REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE DES FRERES MENTOURI CONSTANTINE
Faculté des sciences de la technologie
Département de Génie Civil

N° d'ordre : ……
Série : …….....

Thèse

Présentée pour l'Obtention du Diplôme de Magister
en Génie Civil
Option : Matériaux

Thème

Tenue et comportement au feu des bétons

Présenté Par :
ALLAL Ishaq

Devant le jury composé de:

Président: M.N. GUETTECHE	Professeur	Université des frères Mentouri Constantine
Rapporteur : H. CHABIL	Professeur	Université des frères Mentouri Constantine
Co-encadreur: B. TOUMI	M.C. (B)	Université des frères Mentouri Constantine
Examinateur: A. BEROUAL	M.C. (A)	Université des frères Mentouri Constantine
Examinateur: A. TEKKOUK	M.C. (A)	Université des frères Mentouri Constantine

Septembre 2015

REMERCIMENTS

En premier lieu, je voudrais exprimer mes remerciements les plus sincères à mon encadreur le professeur CHABIL Hocine pour m'avoir guider dans la réalisation de cette étude et le soutien scientifique et moral qu'il m'a apporté.

Je tiens aussi à adresser toute ma gratitude à TOUMI Belkacem, mon co-encadreur, pour ses conseils prodigieux, son intérêt et sa vaste culture.

Je voudrais également adresser mes vifs remerciements à:

Monsieur GUETTECHE. M.N, Professeur à l'Université Mentouri de Constantine, en me faisant l'honneur de présider ce jury.

Monsieur BEROUAL. A, Maître de conférence classe A à l'Université Mentouri de Constantine, en me faisant l'honneur d'examiner mon travail.

Monsieur TEKKOUK. A, Maître de conférence classe A à l'Université Mentouri de Constantine, en me faisant l'honneur d'examiner mon travail.

J'exprime ensuite toute ma sympathie à tous les doctorants et à tout le personnel du laboratoire qui a pu m'assister durant ce travail de recherche. Merci aussi à tous mes amis sur qui je pourrai toujours compter.

Enfin, un remerciement du fond du cœur à mes parents, mes frères et mes sœurs pour le soutien et les encouragements tout au long de ce mémoire.

Table des matières

Table des matières.....3
Liste des figures 8
Liste des tableaux.....11
Résumé en Français.....12
Abstract.....13
Résumé en Arabe.....14
INTRODUCTION GENERALE.....15
CHAPITRE 1: ETAT DE L'ART 18
PARTIE A : LE MATERIAU BETON 19
1. Introduction.....19
2. Chimie de la pâte de ciment.....19
3. Eau contenue dans le béton durci 20
3.1. L'eau libre (ou capillaire).....20
3.2. L'eau adsorbée et chimiquement liée.....21
3.2.1. L'eau interlamellaire 21
3.2.2. L'eau interfeuillet 21
3.2.3 L'eau hydroxylique 21
4. Interface pâte/granulat.....21
5. Les granulats 21
6. Les additions minérales 22
7. Les adjuvants 22
8. Les fibres.....22
8.1. Rôle des fibres.....23
PARTIE B : LES BETONS AUTOPLAÇANTS (BAP).....25
1. Introduction.....25
2. Définition et concept des bétons autoplaçants 25
3. Spécification de la composition et méthodes de formulation des BAP.....26
3.1. Spécification de la composition 26
3.1.1. Un volume de pâte élevé 26
3.1.2. Une quantité de fines importantes 26
3.1.3. L'utilisation du superplastifiant 27
3.1.3.1. La compatibilité ciment-superplastifiant.....27
3.1.4. L'utilisation d'un agent de viscosité 28
3.1.5. Un faible volume de gravillons 28
3.2. Méthodes de formulation.....29
3.2.1. La méthode Japonaise.....29
3.2.2. La méthode Chinoise 30
3.2.3. La méthode Française 32
4. Essais de caractérisations des BAP à l'état frais 32
4.1. Essai d'étalement 33
4.2. Essai du V-funnel 34

4.3. Essai de la boîte en L (L box) 34
4.4. Essai à de l'anneau (J-ring).....35
4.5. Essai de stabilité au tamis 35
5. Propriétés mécaniques du béton autoplaçant 36
5.1. Résistance en compression.....36
5.2. Résistance en traction.....37
5.3. Module d'élasticité.....37
PARTIE C : LE BETON DE CHANVRE.....39
1. Introduction.....39
2. L'impact du bâtiment sur l'environnement et l'utilisation des éco-matériaux 39
3. Historique sur le chanvre 40
4. Présentation du chanvre industriel.....41
5. La récolte et la production du chanvre industriel.....42
6. L'utilisation du chanvre 43
7. La composition du béton de chanvre.....44
7.1. Introduction.....44
7.2. Les liants 44
7.2.1. La chaux aérienne.....45
7.2.2. La chaux hydraulique 46
7.3. Le granulat de chanvre 47
7.4. Formulations de bétons de chanvre.....48
8. Conservation et séchage 50
9. Les différents types de produits existants.....50
9.1. Béton de chanvre coulé sur place.....50
9.2. Béton de chanvre projeté.....51
9.3. Béton de chanvre préfabriqué.....51
10. Caractéristiques du béton de chanvre.....52
11. Propriétés mécaniques du béton de chanvre.....53
CHAPITRE 2 COMPORTEMENT DES BETONS AUX HAUTES TEMPERATURES.....56
1. Introduction.....57
2. Terminologie feu et incendie 57
3. Le développement d'un incendie 58
4. Courbes températures-temps normalisées 59
4.1. La courbe normalisé ISO 834 59
4.2. La courbe hydrocarbure (HC).....59
5. Evolution des propriétés physiques.....60
5.1. Variation de la porosité.....60
5.2. Perte de masse 61
6. Évolution des propriétés thermiques.....63
6.1. Conductivité thermique 63
6.2. Déformation thermique du béton 64
7. Évolution des propriétés mécaniques.....65
7.1. Résistance à la compression.....65

7.2. Résistance à la traction....72
7.3. Module d'élasticité 75
8. Instabilité thermique des bétons....76
8.1. Les différents types d'instabilités thermiques....76
8.2. Mécanisme du phénomène de l'éclatement des bétons chauffés....77
8.3. Paramètres favorisant l'instabilité thermique....78
8.4. Méthodes préventives....79
8.4.1. Utilisation des fibres polypropylènes et métalliques 79
8.4.2. Utilisation des plaques de protection passive....79
9. Etat de l'art des BAP aux hautes températures....79
9.1. Introduction....79
9.2. Propriétés mécaniques des BAP aux hautes températures 80
9.2.1. Les travaux Hanaa Fares et al 80
9.2.2. Les travaux de M. A. Helal et al 80
9.2.3. Les travaux de Wasim Khaliq et al 81
9.2.4. Les travaux de S. Bakhtiyaria et al 82
9.2.5. Les travaux de K.K. Sideris et al....82
10. Conclusion de la partie bibliographique 84
CHAPITRE 3 CARACTERISATION DES MATERIAUX DE BASE ET ESSAIS EFFCTUES 86
1. Introduction....87
2. Programme expérimental....87
3. Caractéristiques des matériaux de base 87
3.1. Le ciment 87
3.2. Les granulats 88
3.3. Le filler calcaire....90
3.4. L'adjuvant....91
3.5. Chaux éteinte 92
3.6. Fibres de chanvre 92
3.7. Les fibres métalliques et polypropylènes....94
4. Formulation des mélanges....95
4.1. Formulation des bétons ordinaires....96
4.1.1. Fabrication des bétons ordinaires 99
4.2. Formulation des bétons autoplaçants 99
4.2.1. Fabrication des bétons autoplaçants....102
4.3. Formulation des bétons de fibres de chanvre 103
4.3.1. Calcul des quantités des composants pour 1 mètre cube....103
4.3.2. Fabrication et mise en place des bétons de chanvre 104
5. Essais de caractérisation des mélanges à l'état frais 105
5.1. Essai d'affaissement au cône d'Abrams (pour les BO)....105
5.2. Essai d'étalement (pour les BAP)....105
5.3. Essai des anneaux Japonais (pour les BAP)....106
5.4. Essai de la boite en L (pour les BAP)....106
5.5. Essai V-funnel (pour les BAP)....107

5.6. Essai de stabilité au tamis (pour le BAP).....107
5.7. Mesure de l'air occlus 108
5.8. Mesure de la masse volumique réelle du béton frais 108
6. Résultats des essais de caractérisation à l'état frais.....108
7. Mise en place et conservation des bétons ordinaires et autoplaçants 110
7.1. Mise en place.....110
7.2. Conservation 110
8. Mise en place et conservation des bétons de fibres de chanvre 110
8.1. Mise en place.....110
8.2. Conservation et séchage des éprouvettes.....111
9. Essais sur différents types de bétons durcis avant et après exposition au feu 111
9.1. Essai au feu 111
9.2. Essais mécaniques 112
9.2.1. Essai de résistance en traction par flexion.....112
9.2.2. Essai de résistance en compression 113
9.3. Essais physiques 114
9.3.1. Mesure de la porosité accessible à l'eau.....114
9.3.2. Absorption capillaire.....114
9.3.3. Mesure de la perte de masse.....115
9.3.4. Mesure du retrait total 115
10. Conclusion 116
CHAPITRE 4 : RESULTATS ET DISCUSSIONS SUR LES ESSAIS REALISES A TEMPERATURE AMBIANTE 117
1. Introduction 118
2. Essais mécaniques 118
2.1. Résistance en compression.....118
2.1.1. Cas des bétons ordinaires et autoplaçants.....118
2.1.2. Cas des bétons de fibres de chanvre.....119
2.2. Résistance en traction.....121
2.2.1. Cas des bétons ordinaires et autoplaçants.....121
2.2.2. Cas des bétons de chanvre.....122
3. Résultats des essais physiques.....123
3.1. Mesure de l'évolution de la perte en masse.....123
3.1.1. Cas des bétons ordinaires et autoplaçants.....123
3.1.2. Cas des bétons de chanvre 124
3.2. Mesure de l'évolution de retrait 126
3.2.1. Cas des bétons autoplaçants et ordinaires.....126
3.2.2. Cas des bétons de fibres de chanvre.....127
3.3. Mesure de la porosité 128
3.3.1. Cas des bétons ordinaires et autoplaçants.....128
3.3.2. Cas des bétons de chanvre.....129
3.4. Absorption par capillarité.....130
3.4.1. Cas des bétons ordinaires et autoplaçants.....131
3.4.2. Cas des bétons de fibres de chanvre 132

4. Conclusion 133
CHAPITRE 5 : RESULTATS ET DISCUSSIONS SUR L'INFLUENCE DU FEU SUR LE COMPORTEMENT DES DIFFERENTS BETONS 134
1. Introduction 135
2. Courbes température-temps du foyer de feu 135
3. Influence du feu sur le comportement des bétons de fibres de chanvre 136
3.1. Influence du feu sur le comportement mécanique des différents bétons 137
3.1.1. Influence du feu sur la résistance en compression des différents bétons 137
3.1.2. Influence du feu sur la résistance en traction des différents bétons 139
4. Essais physiques.....140
4.1. Mesure de la porosité.....140
4.2. Absorption par capillarité 142
4.3. Mesure de la perte de masse 143
4.4. Mesure de la dilatation thermique 144
5. Influence du mode de conservation après exposition au feu sur le comportement mécanique des différents bétons.....146
5.1. Influence du mode de conservation sur la résistance en compression 146
5.2. Influence du mode de conservation sur la résistance en traction des différents bétons.....147
6. Conclusion 148
CONCLUSION GENERALE 150
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....153

Liste des figures

Figure 1.1. Modèle de C-S-H de Feldman et Sereda 20
Figure 1.2. Evolution de slump flow en fonction du temps 27
Figure 1.3. Action du superplastifiant.....28
Figure 1.4. Cônes pour mesurer l'étalement des mortiers et entonnoir pour mesurer le temps d'écoulement des mortiers 30
Figure 1.5. Essai d'étalement.....33
Figure 1.6. Essai de V-funnel pour mesurer le temps d'écoulement du béton.....34
Figure 1.7. Dimensions de la boite en L (L-box).....35
Figure 1.8. Essai de stabilité au tamis.....36
Figure 1.9. Evolution de la résistance à la compression d'un BAP (SCC) et d'un BV (REF) correspondant 36
Figure 1.10. Evolutions de la résistance à la compression en fonction de finesse du filler 37
Figure 1.11. Module d'élasticité à 28j et 90 jours 38
Figure 1.12. Plante de Chanvre (A), et composition d'une tige de chanvre (B) 41
Figure 1.13. Micrographie d'une coupe transversale de tige de chanvre colorée au cramino-vert de Mriande 42
Figure 1.14. Grossissement au MEB d'une particule de chanvre 47
Figure 1.15. Gain massique et taux de saturation pour des particules de chanvre sec 48
Figure 1.16. Pourcentage volumique de chaque constituant et vue schématique de la structure pour obtenir 1 m^3 de béton de chanvre pour une utilisation en toiture (a), en mur (b) et en mortier (c) 49
Figure 1.17. Béton de chanvre coulé sur place 50
Figure 1.18. Béton de chanvre projeté 51
Figure 1.19. Béton de chanvre préfabriqué 52
Figure 1.20. La courbe contrainte déformation 54
Figure 1.21. Évolution σ_{max} de en fonction du temps pour les différentes formulations 55
Figure 2.1. Triangle du feu 57
Figure 2.2. Phases de développement d'un incendie.....59
Figure 2.3. Courbes température-temps ISO 834 et HC.....60
Figure 2.4. Évolution de la porosité des BAP et BO en fonction de la température 61
Figure 2.5. Évolution comparée de la porosité des bétons de fibres de polypropylène (a) et de fibres métalliques (b) 61
Figure 2.6. Perte de masse des éprouvettes de béton étuvées à 105°C 62
Figure 2.7. Perte de masse des éprouvettes Ø104x30 mm et Ø104x60 mm étuvées à 105°C 62
Figure 2.8. Perte de masse des bétons testés en fonction de la température de chauffage. une plus faible perte de masse pour les BHP que les BO 63
Figure 2.9. Evolution de la conductivité thermique des différents bétons en fonction de la température (les valeurs à 600 °C pour le B40 et le B40F2 ont été obtenues après refroidissement).....64
Figure 2.10. Déformation thermique des bétons de granulats silico-calcaires et calcaires 65
Figure 2.11. Évolution de la résistance résiduelle relative à la compression des BO et BHP et BAP 66

Figure 2.12. Evolution des résistances en compression et résistances en compression relatives à chaud et résiduelles obtenues sur un BHP fibré (f = 0,9 kg/m^3) 67
Figure 2.13. Évolution de la résistance résiduelle à la compression (en MPa) des BO (a) et BHP (b) avec différents granulats.....68
Figure 2.14. Évolution de la résistance résiduelle à la compression des BO (a) et BHP (b) avec ou sans les fibres de polypropylène, métalliques, et cocktail de fibres (S-P) 69
Figure 2.15. Résistance résiduelle en compression relative des bétons B325(a) et B500 (b) chauffés suivant des cycles dont les vitesses de montée sont de 0.1 et 1°C/min et le palier dure 1 heure à différentes températures 70
Figure 2.16. Evolution de la résistance relative du béton refroidi par l'air (a) et par pulvérisation d'eau (b) après 28 jours de conservation 71
Figure 2.17. Evolution de la résistance relative résiduelle en traction de différents bétons mesurée par essai de fendage.....72
Figure 2.18. Evolution de la résistance en traction testée "à chaud". Traction directe, technique par serrage, béton M100C/0.3.....73
Figure 2.19. Modules élastiques résiduels relatifs d'après 75
Figure 2.20. Modules d'élasticités résiduels relatifs des cinq bétons chauffés suivant des cycles dont la vitesse de montée est 1°C/min et le palier dure 1 heure pour différentes températures d'après 76
Figure 2.21. Illustration du mécanisme d'éclatement 78
Figure 3.1. Courbes granulométriques des granulats.....89
Figure 3.2. Répartition granulométrique du filler ALCAL UF20.....90
Figure 3.3. Filasse de chanvre coupée entre 1 et 4 cm.....93
Figure 3.4. Cinétique d'absorption des fibres de chanvre.....94
Figure 3.5. Détermination de la composition granulaire du béton ordinaire.....97
Figure 3.6. Essais d'affaissement au cône d'Abrams.....105
Figure 3.7. Essai d'étalement.....106
Figure 3.8. Essai des anneaux Japonais.....106
Figure 3.9. Essai de la boîte en L.....107
Figure 3.10. Essai V-funnel.....107
Figure 3.11. Essai de stabilité au tamis.....107
Figure 3.12. Moules utilisés pour bétons ordinaires (A) et bétons autoplçants (B).....110
Figure 3.13. Moules utilisés pour bétons de fibres de chanvre.....111
Figure 3.14. Disposition des éprouvettes dans le foyer de feu (A) et essai au feu (B).....112
Figure 3.15. Essai de traction par flexion 113
Figure 3.16. Essai de compression sur cube équivalent.....113
Figure 3.17. Essai de porosité accessible à l'eau.....114
Figure 3.18. Essai d'absorption capillaire.....115
Figure 3.19. Essai de retrait.....116
Figure 4.1. Résistance en compression sur cube équivalent et sur cylindre des différents bétons.....118
Figure 4.2. Résistance en compression de différentes compositions de bétons de fibres de chanvre.....119
Figure 4.3. Essai de résistance en compression des bétons de fibres de chanvre.....120
Figure 4.4. Résistance en traction des différents bétons.....121

Figure 4.5. Résistance en traction des différentes compositions de bétons de fibres de chanvre.....122
Figure 4.6. Essai de traction par flexion sur un béton de fibres de chanvre.....123
Figure 4.7. Evolution de la perte de masse.....124
Figure 4.8. Perte de masse totale après 61 jours pour différents types de bétons.....124
Figure 4.9. Evolution de la perte de masse durant 55 jours pour les trois bétons de fibres de chanvre.....125
Figure 4.10. Evolution du retrait total pour les différents types de bétons.....126
Figure 4.11. Retrait total après 61 jours pour les différents types de bétons.....126
Figure 4.12. Evolution du retrait total des bétons de fibres de chanvre.....128
Figure 4.13. Porosité des bétons ordinaires et autoplçants (%).....129
Figure 4.14. Porosité de différentes compositions de bétons de fibres de chanvre (%).....130
Figure 4.15. Absorption d'eau par capillarité des différents bétons.....131
Figure 4.16. Cinétique d'absorption des différents bétons.....131
Figure 4.17. Absorption d'eau par capillarité des bétons de fibres de chanvre.....132
Figure 5.1. Courbes température-temps des différents thermocouples et la courbe ISO 834....135
Figure 5.2. Endommagement des éprouvettes de fibres de chanvre.....136
Figure 5.3. Résistance en compression avant et après exposition au feu des différents bétons.....137
Figure 5.4. Baisse relative de la résistance en compression après exposition au feu 137
Figure 5.5. Fissurations dans les BOFM.....138
Figure 5.6. Résistance en traction avant exposition au feu et résiduelle des différents bétons..139
Figure 5.7. Baisse de la résistance relative en traction.....140
Figure 5.8. Porosité ouverte avant exposition au feu et résiduelle des différents bétons (%)....141
Figure 5.9. Porosité ouverte relative des différents bétons (%).....141
Figure 5.10. L'augmentation de la cinétique d'absorption des différents bétons après exposition au feu (%).....142
Figure 5.11. La diminution de l'absorption capillaire des différents bétons après exposition au feu (%).....142
Figure 5.12. Perte de masse des différents bétons avant et après exposition au feu (%).....143
Figure 5.13. Augmentation de la perte de masse des différents bétons (%).....144
Figure 5.14. Variations dimensionnelles des différents bétons avant et après exposition au feu.....145
Figure 5.15. Dilatation thermique des différents bétons juste après exposition au feu et résiduelle.....145
Figure 5.16. Résistance en compression des différents bétons conservés dans l'eau et dans l'air ambiant.....146
Figure 5.17. Augmentation de la résistance en compression des différents bétons conservés dans l'eau.....147
Figure 5.18. Résistance en traction des différents bétons conservés dans l'eau et dans l'air ambiant.....147
Figure 5.19. Diminution de la résistance en traction des différents bétons conservés dans l'eau.....148

Liste des tableaux

Tableau 1.1. Dosages des constituants donnés par les règles professionnelles d'exécution d'ouvrages en béton de chanvre 49
Tableau 1.2. Caractéristiques mécaniques du béton de chanvre pour différents dosages en liant 54
Tableau 2.1. Perte et gain de résistance en fonction de la température et du temps de chauffage (-perte de résistance et + gain de résistance) 70
Tableau 3.1. Composition chimique du ciment (%).....88
Tableau 3.2. Propriétés physiques du ciment 88
Tableau 3.3. Résistances mécaniques du ciment (MPa).....88
Tableau 3.4. Caractéristiques géométriques des granulats 88
Tableau 3.5. Caractéristiques physiques des granulats.....89
Tableau 3.6. Caractéristiques chimiques.....89
Tableau 3.7. Caractéristiques physiques 90
Tableau 3.8. Composition chimique du filler calcaire ALCAL UF20 91
Tableau 3.9 Caractéristiques physiques.....92
Tableau 3.10 Caractéristiques chimiques.....92
Tableau 3.11. Caractéristiques des fibres de chanvre 94
Tableau 3.12. Caractéristiques techniques de fibres métalliques.....95
Tableau 3.13. Caractéristiques techniques de fibres polypropylènes 95
Tableau 3.14. Dosage des différents constituants 99
Tableau 3.15. Compositions retenus des BAP.....102
Tableau 3.16. Rapports massiques de la formulation retenue 103
Tableau 3.17. Dosage des différents constituants des bétons de fibres de chanvre.....104
Tableau 3.18. Résultats des essais de caractérisation à l'état frais.....108

Résumé

Le béton est un matériau de construction, dont le développement et l'utilisation dans les bâtiments et les ouvrages de génie civil ne cessent de croitre à travers le monde en raison de sa facilité de mise en œuvre et son faible coût. Sous l'action des incendies et des hautes températures, les éléments en béton peuvent subir des chutes de performances mécaniques, thermiques et physiques, ils peuvent également subir des instabilités thermiques caractérisées par l'écaillage et l'éclatement, voire manifester un comportement explosif.

Le but de ce travail de recherche est de constituer une base de données expérimentales sur le comportement mécanique et physique au feu de trois types de béton; un béton ordinaire, un béton autoplaçant et un béton de fibres de chanvre, de comparer le comportement du béton autoplaçant avec celui du béton ordinaire ainsi que l'effet de l'ajout des fibres polypropylènes et métalliques sur le comportement de ces derniers. Pour cela, 9 formulations ont été définies et pour chaque type de béton nous avons défini trois compositions : une composition sans fibres, une composition contenant des fibres polypropylènes avec un dosage de 2 kg/m^3, une composition contenant des fibres métalliques avec un dosage de 40 kg/m^3.

Les différents bétons ont été soumis à un feu réel de vitesse de montée en température de 67.3°C/minute et d'une durée totale d'environ 85 minutes. L'étude démontre une chute des performances mécaniques et physiques des différents bétons.

Mots clés béton ordinaire, béton autoplaçant, bétons de fibres de chanvre, fibres polypropylènes, fibres métalliques, propriétés mécaniques, propriétés physiques, feu.

Abstract

Concrete is a material of construction, its development and use in buildings and civil engineering works do not cease to increase in worldwide due to its ease of implementation and low cost. Under the influence of fire and high temperatures, the concrete elements can suffer drop mechanical performance, thermal and physical, they can also undergo thermal instability characterized by spalling and it can also manifest explosive behavior.

The purpose of this research is to make an experimentally data base on the mechanical and physical fire behavior of three types of concrete, ordinary concrete, self-compacting concrete and hemp fiber concrete, to compare the behavior of self-compacting concrete with that ordinary concrete and the effect of the addition of polypropylene and steel fibers on the behavior of them. For this, 9 formulations were defined, for each type of concrete, three compositions are defined: a composition without fiber, a composition containing polypropylene fibers with a dosage of 2 kg/m^3, a composition containing steel fibers with a dosage of 40 kg/m^3.

The different concretes were subjected to a real fire, the speed to increase of temperature is 67.3 °C/min, the total duration of exposure to fire is about 85 minutes. The study shows a drop in physical and mechanical performance of different concretes.

Keywords: ordinary concrete, self-compacting concrete, hemp fibers concrete, polypropylene fibers, steel fibers, mechanical properties, physical properties, fire.

ملخص

الخرسانة هي مادة بناء ما فتئت تعرف تطورا واستخداما متزايدا في المباني وأعمال الهندسة المدنية في جميع أنحاء العالم نظرا لسهولة تنفيذها وتكلفتها المنخفضة ، تحت تأثير الحرائق و درجات الحرارة العالية يمكن لخصائصها الميكانيكية و الفيزيائية والحرارية أن تتأثر تأثرا شديدا، كما يمكن لها أيضا أن تخضع إلى عدم الاستقرار الحراري الذي يتميز بتساقط وحتى انفجار الخرسانة.

الغرض من هذا البحث هو إعطاء قاعدة معلومات تجريبية للسلوك الميكانيكي والفيزيائي لثلاثة أنواع من الخرسانة عند تعريضها للنار، أنواع الخرسانة التي سوف نقوم بدراستها في هذا البحث هي ، الخرسانة العادية والخرسانة ذاتية التموضع و خرسانة ألياف القنب، كما سوف نقوم بمقارنة سلوكي ، الخرسانة العادية و الخرسانة ذاتية التموضع وكذا تأثير إضافة ألياف البولي بروبلين والمعدن على سلوك الأنواع الثلاثة من الخرسانة. من اجل هذا قمنا بإنجاز 9 تركيبات من الخرسانة من اجل كل نوع من انواع الخرسانة الثلاثة السالفة الذكر قمنا بإنجاز ثلاث تركيبات، تركيبة لا تحتوي على الالياف تركيبة بإضافة الياف البولي بروبلان بكمية قدرها $2\ kg/m^3$ و تركيبة بإضافة الألياف المعدنية بكمية قدرها $40\ kg/m^3$

بعد ذلك قمنا بتعريض مختلف الخرسانات لنار سرعة ارتفاعها 67.3 درجة مئوية / دقيقة لمدة قدرها حوالي 85 دقيقة

نتائج الدراسة أظهرت انخفاض في مختلف الخصائص الفيزيائية والميكانيكية لمختلف الخرسانات.

كلمات مفتاحية : الخرسانة العادية، الخرسانة ، الخرسانة ذاتية التموضع، خرسانة ألياف القنب، ألياف البولي بروبلان ، الألياف المعدنية، خصائص ميكانيكية، خصائص فيزيائية، النار.

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

Le béton est un matériau composite dont le développement et l'utilisation dans la construction de bâtiments et d'ouvrages de génie civil ne cessent de croitre à travers le monde. Cet accroissement est lié à de meilleures connaissances acquises et aux nombreuses recherches menées sur ce matériau.

Dans le domaine de la résistance au feu, le béton ordinaire a été bien étudié. Néanmoins les recherches sur les nouveaux bétons en situation d'incendie n'ont pas été suffisamment explorées.

En effet, malgré le meilleur comportement des nouveaux bétons à température ambiante, aux températures élevées comme lors d'un incendie ou d'un accident nucléaire, ils peuvent présenter au-delà d'une certaine température, des chutes de performances mécaniques, thermiques et physiques. Ils peuvent également subir des instabilités thermiques caractérisées par l'écaillage et l'éclatement, voire manifester un comportement explosif causant ainsi des dommages considérables sur les constructions (tunnel sous la manche en 1996, tunnel du Mont blanc en 1999, immeubles de grande hauteur, etc.) et des pertes en vies humaines. Dans ce contexte, il est donc nécessaire de bien comprendre le comportement au feu de ces matériaux.

Les travaux de recherche sur le comportement des bétons aux hautes températures ont permis de donner des réponses aux phénomènes physico-chimiques qui se manifestent dans les bétons chauffés, et qui sont à l'origine des chutes de performances mécaniques et de l'instabilité thermique des bétons : l'état hydrique, le type de béton (béton ordinaire, bétons spéciaux, etc.), la vitesse de chauffage et/ou de refroidissement, la température maximale atteinte, etc...

L'une des méthodes proposées, pour éviter et/ou minimiser les risques d'instabilité thermique des bétons, est l'ajout des fibres polypropylènes ou métalliques. Les résultats de la littérature montrent également l'effet bénéfique de l'ajout des fibres métalliques sur les performances mécaniques résiduelles des bétons chauffés. Toutefois, il n'y a pas un consensus sur l'apport des fibres métalliques ou polypropylènes sur le comportement des bétons chauffés, et même parfois il y a des résultats contradictoires.

Le travail présenté dans ce mémoire s'articule sur un programme expérimental qui a pour objectif de donner une base de données expérimentales sur le comportement au feu des bétons ordinaire, autoplaçant et de fibres de chanvre, de comparer le comportement du béton autoplaçant avec celui du béton ordinaire ainsi que l'effet de l'ajout des fibres polypropylènes et métalliques sur le comportement de ces derniers. Pour atteindre ces objectifs, ce mémoire est divisé en deux parties:

La première partie présente l'étude bibliographique qui est divisée en deux chapitres. Le premier chapitre relate plusieurs informations concernant l'état de l'art du matériau béton et ses constituants, la particularité de composition des BAP et leur caractérisation à l'état frais (essais spécifiques) ainsi que leurs propriétés à l'état durci. L'état de l'art des bétons de chanvre est également abordé dans ce premier chapitre. Le deuxième chapitre présente une synthèse des travaux réalisés sur l'évolution des propriétés physiques et mécaniques des différents bétons soumis aux hautes températures. En outre, le phénomène d'instabilité thermique des bétons est abordé, nous présentons les paramètres qui influent sur ce comportement ainsi que le rôle des

fibres polypropylènes et métalliques comme un moyen efficace de réduire les risques d'apparition du comportement explosif. Enfin un état de l'art des travaux réalisés sur le comportement au feu des BAP portés aux hautes températures est présenté.

La deuxième partie est consacrée à l'étude expérimentale. Cette partie est divisée en trois chapitres.

Le premier chapitre présente les matériaux de base utilisés dans cette étude et la composition retenue des trois types de bétons. Ce chapitre présente également les essais réalisés sur bétons frais et durci, ainsi que les résultats de caractérisation à l'état frais.

Le chapitre deux et trois présentent respectivement les résultats d'essais expérimentaux sur les différents bétons à température ambiante et après exposition au feu, analysés et confrontés avec les résultats antérieurs.

Le mémoire se termine par des conclusions générales.

CHAPITRE 1

ETAT DE L'ART

CHAPITRE 1: ETAT DE L'ART

PARTIE A : LE MATERIAU BETON

1. Introduction

On appelle béton tout mélange contenant ciment, eau, granulat et éventuellement des additions minérales (filler, fumée de silice, etc.), des adjuvants ou des fibres. Le béton est un matériau hétérogène multiphasique, constitué d'un mélange de granulats et d'une pâte, elle-même constituée à partir de ciment et d'eau. Chaque constituant joue un rôle bien défini, celui de liant hydraulique pour la pâte de ciment et celui de remplissage atténuateur de variations volumiques (retrait) et source de résistance pour les granulats.

2. Chimie de la pâte de ciment

La pâte de ciment représente 25 à 40 % du volume total du béton, c'est la pâte qui assure le rôle de matrice au sein du béton en liant les granulats. Elle est obtenue en mélangeant le ciment anhydre avec de l'eau. La principale caractéristique de ce liant est sa capacité de s'hydrater avec de l'eau en formant une pâte solide.

Un ciment anhydre est composé principalement du clinker, de gypse et d'ajouts éventuels (laitier, cendre volante, etc.). Le clinker est essentiellement constitué de silicates et d'aluminates de calcium. Son broyage et son mélange avec le gypse donne le ciment Portland pur dont la composition minéralogique est constituée essentiellement de :

Silicate tricalcique (ou alite) $3CaO, SiO_2$ (C_3S) : 60 à 65% en masse du ciment;
Silicate bicalcique (ou bélite) $2CaO, SiO_2$ (C_2S) : 20 à 25% en masse du ciment;
Aluminate tricalcique (ou célite) $3CaO, Al_2O_3$ (C_3A) : 8 à 12% en masse du ciment;
Alumino-ferrite tétracalcique $4CaO, Al_2O_3, Fe_2O_3$ (C_4AF) : 8 à 10% en masse du ciment.

L'hydratation du ciment conduit à la formation des hydrates, les deux principaux hydrates formés sont le Silicate de Calcium Hydraté, noté "CSH" et la Portlandite notée "$Ca(OH)_2$" , et d'autres composés mineurs, tels que aluminates de calcium hydraté, ettringite ($3CaO{\cdot}Al_2O_3{\cdot}3CaSO_4{\cdot}32H_2O$), etc.

La principale équation résultant de l'hydratation des silicates de calcium est présentée d'une manière simplifiée:

C_3S ou C_2S + H2O ⟶ C-S-H (Silicate de Calcium Hydraté) + CH (Portlandite)

Pour un ciment donné, les quantités de C-S-H et de $Ca(OH)_2$ formées dépendent essentiellement du rapport E/C (Eau/Ciment) et du temps de réaction. Dans une pâte de ciment durcie, on trouve en moyenne 50 à 70% de silicate de calcium hydraté C-S-H et 25 à 27% de portlandite (hydroxyde de calcium $Ca(OH)_2$). Ainsi, le C-S-H est la phase hydratée la plus importante dans la pâte de ciment, c'est elle qui confère à la pâte de ciment durcie sa résistance. Il est important de noter que la quantité de C-S-H est plus importante dans une pâte de ciment d'un béton à hautes performances qu'une pâte de ciment d'un béton ordinaire, ceci est favorable à l'augmentation de la résistance. Quant à la portlandite $Ca(OH)_2$, elle n'a que peu d'importance du point de vue de la résistance mécanique parce que ses cristaux de taille importante sont

susceptibles de limiter la résistance en compression du béton. De plus, la portlandite est facilement soluble dans l'eau, ce qui diminue la durabilité du béton.

Vu la grande proportion des hydrates C-S-H et leur importance dans la résistance de la pâte de ciment, nous allons détailler un peu plus leur composition.

Les hydrates C-S-H ont différentes formes suivant la proportion des éléments C, S et H et de la température. En général, l'observation ne montre pas une cristallisation nette de ces hydrates, c'est pourquoi on les appelle aussi gel C-S-H.

En 1968, Feldman et Serada ([1] cité par [2]) ont proposé un modèle de C-S-H (figure 1.1). Il suppose que le gel C-S-H se compose de particules fines (de 100 à 200 Å), qui se présenteraient sous forme de lamelles, chacune étant composée de deux ou trois feuillets très minces. Celles-ci s'enroulent sur elles-mêmes pour former des fibres tubulaires et des feuillets plissés. Par ailleurs, le modèle montre la présence d'eau entre les feuillets de C-S-H. Comme cet hydrate est très présent dans le béton, on peut pressentir le rôle important de l'eau dans les caractéristiques du matériau.

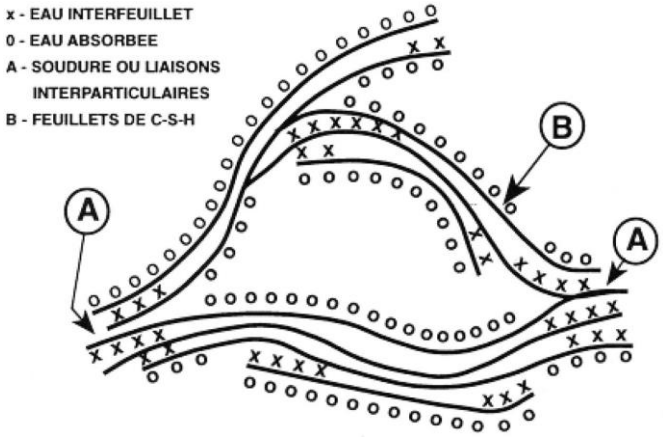


Figure 1.1. Modèle de C-S-H de Feldman et Sereda [1]

3. Eau contenue dans le béton durci

L'eau est l'une des composantes les plus importantes du béton. Elle joue un double rôle dans le béton: à l'état frais, elle permet d'une part une bonne maniabilité du béton, d'autre part, elle permet l'hydratation du ciment. Sa présence et surtout son mouvement au cours de la vie d'un ouvrage en béton est souvent responsable de l'apparition de phénomènes tels que : retrait, gonflement, fissuration du béton lors des cycles gel-dégel, etc. Elle joue aussi un rôle important lors de la montée de la température du béton.

L'eau contenue dans le béton est généralement classifiée selon la nature de sa liaison avec la pâte de ciment hydratée. La classification retenue la présente selon l'ordre des liaisons croissantes [3 cité par 4].

3.1. L'eau libre (ou capillaire)

C'est dans celle-ci que s'effectuent les écoulements et les cisaillements lors de la mise en oeuvre du béton. Elle n'est pas dans le champ d'influence des forces superficielles. Elle remplit le

volume poreux et se trouve principalement dans les pores capillaires de dimension supérieure à 10 μm (gros pores et fissures). Les quantités de ce type d'eau dépendent fortement de l'humidité relative régnant dans le réseau poreux. Cette eau est la première et la plus facile à évaporer lors d'une élévation de température qui s'effectue entre 30 et 120°C.

3.2. L'eau adsorbée et chimiquement liée

L'eau consommée durant les réactions d'hydratation du ciment est combinée avec d'autres composants tels que calcium ou silice. En considérant le modèle lamellaire du gel de C-S-H (figure 1.1), l'eau dans les C-S-H peut apparaître sous trois formes : interfeuillet, interlamellaire et hydroxylique.

3.2.1. L'eau interlamellaire : c'est l'eau des micropores, adsorbée à la surface externe des particules (lamelles). L'eau interlamellaire est une eau structurée, soit fixée sur un hydroxyle isolé, soit liée à d'autres molécules d'eau. Les épaisseurs des espaces inter-particulaires (inter-lamellaires) est inférieure à 20 A°. L'épaisseur moyenne d'une couche d'H_20 adsorbée étant d'environ 3 A°, on peut dire que l'eau externe sera adsorbée sur 6 couches au maximum.

3.2.2. L'eau interfeuillet : cette eau se situe dans l'espace interfolière et possède un très faible degré de liberté. Ces molécules d'eau interfolières sont liées triplement par des ponts hydrogènes comme dans la structure de la glace et interviennent directement dans la cohésion intrinsèque de la lamelle.

3.2.3 L'eau hydroxylique : c'est l'eau liée à des atomes de silice ou de calcium présents sur la surface des feuillets par une association d'un groupement hydroxyle.

4. Interface pâte/granulat

Lors de l'hydratation du ciment, il se forme autour des granulats une zone de pâte hydratée particulière, appelée auréole de transition ou zone de transition interfaciale, notée ITZ (Interfacial Transition Zone en anglais). Cette ITZ présente un rapport E/C plus élevé que le reste de la pâte, ce qui rend sa porosité plus élevée [5]. Du point de vue mécanique, l'auréole de transition présente une résistance plus faible que la pâte de ciment elle-même. Les pores, plus grossiers dans cette zone, forment une faiblesse structurelle. L'épaisseur de l'auréole de transition augmente avec le diamètre du granulat et avec la quantité d'eau d'hydratation (c'est-à-dire avec le rapport E/C) [6].

La nature et la porosité des granulats peuvent aussi influencer l'auréole de transition. En effet, la zone de transition entre les granulats réactifs (calcaires) et la pâte de ciment est plus résistante et faiblement poreuse, avec les granulats neutres (quartz), la zone de transition présente une plus faible résistance mécanique et une porosité plus importante [7], elle constitue ainsi une zone de faiblesse du béton. La forme des granulats joue aussi un rôle très important, la liaison entre pâte et granulats concassés est meilleure que celle avec des granulats roulés.

5. Les granulats

Les granulats (sable, gravillon) constituent le squelette du béton et représentent environ 60-80% de son volume. Les granulats utilisés pour la confection du béton peuvent être naturels (origine

minérale sans transformation autre que mécanique); artificiels (origine minérale et transformés) ou recyclés.

Les granulats utilisés pour la fabrication du béton sont généralement d'origine naturelle. Ils proviennent essentiellement de roches sédimentaires siliceuses ou calcaires, de roches métamorphiques (quartz), ou de roches éruptives (basaltes, granites). Indépendamment de leur nature, les granulats peuvent être alluvionnaires (dits granulats roulés) ou de carrière (dits granulats concassés). Dans les bétons courants, les granulats utilisés doivent avoir une bonne résistance mécanique et leur courbe granulométrique doit être optimisée afin de remplir le plus possible les vides dans le béton et d'avoir par la suite une grande compacité, c'est la raison pour laquelle on utilise plusieurs classes granulaires dans un même béton qui sont les sables et les gravillons.

Les granulats constituent une phase généralement inerte dans le béton à température ambiante au sens où ils n'ont pas d'interaction avec le ciment, l'air et l'eau. Néanmoins, dans certains cas pathologiques, ils peuvent les rendre réactifs, comme les réactions alcali-granulats. Les granulats ont un comportement différent aux températures élevées. Ce comportement dépend de leur nature minéralogique et de leur composition chimique.

Les granulats en contact de la pâte de ciment peuvent être réactifs ou neutres. Les granulats réactifs (calcaire) présentent de fortes liaisons avec la pâte de ciment du fait des réactions chimiques qui se produisent au cours du temps. Les granulats neutres (siliceux) ne réagissent pas avec la pâte de ciment et présentent donc de faibles liaisons.

6. Les additions minérales

Les additions minérales (additions calcaires, cendres volantes, fumées de silice, laitiers, etc.) sont des matériaux finement divisés et pouvant être ajoutés au béton pour améliorer ses propriétés ou pour lui conférer des propriétés particulières.

7. Les adjuvants

Les adjuvants sont des produits chimiques, incorporés au béton à des doses inferieures à 5% du poids du ciment, dans le but de modifier ou d'améliorer certaines de ses propriétés.

