998.
- [Ulm, 1999] Ulm, F.-J., Coussy, O., Bazant, Z.P., The "Chunnel" fire. I: chemoplastic softening in rapidly heated concrete, *Journal of Engineering Mechanics*, March 1999, pp. 272-282.
- [Vive, 1997] Vivekanandam, K., Patnaikuni, I., Transition zone in high performance concrete during hydration, *Cement and Concrete Research*, Vol. 27, 1997, pp. 817-823.
- [Wang, 2006] Wang, Y.C., Wong, P.M.H., Kodur, V., An experimental study of the mechanical properties of fibre reinforced polymer (FRP) and steel reinforcing bars at elevated temperatures, *Composite Structures*, doi:10.1016/j.compstruct.2006.04.069, 2006.
- [Xiao, 2006] Xiao, J., Falkner, H., On residual strength of high-performance concrete with and without polypropylene fibres at elevated temperatures, *Fire Safety Journal*, Vol. 41, 2006, pp. 115-121.

- [Xing, 2009] Xing, Z., Beaucour, A-L., Ronan, H., Noumowé, A., Ledesert, B., Influence de la nature minéralogique des granulats sur le comportement à haute température des bétons, AUGC, 02/42, 2009, pp. 1-15.
- [Xu, 2003] Xu, Y, Wong, Y.L, Poon, C.S, Anson, M., Influence of PFA on cracking of concrete and cement paste after exposure to high temperature, Cement and Concrete Research, Vol. 33, 2003, pp. 2009-2016.
- [Yao, 2003] Yao, W., Li, J., Wu, K., Mechanical properties of hybrid fiber-reinforced concrete at low fiber volume fraction, Cement and Concrete Research, 33, 2003, pp. 27-30.
- [Yazi, 2006] Yazici S., Inan G., Tabak V. Effect of aspect ratio and volume fraction of steel fiber on the mechanical properties of SFRC. Construction and Building Materials, doi:10.1016/j.conbuildmat.2006.05.025, 2006.
- [Ye, 2007] Ye, G., Liu, X., de Schutter, G., Taerwe, L., Vandeveldel, P., Phase distribution and microstructural changes of self-compacting cement paste at elevated temperature, Cement and Concrete Research, Vol. 37, 2007, pp. 978-987.
- [Zeim, 2006] Zeiml, M., Leithner, D., Lackner, R., Mang, H., How do polypropylene fibers improve the spalling behavior of in-situ concrete?, Cement and Concrete Research, Vol. 36, 2006, pp. 929-942.