8. Les fibres

Une fibre est une unité de matière caractérisée par un rapport longueur sur diamètre ou épaisseur très élevé. Les fibres de différentes natures sont ajoutées aux matrices cimentaires afin d'améliorer leurs caractéristiques principalement à l'état durci [8]. Les fibres utilisées dans la confection des bétons sont généralement classées en trois grandes familles [9] :

- **Les fibres métalliques :** sont les fibres les plus utilisées pour la confection des bétons, elles sont caractérisées par une longueur variant entre 6 et 80 mm et par une surface entre 0.1 et 1.5 mm^2. La résistance à la traction est comprise entre 300 et 2400 MPa. Selon leur forme, les fibres métalliques existent en forme plate, ondulée, crantée, etc. Pour un dosage normal, le pourcentage volumique des fibres est inférieur à 2% en volume.
- **Les fibres synthétiques :** ce sont des produits issus pour leur majorité de l'industrie du pétrole, elles sont fabriquées pour résister pendant longtemps à l'environnement alcalin

du béton. Les fibres synthétiques comprennent les fibres polypropylènes, de polyéthylène, acryliques et fibres de polyester, de nylon, de verre, de carbone. Comme pour les fibres métalliques, les fibres synthétiques sont ajoutées pour améliorer les performances mécaniques des bétons. Les fibres synthétiques sont généralement ajoutées aux bétons avec un dosage faible, compris entre 0.06 et 0.2% en volume.

- **Les fibres végétales :** la valorisation des fibres végétales dans la construction est relativement récente, elle remonte au début des années 1970 où les fibres végétales sont utilisées comme substituant de l'amiante dans les fibrociments. Au cours des dernières années, l'utilisation des fibres végétales (telles que le lin, la cellulose, le jute, le chanvre, le sisal, de coco et de bambou) dans les applications composites a connu un développement considérable, ceci est dû à leur faible coût de production et leur abondance, de plus les fibres végétales sont recyclables et durables.

8.1. Rôle des fibres

A l'état frais, les fibres ont pour rôle de limiter le retrait et les fissurations du béton [10], cependant la littérature montre que l'ajout des fibres réduit la fluidité du béton. Le taux de diminution dépend des paramètres suivants: rigidité, concentration volumique, facteur d'aspect (rapport entre la longueur et le diamètre des fibres) et forme des fibres.

A l'état durci, le rôle principal des fibres dans un matériau cimentaire peut être divisé en deux volets [11 cité par 12] :

- Le contrôle de la propagation des fissures dans le béton en réduisant l'ouverture de ces dernières. Lorsque une éprouvette est soumise à un effort de traction, des microfissures se produisent généralement dans des zones de moindre résistance mécanique comme l'interface entre les granulats et la matrice (auréole de transition) suite à la coalescence des microfissures, des macrofissure apparaissent, l'effort de traction est repris par les fibres qui limitent la propagation de la fissure, les fibres qui traversent une fissure créent un pont entre les deux lèvres de la fissure ce qui permet le transfert d'une partie des contraintes et de s'opposer à l'élargissement de cette dernière, c'est ce que l'on appelle le rôle de couture. Il faut signaler ici que les fibres ne retardent pas l'apparition de la première fissure mais comme il est mentionné, limitent sa propagation une fois elle est apparue.
- La transformation du comportement fragile du béton en un comportement ductile, ceci est assuré par le mécanisme de couture des fibres, qui assure une redistribution uniforme des contraintes dans la matrice, ce qui contribue à l'amélioration de la résistance post-fissuration. Toutefois, ce comportement est lié à la longueur des fibres.

La longueur des fibres métalliques joue un rôle important sur le comportement mécanique du béton. Selon Abbas et al [13], les fibres courtes (utilisées surtout pour la fabrication des bétons UHP) contrôlent la propagation de microfissures. Une fois les macrofissures apparues, les fibres courtes s'arrachent, ceci permet d'augmenter la résistance à la traction des bétons renforcés. Les fibres longues n'ont pas un effet significatif sur l'apparition et la propagation des microfissures, mais elles s'opposent à l'élargissement de macrofissures, d'où la ductilité et l'augmentation de la rigidité des bétons renforcés.

Donc en résumant, les fibres ont généralement pour rôle de renforcer les bétons en s'opposant au développement des fissures et à leur propagation. Selon le type, le dosage et les éléments en béton dans lesquels elles sont insérées, les fibres permettent :

- la réduction de la microfissuration due aux variations dimensionnelles notamment au jeune âge;
- la réduction de la fissuration d'origine mécanique (chargement extérieur);
- l'augmentation de la résistance à la traction par flexion;
- l'augmentation de la ductilité et le comportement post-fissuration;
- les fibres ont également pour rôle l'amélioration de la tenue au feu et de la résistance aux chocs, à la fatigue, à l'usure et à l'abrasion.

PARTIE B : LES BETONS AUTOPLAÇANTS (BAP)

1. Introduction

L'idée de produire des bétons qui se mettent en place sous le seul effet de la gravité est apparue pour la première fois au Japon dans les années 80 par des chercheurs de l'université de Tokyo au Japon. Leur objectif était de parvenir à utiliser des matériaux de plus en plus "performants" pour palier une réduction de la qualité des constructions due à une réduction de la main d'œuvre qualifiée [14]. La mise en oeuvre d'un béton traditionnel nécessite une phase de vibration afin de remplir correctement les coffrages, cette étape conditionne la qualité de la structure finale, mais c'est également un travail pénible et qui demande un savoir-faire particulier.

La solution proposée était d'utiliser un matériau très fluide, capable de se compacter sous son propre poids, sans vibration extérieure. Ces matériaux initialement appelés Bétons Hautes performances, sont aujourd'hui connus sous le nom de bétons autoplaçants, bétons autocompactants ou bétons autonivellants, selon les applications [14]. Ils connaissent à l'heure actuelle un essor considérable dans le monde grâce à leur intérêt technico-commercial qu'ils présentent, à savoir :

- Facilité de mise en place: diminution du temps de réalisation, diminution du nombre des ouvriers, donc du coût de la main d'œuvre, ainsi que la possibilité d'utiliser des coffrages de formes complexes et de fortes densités d'armatures;
- Une amélioration de la qualité du béton (résistance et durabilité), qui est indépendante du savoir-faire des ouvriers.

Nous allons présenter dans ce chapitre, le concept du BAP, ses caractéristiques et les essais auxquels ils doivent être soumis à l'état frais. Nous présentons également les propriétés mécaniques du BAP à l'état durci.

2. Définition et concept des bétons autoplaçants

Les bétons autoplaçants (BAP, ou SCC, en anglais pour self-compacting concrete) sont des bétons très fluides. Ils se mettent en place par l'unique effet de la gravité, sans l'utilisation de moyen de vibration. Ils doivent être homogènes et stables [15].

Les bétons autoplaçants se distinguent donc des bétons dits ordinaires, ou bétons vibrés, par leurs propriétés à l'état frais [16,17], qui sont le résultat d'une formulation spécifique. Cette dernière doit pouvoir concilier aux BAP les propriétés suivantes: un écoulement avec un débit important (fluidité) sans risque de blocage au droit des obstacles et sans risque de séparation des constituants, et une résistance à la ségrégation statique jusqu'à la prise du béton afin d'assurer l'homogénéité de ses propriétés mécaniques. Ces propriétés contradictoires sont obtenues par l'ajout et le dosage adéquat d'éléments fins, de superplastifiant, et éventuellement d'agents de viscosité.

L'emploi d'éléments fins permet de garantir le compromis entre stabilité et maniabilité. Mais il n'est pas suffisant pour atteindre la fluidité, c'est pour ça que l'ajout d'un défloculant est primordial (superplastifiant), sans lequel la demande en eau du mélange serait trop élevée. Les quantités de fines et de superplastifiant ne sont pas à leur tour toujours suffisantes pour empêcher

la ségrégation, c'est pour ça que le recours aux agents de viscosité est parfois nécessaire. Ces agents de viscosité sont souvent des polymères, composés de longues molécules organiques, qui augmentent la viscosité de l'eau de gâchage, ils assurent une meilleure stabilité du béton et le rendent moins sensible aux variations de teneur en eau des granulats en centrale à béton [18], mais leur utilisation pratique est peu répondue, car ils entraînent un surcoût, qui s'ajoute aux surcoûts dus au superplastifiant et aux additions minérales.

3. Spécification de la composition et méthodes de formulation des BAP

La difficulté de la fabrication des BAP réside dans la recherche à obtenir d'une part une grande fluidité et d'autre part une grande stabilité du béton à l'état frais afin de limiter la ségrégation et le ressuage de ces bétons. Pour répondre à ces caractéristiques, la composition d'un BAP doit être soigneusement mise au point.

3.1. Spécification de la composition

Indépendamment des méthodes de formulation des BAP, la composition de ces derniers se caractérise par certaines caractéristiques, qui sont intrinsèques aux BAP, à savoir:

3.1.1. Un volume de pâte élevé

L'utilisation d'un volume de pâte (ciment + additions + eau efficace + air) élevé (350 à 450 l/m^3), qui a pour objectif de limiter les frottements intergranulaires, qui sont source de limitations de l'étalement et de la capacité au remplissage du BAP. En effet, le rôle de la pâte étant précisément d'écarter les granulats.

Le volume de pâte dans un BAP représente 35 à 45 % du volume total, alors que dans un béton traditionnel il est de 20 à 35 % [19].

3.1.2. Une quantité de fines importantes

Les compositions de BAP comportent une grande quantité de fines (environ 500 kg/m^3) pour assurer une maniabilité suffisante tout en limitant les risques de ressuage et de ségrégation. Les fines (particules < 63um) proviennent du ciment, des additions minérales et des granulats. L'utilisation des additions minérales permet d'éviter les effets négatifs d'une quantité trop importante de ciment (diminution des coûts et de la chaleur d'hydratation). L'utilisation des additions minérales comble également les vides entre les grains de ciment et réduit par conséquence la demande en eau ainsi qu'elle augmente la compacité du béton.

Différentes additions peuvent être utilisées : fillers, cendres volantes, laitiers de hauts fourneaux, fumées de silice. Le filler calcaire est le plus fréquemment utilisé car il est inerte chimiquement et disponible en abondance.

Zhu et Gibbs [20] ont étudié l'influence de deux types de fillers (craie et calcaire) sur les propriétés des BAP. Les résultats montrent que le dosage approprié en superplastifiant dépend plus du type que de finesse du filler utilisé. Les fillers calcaires présentent une demande plus faible en superplastifiant que les fillers de craie, la finesse a peu d'influence sur l'étalement et la demande en superplastifiant des deux types de fillers, mais entraine de manière significative une augmentation de la résistance au jeune âge.

El Hilali [21] a étudié l'influence de la surface Blaine des fillers calcaires sur l'ouvrabilité des BAP, ces fillers sont nommés LFE, MFO et MFS, ils ont respectivement les surfaces de Blaine suivantes: 409 m^2/kg, 457 m^2/kg et 552 m^2/kg. Les résultats ont montré que l'augmentation de la surface de Blaine conduit à une diminution du dosage en superplastifiant, de plus, l'ouvrabilité diminue au cours du temps d'une manière significative quand la surface de Blaine est faible (Figure 1.2).

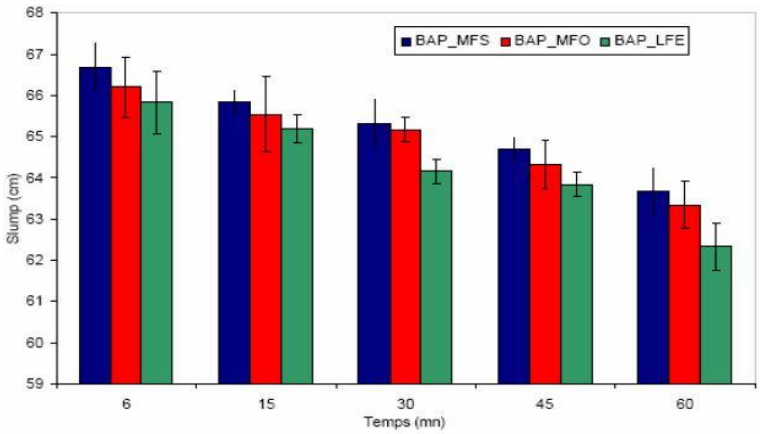


Figure 1.2. Evolution de slump flow en fonction du temps (El Hilali[21])

3.1.3. L'utilisation du superplastifiant

Les superplastifiants sont des polymères à base des sels de sodium ou de calcium de polynaphtalène sulfoné, de sel de sodium de poly-mélamine sulfoné ou des sels de sodium ou de calcium lignosulfonate de grande pureté ou des polycarboxylates récemment (dites de nouvelle génération). Les plus utilisés sont les superplastifiants de nouvelle génération et les deux premiers qui sont communément appelés superplastifiants à base de naphtalène et superplastifiants à base de mélamine [22].

Ils sont ajoutés à des faibles proportions (généralement à un dosage de 0.2% à 2% du poids de la poudre) au béton frais, permettent ainsi d'en modifier les propriétés rhéologiques durant une période plus ou moins longue. Les superplastifiants permettent en effet de défloculer les grains de ciment. Ils agissent par répulsion électrostatique, ils ont adsorbé sur la surface des grains de ciment, donnant des charges électriques négatives à la surface de ceux-ci, et par effet stérique (pour les superplastifiants de nouvelle génération) en écartant les grains les uns des autres, grâce à des chaînes moléculaires très longues [22]. L'eau initialement piégée entre les flocs est de nouveau disponible pour l'hydratation ou pour fluidifier le mélange (figure 1.3). Il devient donc possible de fabriquer des bétons très fluides, à faible rapport E/C et facile à mettre en place.

3.1.3.1. La compatibilité ciment-superplastifiant

L'origine de l'incompatibilité entre le ciment et le superplastifiant est l'adsorption de ce dernier par le ciment et le sulfate de calcium, lequel est ajouté pour réguler la prise du ciment, ainsi, seulement une faible quantité de superplastifiant reste disponible dans la solution interstitielle et son effet dispersant sur C_3S et C_2S est alors considérablement réduit. De plus, le sulfate de calcium ne peut plus réagir pleinement avec le C_3A pour réguler la prise, ce qui dégrade l'ouvrabilité. Cependant, lorsque le superplastifiant est quelque peu retardé, le sulfate de calcium

a le temps de réagir avec le C_3A pour former une coquille d'éttringite, adsorbant beaucoup moins les molécules actives qui sont ainsi disponibles en plus grand nombre pour remplir leur fonction dispersante. Parfois il n'est pas possible de différer l'ajout de toute la quantité du superplastifiant, c'est le cas par exemple des bétons à hautes performances où on risque d'obtenir un béton trop sec lors du malaxage, une double introduction est donc pratiquée, le dosage en double introduction est effectué comme suit [22]: une quantité dans l'eau de gâchage (généralement 1/3 de la quantité totale du superplastifiant), cette quantité joue le rôle de plastifiant réducteur d'eau, et la quantité restante (généralement 2/3 de la quantité totale du superplastifiant), à la fin du malaxage, ou, mieux encore, à la livraison, le superplastifiant joue le rôle dans ce cas de fluidifiant.

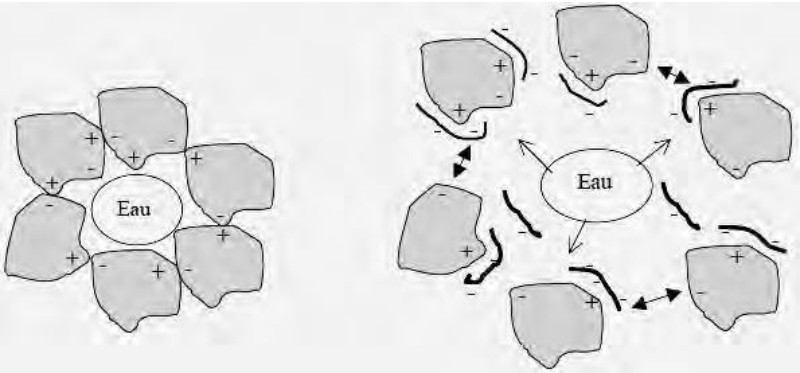


Figure 1.3. Action du superplastifiant

3.1.4. L'utilisation d'un agent de viscosité

Les agents de viscosité permettent d'augmenter la viscosité des BAP et de les rendre moins sensibles aux problèmes de ressuage et de ségrégation. Ce sont généralement des dérivés cellulosiques, des polysaccharides, des colloïdes naturels ou des suspensions de particules siliceuses, ils interagissent avec l'eau et augmentent la viscosité de celle-ci. Leur emploi est particulièrement justifié dans les compositions des BAP avec un rapport E/L_{eq} élevé (supérieur à 0.4) [21,23]. L'incorporation d'un agent de viscosité a pour effet une meilleure stabilité du BAP et de lui rendre moins sensible aux variations de teneur en eau des granulats [18], mais génère un surcoût et engendre une action opposée à celle des superplastifiants, ce qui rend nécessaire l'ajustement des teneurs en agent de viscosité et en superplastifiant.

3.1.5. Un faible volume de gravillons

Les BAP peuvent être formulés avec des granulats roulés ou concassés, mais il est généralement admis que les granulats roulés confèrent au béton une plus grande ouvrabilité.

Afin de limiter le risque de blocage, le volume et le diamètre des granulats doivent être réduits par rapport à celui d'un béton traditionnel. D'après L'AFGC [15], le diamètre maximal des gravillons est compris entre 10 et 20 mm, cependant un volume de gravillons très réduit conduit à une réduction de la compacité du squelette granulaire et par la suite une augmentation exagérée de la demande en liant et par conséquent une altération de la résistance souhaitée. C'est pour ces raisons l'AFGC préconise l'utilisation d'un rapport gravillon/sable (G/S) de l'ordre de 1, qui peut être corrigé suivant le confinement de la structure étudiée.

3.2. Méthodes de formulation

Les méthodes de formulation classiques ne sont pas adaptées aux BAP, car elles ne prennent en compte ni les adjuvants ni les additions, alors que ce sont des composants essentiels d'un BAP. C'est pour ça que plusieurs méthodes de composition se sont développées ces dernières années pour la formulation des BAP. Elles reposent toutes sur une ou plusieurs approches expérimentales plus ou moins lourdes. Parmi les approches de formulation les plus répandues, nous citons :

- L'approche basée sur l'optimisation de la compacité des mélanges granulaires;
- L'approche basée sur l'optimisation de mortier ou de la pâte;
- L'approche basée sur le rassemblement des deux approches précédentes.

Indépendamment de la méthode de formulation adoptée, les grandes lignes d'optimisation restent pratiquement communes. L'analyse de Domone [24] sur des études effectuées sur des BAP à travers le monde révèle que la composition des BAP est basée sur:

- Un volume de gravillons variant entre 28% et 38% du volume total du BAP;
- Un volume de pâte variant entre 30 et 42% du volume total du BAP;
- Un rapport E/C $\leq$ 0.48 en masse du matériau;
- Un dosage en liant (ciment +additions) variant de 385 à 635 kg/m^3;
- Le dosage en superplastifiant proche de son dosage de saturation.

Quant à l'AFGC [15], elle recommande l'utilisation des dosages suivants:

- Un rapport gravier/sable (G/S) proche de 1;
- Un rapport eau/ciment (E/C) proche de 0.5;
- Un dosage en ciment supérieur ou égal à 300 kg/m^3;
- 330 (l/m^3) $\leq$ volume de pâte $\leq$ 400 (l/m^3);
- 120 (kg/m^3) $\leq$ masse d'addition $\leq$ 200 (kg/m^3).

Les principales méthodes de formulation sont énumérées ci-dessous:

3.2.1. La méthode Japonaise

Cette méthode est proposée initialement par des chercheurs Japonais [14], elle consiste à privilégier le volume de pâte au détriment de celui des granulats. Cette méthode de formulation conduit à des bétons de hautes performances mécaniques, mais onéreux car sont fortement dosés en ciment et en superplastifiant.

La méthode repose sur les concepts suivants :

- La quantité de gravillons est limitée à 50% de leur compacité (rapport entre le volume des grains et le volume total du système (grains +vides)) afin de minimiser les risques de blocage.
- Le volume du sable est de l'ordre de 40% du volume total de mortier, ceci permet d'assurer une ouvrabilité suffisante au mortier. Il est important de noter que les auteurs

excluent du terme de sable toutes les fines inférieures à 90 µm, qui sont considérées comme poudre au même titre que les liants.

- Les rapports $\frac{E}{F+C}$ et $\frac{F}{F+C}$ et le dosage en superplastifiant optimisés à partir d'essais sur mortiers (contenant une teneur volumique en sable égale à 40% du volume total du mortier) en effectuant des essais d'étalement au mini-cône et au V-Funnel (figure 1.4). Ces essais permettent de calculer deux paramètres :$\Gamma_m = \frac{(d)^2-(d_0)^2}{(d)^2}$ et $R_m = \frac{10}{t}$,

Où d est l'étalement, d_0 est le diamètre inférieur du cône et t est le temps d'écoulement du mortier. Certains auteurs [17] montrent que pour un BAP, Γ_m = 5 et R_m= 1.

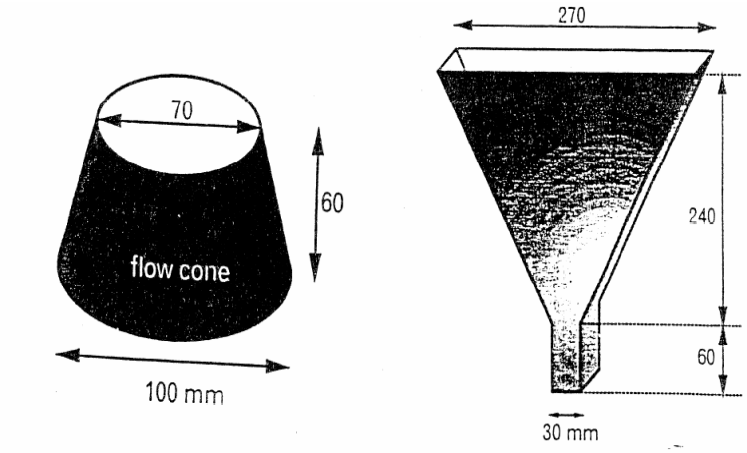


Figure 1.4. Cônes pour mesurer l'étalement des mortiers et entonnoir pour mesurer le temps d'écoulement des mortiers (cité par [25])

3.2.2. La méthode Chinoise

Su N. et col. [26] ont développé une méthode pour formuler les BAP, elle consiste à optimiser la compacité du squelette granulaire (sable et gravier), puis le volume de la pâte dont le rôle est le remplissage des vides entre les granulats est optimisé de façon à satisfaire les exigences de résistance et de durabilité. Le dosage en superplastifiant est vérifié expérimentalement à l'échelle du béton pour assurer l'ouvrabilité requise. Comparée à la méthode Japonaise, cette méthode est plus simple, plus facile pour l'exécution et moins coûteuse. La méthode repose sur les concepts suivants :

- **Etape 1** : Calcul du dosage des granulats:

Il s'appuie sur la notion du facteur de compacité PF "Packing Factor en anglais" évalué expérimentalement. Le PF est déterminé en variant le rapport massique sable/granulats de 0% à 100%, et de déterminer pour chaque rapport massique sable/granulats, la masse volumique avant et après compactage, le PF est défini comme étant le rapport entre la masse volumique maximale des granulats (sable + gravillon) compactés et la masse volumique maximale des granulats (sable + gravillon) desserrés (non compactés).

La proportion du gravillon Mg et du sable Ms sont calculées par les deux équations suivantes :

Mg=PFxρgL(1-S/G);
Ms=PFxρsL(S/G);

Où:

Mg: proportion du gravillon (Kg/m3);
Ms : proportion du sable (Kg/m3);
ρgL : masse volumique apparente du gravillon (Kg/m3);
ρsL : masse volumique apparente du sable (Kg/m3);
S/G: rapport massique sable sur granulat (gravillon + sable) correspondant à la compacité maximale.

- **Etape 2** : Calcul du dosage de ciment:

En général, les recommandations en Tawain imposent pour le BHP ou le BAP une résistance à la compression égale à 20 psi (0,14 MPa) /Kg de ciment. Donc, le dosage de ciment est défini comme :

C= σc'/0.14;
C : dosage en ciment (Kg/m3);
σc' : résistance à la compression (psi).

- **Etape 3** : Calcul du dosage en eau:

Le calcul de la quantité d'eau est basé sur la connaissance du rapport E/C déterminé expérimentalement.

Wwc=(E/C) xC, avec E/C : le rapport eau/ciment.

- **Etape 4** : Calcul de la teneur en filler (Wpf) :

$$Vpf= 1 - \frac{Wg}{1000xGg} - \frac{Ws}{1000xGs} - \frac{C}{1000xGc} - \frac{Wwc}{1000xGw} - Va$$

$$Vpf= \left(1 + \frac{W}{F}\right) x \frac{Wpf}{1000xGf}$$

Gg : densité du granulat;
Gs : densité du sable;
Gc : densité du ciment;
Gw : densité de l'eau;
Gf : densité du fillers;
Va : volume de l'air.

Gf, Gc, W/F sont obtenus à partir des tests.
W/F : rapport eau sur filler

Calcul d'eau nécessaire pour malaxer le filler:

$$Wwf= \left(\frac{W}{F}\right) xWf$$

- **Etape 5** : Calcul du dosage total d'eau :

Ww=Wwc + Wwf

- **Etape 6** : Calcul du dosage du superplastifiant:

Wsp= n%(C+ Wf);
Wwsp= (1 − m%)Wsp;

Où:

n% : pourcentage du superplastifiant dans la pâte;
m% : pourcentage de l'extrait sec du superplastifiant.

- **Etape 7** : Ajustement d'eau nécessaire pour le BAP
- **Etape 8** : validation des calculs par les essais à l'état frais

Les formulations obtenues par les calculs doivent accomplir les conditions suivantes :

- Les résultats d'essais d'étalement, boite en L et V-funnel doivent être vérifiés;
- Les phénomènes de ségrégation doivent être satisfaits.

3.2.3. La méthode Française

Cette méthode a été développée au LCPC et repose sur les principes du Modèle d'Empilement Compressible, MEC, du squelette granulaire, elle permet d'estimer la compacité réelle de l'empilement granulaire à partir des caractéristiques de l'ensemble des grains qui le composent (forme, granulométrie).

Ce modèle fait intervenir deux notions physiques :

- La compacité virtuelle du mélange, notée γ: la compacité maximale que l'on pourrait atteindre en arrangeant, au mieux, l'empilement des grains qui s'étendent aux additions fines jusqu'aux gravillons. Dans la pratique, les grains se positionnent avec un certain désordre. C'est ainsi que la compacité expérimentale du mélange, notée C, est toujours inférieure à la compacité virtuelle.
- Indice de serrage K : grandeur représentative du degré de compaction d'une classe granulaire. Ainsi pour chaque classe granulaire de diamètre moyen d_i on définit un indice de serrage K_i. Plus ce dernier est élevé, plus les contacts entre les grains d'une même classe sont importants et plus le seuil de cisaillement τ_0 est significatif.

Le modèle de l'empilement granulaire est implanté dans un logiciel (Betonlab Pro2), qui permet d'optimiser la composition du BAP à partir d'un cahier des charges précis et de simuler les autres propriétés du béton (résistance, déformations différées, etc.).

L'utilisation de cette méthode nécessite la réalisation de certains essais expérimentaux pour déterminer la compacité du sable, la compacité des gravillons, le dosage en eau et le dosage de saturation du superplastifiant pour le ciment.

4. Essais de caractérisations des BAP à l'état frais

L'intérêt majeur d'un BAP réside dans ses propriétés à l'état frais qui lui permettent d'apporter une réelle innovation dans la construction actuelle, c'est pour cela que de nombreuses recherches visent également au développement de techniques de caractérisation du critère autoplaçant. En

effet, le comportement spécifique des BAP à l'état frais rend quasi inadaptés la plupart des essais classiques sur les bétons traditionnels.

Dès la découverte des BAP, de nombreux essais ont été développés, regroupés sous la forme de recommandations en 2002 puis en 2005 par l'EFNARC (EFNARC, 2002 [27]), (EFNARC, 2005), et enfin par l'AFGC dans le cadre du Projet National (en France) Béton Auto plaçant (AFGC, 2008 [19]). Ces recommandations ont finalement conduit à l'écriture d'une norme européenne NF EN 206-9 : Règles complémentaires pour le béton autoplaçant datant de juin 2010.

Pour une caractérisation complète des propriétés à l'état frais du BAP, il est nécessaire de s'intéresser à trois caractéristiques:

La mobilité en milieu non confiné (décrit par l'essai d'étalement) ;
La mobilité en milieu confiné (décrit par l'essai de la boîte en L) ;
La stabilité (résistance à la ségrégation et au ressuage).

Les principaux essais présentés ici, permettent d'étudier l'ensemble des propriétés à l'état frais du BAP et de donner la classification des BAP en fonction de leur application.

4.1. Essai d'étalement (NF EN 12350-8 [28])

L'essai d'étalement permet de caractériser la fluidité du BAP et de donner une indication sur sa mobilité en milieu non confiné. Cet essai s'effectue comme un essai d'affaissement au cône d'Abrams (Figure 1.5). Le BAP est introduit dans le cône sans compaction, on mesure le diamètre moyen (moyenne sur deux diamètres orthogonaux) de la galette de béton obtenue au bout d'une minute, l'étalement cible se situe entre 600 et 800 mm suivant l'utilisation prévue du béton. Ainsi trois classes d'étalement ont été définies :

SF1 pour un étalement compris entre 550 et 650 mm;
SF2 pour un étalement compris entre 660 et 750 mm;
SF3 pour un étalement compris entre 760 et 850 mm.

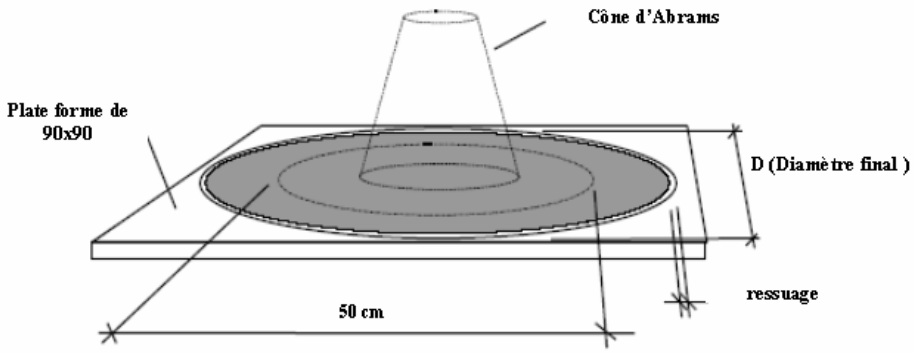


Figure 1.5. Essai d'étalement

Le BAP de classement SF1 est utilisé pour la réalisation d'élément non ou très faiblement armés celui de classe SF3 est dédié aux ouvrages fortement ferraillés.

La vitesse d'étalement du béton est également souvent prise en compte par la mesure du temps nécessaire à l'obtention d'une galette de 50 cm de diamètre t_{50} cette dernière donne une indication sur la viscosité du matériau. En outre, l'observation visuelle permet également de constater s'il y a lieu de ségrégation du béton par effet de gravité, qui se manifeste par l'accumulation des gros grains au centre de la galette et par la formation d'une auréole de laitance à ses extrémités.

4.2. Essai du V-funnel (NF EN 12350-9 [29])

L'essai consiste à étudier l'écoulement du BAP à travers un entonnoir en forme de V, il permet d'évaluer la mobilité du béton en milieu non confiné en mesurant le temps d'écoulement de 12 litres de béton à travers l'entonnoir, le temps d'écoulement cible est compris entre 8 et 14 secondes (figure 1.6). En effet, plus le temps d'écoulement est long, moins le béton est fluide et plus il est visqueux. D'après les spécifications, deux classes de viscosité ont été définies:

VF1 si le temps d'écoulement est inférieur à 8 s. Cette classe correspond à t 50 $\leq$ 2 s;
VF2 si le temps d'écoulement est compris entre 9 et 25 s. Cette classe correspond à t50 $\geq$ 2 s.

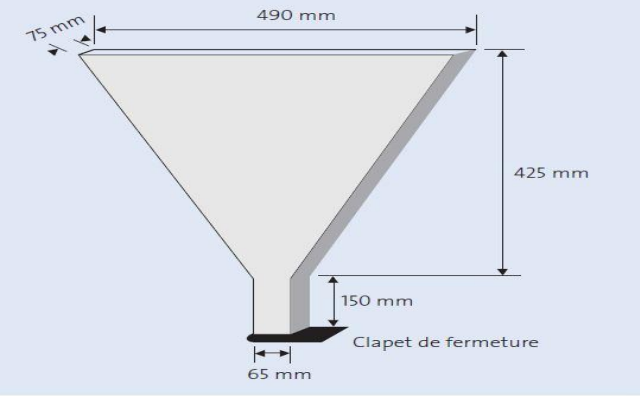


Figure 1.6. Essai de V-funnel pour mesurer le temps d'écoulement du béton

4.3. Essai de la boîte en L (L box) (NF EN 12350-10 [30])

Cet essai permet caractériser la mobilité du BAP en milieu confiné et de vérifier que la mise en place du béton ne sera pas contrariée par des phénomènes de blocage au droit des armatures. Le schéma de la boîte ainsi que le principe de l'essai sont décrits sur la figure 1.7.

La partie verticale de la boîte est remplie de béton en une seule fois et qu'on laisse reposer une minute. On lève la trappe et on laisse le béton s'écouler à travers le ferraillage standard formé de 3 barres d'armature φ14 mm distantes de 39 mm. Une fois l'écoulement (le temps d'écoulement doit être de préférence compris entre 3 et 7 secondes) terminé, on mesure les deux hauteurs H1 et H2 et on exprime le résultat en terme de taux de remplissage H2/H1. Le taux de remplissage pour un BAP doit être supérieur à 0.8. Lorsque le béton s'écoule mal à travers le ferraillage ou qu'il y a blocage des granulats, c'est le signe de l'apparition de la ségrégation.

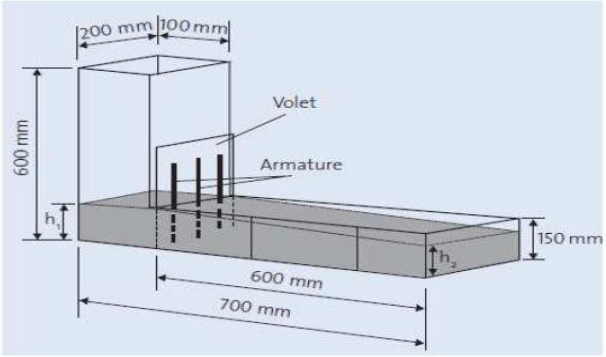


Figure 1.7. Dimensions de la boite en L (L-box)

4.4. Essai à de l'anneau (J-ring) (NF EN 12350-12 [31])

Il est aussi appelé essai d'étalement modifié, il a pour but de vérifier l'aptitude des BAP à s'écouler dans un milieu confiné.

Le principe de l'essai est de placer le cône d'Abrams sur une plaque plane entouré par un anneau de 300 mm de diamètre, équipé de 16 barres HA de diamètre 16 mm. Une fois le cône rempli, on le soulève, ce qui laisse écouler le béton à travers les barres HA.

Le résultat de cet essai est exprimé par la différence entre la mesure du diamètre d'étalement obtenu sans et avec l'anneau, l'écart entre les deux étalements doit être inférieur à 10 cm.

4.5. Essai de stabilité au tamis (NF EN 12350-11 [32])

Cet essai vise à quantifier l'aptitude du BAP à rester homogène après sa mise en place et jusqu'au début de prise le béton doit demeurer stable et il ne doit pas présenter de signes de ségrégation. L'essai consiste à prélevé un échantillon de 10 litres du béton. Après 15 minutes d'attente, on verse sur un tamis d'ouverture 5 mm, une masse de 4.8 kg de béton avec une hauteur de 50cm et après 2 minutes on pèse la masse de l'échantillon ainsi que celle de la laitance qui a traversé le tamis (figure 1.8).

On calcule le pourcentage en masse de laitance par rapport au poids de l'échantillon :

Pi = (Plaitance/Pechantillon)*100

La mesure de ce pourcentage permet de classer les BAP selon la classification suivante :

SR1 pour P% Laitance < 20 %);
SR2 pour P% Laitance < 15 %).

La classe SR1 est généralement applicable aux dalles de faible épaisseur et peut également être utilisée dans les applications verticales avec une distance maximale de cheminement de 5 mètres et un intervalle d'écoulement supérieur à 80 mm.

La classe SR2 est mieux adaptée dans les applications verticales si la distance de cheminement est supérieure à 5 mètres et si l'intervalle d'écoulement est supérieur à 80 mm. Elle convient également pour les applications verticales avec un intervalle d'écoulement maximum de 80 mm, si la hauteur de chute du béton est inférieure à 5 mètres.

L'intervalle d'écoulement est la plus petite maille d'armatures à travers laquelle le BAP doit s'écouler de manière continue pour remplir le coffrage.

Figure 1.8. Essai de stabilité au tamis

D'autre essais sur les BAP à l'état frais peuvent être conduits tels que l'essai de la boîte en U qui permet de caractériser la mobilité du béton en milieu confiné et la facilité de sa mise en place.

5. Propriétés mécaniques du béton autoplaçant

5.1. Résistance en compression

De nombreuses études ont été effectuées sur les propriétés mécaniques des BAP contenant des fillers calcaires comparées à celle des bétons vibrés. Les résultats de ces études ont montré que la résistance des BAP à long terme est supérieure ou au moins égale à celle du BV correspondant (formulé à des rapports E/L identiques). Certains auteurs [21,33] ont constaté aussi une accélération de la résistance au jeune âge (El Hilali [21] a trouvé une résistance de 21 MPa à 24 heures) et cela jusqu'a 28 jours. Ceci est expliqué par une hydratation favorisée par les petites particules du filler et ceci est d'autant plus remarquable que la finesse du filler (exprimée en valeur Blaine) est plus importante [33].

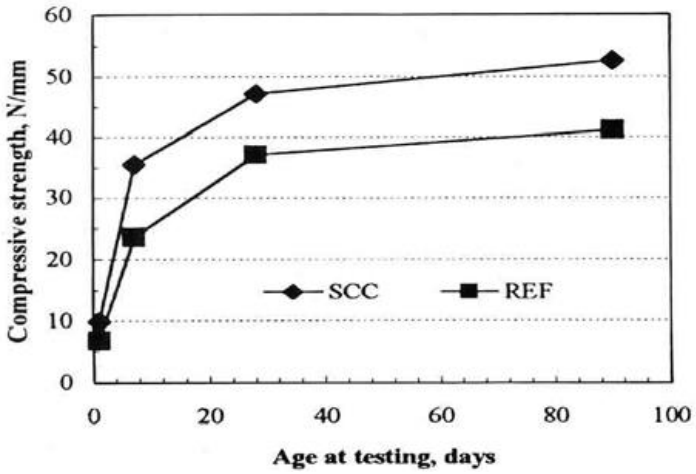


Figure 1.9. Evolution de la résistance à la compression d'un BAP (SCC) et d'un BV (REF) correspondant [33].

El Hilali [21] a montré que l'augmentation de la finesse du filler a pour effet d'augmenter la résistance à la compression. Selon lui, ce phénomène est dû au fait qu'en diminuant la taille des

particules, le temps de prise augmente et par conséquent la quantité de chaleur dégagée par l'hydratation est moindre, ce qui réduit vraisemblablement la microfissuration du BAP (figure 1.10).

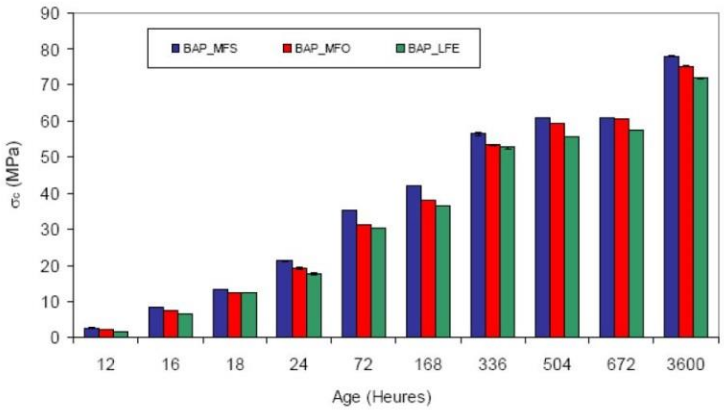


Figure 1.10. Evolutions de la résistance à la compression en fonction de finesse du filler [21]

Le dosage en superplastifiant peut y avoir une influence sur l'évolution de la résistance à la compression des BAP. En effet, selon Shi [34 cité par 23], certains superplastifiants utilisés pour contrôler la fluidité des formulations ont pour effet secondaire d'augmenter le développement de la résistance à la compression des BAP. Leur dosage important dans les BAP et la défloculation qu'ils engendrent conduisent à des BAP plus résistants que les bétons vibrés.

5.2. Résistance en traction

Domone [24] a révélé que les BAP ont une résistance à la traction similaire à celle des bétons vibrés. Néanmoins, Felekoglu et al [35] a trouvé que la résistance à la traction des BAP est supérieure à celle des BV (de l'ordre de 10%). Cette augmentation a été attribuée à l'amélioration de la qualité de l'interface pâte-granulats dans les BAP qui est liée à l'ajout des fines dans leurs compositions.

5.3. Module d'élasticité

L'analyse de Domone [24] sur des études effectuées sur les BAP à travers le monde a révélé que le module élastique des BAP diffère peu de celui des bétons traditionnels si le rapport G/S est similaire et inférieur à 1. Néanmoins, si le rapport G/S est plus élevé pour les BV que pour les BAP, il en résulte des valeurs du module d'élasticité des BAP plus faibles que celles des bétons vibrés auxquels ils sont comparés. Cette diminution des modules des BAP s'explique par l'augmentation du volume de la pâte et la diminution du volume des granulats dans les BAP. En effet, le module du béton dépend des proportions volumiques de ses constituants et de leur module respectif. Les BAP sont formulés de telle sorte à ce que le volume de la pâte soit plus important et la proportion granulaire plus faible que ceux des bétons vibrés.

Parra et al [36], en testant des BAP et des bétons vibrés, a conclu suite à une étude statistique que les modules d'élasticité des deux bétons sont pratiquement les mêmes au jeune âge (< 7 jours). Ce comportement est expliqué par l'effet favorable des fines calcaires, qui accélèrent le processus d'hydratation du ciment au cours des premiers jours. Néanmoins, entre les âges de 28

et 90 jours, le résultat de la recherche a révélé une légère tendance pour les BAP de montrer un peu plus un faible module d'élasticité (figure 1.11), d'environ 2% en moyenne. Ceci est expliqué par la forte teneur des BAP en pâte comparé au BV.

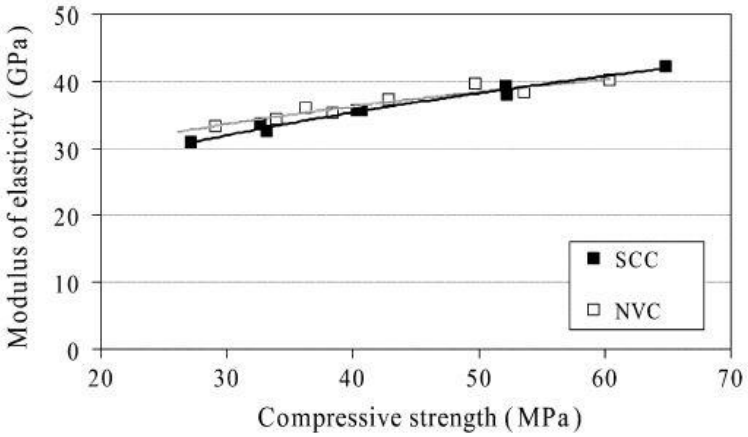


Figure 1.11. Module d'élasticité à 28j et 90 jours [36]

El-Hilali [21], dans le cadre de sa thèse, a mesuré le module d'élasticité pour tous les BAP formulés et il a corrélé les résultats à la résistance à la compression. Il a trouvé que l'évolution de E en fonction de fc est décrite par l'équation suivante: $E=5.04\sqrt{fc}$.

De même Assie [23], en testant des BAP et des BV, a obtenu pratiquement une relation du même type valable aussi bien pour les BAP que pour les BV: $E=4.64\sqrt{fc}$. Ces résultats sont assez éloignés de la formule règlementaire de l'Eurocode 2 donnée par l'équation suivante $E=22(fc/10)^{0.3}$.

PARTIE C : LE BETON DE CHANVRE

1. Introduction

Les politiques de développement durable dans le bâtiment conduisent de plus en plus à s'intéresser aux matériaux de construction alternatifs. Dans ce cadre, le développement de matériaux de construction innovants, qui respectent la santé et améliorent le confort de l'usager tout en ayant un impact environnemental limité, constitue un enjeu prioritaire.

Pour cela, l'utilisation des matériaux fabriqués à base de particules et de fibres végétales (le chanvre, la paille, le lin, le bois, etc.) qui sont renouvelables, recyclables et durables constitue une des voies envisagées.

Différents travaux ont été menés sur le développement de matériaux de construction à base de chènevotte et de fibres de chanvre, particules ligneuses issues de la tige du chanvre. Le béton de chanvre, qui associe les granulats végétaux légers (chènevottes) à une matrice minérale généralement formulée à base de chaux aérienne, présente des propriétés d'usage intéressantes. Il permet notamment d'obtenir une conductivité thermique compatible avec une fonction d'isolation, les fibres de chanvre quant à eux sont valorisées dans la fabrication de laine de chanvre, elles sont également utilisées dans les composites pour renforcer les matrices minérales.

Dans ce chapitre, nous allons présenter le béton de chanvre, son impact sur l'environnement ainsi que ses caractéristiques physiques et mécaniques.

2. L'impact du bâtiment sur l'environnement et l'utilisation des éco-matériaux

Les problématiques énergétique et environnementale sont des enjeux majeurs dans la perspective globale du développement durable. Le secteur de l'habitat étant particulièrement énergivore, émetteur de gaz à effet de serre et consommateur de ressources naturelles. En effet, en 2010 et en France par exemple les consommations d'énergie des bâtiments (immeubles, maisons, bureaux, etc.) représentaient 43% de la consommation énergétique totale (le secteur de l'habitat est le premier consommateur d'énergie parmi tous les secteurs économiques) et près de 25% des émissions de CO_2 (le secteur de l'habitat est le deuxième secteur émetteur de CO_2 parmi tous les secteurs économiques). Le chauffage est le principal consommateur d'énergie avec presque trois quarts des consommations d'énergie, et l'émetteur de la majeure partie des émissions de CO_2 du secteur de l'habitat en France [37]. La consommation de l'énergie par le secteur de l'habitat contribue donc fortement au réchauffement climatique et la raréfaction des sources d'énergie d'origine fossile.

Cette problématique environnementale et énergétique a donné naissance à diverses méthodes dans le but de répondre à deux exigences primordiales : diminuer les consommations énergétiques et les impacts sur l'environnement extérieur, et assurer des ambiances intérieures saines et confortables, L'amélioration de l'efficacité énergétique des bâtiments (enveloppe et équipements) constitue donc une des voies qui va permettre de réduire leur consommation d'énergie tout en assurant un bon niveau de confort et en limitant les émissions de CO_2.

Dans ce cadre, l'utilisation des éco-matériaux intégrant une composante végétale (le chanvre, la paille, le lin, le bois, etc.) qui sont renouvelables, recyclables et durables constitue une bonne voie dans le souci de préserver la santé de l'homme, de répondre à ses besoins de bien-être et de

confort et de réduire les impacts environnementaux (émission de gaz à effet de serre, énergie grise, consommation de matières premières non renouvelables) [38].

Parmi ces matériaux, le béton de chanvre qui, par ses caractéristiques, permet de réduire considérablement la consommation de l'énergie et par la suite l'impact "Effet de Serre" des bâtiments en agissant sur deux paramètres:

- En améliorant la performance énergétique des bâtiments neufs ou rénovés : le béton de chanvre par ses qualités techniques en terme de performances hygrothermique et acoustique contribue à diminuer la part de gaz à effet de serre liée au chauffage ou au refroidissement de ces bâtiments.
- En stockant durablement du carbone : comme tous les végétaux, le chanvre utilise le gaz carbonique (CO_2) de l'air pour sa croissance. Un hectare de chanvre peut ainsi utiliser plus de 15 tonnes de CO_2 avant d'arriver à maturité. Ce CO_2 est piégé durablement dans le béton de chanvre. Une analyse de cycle de vie a permis de démontrer que 1 m^2 de mur à ossature de chanvre de 26 cm d'épaisseur stocke 75 kg de CO_2. Le béton de chanvre induit également une faible consommation d'énergie sur l'ensemble de son cycle de vie et présente un indicateur "effet de serre" négatif d'une valeur de -0.35 kg CO_2 eq, cela signifie que le mur de béton de chanvre a un impact favorable sur l'effet de serre [39] . Il constitue un puits de carbone puisque la quantité de CO_2 stockée par ses différents constituants surpasse celle émise par son cycle de vie (sous réserve d'une bonne gestion en fin de vie). Ceci nous permet d'envisager un objectif très ambitieux au futur : les Constructions Zéro Carbone [40].

Les fibres végétales telles que les fibres de chanvre, de sisal, de jute et de lin, etc. sont également valorisées pour fabriquer des éco-matériaux de construction, elles sont utilisées comme agent de renfort des matrices cimentaire grâce à leurs performances mécaniques [41].
Le faible impact environnemental des fibres végétales a permis à ces dernières de concurrencer les autres types de fibres, telles que les fibres de verre. En effet, les besoins en énergie pour la production de fibres de verre ou de fibres de lin diffèrent considérablement, ces besoins en énergie sont de 57.4 MJ/kg et 9.6 MJ/kg respectivement pour les fibres de verre et de lin [42].

3. Historique sur le chanvre

Originaire d'Asie centrale, le chanvre « Cannabis sativa », à ne pas confondre avec le chanvre indien « Cannabis indica », est cultivé depuis plus de 8 000 ans pour sa fibre textile et sa graine oléagineuse et ses vertus médicinales. Sa culture a perduré durant plusieurs siècles principalement en raison de l'utilisation de sa fibre pour réaliser les voiles de bateau, du cordage ou des vêtements, Il constitue jusqu'au milieu du siècle dernier une activité importante dans le monde entier.

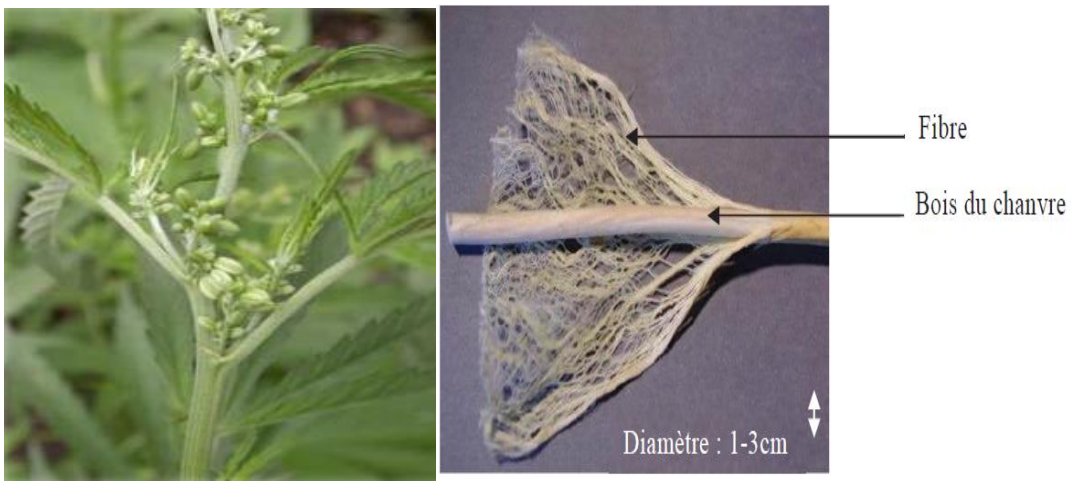
Au XVIII^{ème} siècle, la surface cultivée avoisinait les 180 000 hectares. Cette surface a diminué peu à peu compte tenu de la concurrence de nouveaux matériaux comme le coton ou plus tard les fibres synthétiques. Elle est tombée à quelques dizaines d'hectares dans les années soixante avant de connaître un certain renouveau dans les années soixante-dix. Actuellement, la surface cultivée annuellement en France est de l'ordre de 8000 ha.

4. Présentation du chanvre industriel

Le chanvre, chanvre textile, chanvre industriel ou chanvre agricole sont les appellations d'une variété de plantes annuelles naturellement dioïque, de la famille des Cannabis. Le chanvre comprend trois espèces : Cannabis sativa (le chanvre industriel), Cannabis indica (la forme psychotrope de la plante), Cannabis ruderalis (la forme sauvage). Parmi celles-ci, seule la première est destinée à la culture du chanvre industriel (afin de respecter les règles en vigueur), elle se distingue par une faible teneur en tétrahydrocannabinol (THC), moins de 0,2 %. En général, on trouve cette espèce en Asie centrale et particulièrement en Europe au printemps.

Le chanvre, Cannabis sativa (figure 1.12), est une plante à croissance rapide : il atteint en moyenne 3 m en 4 à 5 mois (qui est l'âge de maturité de cette plante). Il dispose d'un système radiculaire très développé autour d'une racine pivotante. Sa tige est creuse, elle a un diamètre moyen de 1 à 3 cm. Toutefois, les caractéristiques morphologiques (hauteur, diamètre, ramification) sont très dépendantes de l'espèce, de la densité du semis et des conditions environnementales [43].

La plante du chanvre est constituée d'une tige et de graines (figure 1.12):



(A) (B)

Figure 1.12. Plante de Chanvre (A), et composition d'une tige de chanvre (B) [40]

- **La tige du chanvre**

La tige de chanvre a une surface cannelée et un diamètre croissant de l'apex vers la base. Elle est constituée d'une forte proportion de bois (figure 1.13) qui, une fois récupérée, par traitement mécanique (défibrage), donne la chènevotte (bois de chanvre). A l'extérieur, on trouve en revanche des fibres corticales qui donnent la filasse. Le pourcentage de la chènevotte est compris entre 65 et 70 % et celui de la filasse entre 30 et 35 % en masse du poids sec de la tige.

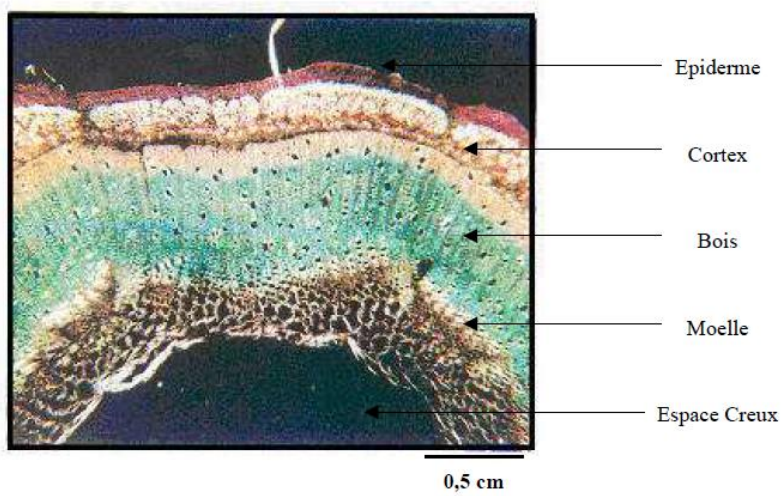


Figure 1.13. Micrographie d'une coupe transversale de tige de chanvre colorée au cramino-vert de Mriande ([44] cité par sedan [45])

- **Les graines de chanvre**

Le fruit du chanvre (le chènevis), improprement appelé graine, est un akène de forme ovoïde, de couleur gris-brunâtre, de 3 à 5 mm de longueur et contenant notamment 25 à 30 % de protéines et 35 % d'acides gras. Le chènevis bio trouve ses meilleures valorisations dans l'alimentation humaine et la cosmétique bio.

5. La récolte et la production du chanvre industriel

En France, la récolte du chanvre se fait selon deux modes. Le premier a pour but de récupérer uniquement la paille (tige) de la plante et est réalisé avant maturité des grains, fin août (pour un semis, fin avril début mai). Ce type de récolte est appelé non-battu, la plante est coupée à la faucheuse, disposée en andains et mise en balles cylindriques à la presse. Le second permet de récupérer les graines et la paille séparément à maturité des graines fin-septembre. Ce type de récolte appelé battu car une moissonneuse batteuse permet de récupérer les graines. Les étapes suivantes sont semblables au mode non battu.

Après la coupe des tiges, la paille peut être soit laissée exposée à la chaleur et à l'humidité au sol (rouissage au sol), soit immergée pendant 10 à 20 jours. Ce procédé, appelé rouissage à l'eau, est utilisé afin de faciliter le défibrage (séparation chènevotte-fibres). Après le rouissage, la paille subit un défibrage mécanique. Celui-ci permet de séparer la chènevotte des fibres situées en périphérie de la tige, et la découpe et le calibrage des particules de manière industrielle. En général, une tonne de paille donne 0.3 à 0.35 tonne des fibres et 0.55 à 0.65 tonne de chènevotte, le 0.05 à 0.15 tonne restant correspond à la poudre engendrée lors des broyages.

Les deux produits principaux issus de ces procédés sont donc les fibres et la chènevotte. Les fibres sont destinées à la papeterie et à l'industrie des laines d'isolation thermique, au renforcement des matrices minérales et organiques, etc. et la chènevotte est utilisée en vrac comme litière d'animaux pour ses fortes capacités d'absorption, et dans le bâtiment sous forme de granulats pour le béton de chanvre [46].

6. L'utilisation du chanvre

Les possibilités d'utilisation du chanvre sont nombreuses, il trouve ses débouchés à la fois dans l'industrie non alimentaire et alimentaire. Toutes les parties aériennes de la plante (fibre, chènevotte, chènevis et poudre) sont utilisées et valorisées dans une large palette de débouchés. Parmi les utilisations, on peut citer [47]:

- **La papeterie :** Les papiers spéciaux restent de loin le principal débouché des fibres (environ 90% de la production). Le papier fabriqué à partir de chanvre est un papier haut de gamme léger et résistant (type papier bible) dont les usages sont très variés (papier à cigarettes, papier pour l'édition, papier à usage graphique, etc.). Les fibres servent également à renforcer les papiers recyclés.
- **L'éco-construction :** l'utilisation du chanvre dans la construction est en forte expansion. la chènevotte est utilisée dans le béton de chanvre en mélange avec de la chaux. Les fibres sont valorisées dans l'isolation thermique des habitations (laines de chanvre) en substitution des laines minérales (laines de verre) et elles sont également ajoutées aux matrices cimentaires comme renfort.
- **Les produits issus de la plasturgie :** Les matières plastiques renforcées de fibres de chanvre ou les fibres de chanvre mélangées à d'autres fibres synthétiques et naturelles (lin, sisal, kénaf) trouvent de nombreuses applications dans les marchés de la plasturgie : automobile (intérieurs de porte, tableau de bord, feutres non tissés, etc.), habitat (profilés pour fenêtre, abords de piscine, jardinerie, etc.), emballage/conditionnement (palettes, etc.).
- **Le bien-être animal :** La chènevotte et la poudre ont la particularité de posséder un pouvoir absorbant important des liquides. De ce fait, la chènevotte est essentiellement utilisée en litière pour chevaux, petits animaux de compagnie, tandis que la poudre est utilisée en litière pour bovins et chats (après granulation).
- **L'alimentation humaine :** En alimentation humaine, les graines de chanvre peuvent être consommées sous de multiples formes, dans des biscuits, des farines, ou encore des boissons. Elles servent également à la production d'huile d'assaisonnement de grande qualité. En effet, les caractéristiques particulières de cette huile triturée à froid en font la plus équilibrée du marché grâce à sa richesse en oméga 3 et plus particulièrement grâce à son excellent rapport oméga 3/oméga 6 (1 oméga 3 pour 4 oméga 6). Sa composition correspond précisément aux besoins du corps humain.
- **Autres utilisations :** Les utilisations potentielles du chanvre sont très nombreuses et intéressantes pour d'autres marchés : paillage horticole et viticole (chènevotte), géotextile (fibre), amendement organique (poudre), cosmétique (huile), etc.

7. La composition du béton de chanvre

7.1. Introduction

Le béton de chanvre est un nouveau matériau de construction développé en France depuis le début des années 90. Il est obtenu en mélangeant dans des proportions variables deux constituants de nature différente, à savoir un granulat d'origine végétale (la chènevotte), une phase minérale liante de composition variable (chaux aérienne et/ou hydraulique ou ciment et éventuellement additionnée par des pouzzolanes naturelles), et de l'eau [48].

Avant de présenter les différentes formulations du béton de chanvre, nous allons tout d'abord faire une description générale des composants de celui-ci.

7.2. Les liants

Les liants actuellement utilisés ou en cours de développement pour confectionner des bétons de chanvre sont des liants minéraux à base de chaux aérienne, de chaux hydraulique; le liant qui convient le mieux pour un mariage intime avec les particules de chanvre est la chaux aérienne $Ca(OH)_2$. Les qualités de celle-ci ont été démontrées à savoir : perméabilité (comme pour le ciment, la porosité de la chaux aérienne augmente avec le rapport E/L, elle est de 51% pour un rapport E/L =0.8 [49]), caractère onctueux à fort dosage en eau sans risques de ségrégation (un tel comportement est moins évident en présence de suspensions de liants hydrauliques qui, sans le recours de l'adjuvantation, présentent des risques importants de ségrégation) et un caractère anti-fongique et antibactérien. Elle permet d'obtenir un résultat plus performant, du point de vue thermique, hydrique, acoustique et plus durable, dans le sens de la durabilité dans le temps mais aussi par rapport au respect de l'environnement et de la santé.

Sa limitation principale est le temps que prend la réaction de carbonatation, car celui-ci est difficilement compatible avec les impératifs des chantiers d'aujourd'hui. Ainsi, la chaux aérienne est complétée par d'autres types de liants, mais ceux-ci doivent être rigoureusement sélectionnés et dosés. Il s'agit grossièrement :

- **De liants hydrauliques (chaux hydraulique, ciment, etc.) :** le liant hydraulique le plus utilisé est la chaux hydraulique, ce liant par son caractère hydraulique permet l'acquisition de résistance à court terme du mélange (chaux aérienne+ chaux hydraulique) [50]. Cette propriété est souvent recherchée par l'utilisateur du béton de chanvre, par exemple pour un décoffrage rapide.
- **De liants pouzzolaniques :** le liant pouzzolanique généralement ajouté est la pouzzolane naturelle ou artificielle (contenant de la silice et de l'alumine réactive). Elle permet par sa réaction pouzzolanique de réagir en présence d'eau avec l'hydroxyde de calcium $Ca(OH)_2$ pour former des produits cimentaires générateurs de résistance de type silicate de calcium hydraté (CSH), et aluminate de calcium hydraté (CAH), l'enchevêtrement des cristaux néoformés augmente la cohésion et la densification du mélange et lui confère des performances mécaniques plus élevées et stables (résistances en compression et en traction, module). La cinétique de cette réaction est plus lente que celle d'un ciment, mais elle peut se prolonger sur plusieurs années [51].

Les vertus de la chaux (aérienne et hydraulique) ne se limitent pas aux avantages énumérés ci-dessus. En effet, la chaux connaît ces dernières années une reconsidération par la communauté scientifique et une utilisation accrue pour la restauration des anciens bâtis [52]. Des incompatibilités et des dommages importants sont observés suite à l'utilisation de liants très hydrauliques (ciment, ciment à maçonner) pour la restauration des anciens bâtis. Certes, ces liants exhibent une résistance meilleure mais elle est loin d'être favorable, les structures en maçonnerie présentent des mouvements résultant du tassement et de l'effet thermique (l'expansion thermique du ciment est supérieure à celle de la maçonnerie [53]). Le mortier de réparation doit être capable de poursuivre ces mouvements, un mortier de réparation trop résistant comme le ciment restreint les mouvements, ce qui engendre des contraintes pouvant conduire à des décollements en plaque ou de grosses fissures pour les enduits. Ces liants augmentent également l'aspiration capillaire dans le mur et y provoquent une rétention d'eau, aggravant de multiples pathologies (dissolution des mortiers de hourdage, cristallisation de sels dans la maçonnerie, etc.) [54].

Dans ce contexte, les mortiers à base de chaux aérienne constituent une solution relativement attrayante, ils présentent une bonne compatibilité avec les anciens bâtis [50,55]:

- La faible résistance de la chaux aérienne autorise une certaine souplesse du bâti, les éventuelles fissures engendrées sont imperceptibles (microfissures) et sans influence sur l'imperméabilité de l'enduit à l'eau ;
- La chaux, par sa perméabilité à la vapeur d'eau, permet l'évaporation des eaux contenues dans le mur suite à la transformation de cette dernière en vapeur (échauffement du mur au soleil par exemple).

Ces atouts de la chaux justifient son utilisation avec la chènevotte comme béton de chanvre, que ce soit pour les bâtiments neufs ou bien pour la restauration des anciens bâtis.

7.2.1. La chaux aérienne

La norme européenne EN 459-1 (chaux de construction) distingue deux catégories de chaux aériennes utilisées en construction : la chaux vive (notation Q selon la norme EN 459-1) et la chaux hydratée également qualifiée d'éteinte (notation S selon la norme EN 459-1), la présence ou non de l'oxyde de magnésium permet de distinguer deux types de chaux aériennes :

- **Chaux calcique** (notation CL selon la norme EN 459-1: Calcic Lime): chaux fabriquée à partir de l'oxyde de calcium;
- **Chaux dolomitique** (notation DL selon la norme EN 459-1: Dolomitic Lime) : chaux obtenue à partir de l'oxyde de calcium et de magnésium.

La chaux vive, de formule chimique CaO, est obtenue par calcination du calcaire ($CaCO_3$) à des températures d'environ 900°C. La réaction issue de cette cuisson génère une perte de masse de la matière (d'environ 45 %), en raison d'un fort dégagement de dioxyde de carbone (CO_2) [56] :

$CaCO_3 \longrightarrow CaO + CO_2$

L'hydratation de la chaux vive forme de la chaux arienne éteinte. Ce processus qui s'effectue par apport d'eau s'appelle extinction, il est très exothermique (1 155 kJ/kg de CaO), il correspond à un processus violent et dangereux donnant lieu à un bouillonnement et à un échauffement

pouvant atteindre 400°C. L'extinction s'accompagne également d'une augmentation du volume proche de 30 % [56]. Cette opération d'extinction produit l'hydroxyde de calcium $Ca(OH)_2$:

$CaO + H_2O \longrightarrow Ca(OH_2)$

La prise de la chaux aérienne s'effectue par carbonatation, c'est-à-dire par absorption du dioxyde de carbone CO_2 de l'air ambiant. C'est de ce processus qu'elle tire son nom "d'aérienne". La réaction de carbonatation s'écrit :

$Ca\ (OH)_2 + CO_2 \longrightarrow CaCO_3 + H_2O$

En milieu humide, la vapeur d'eau se lie au dioxyde de carbone de l'air pour former de l'acide carbonique en fixant le dioxyde de carbone contenu dans cet acide, la chaux aérienne exposée à une atmosphère humide se transforme à nouveau en calcaire. Le mécanisme de prise par carbonatation s'effectue en présence d'eau, d'où une maîtrise des conditions de mise en œuvre est indispensable. Ce phénomène de carbonatation peut s'étendre sur plusieurs années.

L'impact environnemental de la chaux aérienne est donc favorable puisque, outre l'énergie grise associée à son élaboration, le CO2 émis durant sa fabrication est susceptible d'être recapté en fin de vie.

7.2.2. La chaux hydraulique

La chaux hydraulique (NHL selon la norme NF EN 459-1, pour Natural Hydraulic Lime) la plus courante, est obtenue à partir de la calcination de calcaire contenant 10 à 20 % d'argile, elle tient son appellation au fait qu'elle fait prise au contact de l'eau.

Au cours de la cuisson, le carbonate de calcium se décompose, une partie du CaO formé s'allie à l'état solide avec les oxydes SiO_2, Al_2O_3, Fe_2O_3, contenus dans les minéraux d'argile en formant les silicates dicalcique (C_2S en notation cimentière) et tricalcique (C_3S en notation cimentière), la ferrite de calcium (C_2F en notation cimentière) et l'aluminate monocalcique (CA en notation cimentière), les proportions de ces constituants dépendant des quantités d'argiles initiales. Étant donné que la chaux hydraulique contient une quantité importante de l'oxyde de calcium libre CaO, elle s'éteint sous l'action de l'eau. En outre, plus la quantité de CaO libre est grande, moins elle est apte au durcissement hydraulique. Donc, les chaux hydrauliques font une double prise : une première prise à court terme de type hydraulique (assurée par la réaction entre les silicates de calcium ou aluminate et ferro-aluminate de calcium et l'eau qui forment des hydrates insolubles ainsi que de la chaux aérienne) au moment de la mise en oeuvre puis une prise secondaire de type aérienne pendant laquelle la chaux et les hydrates de calcium vont se carbonater au contact de l'air humide pour redonner le carbonate de calcium. Cette carbonatation au contact de l'air est très lente et peut prendre plusieurs années.

Enfin, la différence entre la chaux hydraulique et le ciment se situe au niveau de la proportion des composés minéralogiques qui composent les deux liants, le composé essentiel de la chaux hydraulique est le (C_2S) alors que pour les ciments Portland, d'autres silicates ont un rôle prépondérant (notamment le silicate tricalcique, C_3S ou alite), de plus, les proportions d'alumine et, surtout de fer, sont souvent très faibles dans la chaux. L'intervention des silico-aluminates ou des ferro-aluminates est ainsi le plus souvent négligeable. L'utilisation de la chaux hydraulique au lieu du ciment dans le béton de chanvre est conditionnée notamment par son faible impact

environnemental en comparaison avec le ciment, et également parce que la chaux hydraulique est plus poreuse (la chaux hydraulique par sa porosité facilite la pénétration du CO_2) que le ciment, ce qui permet une carbonatation adéquate de la chaux aérienne et évite l'effet de farinage. Deux autres effets néfastes du ciment sont observés par Cerezo [57] lorsqu'il a utilisé uniquement le ciment comme liant, le premier effet est l'effet de "farinage" où une couche de 2 ou 3 cm située en surface de l'éprouvette a durci, et l'intérieur de l'éprouvette reste en état de poudre. Cerezo [57] attribue ce phénomène à la compétitivité sur l'eau entre les granulats de chènevotte et le ciment, l'autre effet est "l'humidité rémanente", il a observé cet effet lorsqu'il a utilisé une grande quantité d'eau de gâchage, le ciment durcit lentement, et reste humide très longtemps après la mise en œuvre, ici, le désordre est attribué à la trop faible perméabilité de la matrice qui une fois durcie empêche l'eau contenue dans les granulats de chanvre de s'évacuer. Le béton de chanvre est resté humide même après 1 an et demi de conservation en atmosphère contrôlée avec une température de 20°C et une humidité relative de 50 %.

7.3. Le granulat de chanvre

La partie de la plante de chanvre utilisé comme granulat végétal est la chènevotte, elle est issue de la fragmentation du bois de la tige de chanvre. Les granulats de chanvre sont des particules beiges à blanches, allongées, de forme parallélépipédique de 1 à 4 mm de côté et de 4 à 20 mm de longueur. Les chènevottes sont légères, la chènevotte présente une masse volumique apparente et de squelette de l'ordre de 320 kg/m^3 et 1450 kg/m^3 respectivement, leur masse volumique en vrac varie entre 60 et 130 kg/m^3 [57].

Les particules de chanvre sont caractérisées par un fort pouvoir isolant, lié à la structure du bois, formée par des vaisseaux permettant la circulation de la sève (figure 1.14). Après séchage, ces vaisseaux se vident de la sève laissant ainsi place à des alvéoles renfermant de l'air, d'où le caractère isolant.

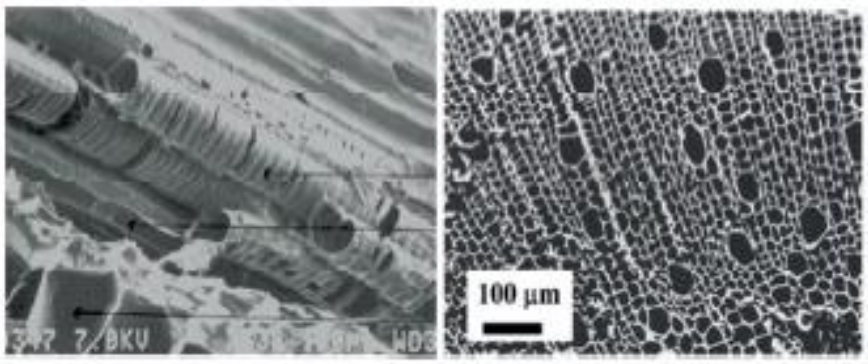


Figure 1.14. Grossissement au MEB d'une particule de chanvre Garcia-Jaldon [58] cité par Yacine Ait Ouméziane [59]

La présence de ces alvéoles et leur taille (comprise entre 10 et 40 µm) permettent d'expliquer trois caractéristiques essentielles des particules de chanvre : leur porosité et leur compressibilité ainsi que leur pouvoir absorbant élevé. Cerezo [57] et Couedel [60] montrent des capacités d'absorption de l'ordre de 250% et une cinétique d'absorption très rapide (figure 1.15). Cette dernière caractéristique a une influence sur le dosage en eau nécessaire lors de la confection de mortiers et bétons de chanvre formulés à base de chènevotte.

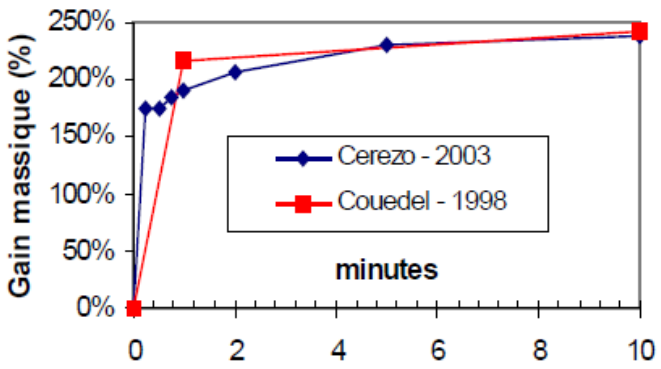


Figure 1.15. Gain massique et taux de saturation pour des particules de chanvre sec (Cerezo [57] et Couedel [60]) [57]

De par leur nature végétale, les particules de chènevotte présentent une certaine variabilité (climat lors de la croissance, implantation, type de sol, etc.), mais leur composition chimique est à peu près la suivante : 50-60% de cellulose, 15-20% d'hémicellulose, 20-30% de lignine et 4-5% de cendres [44].

7.4. Formulations de bétons de chanvre

De nombreuses formulations de bétons de chanvre ont été testées par différents auteurs. Les propriétés obtenues dépendent fortement de ces compositions, mais aussi de la nature du liant et du mode de mise en oeuvre du matériau. Les paramètres généralement utilisés pour définir la composition des mélanges sont leurs proportions massiques à l'état frais (rapport massique E/L (masse d'eau/masse de liant), et rapport massique C/L (masse de chènevotte/masse de liant)).

Comme il est mentionné plus haut, les propriétés du béton de chanvre dépendent fortement de la formulation employée, selon que l'un ou l'autre des constituants sera prépondérant dans le mélange lorsque le dosage en liant est faible par rapport à celui en granulats végétaux. Le matériau peut être vu comme un assemblage de particules reliées entre elles par des ponts de liant cette structure se rapproche de celle du chanvre en vrac, les propriétés de ce type de matériau sont proches de celles de la particule, c'est-à-dire bon isolant thermique et faibles caractéristiques mécaniques, et lorsque le dosage en liant est fort, les particules sont noyées dans une matrice de liant continue, le comportement du matériau se rapproche de celui du liant pur. Entre ces deux dosages extrêmes, la structure du béton de chanvre s'apparente à celle d'un empilement d'éléments, constitués d'une particule végétale entourée d'un mince film de liant. Les propriétés de ce type de matériau sont donc intermédiaires entre celles du liant et celles des particules végétales, ces propriétés contradictoires, rendent nécessaire l'optimisation de la formulation du béton de chanvre afin d'obtenir selon l'utilisation que l'on désire en faire le meilleur compromis possible entre performances mécaniques et thermiques.

L'optimisation a permis de faire émerger quatre formulations types de béton de chanvre identifiées et validées [48] : les formulations "Toit", "Mur", "Enduit" et "Sol" (Tableau 1.1). Le nom de chaque formulation indique son utilisation dans l'habitat. La formulation "Toit" contient une forte proportion de chènevotte et peu de liant, elle sert à isoler thermiquement les toitures. La formulation "Mur" est utilisée comme matériau de remplissage des murs, il contient une quantité de liant plus importante et possède donc de meilleures caractéristiques mécaniques, le

liant joue aussi le rôle de stabilisateur de la structure, il évite notamment les variations dimensionnelles de l'ensemble sous le poids propre des particules. La formulation "sol", quant à elle, contient une quantité de liant plus importante et possède donc de meilleures caractéristiques mécaniques tout en conservant un bon pouvoir isolant. Enfin, dans la formulation "Enduit", la chènevotte est noyée dans la matrice de liant, le comportement du matériau se rapproche de celui du liant pur, et les performances sont d'ordre mécanique.

Tableau 1.1. Dosages des constituants donnés par les règles professionnelles d'exécution d'ouvrages en béton de chanvre [48]

	Chanvre (kg/m^3)	Liant (kg/m^3)	Eau (kg/m^3)	masse volumique sèche (kg/m^3)
Toit	100	100	200	250
Sol	100	275	500	500
Mur	100	220	350	420
Enduit	100	800	500	800

Les dosages sont donnés à titre d'exemple pour un liant commercialisé sous le nom de Tradical 70 (Le tradical 70 est un liant dont la composition volumique est de 75 % chaux aérienne, de 15 % liant hydraulique et 10% liant puzzolanique).

D'autre auteur ([58] cité par [59]) définie les dosages en constituants par des pourcentages volumiques (figure 1.16).

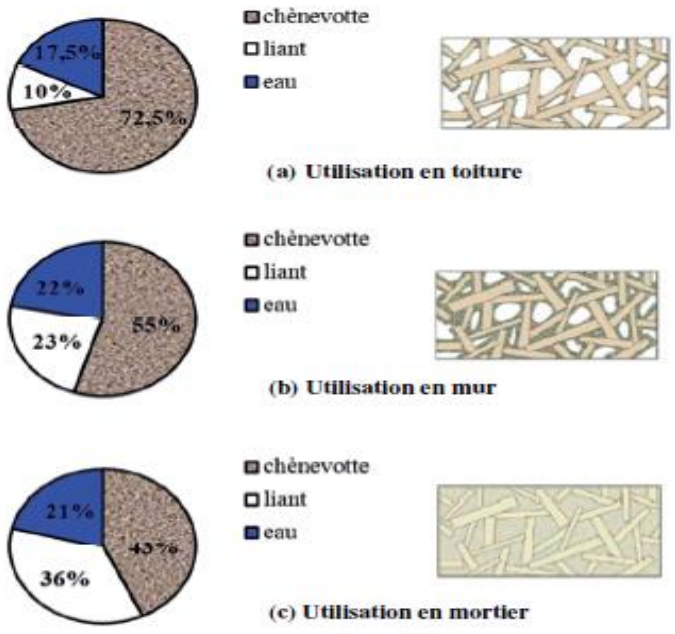


Figure 1.16. Pourcentage volumique de chaque constituant et vue schématique de la structure pour obtenir 1 m^3 de béton de chanvre pour une utilisation en toiture (a), en mur (b) et en mortier (c) ([58] cité par [59])

8. Conservation et séchage

La conservation, le séchage et la carbonatation du béton de chanvre, sont trois paramètres très importants (ils conditionnent le durcissement du béton) et liés entre eux. En effet, l'évolution dans le temps de la réaction de carbonatation de la chaux aérienne de l'extérieur vers l'intérieur du béton est directement liée à la quantité d'eau présente dans ce dernier et au mode de conservation de celui-ci. Si initialement une grande quantité d'eau de gâchage est présente, le séchage du béton de chanvre aura une durée variable (selon le mode de conservation et la porosité du béton), une longue durée de séchage ralentira la vitesse de diffusion du CO_2 à l'intérieur du béton de chanvre et par la suite la vitesse de carbonatation. Un séchage très rapide peut ne pas laisser le temps à la réaction de carbonatation de la chaux de se produire convenablement.

Pour une ambiance contrôlée de (23°C, 65% HR), Evrard [61] a mesuré des durées de séchage respectives de 19 jours pour un mélange en vrac (de masse volumique ρ=309 kg/m^3) et de 33 jours pour un mélange tassé (de masse volumique ρ=470 kg/m^3). En conditions extérieures, l'auteur note que l'équilibre hydrique avec l'environnement extérieur est atteint au bout de 3 mois de séchage, et qu'à cette période environ 91% de l'eau de gâchage est évaporée.

Le compactage influe sur les processus de séchage et de carbonatation du béton de chanvre. Cerezo [57] a observé un ralentissement de ces deux processus lorsque la contrainte de compactage augmente. Il attribue ce ralentissement à la diminution de la porosité macroscopique associée, et donc du réseau capillaire. L'eau aurait donc plus de difficultés à être évacuée et le CO_2 à générer la carbonatation de la chaux aérienne.

9. Les différents types de produits existants

9.1. Béton de chanvre coulé sur place

C'est l'application la plus répandue du béton de chanvre et celle visée par les Règles Professionnelles d'exécution du béton de chanvre. Elle consiste à mettre en place manuellement le béton de chanvre à l'état frais dans un coffrage ou entre deux banches (figure 1.17), le béton de chanvre préalablement obtenu par le mélange de différents constituants : chènevotte, liant et eau dans une bétonnière ou un malaxeur, doit être gâché avec une quantité importante d'eau. Le rapport E/L recommandé par les Règles Professionnelles d'exécution varie entre 1.6 et 2.

Figure 1.17. Béton de chanvre coulé sur place [62]

La quantité importante du dosage en eau par rapport au besoin réel du liant intervient au mélange pour se substituer à une part importante de l'eau de gâchage absorbée par la chènevotte au moment du malaxage.

L'inconvénient de cette méthode réside dans le fait qu'elle nécessite un temps de séchage qui peut prendre plusieurs mois, c'est la raison pour laquelle d'autres modes de mise en oeuvre ainsi que d'autres technologies de réalisation des ouvrages en béton de chanvre sont actuellement proposés. La technique de projection mécanique et celle de préfabrication du béton de chanvre sont présentées dans les deux paragraphes suivants.

9.2. Béton de chanvre projeté

L'avantage de cette application réside dans la limitation de la quantité d'eau nécessaire à la mise en place. La technique de projection par voie sèche consiste au pré-mélange à sec des constituants (chènevotte et liant) puis à la pulvérisation au niveau de la lance de projection d'une quantité d'eau réduite (figure 1.18). Ce qui ne laisse pas le temps à la chènevotte d'absorber l'eau de gâchage, et de réduire par la suite le temps de séchage [63], entre autre la lance du mélange permet à celui-ci d'emmagasiner une énergie cinétique, source d'une compaction du mélange au moment du contact avec la paroi. Il en résulte un matériau plus dense et par conséquent des performances mécaniques plus élevées.

Figure 1.18. Béton de chanvre projeté [64]

9.3. Béton de chanvre préfabriqué

Cette technique est la plus avantageuse, elle permet tout d'abord de limiter le temps de réalisation et de s'affranchir, sur chantier, les problématiques de temps de séchage du béton de chanvre. La préfabrication présente également des avantages en termes de mise en œuvre, elle n'a pas recours au coffrage et à la main d'oeuvre qualifiée (figure 1.19). En ce qui concerne la qualité et la fiabilité des produits proposés, la préfabrication facilite la maîtrise et le contrôle des matières premières ainsi que le processus de fabrication (énergie de compactage, température et hygrométrie). Ceci permet de garantir des caractéristiques techniques constantes.

Figure 1.19. Béton de chanvre préfabriqué [65]

10. Caractéristiques du béton de chanvre

Le béton de chanvre est un matériau composite utilisé pour réaliser des éco-constructions de bâtiments. Ce matériau n'étant pas porteur, il est utilisé comme matériau de remplissage d'une structure porteuse. Les principales caractéristiques du béton de chanvre sont présentées ci-dessus, elles sont fortement liées à sa formulation :

- **Masse volumique:** Le béton de chanvre fait partie de la famille des bétons de bois et à ce titre, sa principale caractéristique est sa légèreté. En effet, il présente des masses volumiques initiales inférieures à 1000 kg/m^3 et des masses volumiques sèches allant de 200 à 600 kg/m^3 [57], ce qui est comparable aux valeurs rencontrées dans le cas du béton cellulaire. L'intérêt de ce matériau, c'est qu'il est facile à mettre en œuvre sur place, ou lorsqu'il est vendu manufacturé sous forme de parpaings. De plus, ce matériau allégé nécessite des fondations moins importantes lors de la construction.

- **Porosité:** La porosité du béton de chanvre est une caractéristique très importante, car elle conditionne son comportement hygrothermique (pouvoir absorbant, isolation thermique, etc.) et mécanique (résistance de traction, compression, déformation sous la contrainte, etc.). Le béton de chanvre possède une porosité très importante. Selon Collet et Cerezo [57, 66] cette porosité est presqu'entièrement interconnectée, les valeurs de porosités ouverte et totale étant très proches. Collet [66] a mesuré pour un enduit chaux-chanvre une porosité de 63% et pour une formulation "mur" une porosité de 76 à 78%. Les bétons de chanvre caractérisés par Cerezo [57] ont pour leur part une porosité allant de 77% pour une formulation "dalle" à 80% pour une formulation "toit". En terme de composition volumique de la porosité, plusieurs auteurs [57, 66, 67] s'accordent à définir trois échelles de porosité au sein du matériau béton de chanvre, rattachées aux composants pris séparément et à l'empilement granulaire:

  La porosité intraliant avec des pores de l'ordre de 1 μm;
  La porosité intraparticule, avec des pores de 10 à 40 μm;
  La porosité macroscopique (liée à l'empilement des particules dans le liant), dont les pores ont une dimension de 1 mm à 1 cm.

  Comme pour les bétons hydrauliques, la porosité du béton de chanvre diminue avec le temps. En effet, la carbonatation comme la formation d'hydrates induisent un comblement des pores du matériau avec le temps. Une mise en oeuvre par compactage,

tassage ou projection diminue également la porosité du béton de chanvre [57] suite à un réarrangement des particules.

- **Conductivité thermique:** La conductivité thermique d'un matériau caractérise sa capacité à transmettre la chaleur par conduction. La conductivité thermique est une grandeur intrinsèque du matériau qui dépend uniquement de ses constituants et de sa microstructure. De faibles conductivités thermiques assurent un meilleur pouvoir isolant aux matériaux.

La forte porosité du béton de chanvre lui confère une conductivité thermique adaptée pour une isolation répartie, cette dernière varie selon la formulation elle est comprise entre 0,06 et 0,2 $W.m^{-1}.K^{-1}$. Selon les auteurs [57,68], la conductivité thermique du béton de chanvre augmente avec l'augmentation de la masse volumique et avec l'humidité relative de l'ambiance.

En plus des caractéristiques énumérées ci-dessus, le béton de chanvre possède une autre propriété très intéressante, c'est son pouvoir de stocker et déstocker la vapeur au sein du matériau (lié à sa porosité), par conséquent, il contribue à stabiliser l'humidité relative intérieure du local, source de confort dans le bâtiment.

Ces caractéristiques permettent donc de constituer un matériau multifonctionnel relativement attrayant, source de confort dans le bâtiment et de répondre aux exigences des réglementations thermiques tout en économisant l'énergie.

11. Propriétés mécaniques du béton de chanvre

Les propriétés mécaniques d'un matériau décrivent sa réponse aux sollicitations appliquées, les grandeurs mécaniques généralement utilisées pour la description de leurs propriétés sont : la résistance en compression (MPa), le module d'Young (MPa), la déformation à la rupture et le coefficient de Poisson ν.

Ces valeurs permettent alors de dimensionner les structures en fonction des sollicitations subies par le matériau. Le béton de chanvre n'assure pas un rôle porteur dans la structure, mais il convient de garantir un minimum de résistance et de rigidité à ce matériau, de ce fait l'étude de ses propriétés mécaniques est nécessaire et a fait l'objet de plusieurs travaux de recherche [57, 68, 69].

Cereso [57], dans le cadre de sa thèse, a réalisé des essais mécaniques pour différentes formulations de bétons de chanvres. Les essais sont effectués sur des éprouvettes cylindriques (hauteur 320 mm et diamètre 160 mm), compactées avec une presse électromécanique sous une contrainte de compactage de 0.05 MPa sur plusieurs couches qui ne dépassent les 8 cm afin d'éviter le tassement non homogène des couches trop épaisses de matériau frais. Les échantillons sont ensuite conservés dans les conditions suivantes : Température de 20°C et Taux d'humidité relative H_R de 50 %.

Les essais sont réalisés par la suite dans des échéances fixées à 21 jours, 3 mois, 6 mois, 12 mois et 24 mois pour l'ensemble des formulations. Les résultats des tests montrent que le béton de chanvre possède un comportement élastoplastique non fragile et une forte déformabilité sous contrainte et la possibilité de reprise des efforts même après avoir atteint la résistance mécanique maximale. Ces résultats sont confirmés par Bruijn et al [68] (figure 1.20).

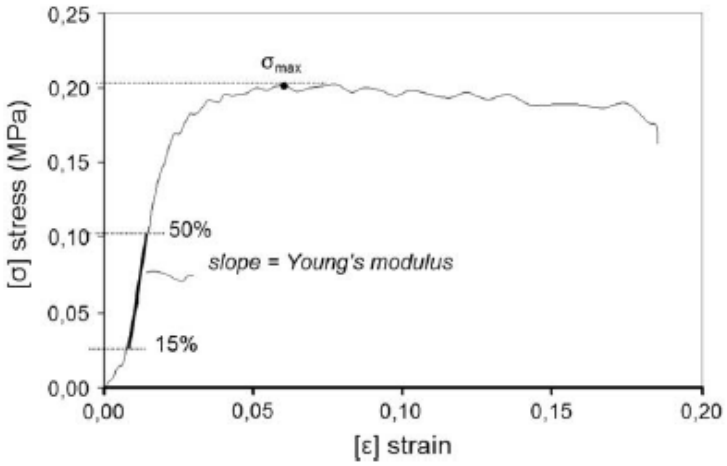


Figure 1.20. La courbe contrainte déformation [68]

La synthèse des résultats obtenus pour différents dosages en liant (faible dosage, dosage intermédiaire et fort dosage) est montrée dans le tableau 1.2.

Tableau 1.2. Caractéristiques mécaniques du béton de chanvre pour différents dosages en liant Cerezo[57]

Dosage en liant	**Concentration volumique liant**	**ρ (kg/m^3)**	**σ_{max} de compression (MPa)**	**E (MPa)**	**$\varepsilon_{\sigma max}$**	**ν**
Faible	10 %	250	0,25	4	0,15	0,05
Intermédiaire	19-29 %	350 - 500	0,35-0,8	32-95	0,05-0,06	0,08-0,16
Fort	40 %	600- 660	1,15	140-160	0,04	0,2

Cerezo [57] a observé que les propriétés mécaniques du béton de chanvre dépendent de la concentration volumique du liant, plus le dosage en liant est faible plus la résistance mécanique, le module d'élasticité et le coefficient de Poisson sont faibles et plus la déformation est élevée. Les grandeurs mécaniques varient entre 0,25 et 1,25 MPa pour la résistance de compression et entre 4 et 160 MPa pour le module de Young.

Ces constatations sont également observées par Magniont et al [69]. Le béton de chanvre confectionné avec un fort dosage en liant et un faible dosage en granulats de chènevotte (un pourcentage massique de chènevotte = 10%) présente une résistance à la compression à 49 jours meilleure (de l'ordre de 2 MPa) que celle des bétons confectionnés avec les dosages de 25% et 32% de chènevotte (résistance en compression à 49 jours très faible, de l'ordre de 0.23 MPa).

Pour des concentrations volumiques faibles en liant, le béton de chanvre se comporte comme un empilement de particules compressibles, reliées entre elles par des "ponts" rigides de liant. En début de prise, le comportement mécanique est piloté essentiellement par le comportement des particules, par conséquent, la déformation est élevée (de l'ordre de 15 %) et les autres propriétés mécaniques sont faibles. Dans les cas où les dosages sont intermédiaires et forts, le niveau des performances mécaniques du béton de chanvre dépend de l'épaisseur de la couche du liant enrobant les particules.

Cerezo [57] a également mis en évidence le caractère évolutif des propriétés mécaniques des formulations testées, et il a pu diviser le développement de la prise de chaque formulation en 3 phases. Pour la résistance à la compression par exemple, les phases suivantes sont observées (figure 1.21):

- Entre 0 et 3 mois, σ_{max} est quasiment multipliée par deux pour l'ensemble des formulations;
- Entre 3 mois et 1 an, la valeur de σ_{max} croît de 10 à 50 % selon la formulation.
- Au bout d'un an, σ_{max} augmente d'une manière beaucoup plus lente (< 10 % par an).

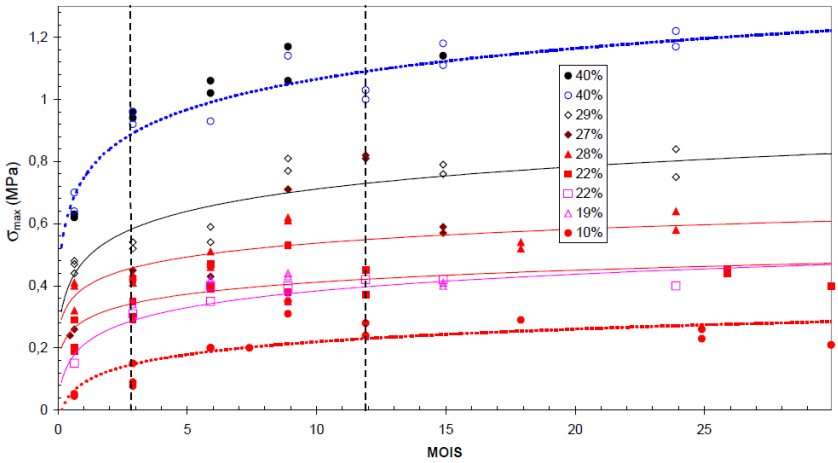


Figure 1.21. Évolution de σ_{max} en fonction du temps pour les différentes formulations [57]

Le niveau de compactage du béton de chanvre a un effet non négligeable sur les performances du béton de chanvre [57]. Les résultats expérimentaux trouvés par Cerezo [57] montrent que la résistance en compression peut atteindre des niveaux deux fois plus élevés en jouant simplement sur le niveau de compactage, ceci est attribué à la diminution de la porosité du matériau. Toutefois, la diminution de la porosité du béton de chanvre entraîne une baisse de son pouvoir isolant qui constitue un des atouts de ce matériau, il est donc nécessaire de limiter le niveau de compactage de façon à ne pas écraser les particules végétales et conserver ainsi une faible conductivité.

CHAPITRE 2
COMPORTEMENT DES BETONS AUX HAUTES TEMPERATURES

CHAPITRE 2 : COMPORTEMENT DES BETONS AUX HAUTES TEMPERATURES

1. Introduction

L'incendie est un phénomène redoutable qui concerne les ouvrages en béton et qui occasionne chaque année des pertes de vies humaines et matérielles considérables. Les incendies les plus connus dans le monde sont ceux des tunnels sous la Manche (1996 et 2008), du Mont Blanc (1999) et du Fréjus (2005) en France, tunnels du Storebealt (1994) au Danemark, du Tauern (1999) en Autriche ou bien encore tunnel du Gothard (2001) en Suisse ainsi que la tour de Windsor à Madrid (2005) [70]. Ces incendies ont mis en avant l'impact des hautes températures sur l'endommagement du béton. Ces incendies montrent d'importantes dégradations caractérisées par un détachement de matière, une perte des performances mécaniques, voire la mise hors service de l'ouvrage.

Le présent chapitre présente une analyse bibliographique des travaux de recherche sur le comportement des bétons portés aux températures élevées. Cette analyse portera d'une part sur l'évolution des propriétés physiques, thermiques ainsi que les propriétés mécaniques des bétons portés aux hautes températures et d'autre part sur les mécanismes de l'instabilité thermique du béton avec les paramètres pouvant influencer cette dernière. Enfin, nous présentons l'état de l'art des bétons autoplaçants portés aux hautes températures.

2. Terminologie feu et incendie

Un feu est une combustion qui prend une dimension telle qu'il devient un incendie. En tant que phénomène physique, un incendie se définit comme le résultat d'une combinaison chaleur – carburant – oxygène. En effet, pour qu'un feu (une combustion) puisse prendre naissance, il faut la présence conjuguée de trois éléments [71] :

- Source d'inflammation : source d'énergie nécessaire au démarrage de la combustion (Flamme, étincelle, décharge électrique, etc.);
- Présence d'un carburant : corps qui se combinant avec le combustible permet la combustion (oxygène, air, peroxyde, etc.);
- Présence d'un combustible : matière inflammable solide (bois, charbon, papier, etc.); liquide (essence, alcools, etc.); gazeux (butane, propane, etc.).

Ces trois composantes sont souvent représentées graphiquement sous forme d'un triangle appelé triangle du feu (figure 2.1).

Figure 2.1. Triangle du feu [71]

3. Le développement d'un incendie

Une fois que le feu est initié par la présence des trois éléments qui forment le triangle de feu, il se développe un incendie suivant deux phases principales, une phase de développement pendant laquelle la température s'élève puis une phase de décroissance où cette température va diminuer. Les différentes phases d'un incendie réel sont représentées sur la figure 2.2 et comportent les quatre phases suivantes [72]:

- **Première phase "Croissance de Feu" :** Au cours de cette phase, le feu est localisé, son développement et sa propagation peuvent être facilement contrôlés s'il est rapidement découvert et si une efficace lutte contre l'incendie est activée. En contrepartie, si le feu localisé est suffisamment alimenté en matériau combustible, et s'il y a une offre suffisante d'oxygène, le feu peut se généraliser en conduisant à un "flashover". Le principal danger à ce stade est le risque pour la sécurité des personnes en raison de la production de grandes quantités de fumée et de gaz toxiques par le feu.
- **Deuxième phase "Embrasement généralisé ou flashover" :** Les gaz chauds accumulés portent les combustibles présents à leur température d'inflammation et l'ensemble du volume s'embrase brutalement (flashover). La présence de gaz inflammables peut également provoquer des déflagrations plus ou moins violentes, l'incendie se propage brutalement en fonction de la circulation de l'air et des combustibles mobilisables. Après cette phase, la température de la flamme augmente rapidement.
- **Troisième phase "Embrasement stable":** Dans cette phase, la combustion est caractérisée par un régime d'embrasement presque stable, et la vitesse de combustion sera contrôlée par la ventilation, l'incendie atteint son point maximal.
- **Quatrième phase "Retombée du feu" :** Après une période de feu continu, les matériaux les plus combustibles seront consommés et la vitesse de combustion commence à diminuer. Le feu finit par décroître quand tous les matériaux combustibles dans l'enceinte de feu sont consommés.

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

- quantité et répartition des matériaux combustibles (charge incendie) ;
- vitesse de combustion de ces matériaux ;
- conditions de ventilation (ouvertures) ;
- géométrie du compartiment ;
- propriétés thermiques des parois du compartiment;
- mesures actives de lutte contre l’incendie.

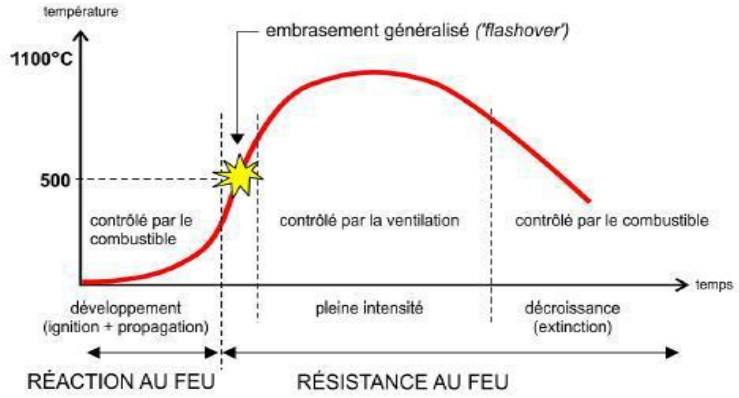


Figure 2.2. Phases de développement d'un incendie

4. Courbes températures-temps normalisées

Les courbes températures- temps sont des courbes conventionnelles, normalisées, censées se rapprocher de celle qui se développe lors d'un incendie réel. Ces courbes sont établies à partir de l'expérience sur des feux réels, elles sont utilisées pour des essais en laboratoire sur des matériaux et des éléments de construction. Les courbes températures-temps différent d'un pays à un autre et dépendent de la destination de la structure. Parmi ces courbes on peut citer:

4.1. La courbe normalisé ISO 834

La courbe ISO 834 (reconnue internationalement), dite d'incendie conventionnel, est une courbe qui est censée représenter un scénario d'incendie développé dans un bâtiment, Elle présente une augmentation continue et logarithmique avec le temps (figure 2.3). Cette courbe atteint environ 500° C après seulement 3 minutes, 800°C après 30 minutes et plus de 1000° C après 90 minutes. L'équation régissant la variation de cette courbe est:

$\theta g = 20+345 \log10 (8t+1)$

θg : représente la température des gaz dans le compartiment en feu (en °C) ou la température des gaz à proximité de l'élément et non l'agression des flammes;
t: temps exprimé en minutes.

4.2. La courbe hydrocarbure (HC)

C'est une courbe qui tient compte de la sévérité lors d'un incendie sur les ouvrages de pétrochimie de certains combustibles caractérisés par un taux de combustion élevé, tels que l'essence, les produits chimiques, etc. Cette courbe est applicable dans le cas de petits incendies liés aux produits pétroliers tels que les incendies de réservoirs de voiture, camions citernes transportant du fuel, de l'essence ou certains produits chimiques (figure 2.3). Cette courbe est caractérisée par une augmentation de la température beaucoup plus rapide que la courbe ISO 834, et elle se stabilise à 1100°C. L'équation caractérisant la variation de cette courbe est:

$\theta g=20+1080. (1-0,325. e^{-0,167t} - 0,675. e^{-2,5t})$

Où:

θg : représente la température des gaz dans le compartiment en feu (en °C) ou la température des gaz à proximité de l'élément et non l'agression des flammes;
t: temps exprimé en minutes.

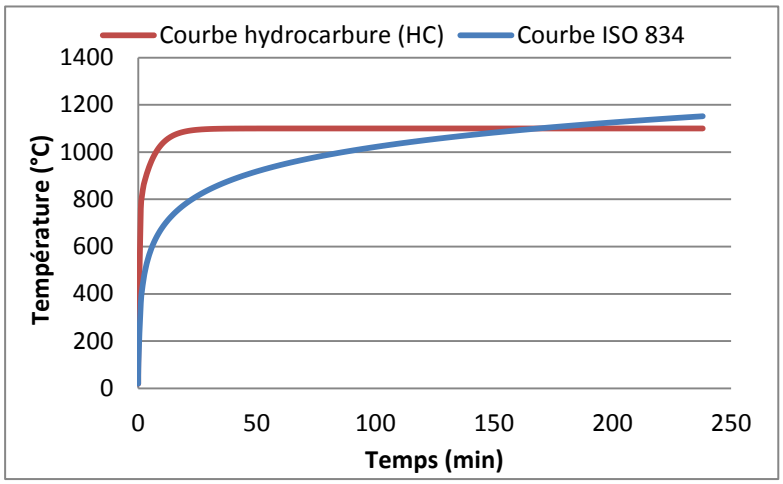


Figure 2.3. Courbes température-temps ISO 834 et HC

Ces deux courbes se caractérisent par une montée en température très rapide, et ne présentent pas de phase de refroidissement à proprement parler. Sur la courbe de feu ISO, malgré un ralentissement de l'échauffement, la température des gaz augmente indéfiniment, tandis que sur la courbe HC, la température se stabilise au bout de 30 min.

5. Evolution des propriétés physiques

5.1. Variation de la porosité

La mesure de la porosité à l'eau ou au mercure des bétons chauffés a fait l'objet de plusieurs études. Les résultats ont montré une augmentation de la porosité avec la température pour les bétons ordinaires, autoplaçants ou à hautes performances en présence ou non des fibres [73, 74, 75, 76, 77].

Fares [75] a étudié l'effet des hautes températures sur la porosité des bétons ordinaire et autoplaçants (un béton vibré de résistance BV = 41MPa, et deux BAP de résistance initiale BAP1 = 37 MPa et BAP2 = 54 MPa) (figure 2.4). Les résultats ont montré une augmentation de la porosité avec la température. Entre 300 et 450° C, la porosité augmente fortement pour le BAP2 (une augmentation de 4%) tandis qu'elle est moins importante pour les deux autres bétons (environ 1%). Au-delà de 450° C, les écarts entre les porosités sont importants à cause d'une évolution différente de la microstructure des trois bétons.

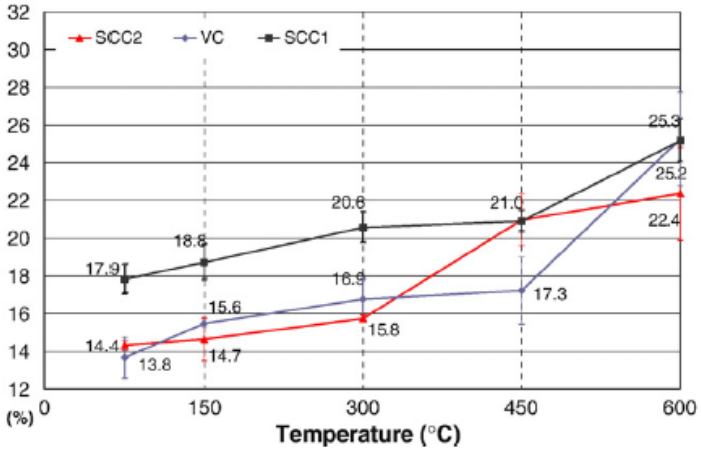


Figure 2.4. Évolution de la porosité des BAP et BO en fonction de la température [75]

L'influence de la nature et du dosage des fibres sur la porosité des bétons (un béton ordinaire et un béton à hautes performances) chauffés, a été étudié par Pliya [76]. Trois proportions des fibres de polypropylène (1; 1.5; 2 kg/m^3) et trois proportions des fibres métalliques (20 ; 30 ; 40 kg/m^3) sont utilisées dans cette étude. L'auteur observe une croissance rapide de la porosité des bétons contenant des fibres de polypropylène entre le chauffage à 150°C et le chauffage à 300°C par rapport aux bétons sans fibres (figure 2.5), l'auteur attribue la porosité supplémentaire à la fusion et l'évaporation des fibres de polypropylènes et également au rapport E/C. Plus le rapport E/C est faible, plus l'endommagement est important. En présence des fibres métalliques, l'augmentation rapide de la porosité ne s'observe qu'au-delà du chauffage à 300°C. Au-delà de 450°C, l'augmentation de la porosité des bétons de fibres métalliques est plus importante que celle des bétons sans fibres. Ce phénomène est lié à l'affaiblissement de la liaison pâte de ciment durcie-fibres consécutive à la déshydratation des C-S-H. De plus, les micropores existants entre fibres et matrice prennent des tailles plus importantes.

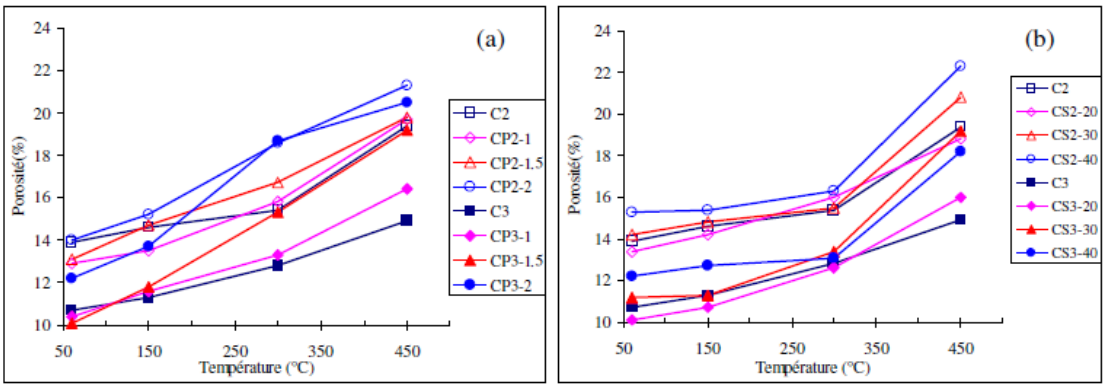


Figure 2.5. Évolution comparée de la porosité des bétons de fibres de polypropylène (a) et de fibres métalliques (b) [76]

5.2. Perte de masse

Lors de l'échauffement du béton à haute température, sa masse diminue à cause de l'évaporation de l'eau et la déshydratation progressive du gel C-S-H. Il est important de distinguer la perte de

masse des bétons mesurée en régime permanent (en fixant la température) de celle réalisée en régime transitoire (en fixant la vitesse de chauffage) des cycles thermiques.

Hager [73] a mesuré la perte de masse en régime permanant durant un séchage à 105°C. Pour un béton ordinaire et des bétons à hautes performances fibrés (avec des fibres de polypropylène) et sans fibres, les essais ont été menés sur des échantillons ayant un âge supérieur à 4 ans pour les bétons non fibrés et 2 ans pour les bétons fibrés. Les résultats (figure 2.6) montrent une perte en masse d'autant plus importante pour le béton ordinaire que pour les bétons à haute performance, (résultat confirmé par Xing [78]), et une cinétique de perte plus élevée pour le béton ordinaire que pour les bétons à haute performance. Ceci est attribué à la structure poreuse du béton ordinaire qui facilite l'évaporation de l'eau par rapport à celle des BHP.

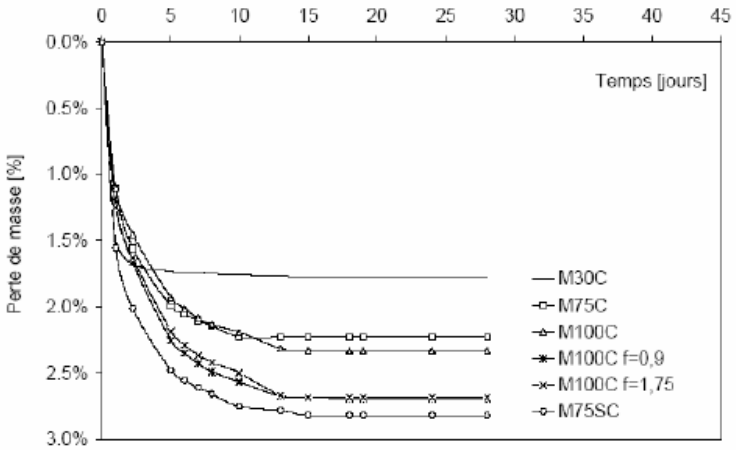


Figure 2.6. Perte de masse des éprouvettes de béton étuvées à 105°C [73]

L'effet de la taille de l'éprouvette sur la perte de masse a été également étudié par Hager [73]. Des éprouvettes de dimensions Ø 104 x 300 mm et Ø 104 x 60 mm, provenant de la même gâché de bétons, sont sollicitées suivant un régime permanent à 105°C. Les résultats montrent une perte de masse totale identique pour les deux éprouvettes (figure 2.7). Cependant la cinétique de perte de masse est plus rapide pour les éprouvettes de petites dimensions.

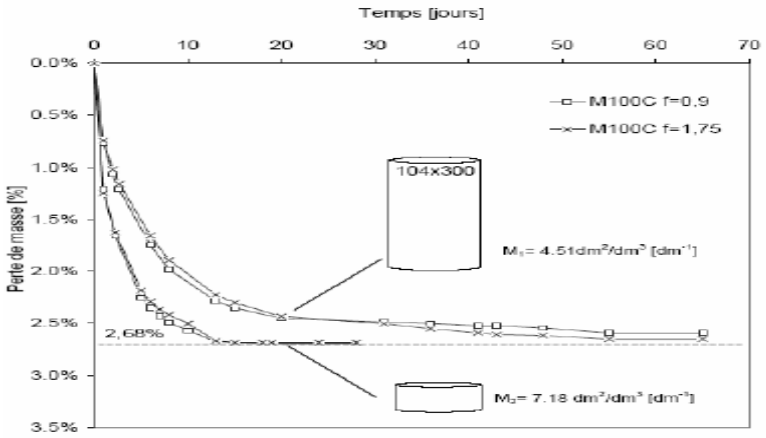


Figure 2.7. Perte de masse des éprouvettes Ø104x30 mm et Ø104x60 mm étuvées à 105°C [73]

La nature minéralogique des granulats influence le degré de la perte de masse. Les résultats de Xing [78] montrent (figure 2.8) que la perte de masse des bétons est moins significative pour les bétons de granulats siliceux que pour les bétons de granulats calcaires ou silico-calcaires.

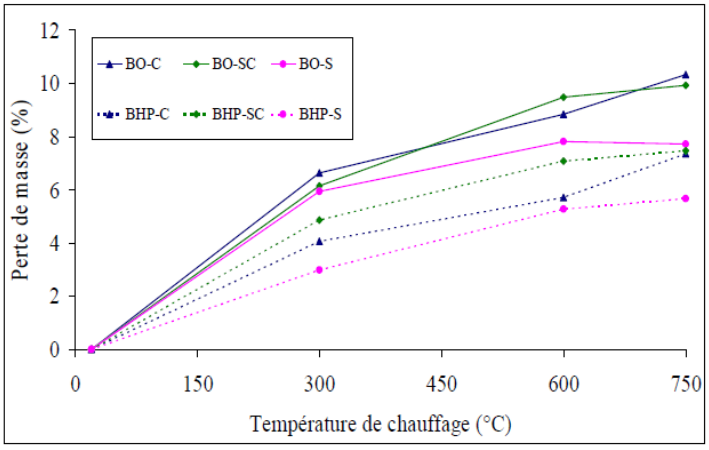


Figure 2.8. Perte de masse des bétons testés en fonction de la température de chauffage: une plus faible perte de masse pour les BHP que les BO [78]

6. Évolution des propriétés thermiques

6.1. Conductivité thermique

La conductivité thermique est l'aptitude d'un matériau à conduire de la chaleur. Elle est mesurée en joules par secondes pour 1 mètre carré de surface et 1 mètre d'épaisseur d'un corps pour une différence de température de 1°C. La conductivité thermique dépend de la composition du béton, du type de béton, du degré de saturation du bêton et surtout de la nature minéralogique des granulats. La conductivité thermique diminue généralement avec l'augmentation de la température [74, 78, 79].

Mindeguia [74] a étudié l'effet de la variation de la température sur la conductivité thermique de différents bétons ordinaires avec et sans fibres, confectionnés avec des granulats calcaires et silico-calcaires. Les résultats (figure 2.9**)** montrent une baisse quasi linéaire de la conductivité thermique avec la température, et que cette baisse est quasi similaire pour tous les bétons. A température ambiante (20°C), la conductivité thermique se situe entre 2 et 2.5 W/m.K, à la température de 600°C, la conductivité thermique est d'environ 1W/m.K. Mindeguia [74] explique la baisse de la conductivité thermique par:

- Le départ progressif de l'eau (sous toutes ses formes) qui est un bon conducteur thermique;
- La création de vides (l'air est peu conducteur de chaleur) du fait de l'augmentation de la porosité du matériau et l'apparition de fissures.

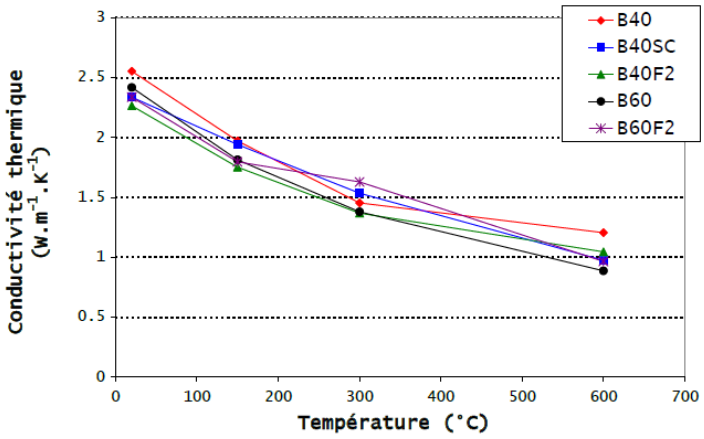


Figure 2.9. Evolution de la conductivité thermique des différents bétons en fonction de la température (les valeurs à 600 °C pour le B40 et le B40F2 ont été obtenues après refroidissement) [74].

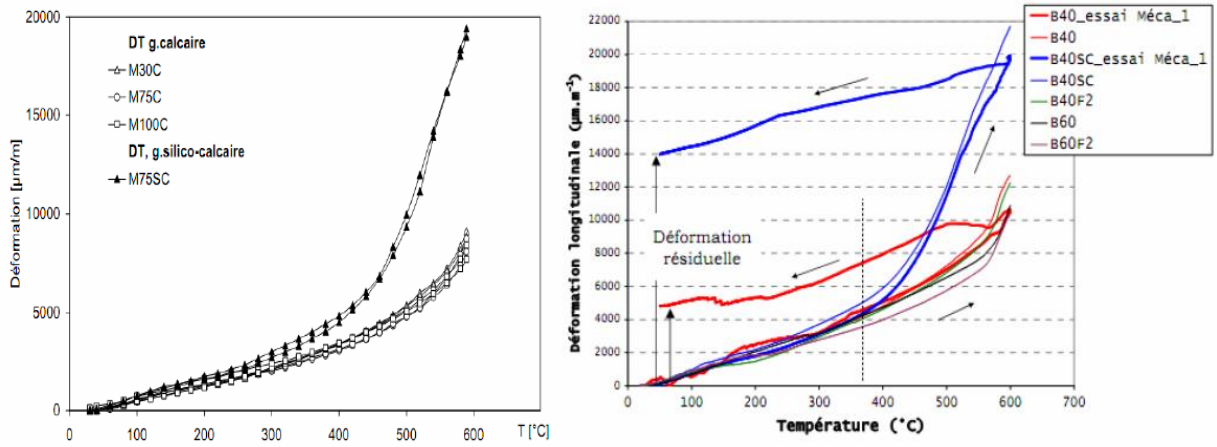
Xing [78] a étudié l'effet de la haute température sur la conductivité thermique des bétons ordinaires et à hautes performances confectionnés avec différents types de granulats (calcaire, silico-calcaire et siliceux). Les mesures ont été effectuées après refroidissement à température ambiante. Les résultats montrent que la conductivité thermique du béton ordinaire de granulats siliceux diminue plus rapidement que celle des bétons de granulats silico-calcaires ou de granulats calcaires. Ces remarques sont similaires pour les BHP, néanmoins ces derniers présentent une baisse de conductivité thermique plus faible que pour les bétons ordinaires. Xing [78] attribue cette différence de baisse entre les deux types de bétons au rapport E/C, qui est très faible pour les BHP.

6.2. Déformation thermique du béton

L'action thermique sur le béton conduit à une déformation thermique de celui-ci, cette dernière est caractérisée par une expansion volumique qui n'est pas linéaire avec la température. La dilatation thermique tend à augmenter de plus en plus rapidement jusqu'à des températures 600-800°C, où une réduction ou un arrêt de la dilatation thermique peut avoir lieu [73]. L'expansion thermique des granulats est le paramètre dominant de la déformation totale des bétons, la pâte de ciment se dilate jusqu'à la température 150°C, puis elle est sujette à un fort retrait.

La nature minéralogique des granulats influe fortement sur la dilatation thermique des granulats. Hager [73] et Mindeguia [74] ont effectué des essais à chaud et après refroidissement sur des bétons de granulats calcaires et silico-calcaires. Les résultats à chaud (figures 2.10) ont montré une forte dilatation thermique des bétons de granulats silico-calcaires au-delà de la température 300°C, elle est approximativement 2.5 fois plus élevée que celle des bétons de granulats calcaires autour de la température 600°C. La différence de la dilatation thermique entre les bétons calcaires et silico-calcaires est liée à la nature des granulats silico-calcaires, qui possèdent un coefficient de dilatation thermique plus élevé que celui des granulats calcaires et aussi à la transformation du quartz à 575°C (composé des granulats silico-calcaires) qui génère une augmentation du volume de l'ordre de 1%.

Après refroidissement, les bétons de granulats silico-calcaires présentent une déformation résiduelle trois fois plus élevée que celle des autres bétons étudiés. Cette déformation résiduelle est attribuée aux fissurations générées au sein du matériau du fait de l'incompatibilité de déformation entre la pâte cimentaire (retrait) et les granulats (dilatation) au-delà de la température 400°C. L'ouverture de ces fissures pendant le cycle de chauffage est maintenue après refroidissement jusqu'à la température ambiante. Ceci explique la déformation résiduelle liée à la phase de refroidissement [73, 74].



(a) (b)

Figure 2.10. Déformation thermique des bétons de granulats silico-calcaires et calcaires par Hager [73] à gauche (a) et par Mindeguia [74] à droite (b)

7. Évolution des propriétés mécaniques

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

7.1. Résistance à la compression

Deux principaux types d'essais sont utilisés pour caractériser le comportement à haute température des bétons, il s'agit des essais à chaud et après refroidissement. Les essais réalisés à chaud permettent généralement d'évaluer le comportement en cours d'incendie et ceux réalisés après refroidissement indiquent les valeurs post-incendie, utiles pour évaluer la capacité portante résiduelle d'un ouvrage et les possibilités de réparation.

Sur la figure 2.11, nous comparons la résistance relative résiduelle à la compression en fonction de la température de chauffage de différents auteurs. On observe que les résistances à la compression des bétons ordinaires et à hautes performances [74, 76, 78], des bétons autoplaçants [75], baissent généralement avec l'élévation de la température.

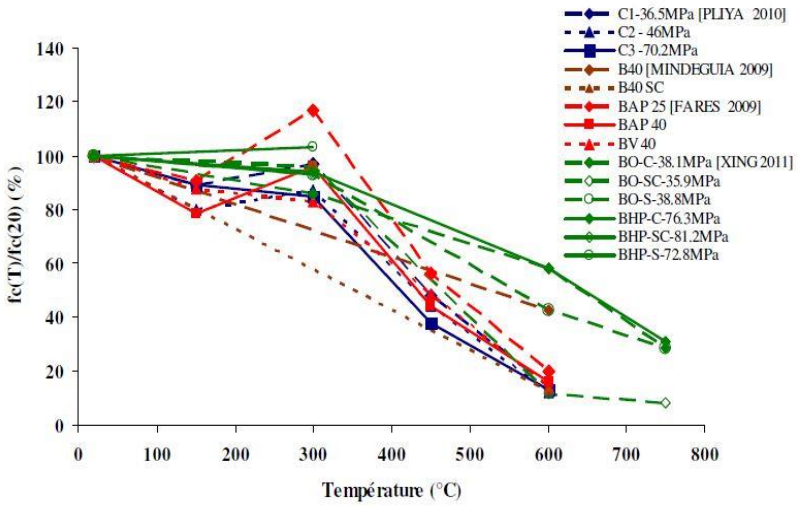


Figure 2.11. Évolution de la résistance résiduelle relative à la compression des BO et BHP et BAP ([74], [76], [78] [75])

L'analyse de la courbe d'évolution de la résistance en compression permet de classer le comportement de bétons aux hautes températures en trois phases:

- **La première phase**: de la température ambiante à 100-200°C (selon les auteurs), cette phase est marquée par une diminution de la résistance qui peut aller, selon certains auteurs [73], de 20 à 30% de la résistance. Cette baisse de résistance est liée à la présence d'eau dans la microstructure du béton qui, lors de la montée en température, se dilate et entraîne un écartement des feuillets du gel. Cet écartement occasionne ainsi une baisse des forces de cohésion,
- **La deuxième phase:**100-250°C ou 200-350°C (selon les auteurs), cette phase est caractérisée par une amélioration ou un maintien de résistance. Cette amélioration peut avoir comme origine le départ de l'eau du matériau, ce qui ré-augmente les forces d'attraction par le rapprochement des feuillets de C-S-H.
- **La troisième phase**: Au-delà des limites de la deuxième phase, dans cette phase le comportement à haute température des bétons est plus net, la résistance baisse de façon monotone. Les origines de cette baisse sont la déshydratation du gel C-S-H, la décomposition de la portlandite et surtout la dilatation thermique différentielle pâte/granulats qui est à l'origine de fissurations de bétons.

Les limites de ces phases varient notamment selon la compacité du béton et le rapport E/C [80]. En effet, pour un BHP dense et de rapport E/C faible, le maintien de sa résistance se prolonge à des températures plus élevées, il peut atteindre environ 400°C [73].

L'effet du type de mesures (à chaud ou résiduel (après refroidissement)) a été étudié par Hager [73] qui a constaté (figure 2.12) qu'à partir d'environ 120°C, la résistance résiduelle du béton devient inférieure à celle mesurée à chaud. Hager [73] a expliqué cette différence de valeurs de résistances par l'endommagement supplémentaire de l'éprouvette induit par le gradient thermique lors du refroidissement, ainsi qu'à une augmentation de volume de l'éprouvette (accompagné de fissuration) provoquée par une possible réhydratation de la chaux par l'humidité de l'air ambiant.

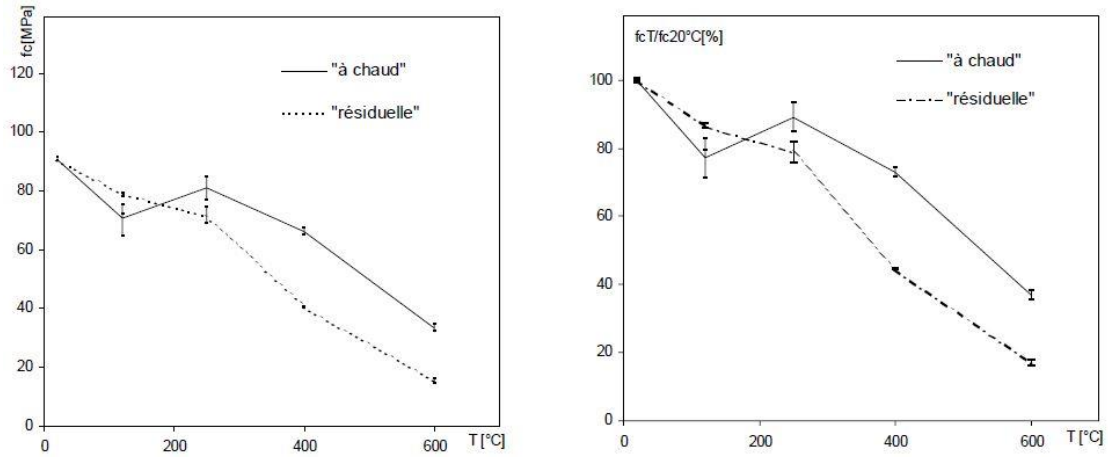


Figure 2.12. Evolution des résistances en compression et résistances en compression relatives à chaud et résiduelles obtenues sur un BHP fibré (f = 0,9 kg/m^3) [73]

L'influence de la nature des granulats sur la résistance mécanique des bétons soumis aux hautes températures a fait l'objet de plusieurs études [74], [78], [81].

Xing [78] a étudié l'influence des granulats calcaires, silico-calcaires et siliceux dans les bétons ordinaires (figure 2.13-a) et dans les bétons à hautes performances (figure 2.13-b). Xing [78] a constaté que l'influence des granulats sur les bétons (bétons ordinaires et à hautes performances) ne commence à être sensible qu'à partir de 300°C. Il a observé une perte de résistance résiduelle en compression beaucoup plus importante pour les bétons ordinaires et à hautes performances confectionnés avec des granulats silico-calcaires. A la température de 600°C, la résistance de ces derniers n'est plus égale qu'à 10% de leur résistance initiale, à cette même température les bétons ordinaires de granulats siliceux et calcaires ont respectivement une résistance résiduelle relative de 40% et 60%. Au-delà de 600°C, les résistances des bétons ordinaires de granulats calcaires et siliceux diminuent encore jusqu'à 30% de leur résistance initiale. Entre 600 et 750°C, la diminution de résistance du béton ordinaire de granulats calcaires est plus importante que celle du béton de granulats siliceux.

Quant aux bétons à hautes performances de granulats siliceux et calcaires, Xing [78] a trouvé qu'ils présentent respectivement à la température de 600°C des résistances de 75% et 60% de leur résistance initiale. A 750°C, la résistance résiduelle du béton à hautes performances de granulats siliceux devient 50 % de sa résistance initiale tandis que la résistance relative du béton à hautes performances de granulats calcaires n'est plus que de 30%. On voit ici qu'à l'inverse des bétons ordinaires, c'est le béton de granulats siliceux qui se comporte mieux que le béton de granulats calcaires, ceci est peut être expliqué par une amélioration de la résistance de l'adhérence à l'interface pâte-granulat.

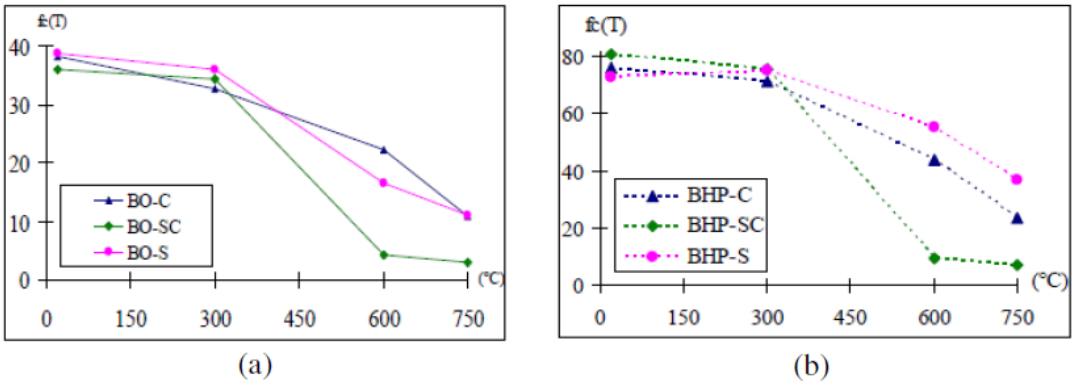


Figure 2.13. Évolution de la résistance résiduelle à la compression (en MPa) des BO (a) et BHP (b) avec différents granulats [78]

L'influence de l'ajout des fibres de polypropylène, métalliques ou de cocktail de fibres dans le béton à hautes températures a été également étudiée par différents auteurs.

Les fibres de polypropylène sont utilisées pour améliorer la stabilité thermique des bétons. Le polypropylène fond, se vaporise en générant un canal qui facilite le transport de masse. La présence de fibres de polypropylène entraîne une porosité supplémentaire du matériau lors du chauffage [77, 76].

Sur les performances mécaniques, les avis divergent selon les auteurs. Certains auteurs [77, 76] ont remarqué une baisse de résistance résiduelle tandis que d'autres auteurs [73, 82, 83] ont observé le phénomène contraire.

Pliya [76] a étudié l'effet des hautes températures sur le comportement résiduel en compression des bétons (ordinaire de rapport E/C = 0.45 et du BHP de rapport E/C = 0.3) fibrés avec des fibres de polypropylène pour les dosages suivants: 1, 1.5, 2 kg/m^3 et les mêmes bétons sans fibres. Il a constaté une perte de résistance résiduelle en compression pour les deux types de bétons confectionnés avec différents dosages en fibres, cette perte est plus significative pour le dosage de 2 kg/m^3 et moins significative pour le dosage de 1.5 kg/m^3 (figure 2.14). Après un chauffage à 450°C, la perte de résistance résiduelle relative pour les deux types de bétons confectionnés avec un dosage de 2 kg/m^3 est d'environ 10% par rapport aux mêmes types de bétons sans fibres. A 600° C, les pertes de résistance sont proches et ne dépendent pas du dosage en fibres.

En contrepartie, Toumi [83] en étudiant l'influence de l'ajout d'un dosage de 1,5 kg/m^3 de fibres de polypropylène sur le comportement aux hautes températures du BHP, il a trouvé une nette amélioration de la résistance en compression du BHP fibré par rapport au BHP non fibré. Cette amélioration est de 30% à 250°C. Il faut toutefois noter que la teneur hydrique, la vitesse de chauffage ainsi que les conditions expérimentales ne sont pas identiques.

En présence de fibres métalliques ou de cocktail de fibres, une amélioration de la résistance résiduelle à la compression a été remarquée à travers la littérature [76, 82].

Pliya [76] a constaté une nette amélioration de la résistance résiduelle des bétons (ordinaire et BHP) confectionnés avec des fibres métalliques par rapport aux mêmes bétons sans fibres et cela pour tous les cycles de chauffage-refroidissement (figure 2.14).

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 leurs résistances initiales. Il a constaté aussi que la résistance résiduelle augmente avec l'augmentation du dosage en fibres jusqu'au dosage de 20 kg/m^3; au-delà, les fibres n'apportent pas de bénéfices sur la résistance résiduelle des bétons.

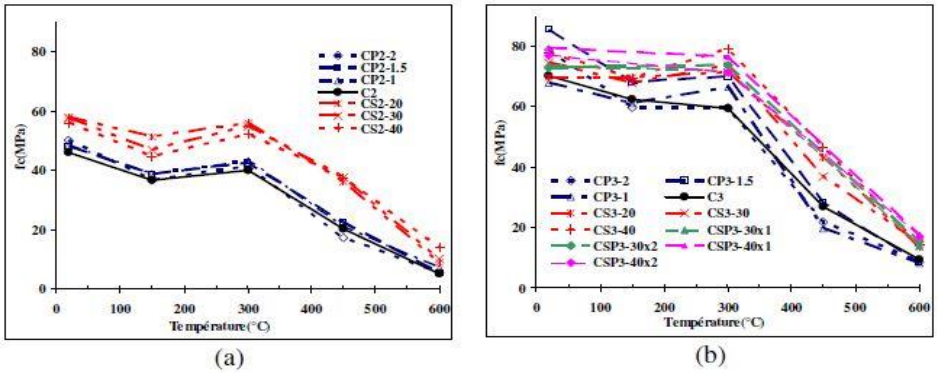
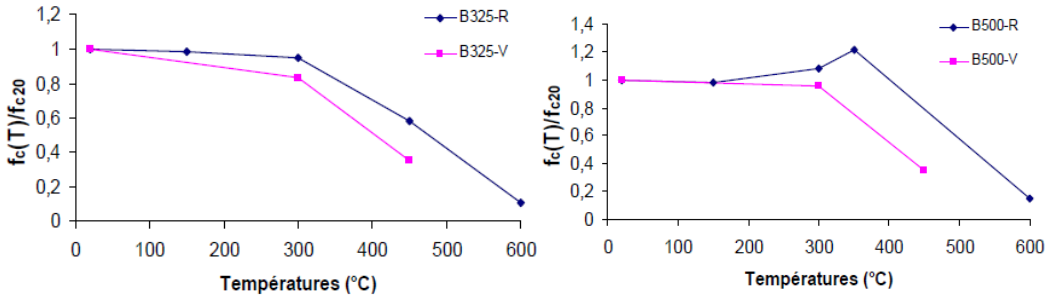


Figure 2.14. Evolution de la résistance résiduelle à la compression des BO (a) et BHP (b) avec ou sans fibres de polypropylène, métalliques et cocktail de fibres (S-P) [76]

Peng et al. [82], en étudiant des BHP ont constaté qu'entre la temperature ambiante et après chauffage à 400°C un gain de resistance residuelle (de l'ordre de 18%) par rapport au beton non chauffé. Ce gain, ils l'ont attribué à la durée courte du chauffage des échantillons.

La vitesse de montée de la température et la durée d'exposition du béton aux hautes températures sont des facteurs prépondérants dans la détermination du comportement du béton aux hautes températures. Kanema [80] a comparé la résistance en compression résiduelle de deux bétons (deux bétons de dosages en ciment 325 et 500 kg/m^3) chauffés à une vitesse de 1°C/min à celle des bétons chauffés à 0.1°C/min (figure 2.15). Il a constaté une chute de la résistance beaucoup plus importante pour les bétons chauffés à une vitesse de 0.1°C/min que pour les mêmes bétons chauffés à une vitesse de 1°C/min. Selon Kanema [80], cette chute de résistance est due à la détérioration plus importante de la matrice cimentaire suite à une déshydratation plus avancée pour les bétons chauffés avec une vitesse de 0,1°C/min.



(a) (b)

Figure 2.15. Résistance résiduelle en compression relative des bétons B325(a) et B500 (b) chauffés suivant des cycles dont les vitesses de montée sont de 0.1 et 1°C/min et le palier dure 1 heure à différentes températures [80]

La durée d'exposition des bétons aux hautes températures a été aussi étudiée par Kanema [80] et Toumi [83]. Ils ont tous les deux trouvé que la prolongation de la durée de chauffage accroît la perte en résistance résiduelle en compression des bétons. Toumi [83], en comparant l'effet de la durée d'exposition (les durées d'exposition prises sont 1h, 3h, 6h, 9h) et de la température maximale (les températures maximales prises sont 300, 500 et 700°C) atteintes sur un béton ordinaire et un BHP a constaté qu'il y a généralement une tendance pour le BHP de présenter une perte de résistance supérieure à celle du béton ordinaire pour les durées de chauffage de 1h et 3h, l'inverse est observé pour les durées de chauffage de 6h et 9h (tableau 2.1).

Tableau 2.1. Perte et gain de résistance en fonction de la température et du temps de chauffage (-perte de résistance et + gain de résistance) [83]

Type De béton	Temps de chauffage (h)	température de chauffage °C		
		300	500	700
BO	1	+0.02	-0.22	-0.42
	3	-0.21	-0.34	-0.61
	6	-0.30	-0.65	-0.81
	9	-0.56	-0.82	-0.89
BHP	1	+0.03	-0.10	-0.54
	3	-0.10	-0.38	-0.71
	6	-0.25	-0.60	-0.78
	9	-0.43	-0.76	-0.88

L'effet des modes de refroidissement (à l'air ou par l'eau) joue un rôle important sur le comportement résiduel en compression des bétons. Toumi [83], en étudiant l'effet des différents modes de refroidissement (à l'air, par trempe dans l'eau et par pulvérisation) sur le comportement résiduel en compression des bétons ordinaires et BHP, a trouvé que le refroidissement dans l'air maintien une valeur relativement élevée de la résistance résiduelle à la compression par rapport aux autres modes de refroidissement et cela indépendamment du type de bétons. Il considère que les modes de refroidissement par trempe dans l'eau et par pulvérisation peuvent avoir un effet similaire sur la résistance résiduelle à la compression et que leur effet peut causer des chutes de résistance allant jusqu'à 30% par rapport aux bétons refroidis à l'air.

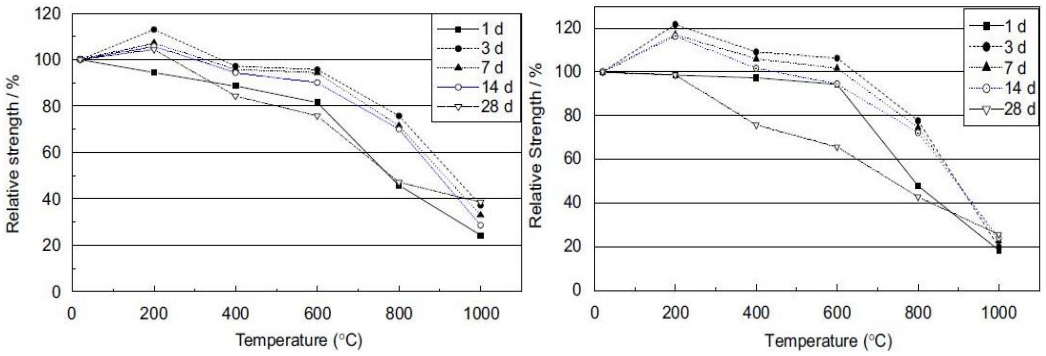
D'autres chercheurs [84] ont étudié l'effet des modes de refroidissement (à l'air et par pulvérisation d'eau) et de l'âge du béton lors du chauffage aux hautes températures sur le comportement résiduel à la compression des bétons. L'étude a été réalisée sur un béton ordinaire à différents âges (1, 3, 7, 14 et 28 jours) soumis à des températures de 200°, 400°, 600°, 800° et 1000°C. Pour chacune de ces températures, l'exposition a été maintenue pendant 3 heures. Ensuite, les échantillons sont refroidis suivant deux modes: à l'air et par pulvérisation d'eau. Après, les échantillons sont conservés à une température de 20°C et une humidité relative de 90 ± 5% pendant 28 jours.

Les résultats de la recherche ont révélé que toutes les éprouvettes (exceptées les éprouvettes de 1 jour) présentent une augmentation de 10 à 15% de la résistance lorsque ces dernières sont soumise à la température 200°C (figure 2.16). Cela est expliqué par la consolidation des hydrates de la pâte de ciment suite à l'évaporation de l'eau libre, ce qui rapproche les gels de CSH et conduit à une liaison plus forte entre eux. De plus, le transfert hydrique progressif au début du chauffage a permis l'hydratation du ciment.

Après avoir chauffé les éprouvettes jusqu'à 800°C, la résistance résiduelle de ces dernières aux jeunes âges, exceptées celles âgées de 1 jour, est beaucoup plus grande que celle des éprouvettes âgées de 28 jours (figure 2.16), ce qui indique que le béton au jeune âge peut récupérer un peu de sa résistance après un certain durcissement. La principale raison de cette récupération est l'existence de certains grains de ciment non hydratés; ces grains s'hydratent, augmentant ainsi la résistance du béton après l'exposition aux hautes températures.

La résistance résiduelle des éprouvettes dont l'âge est inférieur à 28 jours refroidies par l'eau est supérieure à celle des éprouvettes refroidies à l'air si la température de chauffage est inferieure à 800°C, pour les éprouvettes âgées de 28 jours la résistance résiduelle des éprouvettes refroidies à l'air est supérieure à celle des éprouvettes refroidies par l'eau

Dans le cas de la température 1000°C, la résistance résiduelle de toutes les éprouvettes refroidies à l'air est supérieure à celles refroidies à l'eau



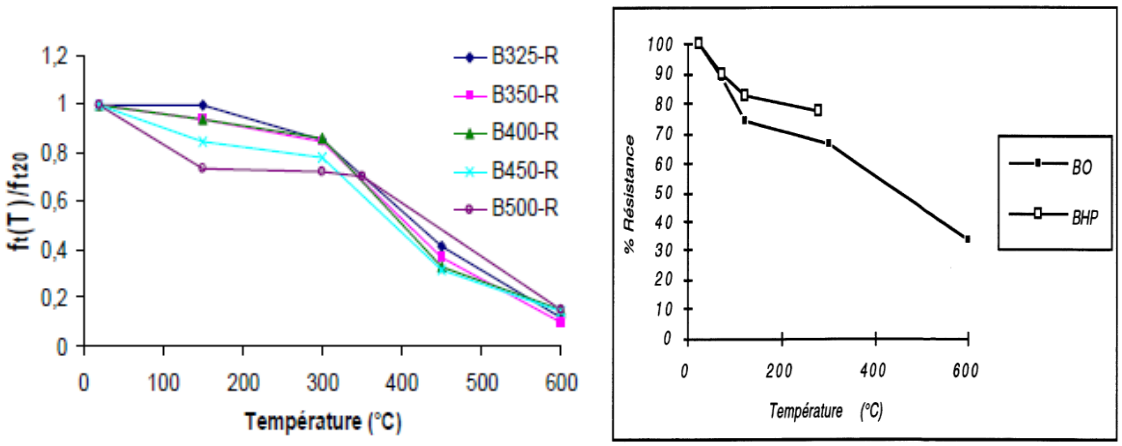
(a) (b)

Figure 2.16. Evolution de la résistance relative du béton refroidi par l'air (a) et par pulvérisation d'eau (b) après 28 jours de conservation [84]

7.2. Résistance à la traction

L'évolution de la résistance en traction en fonction de la température n'a pas été étudiée aussi souvent que celle de la résistance en compression. Ceci peut s'expliquer par l'importance moindre de la résistance en traction du béton dans le comportement macroscopique des structures et par les difficultés expérimentales occasionnées surtout par l'essai de traction directe (problèmes de centrage, de rigidité des pièces, de système de traction, etc.) ajouté bien sûr la température qui rend difficile l'expérimentation. Cependant, à l'échelle du matériau, la connaissance de la résistance en traction du béton est primordiale car elle conditionne en partie la stabilité thermique des bétons (éclatements) [85].

Pour des raisons pratiques de simplicité expérimentale, la plupart des chercheurs proposent des résultats d'évolution de la résistance en traction des bétons à partir d'essais de fendage ou de flexion. Quelques résultats sont présentés à la figure 2.17, pour lesquels la résistance en traction de tous les bétons testés décroit avec la température [86, 80].



(a) (b)

Figure 2.17. Evolution de la résistance relative résiduelle en traction de différents bétons mesurée par essai de fendage selon Kanema [80] à gauche (a) et selon Noumowé [86] à droite (b)

Noumowé [86] a étudié l'effet de la haute température sur le comportement résiduel en traction de deux types de bétons, un béton ordinaire et un BHP. Il note que la résistance résiduelle en traction par fendage diminue plus rapidement que la résistance résiduelle de compression (après un chauffage de 350°C et refroidissement). Il a constaté que les deux types de bétons gardent environ 80% de la résistance en compression et 70% de la résistance en traction par fendage) et que cette dernière semble constante entre 200°C et 350°C.

Il constate également que le maintien de la résistance en traction du béton à hautes performances étudié, soumis à de hautes températures, est supérieur à celui des bétons ordinaires. L'origine de cette différence est attribuée à l'accélération à haute température de l'hydratation de ces bétons mal hydratés avant essai.

Kanema [80] a effectué des essais de traction par fendage sur cinq formulations de bétons (B325, B350, B400, B450 et B500) soumises à quatre cycles de chauffage–refroidissement composés

d'une rampe de montée en température fixée à 1°C/min, d'un palier de stabilisation d'une heure aux températures cibles suivantes: 150°C, 300°C, 450°C et 600°C. Il a constaté une baisse de la résistance résiduelle à la traction des bétons testés et que cette baisse est fonction de l'action thermique et du rapport E/C.

Kanema [80] a divisé la courbe d'évolution de la résistance résiduelle à la traction des bétons portés à haute température en deux domaines:

- **Le premier domaine** : de la température ambiante à 400°C. Dans ce domaine, la baisse de la résistance en traction des bétons est d'autant plus importante lorsque le rapport E/C est faible. En effet, les bétons à faible rapport E/C (B500 et B450) présentent une réduction plus importante de leur résistance en traction comparés aux bétons à fort rapport E/C (B325). Selon lui, cela peut-être expliqué par une déshydratation plus importante du gel C-S-H dans la zone de transition pâte–granulats des bétons à faible rapport E/C. Contrairement à la résistance en compression résiduelle, aucune amélioration de la résistance en traction n'est observée dans la plage des températures allant de 20 à 300-350°C.
- **Le deuxième domaine** : de la température 400 à 600°C. Dans ce domaine, la baisse de résistance est quasi-identique pour tous les bétons. Kenema [80] attribue la baisse de résistance dans ce domaine à une conjugaison des pertes dues à la déshydratation de la matrice cimentaire et à la transformation chimique des granulats.

Hager [73], en mesurant l'effet de l'élévation de la température sur le comportement en traction à chaud d'un BHP (100 MPa) a trouvé des résultats qui s'opposent aux résultats trouvés par Noumowé et Kanema. Selon ces résultats, la résistance en traction directe du béton mesurée à chaud à 120°C, 250°C et 400°C croît avec l'élévation de la température (figure 2.18).

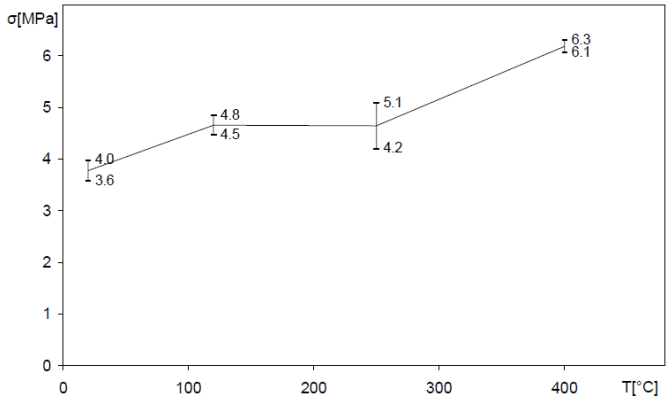


Figure 2.18. Evolution de la résistance en traction testée "à chaud". Traction directe, technique par serrage, béton M100C/0.3. Hager [73].

Comme en compression, l'influence des fibres (polypropylènes et métalliques) sur l'évolution de la résistance résiduelle à la traction en fonction de la température a été étudiée par Pliya [76].

Pliya [76] a étudié l'influence des fibres de polypropylène sur le comportement en traction par flexion à haute température de deux types de bétons. Des bétons ordinaires (E/C = 0.45) et des bétons à hautes performances (E/C = 0.3) ont été confectionnés pour différents dosages en fibres (les dosages sont 1, 1.5, 2 kg/m^3) et chauffés suivant différents cycles de chauffage–

refroidissement. Il a remarqué que l'influence des fibres de polypropylène sur la résistance à la traction dépend fortement du rapport E/C. En effet, les fibres de polypropylène améliorent la résistance résiduelle en traction des bétons ordinaires (de fort rapport E/C = 0.45) et diminuent celle des bétons à haute performance (de faible rapport E/C = 0.3).

Pliya [76] note que l'amélioration de la résistance résiduelle en traction des bétons ordinaires est plus significative entre les températures 150°C et 450°C. Après chauffage à 450°, il a trouvé que la résistance relative du béton ordinaire sans fibres est de 27% et la résistance moyenne des bétons ordinaires fibrés est de 33%. Après un chauffage à 600°C, la résistance relative du béton ordinaire fibré (11%) est toujours supérieure à celle du béton sans fibres (7%). Le dosage en fibres polypropylènes qui donne une plus forte amélioration est le dosage de 1,5 kg/m^3 jusqu'à la température 450°C, au-delà le gain de résistance est faible et varie peu avec le dosage en fibres.

Les BHP présentent des baisses dès la température ambiante, à 450°C la résistance résiduelle relative du BHP sans fibres est de 38% tandis que la résistance moyenne des BHP fibrés est de 29%. Les meilleures performances pour la résistance résiduelle à la traction sont obtenues avec un dosage de 1.5 kg/m^3.

Pliya [76] attribue l'amélioration de résistance des bétons ordinaires à la fusion du polypropylène qui remplit les pores du béton et se re-solidifie durant la phase de refroidissement, augmentant ainsi les forces de contact et de liaisons entre les différents grains. Avec le béton à hautes performances, du fait de sa forte densité, les fibres fondues diffusent moins dans la matrice cimentaire. Cette faible propagation du polypropylène fondu, couplée à une fissuration induite par l'augmentation du volume du polypropylène avec la température explique le fait que la résistance résiduelle à la traction par flexion des bétons BHP ne s'améliore pas.

Après le chauffage à 600°C, les résistances résiduelles à la traction des bétons avec et sans fibres de polypropylène sont presque les mêmes.

Toumi [83] souligne qu'il y a en moyenne, un gain léger de résistance à la traction par flexion des BHP en présence de fibres de polypropylène, ce gain est plus marqué à 500°C.

En présence de fibres métalliques, Pliya [76] a observé une influence positive de celles-ci sur la résistance résiduelle à la traction du béton. En effet, une amélioration notable de la résistance résiduelle des bétons fibrés par rapport aux bétons non fibrés est remarquée pour chaque cycle de chauffage-refroidissement. Contrairement à ce qui a été observé pour les bétons sans fibres ou avec des fibres polypropylène, les bétons à hautes performances avec des fibres métalliques présentent de meilleures résistances relatives en traction que les bétons ordinaires.

De même que pour la résistance à la compression, Kanema [80] a étudié l'effet de la vitesse de chauffage sur le comportement résiduel en traction par fendage pour les mêmes bétons et les mêmes conditions d'essais que pour la résistance à la compression. Il constate que la résistance à la traction résiduelle des bétons à fort rapport E/C (le béton de dosage en ciment 325 kg/m^3 et de rapport E/C = 0.62) est plus faible pour une vitesse de montée en température de 0.1°C/min que pour la vitesse de 1°C/min. Il observe également que le béton à faible rapport E/C (le béton de dosage en ciment 500 kg/m^3 et de rapport E/C = 0.29) présente une résistance à la traction

comparable pour les deux vitesses de montée en température (pour les vitesses de 0.1 et 1°C/min).

Le mode de refroidissement naturel sur le comportement à la traction des bétons chauffés demeure meilleur par rapport aux deux autres régimes de refroidissement (par pulvérisation et par trempe d'eau) Toumi [83].

7.3. Module d'élasticité

Comme la résistance à la compression et à la traction, le module d'élasticité en compression peut être effectué à chaud en fin de palier de stabilisation ou en résiduel après la période de refroidissement. Ce module traduit l'évolution de la rigidité du béton avec la température. Les résultats de la littérature [86], [77] montrent que ce module baisse avec l'augmentation de la température.

Noumowé [86] a effectué des essais de module d'élasticité résiduel, après un chauffage à 150°C, 300°C, 450°C et 600°C sur un béton ordinaire et sur un béton à hautes performance. Il constate que la baisse du module d'élasticité des deux bétons s'effectue de manière linéaire avec l'augmentation de la température et que la courbe d'évolution du module élastique résiduel du BHP reste très proche et semble similaire à celle du béton traditionnel (figure 2.19).

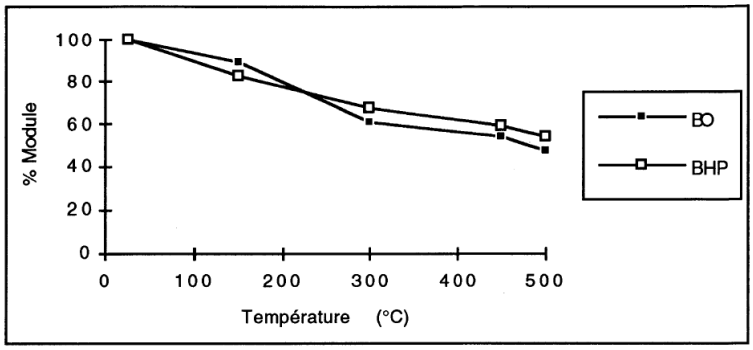


Figure 2.19. Modules élastiques résiduels relatifs d'après Noumowé [86]

Kanema [80] a étudié l'effet de la haute température sur le module d'élasticité résiduel de cinq formulations de bétons (B325, B350, B400, B450 et B500). L'essai est effectué dans les mêmes conditions que l'essai de traction. Il remarque (figure 2.20) une détérioration par le chauffage de manière continue dès 150°C, et que cette baisse s'effectue de manière quasi-identique pour les cinq formulations de béton, ce qui confirme les résultats de Hager [73] montrant un faible influence du rapport E/C des bétons sur la baisse des modules d'élasticité en fonction de la température.

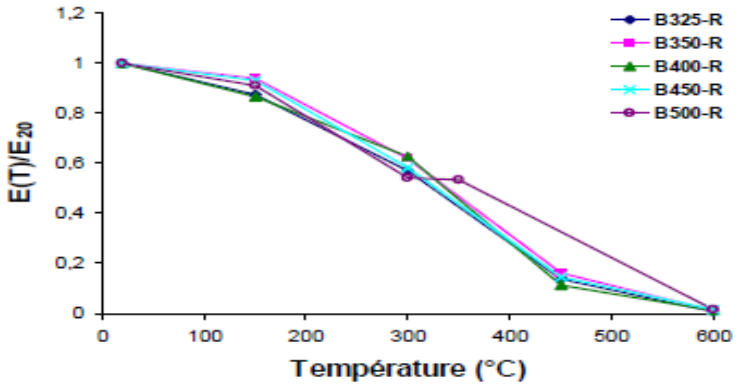


Figure 2.20. Modules d'élasticité résiduels relatifs des cinq bétons chauffés suivant des cycles dont la vitesse de montée est 1°C/min et le palier dure 1 heure pour différentes températures d'après Kanema [80]

Kanema [80] a également étudié l'effet de la vitesse de chauffage sur l'évolution du module résiduel pour deux formulations de bétons B325 et B500 et pour deux cycles de chauffage 1 et 0.1°C/min. Il observe que les bétons B325 et B500 soumis à un cycle de chauffage de 0,1°C/min présentent une réduction du module d'élasticité relatif plus marquée en comparaison aux éprouvettes de mêmes compositions soumises à un cycle de 1°C/min.

L'ajout de fibres de polypropylène semble donner une baisse du module d'élasticité résiduel du béton à haute résistance au cours du chauffage [76,73].

Pliya [76] a observé une baisse légère des module d'élasticité résiduels pour tous les bétons fibrés (ordinaires et à hautes performances) par rapport aux bétons non fibrés entre les températures ambiantes et 300°C. A cette dernière, il a observé un léger gain pour les BHP; au-delà de la température 300°C, les modules d'élasticité résiduels de tous les bétons avec et sans fibres de polypropylènes sont presque similaires.

Hager [73] a effectué des tests à chaud sur deux BHP fibrés avec des dosages en fibres polypropylènes de 0.9 et 1.75 kg/m^3 et un BHP non fibré. Les résultats montrent une baisse des modules d'élasticité pour les deux BHP fibrés et que cette baisse est beaucoup plus prononcée pour le BHP de dosage en fibres 0.9 kg/m^3.

Avec les fibres métalliques, un effet bénéfique est constaté jusqu'à la température 300°C. Au-delà de cette température, la différence de modules entre le béton sans fibres et le béton fibré n'existe plus quelque soit le dosage [76].

8. Instabilité thermique des bétons

8.1. Les différents types d'instabilité thermique

L'instabilité thermique est le terme utilisé pour décrire des phénomènes rencontrés lorsqu'on chauffe certains bétons. On peut définir plusieurs instabilités thermiques d'après l'étude d'Arupfire [87]. Les plus répondues sont les deux premières:

- **Eclatement explosif :** (explosive spalling en anglais) correspondant à un détachement brutal de petits ou gros morceaux de béton, accompagné d'un bruit fort. 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.

- **Eclatement de surface** (appelé aussi écaillage et en anglais surface spalling): correspondant à un détachement progressif et continu, plus ou moins rapide, de petits morceaux (jusqu'à 20 mm environ) du parement exposé au feu. Ce phénomène se produit généralement dans la première phase de l'élévation de température. Il est moins violent que l'éclatement explosif.
- **Eclatement de granulats :** cet éclatement est provoqué par la dilatation thermique des granulats proches de la surface à cause de la montée en température. Les principales causes de ce phénomène sont la conversion de quartz à 570 °C. Les dommages engendrés par l'éclatement de granulats ne sont que superficiels.
- **Eclatement d'angle :** il s'observe dans les stades avancés du feu lorsque le béton est affaibli et que les fissures se développent en raison des contraintes de traction le long des bords et coins de l'ouvrage.
- **Eclatement par détachement des granulats :** 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 :** il est non violent et sans bruit. Ce phénomène est causé par la présence de granulats calcaires et de la réhydratation de la chaux lors de la phase de refroidissement.

Selon Phan et al [88], la cause principale de l'instabilité thermique du béton est la pression de vapeur dans les pores et elle est plus rencontrée dans les bétons à hautes performances que dans les bétons ordinaires.

8.2. Mécanisme du phénomène de l'éclatement des bétons chauffés

Selon Kalifa et al [89], l'éclatement des bétons résulte de deux principaux processus concomitants, le processus thermomécanique et le processus thermo-hydrique:

- **Le processus thermomécanique :** il est lié à la température au sein du béton. Le gradient thermique crée une dilatation thermique, et lorsqu'elle est empêchée, elle génère des contraintes de compression parallèles à la face chauffée. Lorsque les contraintes thermiques sont importantes, le phénomène d'écaillage peut se produire [89, 90].
- **Le processus thermo-hydrique :** il est associé au mouvement de l'eau et de la vapeur d'eau au sein du béton, qui engendre de fortes pressions de vapeur dans le réseau poreux. La figure 2.21 montre le mécanisme d'éclatement lié à la pression de vapeur [90]. Lorsque le béton est exposé à une haute température, l'eau qui se trouve dans les pores sous forme libre ou liée commence à s'évaporer. Une partie de cette eau vaporisée s'évacue vers la surface chauffée et une autre partie migre vers les zones froides à l'intérieur puis se condense. Une accumulation de l'eau liquide dans les pores aux zones froides crée un bouchon saturé qui gêne la migration de l'eau vaporisée. Le bouchon saturé provoque une élévation de la pression interne des pores du côté le plus chaud. Ces pressions de vapeur associées aux fortes contraintes thermiques aboutissent à l'apparition

du phénomène d'instabilité thermique. Dans le cas de béton de forte densité et de faible perméabilité, l'augmentation de pression pourrait engendrer l'éclatement.

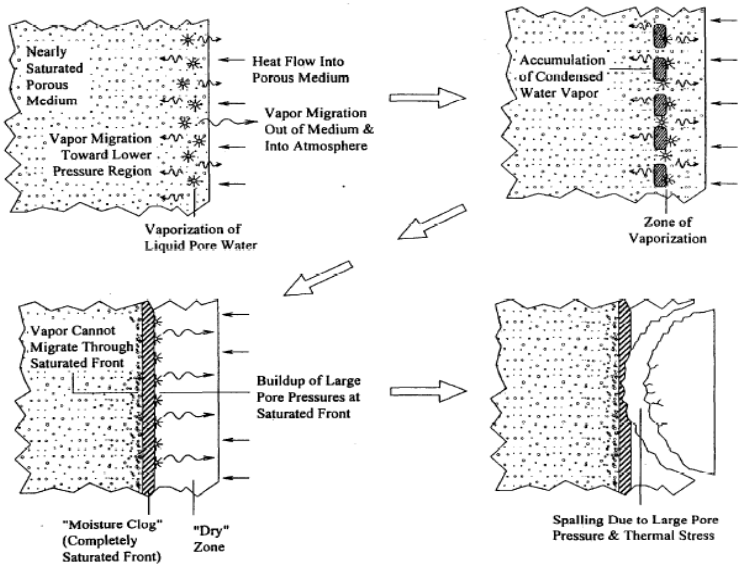


Figure 2.21. Illustration du mécanisme d'éclatement [90]

8.3. Paramètres favorisant l'instabilité thermique

Plusieurs paramètres peuvent favoriser l'éclatement du béton. Les principaux d'entre eux sont brièvement cités ci-dessous :

- **Teneur en eau :** la teneur en eau contenue dans le béton joue un rôle principal dans la formation de pression de vapeur, plus la teneur en eau est grande plus le risque d'éclatement augmente. Des travaux de recherche de Hertz [91] ont montré qu'une teneur en eau massique inférieure à 3-4%, limite le risque d'éclatement.
- **Propriétés physico-mécaniques du matériau (densité, perméabilité, résistances) :** plusieurs recherches [87, 83, 90] effectuées sur des BHP montrent que ces derniers sont plus sensibles à l'éclatement lorsque leur rapport Eau/liant est plus faible. La faible perméabilité du BHP rend difficile le transfert de la vapeur d'eau, ce qui engendre de fortes pressions de vapeur lors de la montée en température.
- **Vitesse de chauffage :** l'échauffement rapide engendre de forts gradients thermiques, d'où de fortes contraintes thermiques pouvant entraîner l'éclatement du béton. Noumowé [86] a effectué des travaux de recherche sur l'instabilité thermique du BHP, la recherche a été effectué sur des éprouvettes cylindriques (16x32 cm) chauffées avec des vitesses de chauffage de 1°C/min et 0.1°C/min. Les résultats montrent que les éprouvettes chauffées avec la vitesse de 1°C/min ont éclaté à une température du surface voisine de 300 – 350°C, tandis que les éprouvettes exposées à la vitesse de chauffage de 0.1°C/min n'ont pas éclaté. La faible vitesse de montée en température réduit donc le risque d'éclatement.
- **Nature des granulats :** le comportement des granulats aux hautes températures est fortement lié à leur nature chimique et minéralogique. Les granulats siliceux présentent généralement un coefficient de dilatation thermique plus élevé que celui des granulats

calcaires, ce qui permet à ces derniers d'avoir une stabilité thermique meilleure que les granulats siliceux [78, 87].

8.4. Méthodes préventives

Il existe principalement deux méthodes préventives du problème de l'éclatement des bétons exposés à des hautes températures : l'utilisation des fibres polypropylènes et métalliques et l'utilisation des plaques de protection passive.

8.4.1. Utilisation des fibres polypropylènes et métalliques

Plusieurs études expérimentales ont confirmé l'effet bénéfique de l'ajout des fibres polypropylènes comme solution efficace permettant la prévention contre l'éclatement des bétons [92, 93]. Ces études estiment que les fibres polypropylènes fondent aux alentours de 171°C, une température qui est généralement inférieure à celle rencontrée au moment de l'écaillage. La fusion des fibres de polypropylène crée des canaux dans le béton permettant l'évacuation de la vapeur d'eau vers l'extérieur et réduisant par la suite la pression dans les pores [93, 94]. Néanmoins, les fibres polypropylènes sont chères et elles réduisent la maniabilité du béton à l'état frais, rendant difficile sa mise en place dans les coffrages. Quant au dosage en fibres polypropylènes, il varie entre 1 et 3 kg/m^3 de béton, le choix s'oriente généralement vers l'utilisation de fibres monofilament.

Les fibres métalliques améliorent également la prévention contre l'éclatement des bétons en améliorant la résistance à la traction des bétons [93].

8.4.2. Utilisation des plaques de protection passive

Les plaques de protection passive sont utilisées surtout pour les structures potentiellement exposées au feu comme les tunnels. Elles sont fixées sur l'ouvrage pour limiter la température et les gradients thermiques au sein du béton dans le cas d'un incendie. Les plaques de protection réduisent la montée en température du béton et donc réduisent le risque d'écaillage ainsi que la perte de résistance. Il est à noter que l'épaisseur des plaques de protection est souvent choisie de façon que la température à la surface du béton soit comprise entre 250°C et 400°C pendant 2 heures d'incendie. Cette technique nécessite du temps pour son installation et peut s'avérer onéreuse si la structure à protéger est très longue (comme les tunnels).

9. Etat de l'art des BAP aux hautes températures

9.1. Introduction

L'utilisation du BAP dans la construction a considérablement augmenté durant ces dernières années à cause de ses propriétés techniques et économiques intéressantes. Cette large utilisation est accompagnée par des études sur ses propriétés et ses performances à l'état durci. Parmi ces études, ses propriétés aux hautes températures. En effet, les caractéristiques des BAP (volume important de la pâte, une quantité importante des additions minérales) rendent leur comportement différent de celui du béton ordinaire à haute température. Nous allons passer en revue les résultats d'étude de quelques auteurs sur le comportement mécanique des BAP portés aux hautes températures.

9.2. Propriétés mécaniques des BAP aux hautes températures

Les résultats d'études sur les propriétés mécaniques des BAP aux hautes températures de certains auteurs sont présentés ci-dessus:

9.2.1. Les travaux de Hanaa Fares et al [75]

- **Conditions d'essais**

L'étude a porté sur deux BAP de résistances initiales BAP1 = 37 MPa et BAP2 = 54 MPa et un béton vibré de résistance BV = 41 MPa. Les essais sont effectués sur des éprouvettes cylindriques Ø 16×32 cm. Les éprouvettes sont soumises aux cycles de chauffage-refroidissement suivants: 150, 300, 450 et 600 °C, avec une vitesse de montée en température de 1 °C/min. Une fois la température voulue atteinte, elle est maintenue stable pendant 1heure (l'essai est réalisé selon les recommandations RILEM).

- **Comportement aux hautes températures**

Les résultats ont montré une légère diminution de la résistance résiduelle en compression des éprouvettes des BAP testés entre 20 et 150° C, suivie par une importante augmentation de la résistance résiduelle entre 150 et 300°C (25%). Pour le BV, une diminution monotone est observée entre 20 et 300°C (5%). Au-delà de 300°C, les trois bétons (les deux BAP et le BV) présentent une diminution continuelle et importante. À 600°C, les bétons BAP1, BAP2 et BV gardent respectivement 19%, 16% et 14% de leurs résistances initiales en compression.

En ce qui concerne la résistance résiduelle en traction par flexion des bétons testés, elle diminue de manière continuelle pour tous les bétons étudiés, une stabilisation est observée entre 150 et 300° C. Au-delà de 300° C, la résistance décroît plus rapidement. À 600°C, les bétons BAP1, BAP2 et BV gardent respectivement 11%, 16% et 12% de leurs résistances initiales en traction par flexion.

Le module d'élasticité des trois bétons testés a diminué d'une manière continuelle. Cette diminution est légèrement supérieure pour le BV que pour les deux BAP. Entre 20 et 300°C, les résultats montrent une diminution progressive du module, tous les BAP possèdent un module supérieur à 50% du module initial. Au-delà de 300°C, une forte diminution du module est observée pour les trois bétons (plus de 90% de perte en module à 450°C pour chacun des trois bétons est observée).

9.2.2. Les travaux de M. A. Helal et al [95]

- **Conditions d'essais**

Ces auteurs ont étudié l'effet des hautes températures sur le BAP comparé avec l'effet des hautes températures sur le BV, ainsi que l'effet du mode de refroidissement (par pulvérisation d'eau et à l'air ambiant).

Les cycles de chauffage-refroidissement sont : 200, 400 et 600°C, avec un pallier de 2 heures une fois la température voulue est atteinte. Les essais sont réalisés à l'âge de 28 jours.

- **Comportement aux hautes températures**

Les résultats montrent que les deux types de bétons (BAP et BV) présentent une augmentation de la résistance à 200°C. Cette augmentation est de 5.7% pour le BAP et 4.47% pour le béton vibré par rapport à la résistance initiale de chacun de ces deux types de bétons. A 400°C et 600°C, la résistance du BAP diminue respectivement de 9.34% et 27.73% par rapport à sa résistance initiale, et la résistance du BV diminue respectivement de 16.15% et 49.32% par rapport à sa résistance initiale.

Les résultats d'essais montrent que le pourcentage de diminution de la résistance à la compression du BV est plus grand que celui du BAP.

Les résultats montrent aussi que la diminution de la résistance à la compression du BAP refroidi par pulvérisation d'eau est plus grande que celle du BAP refroidi à l'air ambiant. Le pourcentage de diminution du BAP refroidi à l'air ambiant est de 10.33%, 24.56% et 40.78% par rapport sa résistance initiale pour les températures de 200°,400° et 600°C respectivement.

Pour le BV, ces valeurs sont de, 21.09%, 37.44% et 63.14% par rapport à sa résistance initiale pour les températures de 200°,400° et 600°C respectivement.

Pour la résistance à la traction, elle diminue d'une manière continuelle. Cette diminution est plus grande pour le BAP que pour le BV dans les deux modes de refroidissement étudiés (par pulvérisation d'eau et à l'air ambiant).

Pour tous les échantillons refroidis par pulvérisation d'eau, la diminution de leur résistance à la traction par flexion est supérieure à celle des éprouvettes refroidis à l'air ambiant.

9.2.3. Les travaux de Wasim Khaliq et al [96]

- **Conditions d'essais**

Ces auteurs se sont intéressés à l'étude de l'effet de l'ajout des fibres polypropylènes (quantité 1 kg/m^3, pourcentage 0.05% en masse totale), fibres métalliques (quantité 42 kg/m^3, pourcentage 1.75 % en masse totale) et du mélange de ces deux fibres (quantité: 1 kg/m^3 de fibres polypropylènes et 42 kg/m^3 de fibres métalliques) sur les propriétés mécaniques résiduelles et sur l'éclatement du BAP.

Les essais sont effectués sur des éprouvettes cylindriques Ø 7.5×15 cm, et qui sont soumises aux cycles de chauffage-refroidissement suivant 100°, 200°, 400°, 600°, et 800 °C, la vitesse de chauffage est de 2°C/minute (l'essai est réalisé selon les recommandations RILEM).

- **Comportement aux hautes températures**

Les résultats montrent que le BAP sans fibres et le BAP fibré avec de fibres polypropylènes présentent une diminution de la résistance résiduelle en compression jusqu'à la température 100°C puis une ré-augmentation entre 100°C et 200°C, tandis que les autres BAP présentent une diminution continuelle de la résistance résiduelle en compression. Au-delà de 400°C, le BAP sans fibres présente une résistance résiduelle supérieure à celle des BAP avec fibres. A 800°C, les BAP conservent entre 30 et 44% de leurs résistances initiales.

L'ajout des fibres polypropylènes, métalliques ou hybrides n'a pas d'effet significatif sur la résistance résiduelle à la compression, cependant l'ajout de fibres métalliques améliore la résistance à la traction jusqu'à 400°C, tandis que l'ajout de fibres polypropylènes seules ou avec les fibres métalliques (fibres hybrides) contribue à la diminution de la résistance à la traction résiduelle.

L'ajout des fibres (polypropylènes, métalliques ou hybrides) contribue à l'augmentation du module d'élasticité.

9.2.4. Les travaux de S. Bakhtiyaria et al [97]

- **Conditions d'essais**

Ces auteurs ont étudié l'effet de l'ajout des fillers de calcaire et de quartz sur le comportement aux hautes températures du BAP et ont comparé ces résultats avec ceux d'un béton témoin (un béton vibré BV).

Les essais mécaniques sont effectués sur des éprouvettes cylindriques de 150mm×300mm et des éprouvettes cubiques de 150 mm de côté soumises aux cycles de chauffage-refroidissement suivants: 150°, 500°, 750° et 1000°C, selon la courbe temps-températures ISO 834 pendant 2 heures, puis le four est éteint et les éprouvettes sont laissées refroidir pendant 24 heures à l'intérieur du four.

- **Comportement aux hautes températures**

Le BV a présenté une résistance meilleure à l'éclatement aux hautes températures comparé aux BAP. Cependant, le BV a présenté une diminution de résistance plus importante. L'effet de la haute température sur la résistance à la compression des éprouvettes confectionnés avec le quartz est négligeable à 150°C, mais significatif à 500°C. Certaines éprouvettes explosent à 500°C. La résistance des éprouvettes confectionnées avec le filler calcaire ne diminue pas de manière significative jusqu' à 500° C. Certaines éprouvettes présentent un éclatement d'angle à 750° C. Toutes les éprouvettes confectionnées avec le filler de quartz ont éclaté à la température de 750°C.

9.2.5. Les travaux de K.K. Sideris et al [98]

- **Conditions d'essais**

Ces auteurs ont étudié l'effet des fibres de polypropylène sur les propriétés mécaniques des BAP portés aux hautes températures. L'étude porte sur 6 BAP avec et sans fibres (des fibres de 12 mm et de 6 mm de longueur) pour deux classes de résistance initiale C25/30 (W/C = 0.56) et C30/37 (W/C = 0.44)) et 2 BV (de même classes de résistance que les BAP). Les essais mécaniques sont effectués à l'âge de 120 jours sur des éprouvettes cylindriques de 150mm×300mm, la vitesse d'échauffement est de 5°C/min, les cycles de chauffage-refroidissement sont : 300° et 600°C, ces températures sont maintenues pendant 1heure, puis le four est éteint et les éprouvettes sont refroidies progressivement dans le four.

- **Comportement aux hautes températures**

La résistance à la compression résiduelle des BV a diminué d'une manière linéaire jusqu'à 600°C. Certaines éprouvettes de résistance C25/30 éclatent à une température inférieure à 500°C, néanmoins un éclatement explosif est survenu à une température inférieure à 250°C dans le cas des éprouvettes de résistance C30/37. La résistance à la compression résiduelle des BAP sans fibres a diminué également d'une manière linéaire. Les éprouvettes de résistance C30/37 explosent à une température supérieure à 500°C, les éprouvettes de résistance C25/30 n'ont pas explosé.

Pour toutes les températures testées, la résistance résiduelle à la compression des BAP sans fibres est supérieure à celle des BV du même classe de résistance (et de même rapport E/C).

Tous les BAP confectionnés avec les fibres de polypropylène n'ont pas explosé, les fibres augmentent la résistance à l'éclatement. Les fibres polypropylènes (pour les deux longueurs) ont présenté le même effet positif sur la résistance à l'éclatement, cependant les deux fibres polypropylènes diminuent d'une manière significative la résistance résiduelle à la compression et à la traction du BAP.

10. Conclusion de la partie bibliographique

Dans cette partie, nous avons présenté en premier lieu le matériau béton, les BAP, la particularité de leur composition et de leur caractérisation à l'état frais ainsi que leur comportement à température ambiante, puis les bétons de chanvre, leur impact sur l'environnement ainsi que leurs caractéristiques physiques et mécaniques. Nous avons aussi présenté l'état de l'art des bétons soumis aux hautes températures et particulièrement les BAP. Notons que nous n'avons pas trouvé des études sur le comportement aux hautes températures du béton de chanvre dans la littérature.

Les BAP sont des bétons très fluides qui se mettent en place sans vibration sous le seul effet de leur poids propre, ils constituent une véritable alternative au béton traditionnel grâce aux avantages techno-commerciaux qu'ils offrent. La composition des BAP se caractérise par un volume de pâte élevé, riche en fines et par un faible volume de granulats, ajouté à cela un dosage adéquat en superplastifiant et en agent de viscosité afin d'atteindre la fluidité et la stabilité requises. Les résistances en compression et en traction du BAP comparées aux résistances du BO correspondant (formulé à des rapports E/L identiques) se trouvent améliorées ou au moins égales suite à l'utilisation des additions minérales qui densifient la microstructure des BAP et améliorent l'interface pâte-granulats.

Dans la partie consacrée à l'étude bibliographique sur les bétons de granulats et fibres de chanvre, nous avons mis en évidence l'utilisation de ces derniers dans la construction afin de réduire les consommations énergétiques et les émissions de gaz à effet de serre, les différents composants rentrant dans la composition du béton de chanvre, les précautions à prendre lors de la fabrication ainsi que les différentes caractéristiques de ce nouveau béton. Le béton de chanvre qui est composé essentiellement de la chaux et de la chènevotte présente des caractéristiques physiques et thermiques très intéressantes, telles que capacité de régulation hydrique élevée, faible conductivité thermique et légèreté. Cette dernière caractéristique explique son utilisation dans les structures en bois. L'inconvénient de ce béton, c'est qu'il présente des caractéristiques mécaniques médiocres. Les fibres de chanvre sont également valorisées pour fabriquer des éco-matériaux de construction, elles sont utilisées comme renfort des matrices cimentaires grâce à leurs performances mécaniques. Dans ce travail de recherche, nous allons utiliser les fibres de chanvre à la place des granulats de chanvre pour étudier le comportement au feu du béton de chanvre. Ceci trouve son explication à la composition chimique (la composition de la chènevotte est 50-60% de cellulose, 15-20% d'hémicellulose, 20-30% de lignine et 4-5% de cendres [44], celle des fibres de chanvre est 56.1% de cellulose, 10.9 de % d'hémicellulose, 20.1% de pectine, 6% de lignine[45]) qui est presque la même pour les granulats et les fibres de chanvre (sachant que le comportement au feu des bétons est principalement gouverné par les transformations chimiques que subissent les différents constituants des bétons).

Par la suite, nous avons présenté le comportement aux hautes températures des différents bétons. Les résultats expérimentaux montrent que l'élévation de la température modifie les propriétés physico-chimiques et mécaniques des bétons, ces modifications sont dues à la déshydratation du gel CSH, à la décomposition de la portlandite et surtout à la dilatation thermique différentielle pâte/granulats. La matrice cimentaire subit une expansion thermique jusqu'à 150°C puis un

retrait thermique; au-delà de cette température, les granulats se dilatent avec la température et l'on note que les granulats donnant les meilleures performances sont les granulats calcaires. Le mode de refroidissement (à l'air, par trempe dans l'eau et par pulvérisation) influe également sur les performances mécaniques des bétons portés aux hautes températures; les bétons refroidis à l'air présentent un maintien relativement élevé de leurs résistances par rapport aux autres modes de refroidissement. La littérature montre également que les bétons dont l'âge est inférieur à 28 jours peuvent reprendre leurs résistances si la température d'exposition est inférieure à 800°C.

Les bétons peuvent subir des instabilités thermiques caractérisées par un éclatement explosif ou un écaillage. Plusieurs paramètres influents sur cette instabilité, la vitesse de chauffage, la présence d'eau, la nature des granulats et surtout le rapport E/C, les bétons de faible rapport E/C comme les BHP sont les plus sujets à cette instabilité.

La littérature note que l'utilisation des fibres polypropylènes ou métalliques peut prévenir le risque d'instabilité thermique des bétons, la fusion de fibres polypropylènes à environ 170°C puis leur évaporation crée une porosité supplémentaire, permettant l'évacuation de la vapeur d'eau vers l'extérieur et réduisant par la suite la pression dans les pores. Les fibres métalliques améliorent également la prévention contre l'éclatement des bétons en améliorant la résistance à la traction des bétons. Sur les performances mécaniques, les avis divergent selon les auteurs, certains auteurs ont remarqué une baisse de résistance résiduelle tandis que d'autres auteurs ont observé le contraire.

L'étude bibliographique sur les BAP portés aux hautes températures ne permet pas de montrer une différence entre le comportement mécanique des BAP et BV. Certains auteurs ont observé que les BAP présentent un comportement mécanique meilleur que les BV, d'autres ont observé l'inverse, les avis divergent également sur le risque d'instabilité des BAP comparés au BV correspondant.

CHAPITRE 3
CARACTERISATION DES MATERIAUX DE BASE ET ESSAIS EFFECTUES

CHAPITRE 3 : CARACTERISATION DES MATERIAUX DE BASE ET ESSAIS EFFECTUES

1. Introduction

Les caractéristiques et le dosage des différents constituants utilisés pour la formulation des bétons influent grandement sur leur comportement. Nous procédons donc dans ce chapitre, tout d'abord, à la caractérisation des matériaux de base ainsi qu'à la formulation des différents bétons analysés dans ce travail de recherche, ensuite nous présentons les différents essais réalisés dans le cadre de ce travail de recherche.

2. Programme expérimental

Le programme expérimental réalisé dans cette recherche a pour but d'examiner le comportement au feu de trois types de bétons (béton ordinaire, béton autoplaçant et béton de fibres de chanvre), ainsi que l'influence de l'ajout des fibres (métalliques et polypropylènes) sur leurs comportements.

Le programme expérimental réalisé comprend plusieurs essais regroupés en quatre parties principales:

- **Partie 1:** Essais de caractérisation des différents constituants utilisés dans la composition des trois bétons. Cette partie a pour but de définir les différentes caractéristiques (géométriques, physiques, chimiques et mécaniques) des différents constituants employés dans cette recherche;
- **Partie 2:** Formulation et essais de caractérisation à l'état frais des trois types de bétons. Cette partie a pour but de donner une formulation pour chaque type de béton et de les caractériser à l'état frais par des essais normalisés selon le type de béton (essai d'affaissement, essai d'étalement, teneur en air, etc.);
- **Partie 3:** Essais mécaniques sur bétons durcis avant et après exposition au feu. Cette partie a été réalisée pour examiner l'influence du feu sur le comportement mécanique (résistance à la compression et à la traction) des différents bétons réalisés;
- **Partie 4:** Essais physiques sur bétons durcis avant et après exposition au feu. Cette partie comprend des mesures de retrait et de perte de masse, des mesures de la porosité et de l'absorption capillaire avant et après exposition au feu des trois types de bétons.

3. Caractéristiques des matériaux de base

3.1. Le ciment

Le ciment utilisé dans cette étude expérimentale est de type CEM II/A 42.5 provenant de l'usine d'El-Hamma (région de Constantine), il est conforme à la norme algérienne NA442 (NF EN 197-1 [99]). Les différentes caractéristiques que ce soit chimiques, physiques ou mécaniques de ce ciment, sont établies sur des fiches techniques élaborées au niveau des laboratoires de l'usine même, elles sont présentées dans les tableaux 3.1, 3.2 et 3.3 suivants.

Tableau 3.1. Composition chimique du ciment (%)

SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	K_2O	Na_2O	SO_3	chlorures	P.A.F 1000°	CaO libre	résidus insolubles
27.71	6.19	2.8	57.62	1.09	0.82	0.68	2.10	0.00	1.45	0.62	11.48

Tableau 3.2. Propriétés physiques du ciment

Temps de prise		Expansion le Chatelier (mm)		Surface spécifique Blaine (cm^2/g)	Consistance normale (%)
Début	Fin	A chaud	A froid	4382	26.36
2h05 min	3h 04 min	2.9	1.65		

Tableau 3.3. Résistances mécaniques du ciment (MPa).

Essais	Ages		
	2 jours	7 jours	28 jours
Compression (MPa)	17.01	35.63	46.75
Flexion (MPa)	3.99	6.21	7.19

3.2. Les granulats

Les granulats utilisés dans cette recherche sont des produits d'origine naturelle, concassés, calcaires, provenant de la carrière de L'ENG d'El Khroub (région de Constantine), ils sont conformes à la norme algérienne NA 5043 (XP P 18-545 [100]). Les classes granulaires utilisées pour la confection des bétons sont: 0/4 pour le sable, 4/8 et 8/16 pour les gravillons.

Les caractéristiques de ces différents granulats sont présentées dans les tableaux 3.4, 3.5 et 3.6 et la courbe granulométrique sur la figure 3.1.

Tableau 3.4. Caractéristiques géométriques des granulats

Caractéristiques géométriques	Classes granulaires		
	Sable 0/4	Gravillon 4/8	Gravillon 8/16
Module de finesse	3.01	/	/
Coefficient d'aplatissement	/	21.1%	16%

Tableau 3.5. Caractéristiques physiques des granulats

Propriétés mesurées		Sable 0/4	Gravillon 4/8	Gravillon 8/16
Masses volumiques (kg/litre)	absolue	2.65	2.55	2.55
	apparente	1.45	1.37	1.35
Coefficient d'absorption (%)		1.14	0.83	0.85
Valeur au bleu de méthylène		0.48	/	/

Tableau 3.6. Caractéristiques chimiques

Propriétés mesurées	Teneur (%)
Teneur en sulfate soluble dans l'acide (%)	0.19
Teneur en soufre total (%)	0.0137
Teneur en chlorure (%)	0.005
Impuretés prohibées	néant

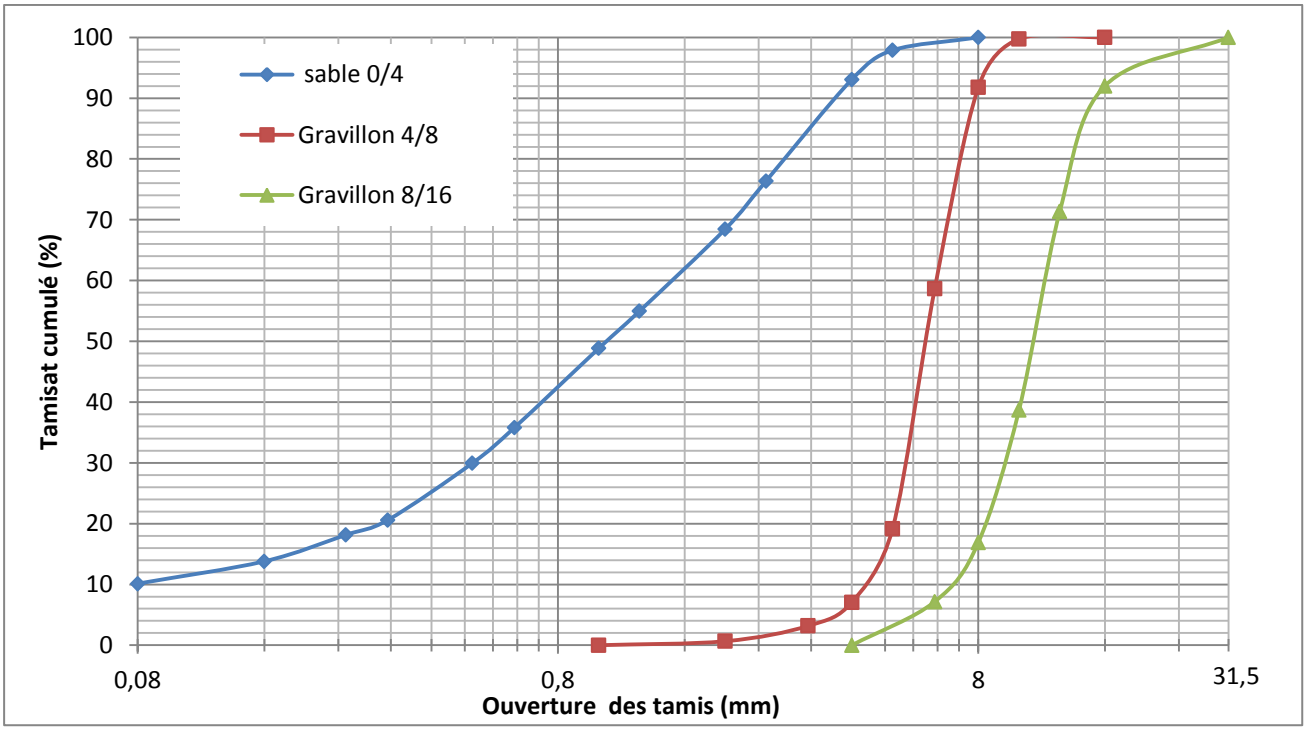


Figure 3.1. Courbes granulométriques des granulats

3.3. Le filler calcaire

Les fillers calcaires sont des produits finement divisés, obtenus par broyage des gisements de roches calcaires. Dans cette recherche, le filler calcaire de la carrière de L'ENG d'El Khroub (région de Constantine) est utilisé. Il est commercialisé sous l'appellation ALCAL UF20 et ses principales caractéristiques sont présentées dans la figure 3.2 et les tableaux 3.7 et 3.8, elles proviennent des fiches techniques élaborées au niveau des laboratoires de L'ENG.

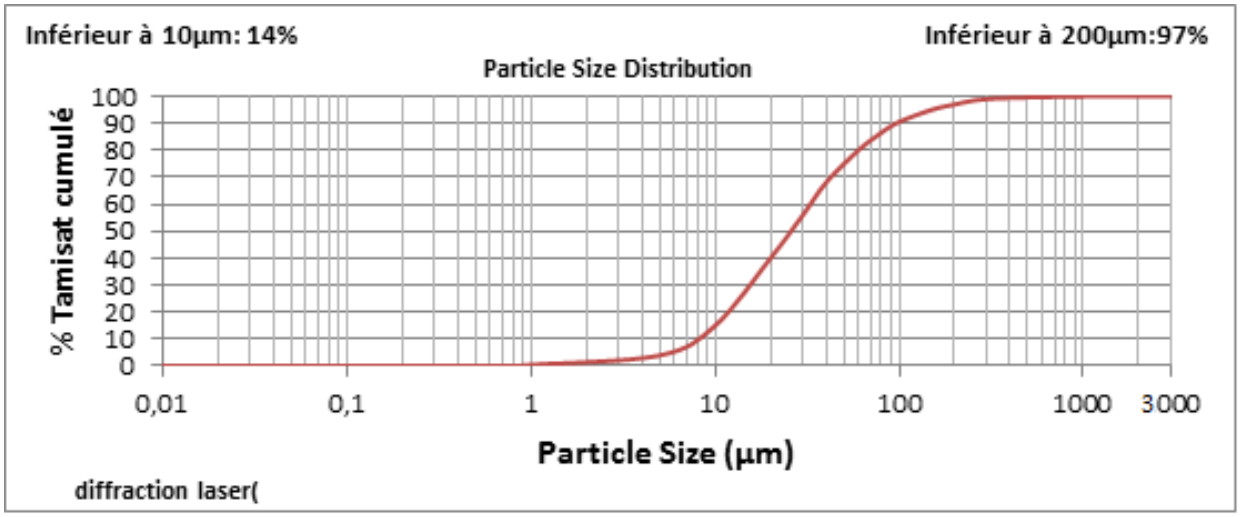


Figure 3.2. Répartition granulométrique du filler ALCAL UF20

Tableau 3.7. Caractéristiques physiques

Dureté (MOHS)	3
Poids spécifique	2.7
Densité apparente non tassée	1.3

Tableau 3.8. Composition chimique du filler calcaire ALCAL UF20

Composants	Teneur en %
$CaCO_3$	99
CaO	55.88
SiO_2	0.01
Na_2O	0.01
MgO	0.14
Al_2O_3	0.01
Fe_2O_3	0.01
K_2O	0.01
P_2O_5	0.01
TiO_2	0.01
Chlorure	0.005
SO_3 (soluble dans l'eau)	0.021
SO_3 (soluble dans l'acide)	0.1115
Soufre totale	0.0137
Résidus insolubles	0.01
Solubilité dans l'eau (Ws)	0.38
Perte au feu	43.9
pH	9.24

3.4. L'adjuvant

Pour la fabrication du BAP, le superplastifiant haut réducteur d'eau **SUPERIOR RM34S12** (conforme à la norme NF EN 934-2 [101]) est utilisé. Il est commercialisé par l'entreprise **TEKNACHEM.** Il est conçu à base de polycarboxylates modifiés et il est compatible avec tous les types de ciment. La plage du dosage du **SUPERIOR RM34S12** varie entre 0.6 et 2.0 % du poids du ciment, il peut présenter un effet retardateur lorsque le dosage est supérieur à 1.5%.

Les caractéristiques techniques du **SUPERIOR RM34S12** sont présentées ci-dessous:

Aspect : Liquide
Couleur : Marron

Densité (20°C) :	1.08 ± 0.02
pH (20°C):	5.5 ± 1
Teneur en chlorures :	≤ 0.1%
Extrait sec:	28% ± 2%

3.5. Chaux éteinte

La chaux éteinte utilisée pour la fabrication du béton de chanvre provient de l'usine d'El-Hadjar de Annaba. Ses caractéristiques physiques sont établies au niveau du LMDC de Constantine, tandis que ses caractéristiques chimiques proviennent des fiches techniques élaborées au niveau du laboratoire de l'usine, elles sont toutes les deux récapitulées dans les tableaux 3.9 et 3.10 suivants:

Tableau 3.9 Caractéristiques physiques

Caractéristiques physiques	
Aspect	fine poudre blanche inodore
Masse volumique absolue (kg/m^3)	2300
Masse volumique apparente (kg/m^3)	680
Surface spécifique m^2/kg	2000

Tableau 3.10 Caractéristiques chimiques

Composants	Teneur en %
Hydroxyde de calcium $Ca(OH)_2$	98
Oxyde de fer	0.7
Oxyde d'aluminium Al_2O_3	0.25
Dioxyde de silicium SiO_2	0.5
Oxyde de magnésium MgO	0.15
pH (à 25° C)	12.6 en solution saturée

3.6. Fibres de chanvre

Les fibres de chanvre utilisées dans cette recherche proviennent du découpage de la filasse de chanvre en morceaux entre 1 et 4 cm (figure 3.3). Les caractéristiques techniques (la masse volumique apparente, la teneur en eau et la cinétique d'absorption) mesurées de ces fibres sont présentées ci-dessous. Les résultats des essais sont récapitulés dans le tableau 3.11.

Figure 3.3. Filasse de chanvre coupée entre 1 et 4 cm

- **La masse volumique en vrac des fibres**

La mesure de la masse volumique en vrac a été réalisée dans un récipient cylindrique d'une contenance d'environ 10 litres, les fibres de chanvre sont déversées manuellement sans être tassées dans le récipient. Trois pesées sur des échantillons distincts sont effectuées. Le résultat de l'essai donne une masse volumique en vrac égale = 25 kg/m^3.

- **La teneur en eau initiale des fibres**

La teneur en eau W_0 contenue dans les fibres a été mesurée en plaçant dans une étuve (60°C) trois échantillons distincts de 30 g de fibres conservés au préalable à l'ambiance du laboratoire, ensuite la teneur en eau est déterminée par la relation suivante : $W_0 = m_1\text{-}m_0/m_{0,}$ où:

m_1: la masse des fibres avant l'étuvage m_1 = 30 g;
m_0: la masse des fibres après l'étuvage.

Le résultat de l'essai donne une teneur en eau initiale des fibres W_0 = 38 %.

- **La cinétique d'absorption de l'eau**

La cinétique d'absorption des fibres est une caractéristique primordiale car elle conditionne les caractéristiques hygrométriques du béton de chanvre.

L'essai consiste à placer dans une étuve une quantité de fibres m_0=30 g à 60°C pendant 24h. Ces fibres sont ensuite placées dans un tamis de 5 mm de taille (permettant une évacuation rapide de l'eau de trempe lors de l'essorage), puis l'ensemble est immergé pendant une durée t de t = (1, 5, 10, 30, 60, 120 minutes et 24 heures). Pour chaque durée, la quantité d'eau m(t) absorbée par les fibres est mesurée, le taux d'absorption W(t) des fibres est ensuite déterminé par la relation ci-dessous. Le taux d'absorption maximum (de saturation W_{sat}) est défini à 24h.

$W(t) = m(t)\text{-}m_0/m_{0.}$

La mesure du taux d'absorption nous a permis de tracer la courbe W(t) (figure 3.4)

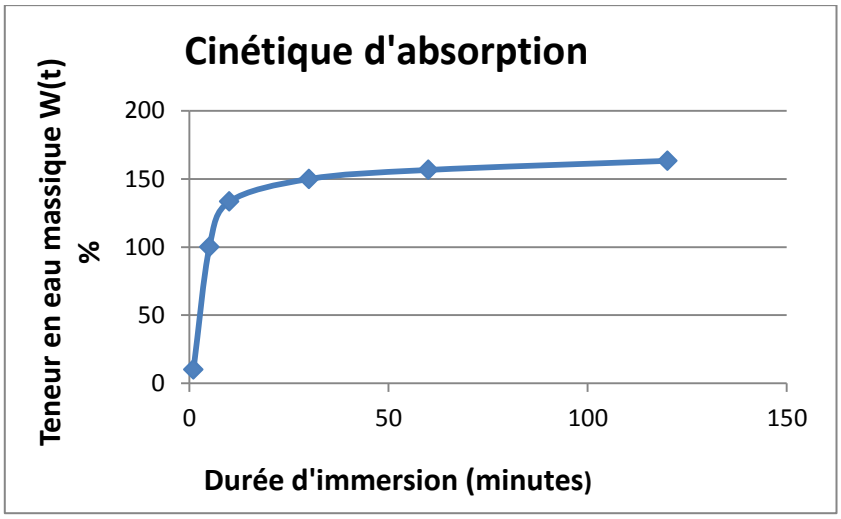


Figure 3.4. Cinétique d'absorption des fibres de chanvre

L'essai conduit sur les fibres de chanvre montre qu'elles présentent un fort pouvoir absorbant et une cinétique d'absorption très rapide. Les fibres de chanvre atteignent un taux d'absorption égal à 130% en moins de 10 minutes, ce taux représente 79,6% du taux de saturation défini à 24 heures, qui est de 163.33%. Ce pouvoir absorbant peut générer des difficultés à l'état frais et à l'état durci; à l'état frais du fait de la mobilisation d'une part importante de l'eau de gâchage par les fibres, et à long terme, en raison des variations volumiques pouvant être engendrées par les variations d'humidité dans le matériau.

Tableau 3.11. Caractéristiques des fibres de chanvre

Caractéristiques des fibres de chanvre	
Granulométrie	entre 1 et 4 cm
Masse volumique en vrac	25 kg/m^3
Teneur en eau initiale	38%
Taux d'absorption après 24 h	163.33%

3.7. Les fibres métalliques et polypropylènes

Les fibres de différentes natures sont ajoutées aux bétons afin d'améliorer leurs caractéristiques à l'état durci, leur rôle principal est le renforcement des bétons en s'opposant au développement des fissures et à leur propagation, en situation d'incendie ils ont pour effet l'amélioration de la tenue au feu des bétons durcis.

Dans ce travail de recherche, les fibres métalliques et polypropylènes sont utilisées dans le but d'améliorer la tenue au feu des bétons, elles sont toutes les deux utilisées en un seul et même dosage pour les trois types de bétons.

- **Fibres métalliques**

Les caractéristiques techniques des fibres métalliques utilisées dans cette recherche sont présentées dans le tableau 3.12 suivant

Tableau 3.12. Caractéristiques techniques de fibres métalliques

Nature	Acier
Masse volumique	7800 kg/m^3
Type d'ancrage	avec 2 crochets
Langueur	30 mm
Diamètre	0.55 mm
Résistance à la traction	1100 MPa

- **Fibres polypropylènes**

Les caractéristiques techniques des fibres polypropylènes utilisées dans cette recherche sont présentées dans le tableau 3.13 suivant

Tableau 3.13. Caractéristiques techniques de fibres polypropylènes

Nature	100% Polypropylène
Masse volumique	900 kg/m^3
Résistance à la traction	670 MPa
Module de Young	4 GPa
Point de fusion	166°C
Point de combustion	593°C
Résistance chimique	Elevée
Résistance au alcalins	Elevée
Longueur	20 mm
Conditionnement	fournis en sac de 200 g

4. Formulation des mélanges

Les mélanges formulés dans ce travail de recherche sont au nombre de neuf. Pour chaque type de béton, trois mélanges sont formulés: un béton témoin (sans fibres), un béton avec ajout de fibres métalliques et un béton avec ajout de fibres polypropylènes.

4.1. Formulation des bétons ordinaires

La méthode utilisée pour formuler le béton ordinaire est la méthode DREUX GORISSE [102]. Cette méthode permet de définir d'une façon simple et rapide une formule de composition à peu près adaptée au béton recherché, mais seulement avec des essais d'étude qu'on ajuste au mieux la composition à adopter définitivement et s'assurer que les objectifs visés sont atteints.

L'application de la méthode de DREUX GORISSE nous conduit à suivre les étapes suivantes:

La résistance souhaitée: elle est définie par la résistance caractéristique en compression à 28 jours fc_{28}. Lors d'un travail de formulation et pour tenir compte de la dispersion des résultats et de l'écart quadratique on doit viser une résistance moyenne à 28 jours fm_{28} supérieure à la résistance caractéristique à 28 jours $fm_{28} > fc_{28}$, car $fc_{28} = fm_{28}$-0.8s (0.8 pour un coefficient de variation de 20%). Pour cette recherche, la résistance caractéristique désirée à 28 jours est de 25 MPa, si l'on admet un coefficient de variation moyen de l'ordre 20%, on pourra adopter la règle approximative pour la résistance moyenne à viser : $fm_{28} = fc_{28} + 15\%$, la résistance moyenne à viser est donc : $fm_{28} = fc_{28} + 15\% \approx 29$ MPa.

Consistance désirée: elle est définie généralement par l'affaissement mesuré au moyen du cône d'Abrams "A", elle est fonction de la nature de l'ouvrage et de la difficulté du bétonnage et des moyens de serrage. Pour cette recherche on se contente de formuler un béton plastique avec un serrage de type courant, ce qui nous conduit à chercher un béton dont l'affaissement est $6 \leq A \leq 9$ cm.

Dimension maximale des granulats: la dimension maximale des granulats D_{max} (tamis) est fonction des caractéristiques de la pièce à bétonner et de l'ambiance plus ou moins agressive. Dans la présente recherche on a utilisé un $D_{max} = 16$ mm.

Détermination du rapport C/E: le rapport C/E dépend de la résistance souhaitée, il est déterminé à partir de la formule de BOLOMEY [102], pour une résistance moyenne de 29 MPa, le rapport C/E est égal à 2.02.

Dosage en ciment C: le dosage en ciment à adopter est fonction de l'environnement de l'ouvrage (l'agressivité du milieu où se trouve l'ouvrage) et de la résistance souhaitée, il est déterminé par des abaques connaissant le rapport C/E et l'ouvrabilité désirée. Dans cette étude le rapport C/E est de 2.02 et l'ouvrabilité désirée est $6 \leq A \leq 9$ cm, on trouve donc $C = 425$ kg/m^3 (valeur tirée de l'abaque X-14 du livre nouveau guide du béton et de ses constituants [102]).

Détermination du dosage en eau E: La quantité d'eau E nécessaire pour la confection du béton se calcule à partir du rapport C/E et du dosage en ciment C:

$E = C/\frac{C}{E}$, pour un dosage en ciment $C = 425$ kg/m^3 et un rapport $C/E = 2.02$, on trouve $E = 210.4$ litres.

Détermination du dosage des granulats: le dosage des granulats est déterminé après le traçage de la courbe de référence OAB et les lignes de partage un et deux, sur un graphique d'analyse granulométrique type AFNOR (figure 3.5), les cordonnées de la courbe de référence sont:

Coordonnées de B (D_{max}, 100%);

Coordonnées de A (X=D_{max} /2, Y=50 - $\sqrt{D_{max}}$+K) avec:

K:est un terme correcteur qui dépend du dosage en ciment, de l'efficacité du serrage, de la forme des granulats roulés ou concassés et également du module de finesse du sable, K = 4 (valeur tirée du tableau 10-12 du livre nouveau guide du béton et de ses constituants [102])

X = D_{max} /2 = 16/2 =8 mm.

Y = 50 - $\sqrt{D_{max}}$+K=50 -4+4=50%.

Y = 50 %, donc B (8mm, 50%).

La ligne de partage 1 s'obtient en joignant le point 97% de la courbe du sable au point 5% de la courbe du gravillon 4/8 (figure 3.5).

La ligne de partage 2 s'obtient en joignant le point 95% de la courbe du gravillon 4/8 au point 5% de la courbe du gravillon 8/16 (figure 3.5).

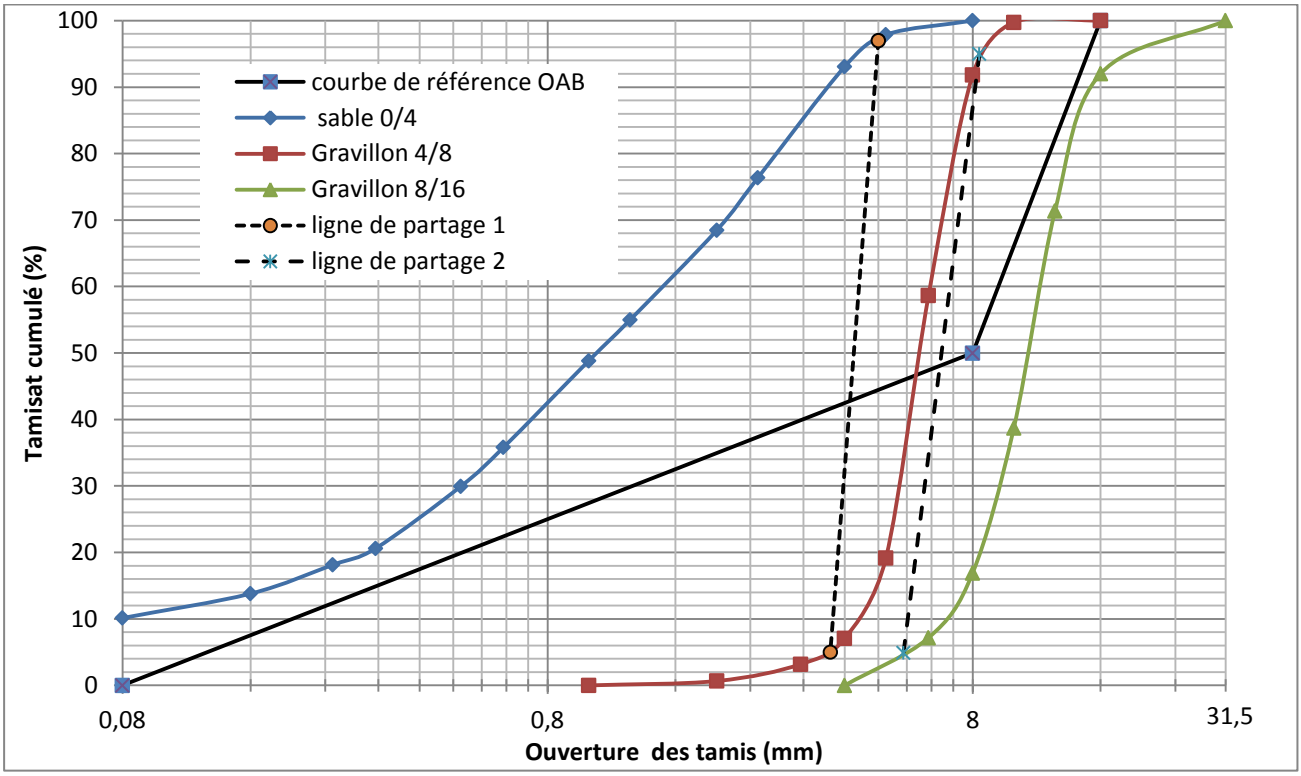


Figure 3.5. Détermination de la composition granulaire du béton ordinaire

Le point de rencontre de la ligne de partage 1 avec la courbe de référence donne le pourcentage du sable et le pourcentage total du gravillon, et le point de rencontre de la ligne de partage 2 avec la courbe de référence donne les pourcentages des gravillons 4/8 et 8/16:

Le pourcentage du sable = 42%;
Le pourcentage du gravillon 4/8 = 6%;
Le pourcentage du gravillon 8/16 = 52%.

En adoptant pour le coefficient de compacité la valeur γ = 0,825 (valeur tirée du tableau 10-13 du livre nouveau guide du béton et de ses constituants [102]), les volumes absolus des constituants solides sont les suivants:

Volume total absolu	1000γ = 825 litres
Volume absolu du ciment	$\frac{425}{3,1} = 137,1$ l
Volume absolu des granulats	825-137.1 = 687.9 litres
Volume absolu du sable	687.9x0.42=288.92 litres
Volume absolu du gravillon 4/8	687.9x0.06=41.27 litres
Volume absolu du gravillon 8/16	687.9x0.52=357.71 litres

Les densités du sable, gravillon 4/8, gravillon 8/16 sont respectivement 2.65, 2.55, 2.55. Le dosage pondéral des différents constituants est donc :

Sable	288.92x2.65=765.64 kg
Gravillon 4/8	41.27x2.55=105.24 kg
Gravillon8/16	357.71x2.55=912.13 kg
Ciment	425 kg
Eau totale (approximativement)	210.4 kg

En ce qui concerne les fibres, un dosage de 1.5 kg/m^3 (0.16% en volume) pour les fibres polypropylènes et un dosage de 40 kg/m^3 (0.49% en volume) pour les fibres métalliques sont utilisés.

Après des essais d'étude de la formule de composition théorique du béton ordinaire sans fibres, les dosages des constituants sont maintenus tels qu'ils sont, et ils sont portés sur le tableau 3.14. Le béton ordinaire, le béton ordinaire avec ajout de fibres métalliques, le béton ordinaire avec ajout de fibres polypropylènes sont notés respectivement BO, BOFM, BOFP.

Tableau 3.14. Dosage des différents constituants

	Dosage en kg/m^3 des constituants des trois BO		
Constituants	BO	BOFP	BOFM
Ciment (C)	425	425	425
Sable (S)	766	766	766
Gravier 4/8	105.24	105.24	105.24
Gravier 8/16	912.13	912.13	912.13
Eau (E)	210.4	210.4	210.4
Fibres polypropylènes	/	1.5	/
Fibres métalliques	/	/	40
E/C	0.5	0.5	0.5
G/S	1.35	1.35	1.35

4.1.1. Fabrication des bétons ordinaires

Pour la fabrication des bétons ordinaires, un malaxeur à axe vertical et mouvement planétaire de capacité 180 litres est utilisé. La fabrication des bétons ordinaires a été effectuée conformément à la norme NF P 18-404 [103].

La séquence du malaxage est la suivante:

- Pré mouillage du malaxeur;
- Introduction des constituants solides en commençant par les plus grossier au plus fin (graviers, sable, puis les fillers calcaires et pour finir le ciment);
- Malaxage à sec pendant 1 minute;
- Introduction de l'eau et malaxage pendant 2 minutes.

4.2. Formulation des bétons autoplaçants

Contrairement au béton ordinaire, il n'existe pas à l'heure actuelle une méthode de formulation propre au BAP. La méthode de DREUX GORISSE n'est en effet pas adaptée, car elle ne prend en compte ni les adjuvants ni les additions minérales, la formulation se fait donc d'une manière empirique (par tâtonnement) tout en tenant compte de l'expérience acquise ces dernières années. Toutefois, il existe des méthodes moins empiriques qui permettent l'aboutissement à une formule de BAP plus rapidement.

Dans cette étude on a appliqué la méthode japonaise car c'est la méthode la plus simple et la plus adaptable aux bétons à base de matériaux locaux. L'application de la méthode japonaise a été effectuée, tout en respectant les recommandations sur le dosage des constituants qu'on trouve dans la littérature.

L'application de la méthode Japonaise déjà présentée dans la partie bibliographique nous conduit à suivre les étapes suivantes:

Le dosage en gravillons : les auteurs de la méthode japonaise ont limité le dosage volumique des gravillons à 50% de leur compacité, ceci permet de minimiser le risque de blocage, les auteurs ne précisent pas la méthode de détermination de la compacité. Dans cette recherche la méthode américaine (ASTM C29-78 [104]) est utilisée pour déterminer la compacité. Elle consiste à remplir un moule cylindrique (16x32 cm) par simple versement (sans le tasser et avec une hauteur de chargement n'excédant pas 50 cm au-dessus du moule) jusqu'au débordement, puis nous le vidons et nous partageons l'échantillon en trois parties égales. Nous remplirons de nouveau le moule avec l'échantillon partagé en trois parties en trois couches successives, chaque couche doit être compactée avec 25 coups par une tige en acier à tête hémisphérique et à 600 mm de longueur avec un diamètre de 16 mm. Lors du piquage de la première couche, on ne doit pas laisser la tige frapper fortement le fond du moule, lors du piquage de la deuxième et troisième couche, on emploie un effort vigoureux sans faire pénétrer la tige à la couche précédente. Le vide qui découle du compactage de l'échantillon représente le vide qui se trouve dans celle-ci.

Pour notre étude, on a utilisé un gravier composé de 50% en masse de la classe granulaire 4/8 et 50% en masse de la classe granulaire 8/16. Les résultats ont donné une compacité de 0.58, le dosage volumique en gravillons sera donc 50 x 0.58/100 = 0.29 m^3, soit un dosage pondéral = 0.29 x 2550 = 740 kg par mètre cube de béton.

Le dosage en sable : Le dosage volumique en sable étant 40% du volume total du mortier, si on suppose que g, s, c, f, sp, e et v sont respectivement les volumes absolus des gravier, sable, ciment, fillers, superplastifiant, eau de gâchage et vides, on peut écrire (en mètre cube):

g + s + c + f + sp + e + v = 1 (mètre cube),

Alors: s + c + f + sp + e + v = 1-g (qui représente le volume absolu du mortier).

$\Longrightarrow$ s=0.4 (1-g)=0.4 (1-$\frac{740}{2550}$) = 0.284 m^3

Soit un dosage pondéral du sable = 0.284 x 2650=752.6 kg par mètre cube de béton, on va retenir 760 kg/m^3.

Le dosage des autres constituants: le dosage des autres constituants (ciment, filler, eau et superplastifiant) est déterminé à partir des essais d'optimisation sur mortiers (contenant un teneur volumique en sable = 40% du volume total du mortier), en faisant varier les rapports $\frac{F}{F+C}$, $\frac{E}{F+C}$, $\frac{SP}{F+C}$ et on effectue conjointement des essais d'étalement au mini-cône et au mini entonnoir. Ces essais permettent de calculer deux paramètres : $\Gamma_m = \frac{(d)^2-(d_0)^2}{(d)^2}$ et $R_m = \frac{10}{t}$, pour un BAP, les valeurs de ces paramètres sont : Γ_m = 5 et R_m= 1.

Comme on a mentionné plus haut, et afin de converger plus rapidement vers une composition de BAP, on va appliquer la méthode Japonaise tout en respectant les recommandations sur les dosages des constituants qu'on trouve dans la littérature [105,106] à savoir, un dosage en liant (ciment (C) + filler (F)) et en filler (F) variant:

385 kg/m^3 ≤ C+F ≤ 635 kg/m^3;
120 kg/m^3 ≤ F ≤ 200 kg/m^3.

Si on fixe le même dosage en ciment que pour le béton ordinaire (qui est un dosage nettement supérieur aux spécifications des normes sur le dosage en ciment), et un dosage en filler F = 160 kg/m^3, alors on peut donner en première approximation:

C = 425 kg/m^3 et F = 160 kg/m^3, ceci nous donne un rapport $\frac{F}{F+C} = \frac{160}{160+425} = 0.273$.

Donc, il ne nous reste qu'à optimiser le dosage en eau et en superplastifiant. Cependant, selon les travaux de Bensebti [25] qui a étudié la formulation du BAP par cette méthode, il a trouvé que le dosage optimal du superplastifiant pour avoir un BAP est le dosage de saturation du coulis (ciment +filler), déterminé par l'essai de cône de Marsh. Pour le rapport $\frac{F}{F+C} = 0.273$ et le superplastifiant **SUPERIOR RM34S12,** on a trouvé un dosage de saturation:

$\frac{SP}{F+C} = 1{,}3\%$.

Cette manière de faire nous a permis de réduire les paramètres de formulation à un seulement. Donc on cherche uniquement à optimiser le dosage en eau, en faisant varier le rapport $\frac{E}{F+C}$ jusqu'à l'obtention d'un mortier caractérisé par un étalement au mini-cône égal à $\Gamma_m = 5$ et au mini entonnoir égal à $R_m = 1$.

Les auteurs de la méthode japonaise considèrent les particules dont le diamètre est inférieur à 90 µm comme des fines (au même titre que le filler), donc on doit prendre en considération l'apport des fines par le sable sur la quantité totale du filler à mettre en place dans le mélange du BAP. Le sable qu'on va utiliser pour confectionner le BAP contient 10% de particules dont le diamètre est inférieur à 0.08 mm (figure analyse granulométrique), donc pour un dosage en sable égal à 760 kg/m^3, l'apport en fines sera de 76 kg/m^3. Pour garder un dosage effectif en sable égal à 760 kg/m^3, on doit soustraire du dosage en sable la quantité des fines que l'on remplace par une quantité correspondante de sable, ceci nous conduit à un nouveau dosage en sable égal à 845 kg/m^3, et un apport en fines de 84.5 kg/m^3.

Comme pour le béton ordinaire, on a confectionné trois mélanges, un béton autoplaçant sans fibres (BAP), un béton autoplaçant avec ajout de fibres métalliques (BAPFM) avec un dosage de 40 kg/m^3 (0.52% en volume), un béton autoplaçant avec ajout de fibres polypropylènes (BAPFP) avec un dosage de 1.5 kg/m^3 (0.163% en volume).

Les compositions retenues de ces trois bétons sont présentées dans le tableau 3.15 suivant:

Tableau 3.15. Compositions retenus des BAP

	Dosage en kg/m^3 des constituants des trois BAP		
Constituants	BAP	BAPFM	BAPFP
Ciment (C)	425	425	425
Sable (S)	845	845	845
Gravier 4/8	370	370	370
Gravier 8/16	370	370	370
Eau (E)	209	209	209
Filler (F)	75.5	55.5	55.5
Superplastifiant (SP)	7.605	7.605	7.605
Fibres métalliques	/	40	/
Fibres polypropylènes	/	/	1.5
E/C	0.49	0.49	0.49
F/L	0.273	0.273	0.273
E/L	0.357	0.357	0.357
G/S	0.974	0.974	0.974

4.2.1. Fabrication des bétons autoplaçants

Pour la fabrication des bétons autoplacants on a utilisé un malaxeur à axe vertical et mouvement planétaire de capacité 180 litres.

La fabrication se déroule comme suit :

- Prémouillage du malaxeur;
- Introduction des constituants solides en commençant par les plus grossiers aux plus fins (graviers, sable, puis les filler calcaire et pour finir le ciment);
- Malaxage à sec pendant 1 minute;
- Introduction de l'eau et un tiers du superplastifiant;
- Malaxage pendant 1 minute 30 secondes;
- Introduction du dernier tiers du superplastifiant;
- Malaxage pendant 2 minutes.

Les fibres métalliques et polypropylènes sont ajoutées en dernier, elles sont dispersées de manière homogène à la main, puis un re-malaxage à nouveau du béton est effectué pendant 1 minute 30 secondes.

4.3. Formulation des bétons de fibres de chanvre

Comme il est mentionné dans la partie bibliographique. Les propriétés du béton de chanvre dépendent fortement de sa composition, lorsqu'on cherche des propriétés hygrothermiques c'est le dosage en granulats de chanvre qui sera prépondérant, et lorsqu'on cherche des propriétés mécaniques c'est le dosage en liant qui sera prépondérant.

Pour cette recherche, on a essayé de reproduire une formulation de béton de chanvre de type enduit (formulation présentée dans la partie bibliographique), mais avec des dosages volumiques et non massiques (vu que les fibres ont une masse volumique (de l'ordre de 25 kg/m^3) nettement inférieure à la masse volumique de chènevottes (variant entre 60 et 130 kg/m^3)) et avec des fibres et non pas avec de chènevottes. Le liant utilisé est la chaux éteinte toute seule.

Les paramètres qui sont utilisés pour définir les proportions du mélange à l'état frais sont le rapport massique E/L (masse d'eau/masse de la chaux), et le rapport massique L/F (masse de la chaux/masse de fibres de chanvre). Le tableau 3.16 résume les valeurs des paramètres de formulation retenue

Tableau 3.16. Rapports massiques de la formulation retenue

E/L	L/F	Ep/F (eau de prémouillage/fibres)	Eg/L (eau de gâchage /liant)
0.55	15.5	1	0.48

L'eau de prémouillage est ajoutée aux fibres de chanvre lors du malaxage et avant l'ajout du liant, afin de prévenir contre l'absorption de l'eau du liant par les fibres de chanvre.

4.3.1. Calcul des quantités des composants pour 1 mètre cube

Le calcul des différents composants du béton de fibres de chanvre s'effectue à partir des rapports définis précédemment et de la masse volumique à l'état frais (initiale) du béton de fibres de chanvre:
rapport massique L/F = 15.5, rapport massique E/L = 0.55, masse volumique initiale ρ initiale = 1420.3 kg/m^3.

A l'état frais, la somme des différents composants du béton de fibres de chanvre est: F+L+E = ρ initiale, ou bien:

$F + \frac{L}{F} \times F + \frac{L}{F} \times \frac{E}{L} \times F = \rho_{initial}$, d'où :

$$\begin{cases} F = \dfrac{\rho_{initial}}{1 + \frac{L}{F} + \frac{E}{L} \times \frac{L}{F}} (kg/m^3) \\ L = \dfrac{L}{F} \times F \ (kg/m^3) \\ E = \dfrac{E}{L} \times \dfrac{L}{F} \times F (kg/m^3) \end{cases}$$

Après calcul, on trouve: $\begin{cases} F = 56.75\ kg/m^3 \\ L = 879{,}62\ kg/m^3 \\ E = 483{,}79\ kg/m^3 \end{cases}$

Comme pour les deux types de bétons précédents, on a confectionné trois mélanges: un béton de fibres de chanvre (BC), un béton de fibres de chanvre avec ajout de fibres métalliques (BCFM) avec un dosage de 40 kg/m^3 (0.56% en volume), un béton de fibres de chanvre avec ajout de fibres polypropylènes (BCFP) avec un dosage de 1.5 kg/m^3 (0.18% en volume).

Le dosage des différents constituants de ces trois mélanges est récapitulé dans le tableau 3.17.

Tableau 3.17. Dosage des différents constituants des bétons de fibres de chanvre

Désignation	Dosage des constituants des bétons de fibres de chanvre (kg/m^3)					L/F	E/L
	Chaux éteinte	Fibres de chanvre	Eau totale	Fibres métalliques	Fibres polypropylènes		
BC	879.62	56.75	483.79	/	/	15.5	0.55
BCFM	879.62	56.75	483.79	40	/	15.5	0.55
BCFP	879.62	56.75	483.79	/	1.5	15.5	0.55

4.3.2. Fabrication et mise en place des bétons de chanvre :

Pour la fabrication du béton de chanvre on a utilisé un malaxeur à axe vertical et mouvement planétaire de capacité 180 litres.

La séquence de malaxage adoptée est celle qu'on trouve dans la littérature [57], elle est déclinée en 8 étapes:

- Introduction de fibres;
- Introduction de l'eau de pré mouillage;
- Malaxage pendant 2 min;
- Introduction du liant;
- Malaxage pendant 2min;
- Introduction de l'eau de gâchage;
- Malaxage pendant 5min;
- Vidange du malaxeur.

Comme pour les autres types de bétons, les fibres métalliques et polypropylènes sont ajoutées en dernier, ensuite les mélanges sont re-malaxés à nouveau pendant 1 min 30 secondes.

Le malaxage de bétons de fibres de chanvre s'est avéré très difficile (formation de pelotes dans le mélange); le dosage élevé de fibres, la longueur de celles-ci, sont les facteurs à l'origine de cette difficulté de mise en œuvre.

5. Essais de caractérisation des mélanges à l'état frais

5.1. Essai d'affaissement au cône d'Abrams (pour les BO)

L'essai d'affaissement au cône d'Abrams permet de mesurer la consistance du béton par la mesure de son affaissement, il a été effectué conformément aux prescriptions de la norme NF EN 12350-2 [107].
L'essai consiste à remplir un cône tronqué préalablement humidifié de 300 mm de hauteur placé sur une surface lisse et humidifié en trois couches d'égal volume de béton, chacune des couches est compactée avec 25 coups d'une tige métallique normalisée, durant ces opérations, le cône doit demeurer fixe sur la base lisse. Après le remplissage et l'arasage du bord supérieur, le cône est relevé lentement et le béton s'affaisse (figure 3.6), l'affaissement représente la différence de la hauteur du cône et celui du béton affaissé (par rapport au point le plus haut du béton affaissé).

Les affaissements des trois bétons sont portés sur le tableau

Figure 3.6. Essais d'affaissement au cône d'Abrams

5.2. Essai d'étalement (pour les BAP)

Cet essai s'effectue comme un essai d'affaissement au cône d'Abrams (figure 3.7). Le BAP est introduit dans le cône sans compaction, on mesure le diamètre moyen (moyenne sur deux diamètres orthogonaux) de la galette de béton obtenue au bout d'une minute, l'étalement cible se situe entre 600 et 800 mm.

Figure 3.7. Essai d'étalement

5.3. Essai des anneaux Japonais (pour les BAP)

Cet essai a pour but de vérifier l'aptitude des BAP à s'écouler dans un milieu fortement ferraillé. L'essai consiste à mesurer la différence entre les diamètres d'étalement obtenu sans et avec l'anneau, l'écart entre les deux étalements doit être inférieur à 10 cm (figure 3.8).

Figure 3.8. Essai des anneaux Japonais

5.4. Essai de la boite en L (pour les BAP)

L'essai consiste à remplir de BAP la partie verticale de la boîte en L en une seule fois et qu'on laisse reposer une minute (figure 3.9), puis on lève la trappe, le béton s'écoule à travers le ferraillage standard formé de 3 barres d'armature φ14 mm distantes de 39 mm. Une fois l'écoulement (le temps d'écoulement doit être de préférence compris entre 3 et 7 secondes) terminé, on mesure les deux hauteurs H1 et H2 et on exprime le résultat en terme de taux de remplissage H2/H1. Le taux de remplissage pour un BAP doit être supérieur à 0.8.

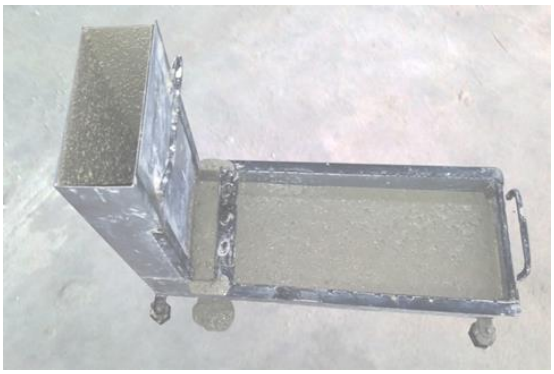


Figure 3.9. Essai de la boîte en L

5.5. Essai V-funnel (pour les BAP)

L'essai consiste à mesurer le temps nécessaire (temps d'écoulement) pour que 12 litres de BAP s'écoulent à travers un entonnoir en forme de V (figure 3.10). Le temps d'écoulement cible doit être de préférence compris entre 8 et 14 secondes.

Figure 3.10. Essai V-funnel

5.6. Essai de stabilité au tamis (pour le BAP)

Cet essai vise à quantifier la stabilité (le risque de ségrégation) du BAP par la mesure du pourcentage en masse de laitance Pi (Pi = (P laitance/P échantillon)*100) d'un échantillon de BAP (4.8 ± 0.2 kg) passant à travers un tamis de 5 mm (figure 3.11). Pour un Pi entre 0% et 15% la stabilité est satisfaisante.

Figure 3.11. Essai de stabilité au tamis

5.7. Mesure de l'air occlus

La mesure de l'air occlus a été effectuée au moyen d'un aéromètre de sept litres modèle "CONTROLS". Conformément aux prescriptions de la norme NF EN 12350-7 [108].

On commence d'abord par remplir la chambre inférieure de l'appareil par le béton, d'une manière identique à celle utilisée pour remplir les moules. On fixe ensuite la chambre supérieure, on ouvre les deux robinets et on ferme la soupape principale. On injecte de l'eau à l'aide d'une pissette dans le premier robinet jusqu'à ce que l'eau commence à sortir du deuxième robinet on ferme les deux robinets et on applique une pression en actionnant la pompe manuelle intégrée jusqu'à ce que l'aiguille du manomètre de l'appareil indique la valeur de référence 0%. On ouvre la valve (la soupape principale) qui sépare les volumes des deux chambres (supérieures et inférieures), le mélange est alors comprimé et le pourcentage d'air occlus est directement indiqué par l'aiguille du manomètre.

5.8. Mesure de la masse volumique réelle du béton frais

Pour la mesure de la densité réelle du béton frais, on s'est servi de la chambre inférieure de l'aéromètre rempli par le mélange avant la mesure de l'air occlus. Si les poids de la chambre pleine et vide sont successivement P et P_0, la densité du mélange frais est tel que :

$\rho = \frac{P-P_0}{V}$ (V représente le volume de la chambre inferieure égal à 8 litres).

6. Résultats des essais de caractérisation à l'état frais

Les résultats des essais effectués sur les différents mélanges sont récapitulés dans le tableau 3.18 suivant.

Tableau 3.18. Résultats des essais de caractérisation à l'état frais

Type de bétons	BO	BOFM	BOFP	BAP	BAPFM	BAPFP	BC	BCFM	BCFP
L'affaissement (cm)	8cm	6cm	5cm	-	-	-	-	-	-
Etalement (cm)	-	-	-	78cm	74cm	71cm	-	-	-
J-ring	-	-	-	3	5	4	-	-	-
H2/H1	-	-	-	1.23	0.94	1.18	-	-	-
Temps d'écoulement(s)	-	-	-	15	20	18,3	-	-	-
Pi (%)	-	-	-	11,75	12,13	11.5	-	-	-
% de l'air occlus	1.7	2.4	2.1	2.4	2.9	2.8	6.8	7.5	7
Masse volumique kg/m^3	2 460,9	2478.6	2459.4	2308,4	2325,58	2307.32	1420.3	1448.85	1425.1

A partir de ces résultats, on peut citer les remarques suivantes:

- **Sur les BO**

L'affaissement des bétons ordinaires varie entre 5 et 8 cm, ce qui nous permet de les classer comme étant des bétons plastiques (S2 selon la classification NF EN 206-1 [109]).

Une diminution de la consistance est observée avec l'ajout des fibres, cette diminution est plus prononcée pour le BOFP que pour le BOFM.

Une augmentation de l'air occlus avec l'ajout des fibres est observée, cette augmentation est légèrement supérieure avec l'ajout de fibres métalliques qu'avec l'ajout de fibres polypropylènes. L'ouvrabilité du béton, la géométrie des fibres et son interaction entre les différents constituants (surtout les gros granulats), sont des facteurs qui influent sur l'air occlus.

Une augmentation de la masse volumique du béton frais BOFM et une diminution de la masse volumique du béton frais BOFP par rapport au béton ordinaire sans fibres sont observés, ceci s'explique par la différence des densités des constituants (granulats et fibres) utilisés pour la fabrication des mélanges.

- **Sur les BAP**

Tous les essais de caractérisation à l'état frais menés sur les BAP ont donné des résultats conformes aux prescriptions des normes.

L'étalement des bétons autoplaçants est compris entre 71 et 78 cm et aucun signe de ségrégation n'est observé sur la galette des trois mélanges.

L'ajout des fibres métalliques et polypropylènes a conduit à une diminution de l'étalement, du taux de remplissage et du temps d'écoulement des BAPFP et BAPFM, et une augmentation de l'air occlus et de la masse volumique du BAPFM par rapport aux BAP et BAPFP.

Les résultats d'essais montrent aussi que le pourcentage de la laitance augmente avec l'ajout des fibres métalliques et diminue légèrement avec l'ajout des fibres polypropylènes.

Le pourcentage de l'air occlus des BAP est supérieur à ceux des BO, ceci peut être expliqué par l'utilisation du superplastifiant.

- **Sur les BC**

Les essais effectués sur les bétons à base de fibres de chanvre sont la masse volumique et la teneur en air occlus. Les résultats d'essais montrent le caractère léger de ces matériaux et leur teneur en air occlus élevé.

7. Mise en place et conservation des bétons ordinaires et autoplaçants

7.1. Mise en place

La mise en place des bétons ordinaires et autoplaçants a été effectuée dans des moules 7x7x28 cm (figure 3.12). Les bétons ordinaires ont été mis en place par vibration à l'aide d'un dispositif de vibration (aiguille vibrante). Les bétons autoplaçants n'ont subi aucune vibration, ni autre méthode de compaction.

(A) (B)

Figure 3.12. Moules utilisés pour bétons ordinaires (A) et bétons autoplçants (B)

7.2. Conservation

Les conditions de conservation pour les deux types de bétons sont les suivantes:

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

A partir de 24 heures, toutes les éprouvettes, sont démoulées et conservées dans des sacs plastiques étanches (ceci permet d'avoir une humidité relative dans les sacs d'environ 95%) dans une température d'environ 20±2°C jusqu'au moment d'essais ,exception pour les éprouvettes destinées à la mesure du retrait et de la perte de masse où elles sont conservées dans l'air ambiant du laboratoire, où la température est d'environ 20±2°C et l'humidité relative est d'environ 50±5%.

8. Mise en place et conservation des bétons de fibres de chanvre

8.1. Mise en place

La mise en place des bétons de fibres de chanvre a été effectuée dans des moules 7x7x28 cm (figure 3.13). Le processus qu'on a adopté pour la mise en place des bétons de fibres de chanvre se résume en trois étapes que l'on répète autant de fois que nécessaire pour remplir les moules:

- Verser du béton de fibres de chanvre dans le moule en deux couches de 3.5 cm;
- Réarranger le béton de fibres de chanvre grossièrement à la main de sorte qu'il occupe tout le volume du moule;
- Surfaçage et lissage de la partie supérieure de l'échantillon à l'aide d'une truelle.

Ce processus a pour but l'obtention des échantillons le plus possible homogènes.

Figure 3.13. Moules utilisés pour bétons de fibres de chanvre

8.2. Conservation et séchage des éprouvettes

Les règles professionnelles de construction en chanvre préconisent une conservation à une température de 20°C et 50% d'humidité relative, quant au démoulage elles n'indiquent pas le temps nécessaire préconisé. Comme ne disposant pas de salle de stockage à humidité contrôlée, il a été choisi de conserver les éprouvettes à l'air ambiant du laboratoire, que ce soit avant ou après démoulage qui a été effectué 7 jours après la mise en place.

9. Essais sur différents types de bétons durcis avant et après exposition au feu

Les essais réalisés sur les différents types de bétons durcis avant et après exposition au feu sont les essais mécaniques et les essais physiques, les essais mécaniques de caractérisation et résiduelle sont tous les deux réalisés 19 heures après l'essai au feu et 62 jours après le coulage.

9.1. Essai au feu

L'essai au feu a été réalisé dans un foyer de dimension 1.5x2 m. Le feu est provoqué par l'inflammation du bois posé à l'intérieur du foyer (figure 3.14) et positionné de telle façon à produire une température le plus possible homogène sur tout le foyer. De même, les éprouvettes sont positionnées de telle sorte que la température soit homogène sur toutes leurs surfaces. La température à l'intérieur du foyer est mesurée par un thermomètre doté de trois thermocouples de type k positionnés aux coins gauche, droit et au centre du foyer.

(A) (B)

Figure 3.14. Disposition des éprouvettes dans le foyer de feu (A) et essai au feu (B)

Une fois que le bois s'est consumé, les éprouvettes sont introduites au laboratoire, et les premières mesures de retrait et de perte de masse après feu sont effectuées. Les éprouvettes sont laissées pendant 17 heures dans l'ambiance du laboratoire avant de commencer les autres essais.

9.2. Essais mécaniques

Les essais mécaniques réalisés sur les différents bétons durcis sont la résistance à la traction et la résistance à la compression, comme mentionné ci-dessus, les essais mécaniques de caractérisation et résiduelle sont tous les deux réalisés 19 heures après l'essai au feu et 62 jours après le coulage.

9.2.1. Essai de résistance en traction par flexion

L'essai de traction par flexion a été effectué par une machine de flexion 3 points sur des éprouvettes prismatiques de 7x7x28 cm (trois éprouvettes pour chaque béton). Les éprouvettes sont placées soigneusement sur les deux rouleaux d'appui inferieurs distants de 3d (d=7cm), et bien centrées de telle sorte que l'axe longitudinal des rouleaux (supérieur et inferieurs) soit orthogonal à l'axe de l'éprouvette, conformément à la norme NF EN 12390-5 [110] (figure 3.15). Le chargement en trois points est effectué à une vitesse de 0.05 MPa/s jusqu'à la rupture. La charge de rupture est enregistrée au cours de l'essai et la résistance en traction est obtenue par la formule suivante:

$ft = 4.5P/d^2$

Ceci suppose que la contrainte est calculée par la formule de l'élasticité $ft = M\nu/I$:

$ft = M\nu/I = 6M/d^3 = 9P/2d$, car $M=3Pd/4$ et $\nu/I=6/d^3$.

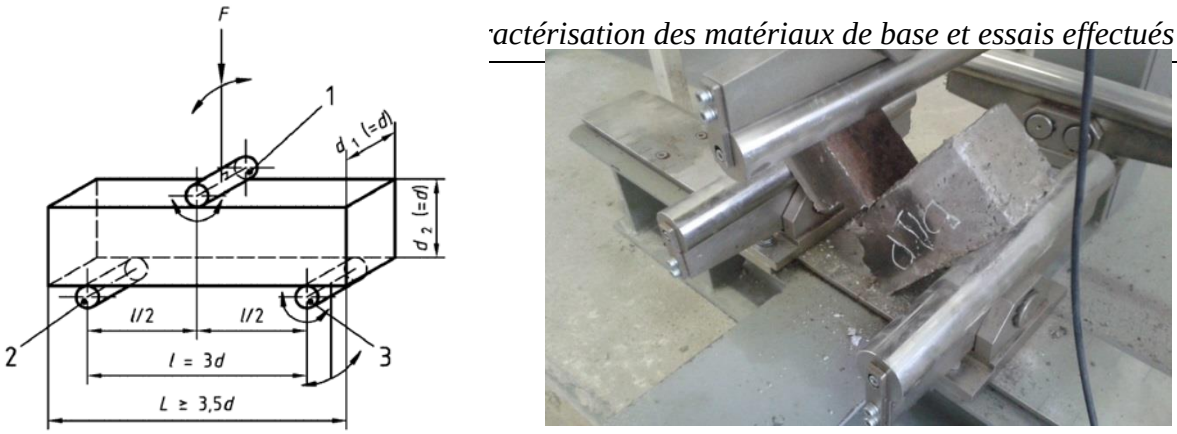


Figure 3.15. Essai de traction par flexion (b)

9.2.2. Essai de résistance en compression

L'essai de compression a été effectué sur les demi-prismes (six demi-prismes) résultant de l'essai de traction par flexion. Cette manière de faire s'appelle résistance sur cube équivalent ou modifié. Elle est décrite dans la norme BS 1881 partie 119 [111] et ASTM C 116-90 [112]. L'essai a été réalisé en plaçant le prisme résultant de l'essai de traction par flexion entre deux plaques métalliques carrées de même section que la section du prisme et d'appliquer un chargement avec une vitesse constante (0,5 MPa /s pour les BO et les BAP et 0.05 MPa /s pour les BC. Cette dernière vitesse est choisie pour avoir une montée en charge lente dans le but de prendre en considération la faiblesse de la résistance des BC et d'avoir des résultats le plus possible homogènes) jusqu'à la rupture du béton.

Le prisme doit être placé de façon à ce que la face supérieure non coffrée lors du coulage ne soit en contact avec aucune des deux plaques et ces dernières doivent être rigoureusement à la verticale l'une au-dessus de l'autre (figure 3.16).

La résistance à la compression (fc) sur le cube modifié est obtenue par la formule suivante:

fc = P/S, avec:
P: la charge de rupture;
S:l'aire de la section carrée du prisme S=7x7cm.

Cette résistance est à peu près la même que celle d'un cube normalisé de même dimension, c'est-à-dire de section 7x7cm [2].

Figure 3.16. Essai de compression sur cube équivalent

9.3. Essais physiques

Les essais physiques réalisés sur les différents bétons durcis sont:

- Deux indicateurs de durabilité (porosité accessible à l'eau et absorption capillaire);
- la perte de masse et le retrait total, ils sont tous les deux mesurés durant 61 jours.

9.3.1. Mesure de la porosité accessible à l'eau

La porosité accessible à l'eau (appelée aussi la porosité ouverte) caractérise l'importance des vides que contient un matériau, elle a été déterminée selon le protocole AFPC-AFREM [113].

La porosité accessible à l'eau des différents bétons exposés (le commencement de l'essai est opéré 17 heures après l'essai au feu) et non exposés au feu est mesurée sur deux échantillons (deux prismes de dimensions 7x7x14 cm provenant du sciage d'une éprouvette de dimensions 7x7x28 cm) conditionnés dans une étuve à une température de 60°C pendant 24 heures. Par la suite, les éprouvettes sont laissées se refroidir pendant 14 heures, puis saturées dans l'eau à une température de 20±2°C pendant trois jours. La porosité est calculée par le rapport de la masse d'eau contenue dans les pores sur le volume apparent de l'échantillon qui est déterminé par une pesée hydrostatique (figure 3.17).

La porosité accessible à l'eau = $\frac{M_{air}-M_{sec}}{M_{air}-M_{eau}} * 100$ (en %), avec:

M_{air} : masse de l'échantillon imbibé, pesé dans l'air;
M_{sec} : masse de l'échantillon sec (étuvé à 60°C);
M_{eau}: masse de l'échantillon imbibé, pesé dans l'eau.

Figure 3.17. Essai de porosité accessible à l'eau

9.3.2. Absorption capillaire

L'absorption capillaire a été mesurée sur deux échantillons de dimensions 7x7x14 cm provenant du sciage d'une éprouvette de dimensions 7x7x28 cm. L'absorption capillaire est mesurée pour une période de 24h. Les échantillons des différents bétons exposés (le commencement de l'essai est opéré 17 heures après l'essai au feu) et non exposés au feu sont préalablement conditionnés dans une étuve à 60°C pendant 24 heures, et laissés par la suite se refroidir pendant 14 heures. Les surfaces latérales des échantillons sont scotchées (avec du Scotch) pour éviter l'évaporation

latérale de l'eau absorbée durant l'essai, puis leurs surfaces sciées sont placées dans 0.5 cm d'eau (figure 3.18). Les pesées sont réalisées aux échéances de 1/2, 1, 2, 4, 7, 24h. Par échéance de mesure, le coefficient d'absorption est donné par la formule suivante:

L'absorption capillaire = $\frac{M_T - M_0}{A}$, Avec:

M_T: masse de l'échantillon à l'échéance T;
M_0: masse initiale de l'éprouvette séchée dans une étuve à 60°C;
A: aire de section de l'éprouvette égale à 0.07x0.07 m^2.

Figure 3.18. Essai d'absorption capillaire

9.3.3. Mesure de la perte de masse

La perte de masse est un indicateur important des dégradations au sein du matériau (après feu) et notamment de la perte en eau. L'essai de perte en masse a été effectué sur une éprouvette prismatique de 7x7x28 cm pour chacun des bétons réalisés, l'essai est effectué avant (suivi continu dès l'instant du démoulage qui est effectué à 24 heures pour les BAP et les BO et 7 jours pour BC) et après exposition au feu sur les mêmes éprouvettes. Les éprouvettes issues de l'exposition au feu sont pesées directement afin d'éviter tout phénomène de réhydratation ou d'échange hydrique avec le milieu ambiant.

L'essai donc consiste à déterminer la perte en masse qu'a subi une éprouvette au cours du temps avant et après chauffage par rapport à son état initial (24 heures après la mise en place du béton). La perte de masse exprimée en pourcentage est obtenue par la formule suivante :

$$\Delta = \frac{m_0 - m_T}{m_T} \times 100\%$$

9.3.4. Mesure du retrait total

La mesure du retrait total a été effectuée sur une éprouvette prismatique de 7x7x28 cm juste après le démoulage pour les différents bétons réalisés. Comme pour la mesure de la perte en masse, la mesure du retrait linéaire est effectuée avant et après exposition au feu. Juste après l'essai au feu, des mesures de retrait sont prises afin d'évaluer l'effet du feu sur ce dernier. L'essai consiste à mesurer à l'aide d'un appareil de retrait muni d'un comparateur digital la variation de la longueur de l'éprouvette en fonction du temps entre les deux plots placés suivant l'axe de symétrie de l'éprouvette (figure 3.19).

Le retrait est donc déterminé par le rapport de la variation de longueur d'une éprouvette ΔL par rapport à son état initial sur sa longueur de base L=28cm, il est exprimé en µm/m.

$$R = \frac{\Delta L}{L} \times 1000 \ (\mu m/m)$$

Figure 3.19. Essai de retrait

10. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté le programme expérimental retenu dans cette étude, les différentes caractéristiques des matériaux ainsi que les compositions retenues des différents bétons utilisés dans cette recherche. Enfin, nous avons donné les résultats d'essais expérimentaux sur les différents mélanges à l'état frais.

Les résultats des différents essais ont montré que tous les bétons sans fibres ont présenté des caractéristiques rhéologiques satisfaisantes en terme de respect des normes et recommandations en vigueur.

L'incorporation des fibres métalliques et polypropylènes a diminué les différentes caractéristiques à l'état frais des différents types de bétons.

Des difficultés sont rencontrées lors de la mise en oeuvre des bétons de fibres de chanvre dues à la longueur et au dosage très important de fibres de chanvre.

CHAPITRE 4

RESULTATS ET DISCUSSIONS SUR LES ESSAIS REALISES A TEMPERATURE AMBIANTE

CHAPITRE 4 : RESULTATS ET DISCUSSIONS SUR LES ESSAIS REALISES A TEMPERATURE AMBIANTE

1. Introduction

Ce chapitre présente les résultats des différents essais réalisés sur les trois types de bétons (bétons ordinaire, béton autoplaçant et béton de fibres de chanvre) à l'état durci à température ambiante. Ces essais comprennent les essais mécaniques (résistance en traction et en compression) et les essais physiques (mesures de la perte de masse et du retrait total), ainsi que les résultats de mesures de deux indicateurs de durabilité qu'ils s'agissent de la porosité et de l'absorption capillaire. L'effet de l'ajout des fibres métalliques et polypropylènes sur le comportement des trois types de bétons est également abordé.

2. Essais mécaniques

2.1. Résistance en compression

L'essai de résistance en compression est réalisé sur les neuf bétons 62 jours après leurs coulages sur des cubes équivalents.

2.1.1. Cas des bétons ordinaires et autoplaçants

Les résultats de l'essai de résistance en compression réalisés sur les bétons ordinaires et les bétons autoplaçants sont présentés sur la figure 4.1.

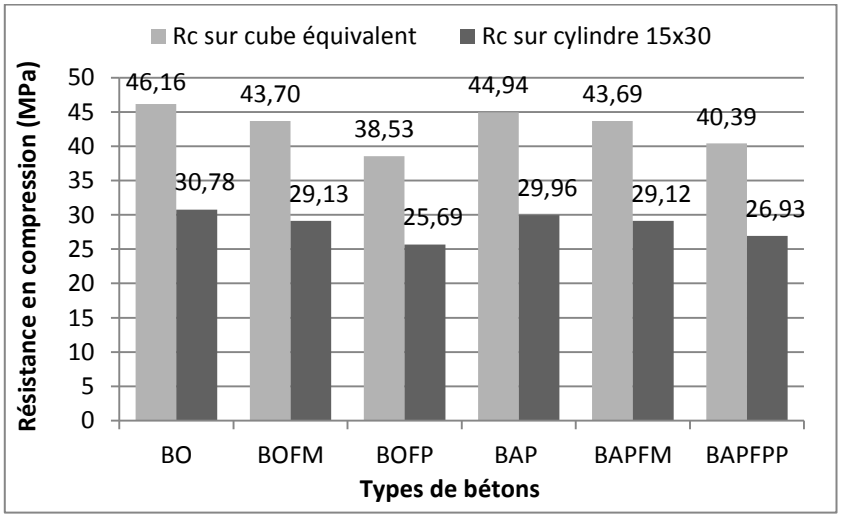


Figure 4.1. Résistance en compression sur cube équivalent et sur cylindre des différents bétons

Cette figure présente les résistances obtenues sur cube équivalent (déterminées expérimentalement) et sur cylindre de 15x30 cm convertie à partir de la résistance sur cube équivalent. La résistance est convertie tout d'abord en résistance sur cube 15x15x15 cm par division par un coefficient égal 1.2 (tiré de [102]), puis cette dernière est convertie en résistance sur cylindre en la multipliant par 0.8 (tiré de la norme NF EN206-1 [109]).

Les résultats d'essais montrent que la résistance du béton ordinaire obtenue à l'échéance de 62 jours est un peu inférieure à la résistance théorique désirée, fixée au préalable et qui est de 29 MPa à 28 jours sur cylindre, calculé par la formule de BOLOMEY [102]. La raison probable de

cette diminution est l'utilisation des moules en bois. En effet, lors du démoulage on a constaté que les moules ont absorbé une grande quantité d'eau des bétons, cette migration d'eau vers les parois des moules en bois peut provoquer des fissurations suite à un retrait plastique gêné (la migration d'eau commence à partir de l'interface moule-béton et se développe vers l'intérieur du béton) et augmente ainsi la porosité des différents bétons, source de diminution de résistance. Cette migration d'eau est plus prononcée pour le BAP, ce qui peut aussi expliquer la supériorité de la résistance du BO d'une quantité de 2.64% sur celle du BAP.

Les résultats montrent aussi que les résistances en compression du béton ordinaire (BO) et du BAP diminuent avec l'ajout des fibres (métalliques et polypropylènes) et que ces diminutions sont plus prononcées pour les bétons avec ajout de fibres polypropylènes que pour les bétons avec ajout de fibres métalliques. La diminution des résistances du BOFM et BOFP par rapport à la résistance du BO est respectivement de 5.33% et de 16.52%. De même, la diminution des résistances du BAPFM et BAPFP par rapport à la résistance du BAP est respectivement de l'ordre de 2.78% et 10.12%.

La diminution de la résistance des bétons de fibres métalliques ou polypropylènes est observée par d'autres auteurs [114, 115 cité par 116]. Selon Cazacliu et al. [115 cité par 116], l'ajout des fibres peut perturber l'empilement granulaire des granulats, il peut augmenter également la teneur en air occlus, ce qui conduit à une diminution de la compacité du béton et à une diminution de la résistance mécanique par la suite. La porosité supplémentaire induite par la zone de transition entre les fibres métalliques ou polypropylènes et la pâte de ciment [117, 118] peut contribuer aussi à la diminution de la résistance des bétons de fibres métalliques.

2.1.2. Cas des bétons de fibres de chanvre

Les résultats d'essais de résistance en compression réalisés sur les bétons de fibres de chanvre sont présentés sur la figure 4.2.

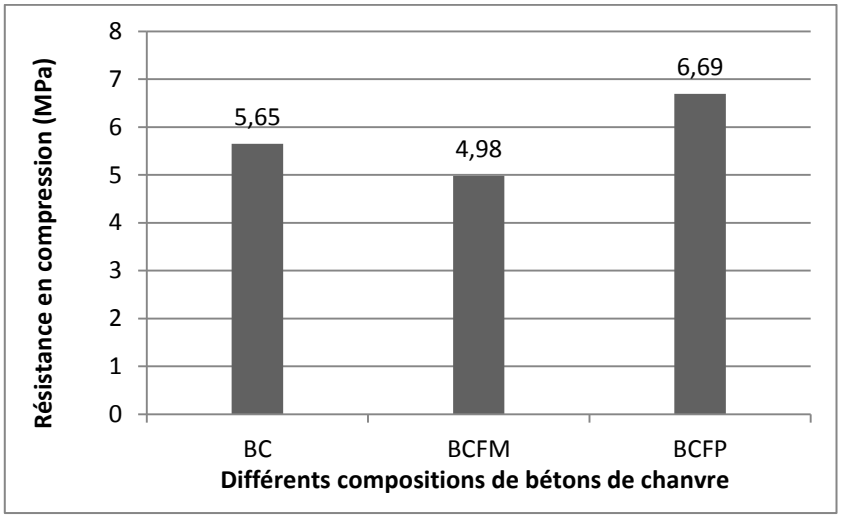


Figure 4.2. Résistance en compression de différentes compositions de bétons de fibres de chanvre

Les résistances présentées ci-dessus sont obtenues une fois l'essai est terminé, c'est-à-dire après l'écrasement de l'éprouvette et l'arrêt de la machine toute seule. Avant la rupture du béton de

fibres de chanvre, il a subi des déformations importantes et irréversibles (figure 4.3), causées par son caractère poreux (porosité des fibres et de la chaux). L'observation visuelle de l'évolution de la rupture du béton de fibres de chanvre a permis de la diviser en deux phases. La première phase c'est lorsque les contraintes imposées à l'échantillon sont reprises par la matrice. Une fois que l'accroissement des contraintes entraîne la rupture de la matrice, la deuxième phase commence. Dans cette phase, des déformations latérales importantes induites par l'effet de poisson sont observées, ces déformations latérales engendrent des contraintes de traction perpendiculaires à la direction de l'application de la charge, qui sont reprises par les fibres; lorsque ces contraintes dépassent les contraintes limites d'adhésion entre les fibres et la matrice, un déchaussement des fibres est observé et la rupture se produit.

Figure 4.3. Essai de résistance en compression des bétons de fibres de chanvre

Les résultats d'essai de résistance sur bétons de fibres de chanvre montrent que ces derniers présentent une résistance meilleure que celle du béton de chanvre réalisé avec la chènevotte (en comparaison avec les résultats de Cerezo [57]). Ceci est peut être dû au mode de rupture diffèrent des deux bétons, la rupture du béton de fibres de chanvre est probablement celle qu'on a décrit précédemment alors que la rupture du béton de chanvre décrit par Cerezo [57] est la suivante: au départ les contraintes sont reprises par la matrice, la matrice se déforme et les particules de chènevottes suivent les déformations du liant et avec l'accroissement des déformations, des fissures dans la matrice apparaissent. A un certain niveau, la matrice n'a plus de rôle mécanique et les particules reprennent les efforts et s'écrasent peu à peu, les particules de chènevotte ont une rigidité bien plus faible que celle du liant (rapport de 400), la contrainte supportée par le matériau est globalement plus faible, d'où la décroissance de la courbe contrainte déformation.

Donc, on peut conclure que la rupture du béton de fibres de chanvre est gouvernée par la zone d'adhésion entre les fibres et le liant, alors que la rupture du béton de chanvre est conditionnée par la rigidité des particules, donc il est probablement intéressant d'incorporer une quantité de fibres de chanvre au béton de chanvre afin d'améliorer sa résistance à la compression. Un comportement qu'il reste à confirmer.

L'ajout de fibres polypropylènes a contribué à l'augmentation de la résistance de 18.4%, l'effet bénéfique de l'ajout de fibres polypropylènes sur la chaux aérienne est observé par Izaguirre et al. [119]. Selon ces derniers, l'ajout de fibres polypropylènes à la chaux aérienne améliore la microstructure de ce dernier en réduisant le volume des gros pores et en augmentant le volume des petits pores, ce qui rend la matrice plus dense et plus résistante.

L'ajout de fibres métalliques a diminué la résistance de 11.85%, cette diminution est peut être expliquée par plusieurs facteurs:

Une mauvaise adhérence entre la matrice et les fibres d'un côté, et entre les fibres de chanvre et les fibres métalliques de l'autre côté (c'est surtout le crochet des fibres métalliques qui peut engendrer une mauvaise adaptation avec les fibres végétales). Les fibres métalliques, par leur rigidité élevée que la matrice, peuvent également favoriser la rupture de la matrice (en s'enfonçant dans la matrice lors de l'écrasement).

2.2. Résistance en traction

Les essais de résistance en traction des neuf bétons sont réalisés 62 jours après leurs coulages. Les essais sont effectués sur des prismes 7x7x28 cm.

2.2.1. Cas des bétons ordinaires et autoplaçants

Les résultats des essais de résistance en traction réalisés sur les bétons ordinaires et les autoplaçants sont représentés sur la figure 4.4.

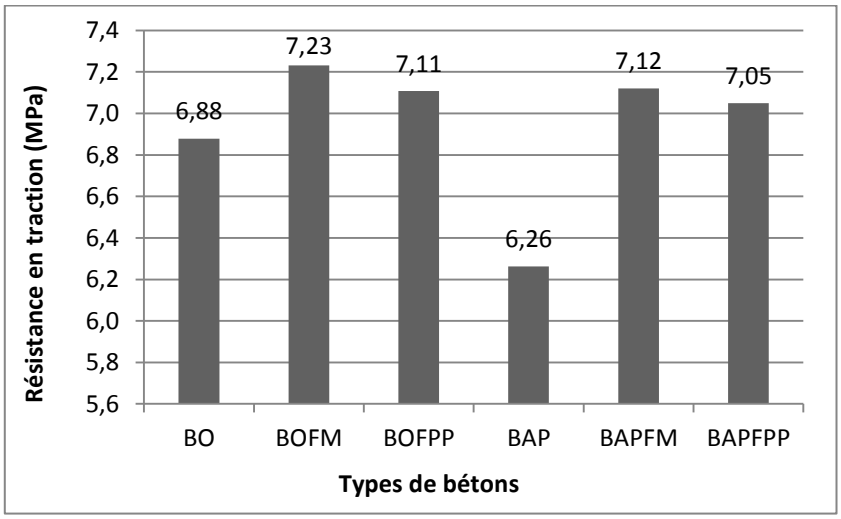


Figure 4.4. Résistance en traction des différents bétons

Comme pour la résistance en compression, la résistance en traction du BO est supérieure à celle du BAP, d'une valeur de 9.1%.

Contrairement aux résultats des essais de compression, les résistances en traction du BO et du BAP augmentent avec l'ajout des fibres (métalliques et polypropylènes), l'augmentation des résistances est légèrement supérieure pour les bétons avec ajout de fibres métalliques que pour les bétons avec ajout de fibres polypropylènes. L'augmentation des résistances du BOFM et BOFP par rapport à la résistance du BO est respectivement de 5.08% et de 3.34%. De même, l'augmentation des résistances du BAPFM et BAPFP par rapport à la résistance du BAP est respectivement de l'ordre de 13.73% et 12.94%.

Donc, on conclut que les fibres métalliques et polypropylènes améliorent la résistance en traction du BO et BAP et que cette amélioration est plus significative sur le BAP que sur le BO.

Le meilleur comportement des BAP par rapport aux BO, que ce soit en traction ou en compression, lors de l'ajout des fibres (métalliques et polypropylènes) est peut être expliqué par l'amélioration de la zone de transition entre les fibres et la pâte de ciment suite à la suppression de la vibration et l'utilisation du filler. Selon les recommandations de la RILEM [120], la zone de transition des BAP est meilleure que celle du BO parce que lors de la vibration des BO, des bulles d'air ont tendance à s'accumuler dans la zone de transition (des granulats ou des fibres), augmentant ainsi la porosité et l'épaisseur de cette zone. On peut également attribuer cette amélioration au volume réduit des gros granulats du BAP [121] (l'ouvrabilité et la résistance des bétons fibrés augmentent avec la diminution du volume des granulats).

2.2.2. Cas des bétons de chanvre

Les résultats d'essais de résistance en traction par flexion réalisés sur les différents bétons de fibres de chanvre sont représentés sur la figure 4.5.

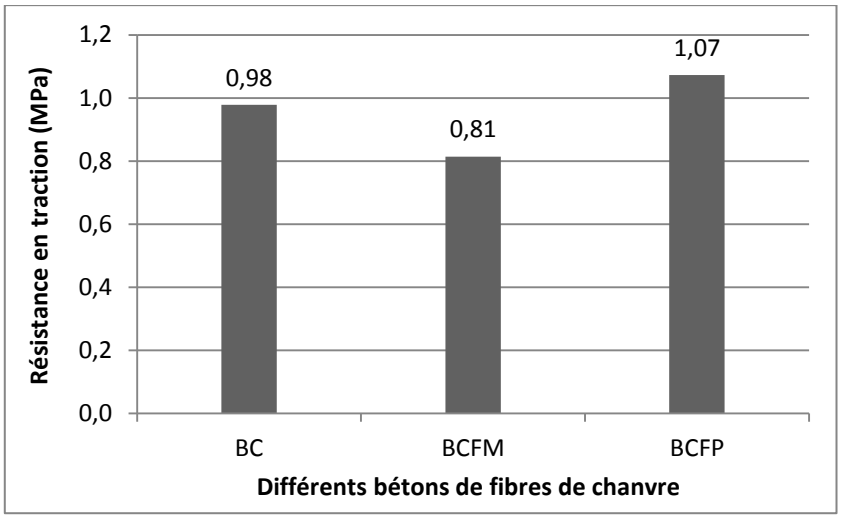


Figure 4.5. Résistance en traction des différentes compositions de bétons de fibres de chanvre

La charge de rupture est déterminée une fois la machine s'arrête. Comme pour la résistance à la compression, les éprouvettes de béton de fibres de chanvre ont présenté un comportement ductile avant la rupture (figure 4.6). Ce comportement est probablement dû à une rupture progressive des interfaces fibres-matrice, suivie d'un déchaussement des fibres.

Les résultats montrent aussi que l'ajout de fibres polypropylènes a contribué à l'augmentation de la résistance relative du BC de 9.18%, tandis que l'ajout de fibres métalliques l'a diminuée de 20.98%. Le module de Young élevé et la mauvaise adhérence des fibres métalliques avec la chaux ou bien avec les fibres de chanvre peut expliquer la diminution de la résistance du BCFM. En effet, lorsque les fibres de chanvre reprennent les contraintes de traction, une partie de celles-ci se dissipe dans l'allongement des fibres (module de Young variant entre 30-60 GPa) et le reste pour le déchaussement des fibres de la matrice, alors qu'avec les fibres métalliques on assiste directement à un déchaussement (module de Young de l'ordre de 210 GPa). Ce déchaussement est plus facile avec les fibres métalliques qu'avec les fibres de chanvre, à cause de la faible adhérence entre la matrice et les fibres métalliques.

Donc, on conclut que la résistance du béton de chanvre augmente avec l'ajout des fibres polypropylènes et diminue avec l'ajout des fibres métalliques.

Figure 4.6. Essai de traction par flexion sur un béton de fibres de chanvre

3. Résultats des essais physiques

3.1. Mesure de l'évolution de la perte en masse

Le suivi de l'évolution de la perte de masse est effectué dès le démoulage, pendant 61 jours pour les bétons autoplaçants et ordinaires et 55 jours pour les bétons de fibres de chanvre.

3.1.1. Cas des bétons ordinaires et autoplaçants

Les résultats de mesure de la perte de masse des bétons ordinaires et autoplaçants sont présentés sur les figures 4.7 et 4.8.

La figure 4.7 montre que les bétons ordinaires et autoplaçants présentent deux phases essentielles de l'évolution de la perte de masse.

La première phase entre (0 et 30 jours), où une cinétique très rapide de perte de masse et une grande quantité d'eau perdue sont observées.

La deuxième phase (entre 30 et 61 jours), cette phase est caractérisée par une cinétique de perte de masse et une quantité d'eau perdue moins importante que la première phase, et une tendance vers la stabilisation de ces dernières est observée.

La perte de masse du béton est liée à la perte d'eau (séchage du béton), au jeune âge le béton se trouve en déséquilibre hygrométrique (80 à 100% HR) avec le milieu extérieur (en moyenne 50% HR) à cause du surplus d'eau contenue dans les pores de béton. Ce déséquilibre se traduit par le mouvement de l'humidité présente dans le béton vers l'extérieur selon deux modes de transport couplés [122] :

- Le transport de l'humidité sous phase liquide, par un gradient de pression (gouverné par la perméabilité du réseau poreux, ce mouvement peut être décrit par la loi de Darcy);
- Le transport de l'humidité sous phase vapeur sous gradient de concentration (gouverné par la diffusivité de la vapeur d'eau, ce mouvement peut être décrit à l'aide de la première loi de Fick J=-D dc/dL).

Initialement, la vapeur d'eau se diffuse rapidement vers le milieu extérieur (première phase de perte de masse). Au fur et à mesure de l'avancement du séchage, l'eau se raréfié dans les pores du béton, la perte d'eau diminue, et par la suite la cinétique de perte de masse et la quantité d'eau perdue diminuent (deuxième phase de perte de masse).

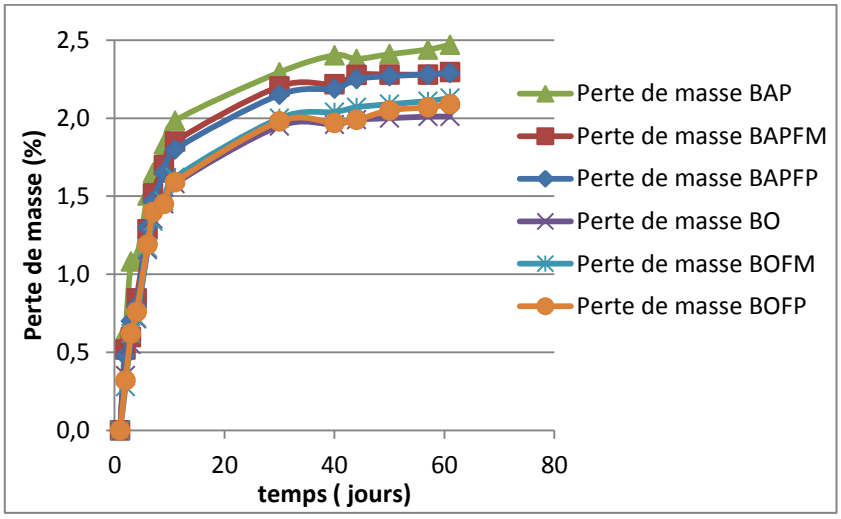


Figure 4.7. Evolution de la perte de masse

La figure 4.8 montre que la perte de masse totale pendant 61 jours est légèrement supérieure pour les bétons autoplaçants que pour les bétons ordinaires.

L'ajout de fibres métalliques et polypropylènes a augmenté légèrement la perte de masse des deux types de bétons, ceci est peut être dû à une augmentation de la perméabilité des bétons fibrés.

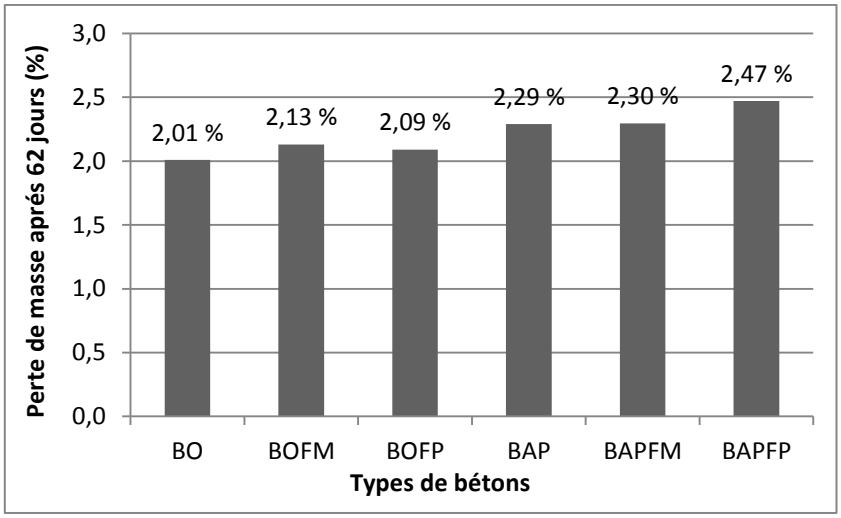


Figure 4.8. Perte de masse totale après 61 jours pour différents types de bétons

3.1.2. Cas des bétons de chanvre

La perte de masse est une caractéristique importante pour les bétons de chanvre parce qu'elle est en relation avec le durcissement de ces derniers, comme pour les deux types de bétons

précédents. Le béton de chanvre dès sa mise en oeuvre libère de l'eau utilisée lors de sa fabrication pour être en équilibre hydrique avec le milieu ambiant [123].

Les résultats de mesure de la perte de masse des différents bétons de fibres de chanvre sont présentés sur la figure 4.9.

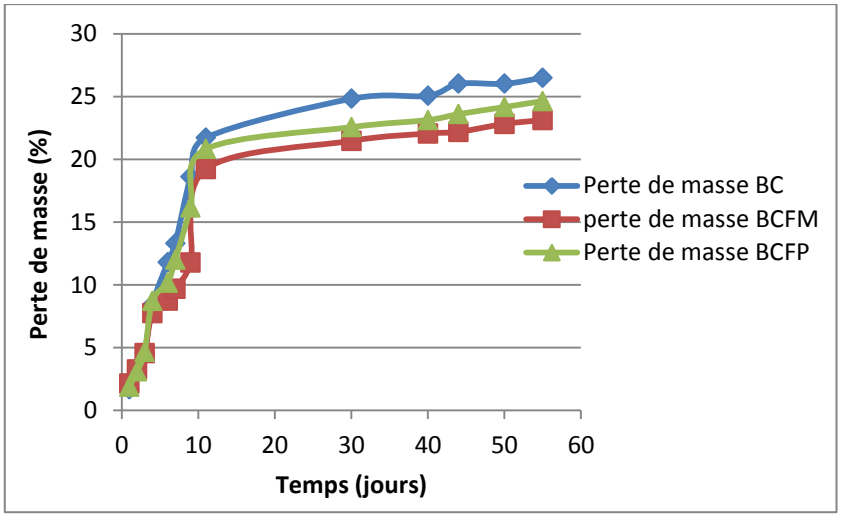


Figure 4.9. Evolution de la perte de masse durant 55 jours pour les trois bétons de fibres de chanvre

La figure 4.9 montre que les trois bétons ont un comportement au séchage similaire où deux phases de séchage sont facilement identifiables:

La première phase (entre 7+0 jours et 7+11 jours): dans cette phase l'eau s'évapore avec des quantités importantes et d'une façon rapide;

La deuxième phase (entre 7+11 jours et 55 jours) : dans cette phase la vitesse d'évaporation et la quantité d'eau évaporée sont moins importantes que dans la première phase.

Selon Whitaker [124] (cité par Cerezo [57]), le mécanisme de séchage se produit par le biais de deux zones, une zone diffusionnelle et une zone à teneur en eau initiale. La zone à teneur en eau initiale se situe à l'intérieur de l'échantillon, elle joue le rôle de réservoir et elle alimente en eau la zone diffusionnelle (l'eau remonte par capillarité) qui se situe initialement à la surface de l'échantillon. La zone diffusionnelle permet la vaporisation puis l'évacuation vers le milieu extérieur de l'eau qui existe dans cette zone et de l'eau remontée. Pour maintenir l'équilibre hydrique à l'intérieur de l'échantillon, l'eau remonte à chaque fois à partir d'une teneur en eau dite critique, l'eau liquide ne peut plus rejoindre la surface. Un gradient de teneur en eau se développe et la vitesse de séchage décroît. Cette dernière est gouvernée par la diffusion de vapeur. Une zone sèche apparaît en surface du matériau, la zone diffusionnelle s'éloigne de la surface en gardant quasiment la même épaisseur et la zone à teneur en eau initiale décroît jusqu'à disparaître à la fin du séchage.

Les pertes de masse totales des BC, BCFP et BCFM sont respectivement 26.49%, 24.63% et 23.12%. Donc pour une même quantité d'eau de gâchage initiale, le BC perd une quantité d'eau de gâchage supérieure (après le démoulage) au BCFP et BCFM. Ceci est peut être lié au

transport d'humidité moins rapide pour le BC que pour le BCFP et le BCFM (les BCFP et BCFM perdent une quantité d'eau supérieure avant le démoulage).

Enfin, il faut distinguer le séchage du durcissement du béton de chanvre quand on analyse l'influence de l'ambiance (la température et l'humidité relative) sur l'évolution dans le temps de ces deux phénomènes. Le durcissement d'une pâte de chaux aérienne est lié à la transformation de la chaux éteinte ($Ca(OH)_2$) en carbonate de calcium ($CaCO_3$), l'avancement de la réaction de carbonatation s'accompagne d'une augmentation de masse du béton de chanvre (la masse molaire de la matrice($Ca(OH)_2$) est environ 1.35 la masse molaire du liant (CaCO3)), tandis que le séchage du BC correspond à une perte de masse de ce dernier [123].

3.2. Mesure de l'évolution de retrait

Comme pour la perte de masse, le suivi de l'évolution du retrait est effectué dès le démoulage, pendant 61 jours pour les bétons autoplaçants et ordinaires et 55 jours pour les bétons de fibres de chanvre.

3.2.1. Cas des bétons autoplaçants et ordinaires

Les résultats de mesure de l'évolution du retrait total et les valeurs finales du retrait total des différents types de béton sont présentés sur les figures 4.10 et 4.11.

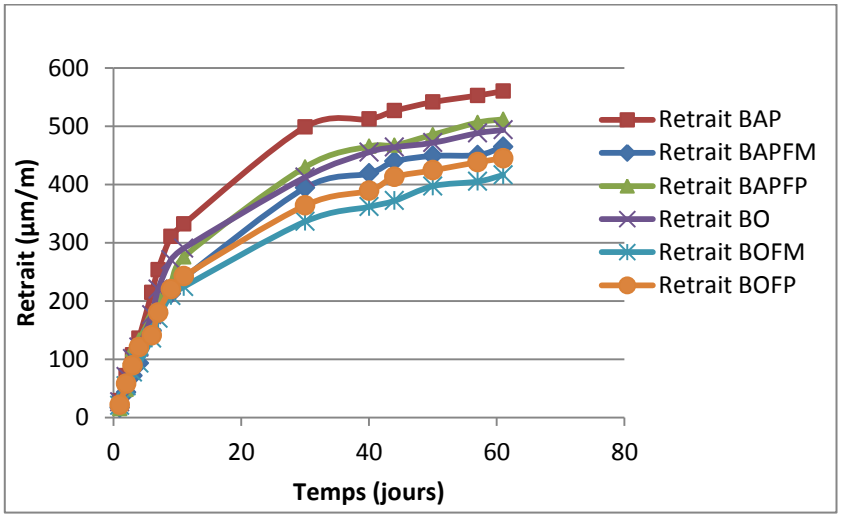


Figure 4.10. Evolution du retrait total pour les différents types de bétons

La figure 4.10 montre une vitesse de retrait total très rapide dans les 20 premiers jours suivant le démoulage et ceci pour tous les bétons. A partir de 40 jours, une diminution flagrante de la vitesse de retrait total est observée.

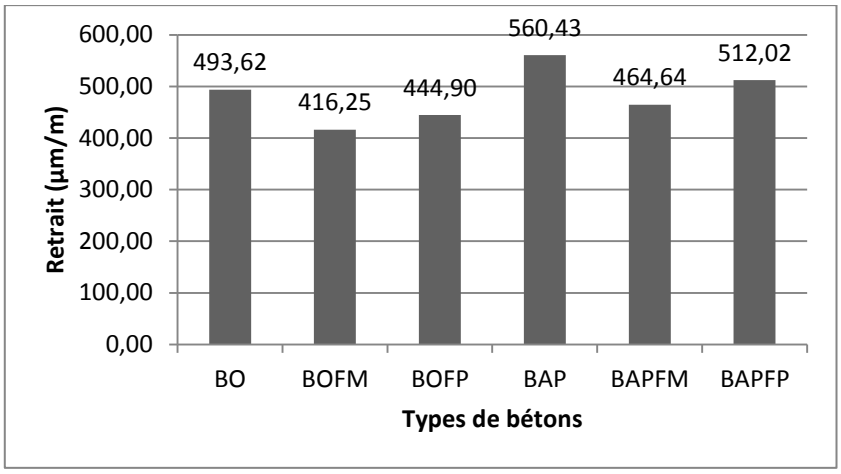


Figure 4.11. Retrait total après 61 jours pour les différents types de bétons

Les valeurs du retrait total (figure 4.11) après 61 jours des BAP, BAPFM, BAPFP, BO, BOFM et BOFP sont respectivement 540.43µm/m, 464.64 µm/m, 506.13 µm/m, 493.62 µm/m, 416.25 µm/m et 444.9 µm/m. La valeur du retrait total du BAP est supérieure à celle du BO, ceci peut être expliqué par la différence de formulation du BAP et du BO (différence de rapport G/S et du volume de la pâte).

Le retrait total mesuré dans cette étude combine les effets du retrait endogène (le retrait endogène, comme son nom l'indique, se produit dans des conditions isothermes et où les échanges avec le milieu extérieur sont inexistants) et le retrait de séchage lié à l'évaporation de l'eau de gâchage.
Selon Neville [2], le retrait endogène se produit juste après la prise lorsqu'un apport d'eau vers la pâte n'est pas possible, les particules de ciment encore anhydre absorbent l'eau contenue dans les pores capillaires pour permettre l'hydratation de celles-ci, c'est le phénomène d'autodessiccation. Ce dernier provoque l'apparition de cavités gazeuses et la formation de ménisques entre la phase gazeuse et la phase liquide dans les pores capillaires, c'est "la dépression capillaire", ce qui implique une mise en traction de l'eau et, réciproquement, une mise en compression des hydrates de ciment suite à un effort de compression sur leur surface (cet effort est dû aux tensions capillaires générées entre l'eau et la phase gazeuse), ce qui provoque le rapprochement des hydrates de ciment, cependant, la dépression capillaire seule ne décrit pas complètement le mécanisme de retrait endogène. D'autres mécanismes plus complèxes s'accompagnent à la dépression capillaire, surtout lorsque l'humidité relative diminue dans le béton (HR<70%), on parle dans ce cas de pressions de disjonction [124].

Quant au retrait de séchage qui représente la quasi-totalité du retrait total (le retrait endogène est plus significatif pour un rapport E/C faible alors que le retrait de séchage est plus significatif pour un rapport E/C grand), il se produit après l'évaporation de l'eau libre. Lorsque l'eau adsorbée à la surface de toutes les particules du gel commence à s'évaporer, si la pâte de ciment n'est pas bloquée (le retrait de séchage diminue avec l'augmentation du rapport G/S), le changement de volume sera approximativement égal à la perte d'un film d'eau de l'épaisseur d'une molécule d'eau.

L'ajout des fibres polypropènes et métalliques a contribué à la diminution du retrait total des différents bétons, cette diminution est plus prononcée avec l'ajout des fibres métalliques et sur le

BAP que sur le BO. Ces résultats confirment l'effet bénéfique de l'ajout des fibres métalliques et polypropylènes sur le retrait des bétons observé par différents auteurs [125,126].

3.2.2. Cas des bétons de fibres de chanvre

Les résultats du retrait total des bétons de fibres de chanvre sont présentés jusqu'à 54 jours sur la figure 4.12.

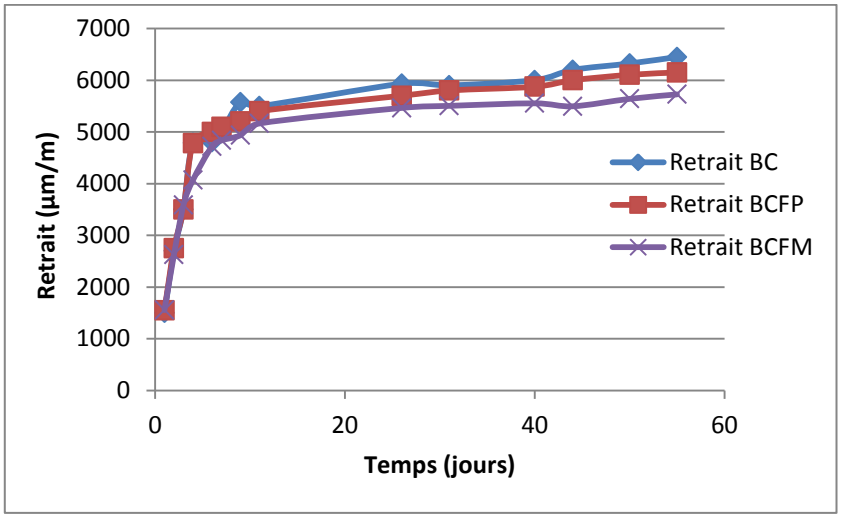


Figure 4.12. Evolution du retrait total des bétons de fibres de chanvre

La figure 4.12 montre une vitesse de retrait très importante dans les 10+7 premiers jours pour les différents bétons de chanvre. A partir de 10+7, la vitesse de retrait diminue brusquement, les valeurs du retrait total sont également très importantes, elles sont de 6450.14 µm/m, 6150.1 µm/m et 5726.61 µm/m respectivement pour les BC, BCFP et BCFM.

Comme pour les mortiers de ciment, le paramètre qui régit le retrait total des mortiers de chaux aérienne est le départ d'eau de gâchage [119, 127]. Les mortiers de chaux aérienne présentent une perte d'eau plus importante que les mortiers des ciments, ceci explique la supériorité du retrait total des mortiers de la chaux aérienne sur celui des mortiers de ciment. Pour le béton de fibres de chanvre, il y a un autre paramètre qui peut augmenter le retrait total, il s'agit de la contraction des fibres suite à leur séchage. En effet, les fibres de chanvre ont un caractère hydrophobe, dès leur contact avec l'eau elles absorbent de l'eau et elles se gonflent, le départ de cette eau lors du séchage conduit à leur contraction.

La figure 4.12 montre également que, comme pour les matrices cimentaires, l'incorporation des fibres polypropylènes et fibres métalliques diminue le retrait total, cette diminution est de 11.22% pour les fibres métalliques et 4.87% pour les fibres polypropylènes. La diminution du retrait total pour le BCFP est observée également par Izaguirre et al. [119]. Selon ces derniers, le mécanisme d'action des fibres polypropylènes sur la chaux aérienne est le même que sur le ciment.

3.3. Mesure de la porosité

3.3.1. Cas des bétons ordinaires et autoplaçants

Les résultats de la mesure de la porosité sur les différents bétons sont présentés sur la figure 4.13

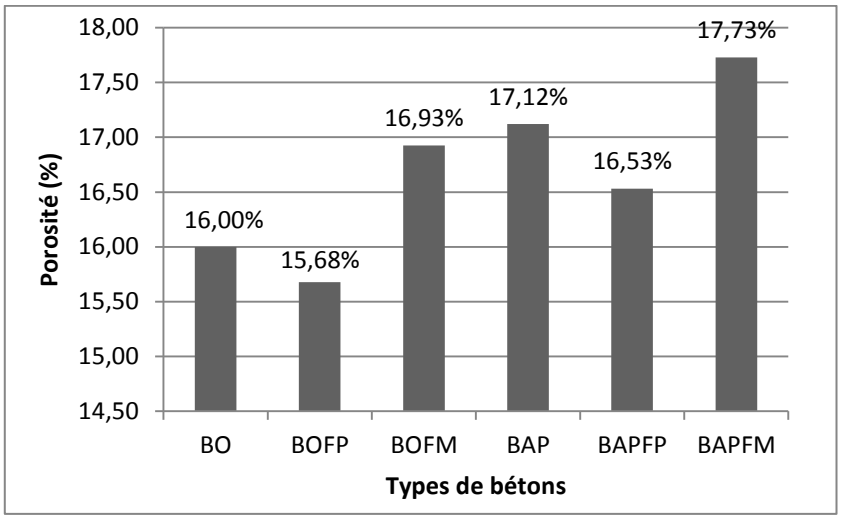


Figure 4.13. Porosité des bétons ordinaires et autoplçants (%)

Les résultats montrent que la porosité du BAP est légèrement supérieure à celle du béton ordinaire, elle est de 16% pour le béton ordinaire et de 17.12% pour le BAP. Les résultats montrent aussi que la porosité augmente avec l'ajout des fibres métalliques et diminue avec l'ajout des fibres polypropylènes.

Alors que l'augmentation de la porosité dans les bétons avec ajout de fibres métalliques trouve son explication par la perturbation de l'empilement granulaire des granulats [115 cité par 116] et également par la porosité supplémentaire apportée par la zone de transition entre la pâte et les fibres [117, 118], la diminution de la porosité avec ajout des fibres polypropènes semble insignifiante vu que les fibres polypropènes augmentent aussi la porosité. Cependant, l'explication qu'on peut dégager c'est que les fibres polypropylènes contraignent les fissures à se développer plus efficacement que les fibres métalliques lorsque le béton est encore en état plastique (n'oublions pas que les différents bétons ont subi une migration d'eau suite à l'utilisation des moules en bois, avant le démoulage bien sûr). Plusieurs auteurs [128, 129 et 130] ont mis en évidence l'efficacité des fibres polypropylènes, en particulier à réduire la fissuration induite par le retrait plastique au jeune âge des bétons [129, 130], et en général leur effet bénéfique sur la réduction des fissurations des bétons suite à la modération du retrait de séchage [130].

Donc, les fibres polypropylènes semblent réduire plus efficacement que les fibres métalliques la fissuration de retrait plastique des bétons (bien sûr dans le cas des moules en bois où une migration d'eau est très importante), ce qui diminue leur porosité.

3.3.2. Cas des bétons de chanvre

La porosité des bétons de chanvre est une caractéristique importante parce qu'elle conditionne le comportement hygrothermique de ces derniers.

Les résultats de la mesure de la porosité des trois bétons de fibres de chanvre sont présentés sur la figure 4.14.

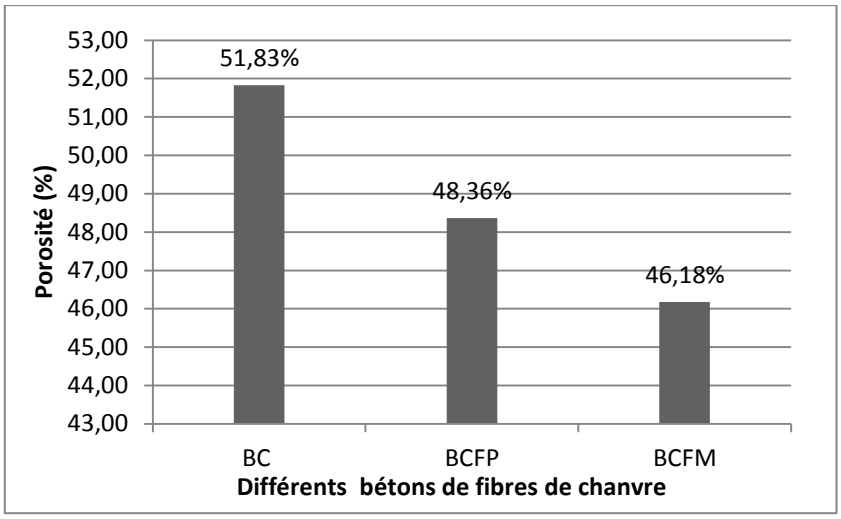


Figure 4.14. Porosité de différentes compositions de bétons de fibres de chanvre (%)

La figure 4.14 montre que les trois bétons possèdent une grande porosité, mais elle est nettement inférieure à celle du béton de chanvre (des porosités variant entre 77 et 80% [57]). Selon Cerozo [57], la porosité des bétons de chanvre est connectée et elle est la somme de l'air intra-particules (porosité des particules de chènevotte) de l'air intra-liant (porosité qui apparaît au moment de la prise des hydrates et du séchage du matériau) et l'air macroscopique (qui est lié à l'empilement des granulats plus ou moins compact). Cerozo [57] a conclu donc que les particules végétales ne sont pas rendues étanches par le liant. La définition de la porosité du béton de chanvre telle que définie par Cerozo [57] est peut être transposée pour le cas des bétons de fibres de chanvre, vu que l'ajout des fibres métalliques et polypropylènes a contribué à la diminution de la porosité (les fibres métalliques et polypropylènes n'absorbent pas l'eau).

3.4. Absorption par capillarité

Le deuxième paramètre de durabilité mesuré dans cette étude est l'absorption par capillarité. L'essai d'absorption capillaire permet de mesurer la vitesse à laquelle un liquide pénètre dans les matériaux poreux par la mesure de son absorptivité, l'essai permet aussi la mesure de la quantité totale d'eau absorbée par le matériau poreux après une durée d'immersion donnée (généralement après 24 heures).

Le béton est en effet un matériau qui possède des pores capillaires dont la dimension varie suivant ses caractéristiques de composition (rapport E/C, additions minérales, etc.). Lorsqu'un béton se met en contact avec un liquide par le biais de sa surface, le liquide remonte à l'intérieur des pores capillaires sous l'effet des tensions de surface. Les pores capillaires ouverts sur le milieu extérieur vont donc conduire, dans certaines conditions (principalement d'humidité), des liquides pouvant contenir des espèces chimiques potentiellement préjudiciables au bon fonctionnement et à la durée de vie d'une construction soumise à ces attaques. L'eau remonte plus haut dans des bétons ayant des capillaires plus fins (des bétons de rapport E/C petit), et moins haut pour des bétons ayant un rapport E/C plus grand, mais la quantité totale d'eau qui pénètre dans un béton est d'autant plus grande que le rapport E/C est grand.

Selon Neville [2], les pores qui permettent l'absorption d'eau par capillarité sont ceux qui ont une taille inférieure ou égale à 120 ou 160 nm et ils doivent être continus.

3.4.1. Cas des bétons ordinaires et autoplaçants

Les résultats d'essais de l'absorption d'eau par capillarité ainsi que la cinétique de ce phénomène sont présentés sur les figures 4.15 et 4.16.

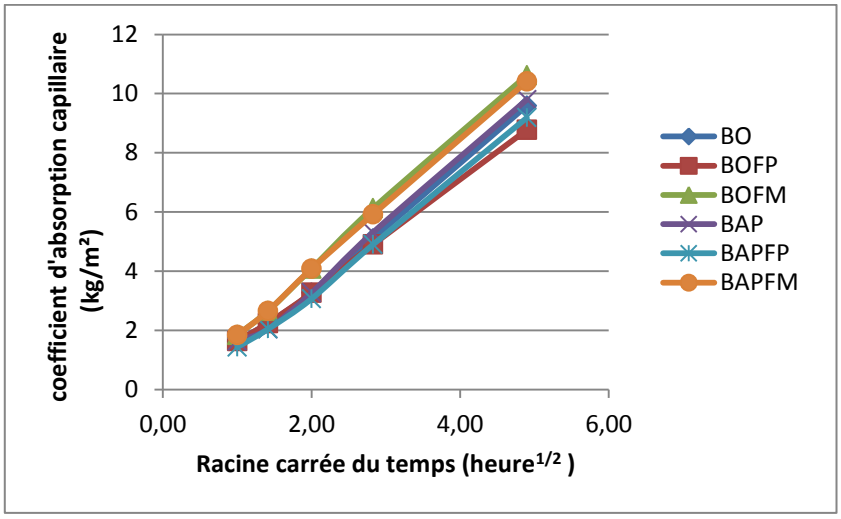


Figure 4.15. Absorption d'eau par capillarité des différents bétons

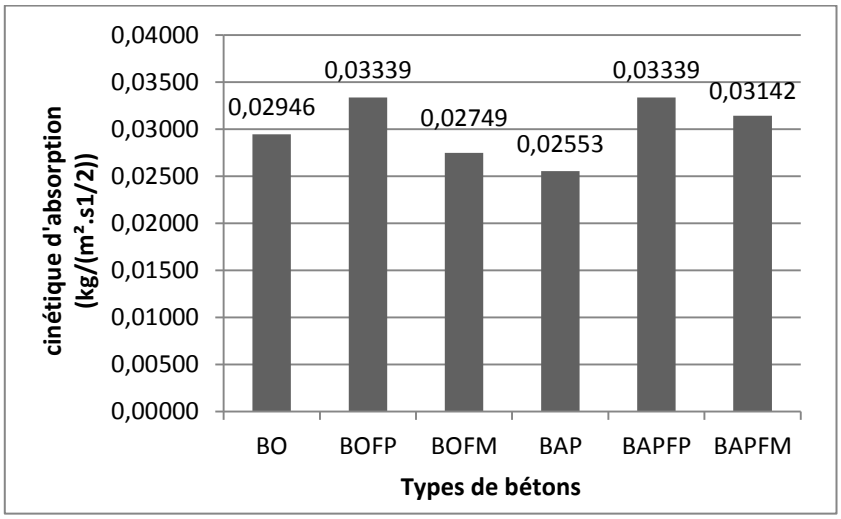


Figure 4.16. Cinétique d'absorption des différents bétons

A partir de ces résultats, les observations suivantes sont tirées:

On constate que les coefficients d'absorption sont un peu exagérés par rapport à ceux qu'on trouve dans la littérature, ceci est dû aux conditions initiales d'immersion. En effet, dès les premiers instants où les pores ouverts superficiels du bas de l'éprouvette se trouvent immergés, une augmentation rapide de la masse est observée.

Les résultats montrent aussi qu'il n'y a pas une grande variation d'absorption capillaire ou de cinétique d'absorption entre les différents bétons, avec une légère tendance pour les bétons

ordinaires de présenter une absorption et une cinétique d'absorption plus grandes que les bétons autoplaçants.

L'ajout de fibres métalliques a augmenté la cinétique d'absorption du BAPFM et l'a diminué dans le BOFM. L'ajout de fibres polypropylènes a contribué à une augmentation de l'absorption et de la vitesse d'absorption des BAPFP et BOFP par rapport à leurs bétons témoins (BAP et BO) et par rapport aux bétons avec l'ajout de fibres métalliques.

En conclusion, on peut dire que les différents bétons n'ont pas donné une tendance générale sur la variation d'absorption capillaire ou de cinétique d'absorption, cela peut être lié d'une part à des compétitions entre porosité accessible et d'autre part à la taille des capillaires.

3.4.2. Cas des bétons de fibres de chanvre

Les résultats de mesure de l'absorption capillaire des bétons de fibres de chanvre sont présentés sur la figure 4.17.

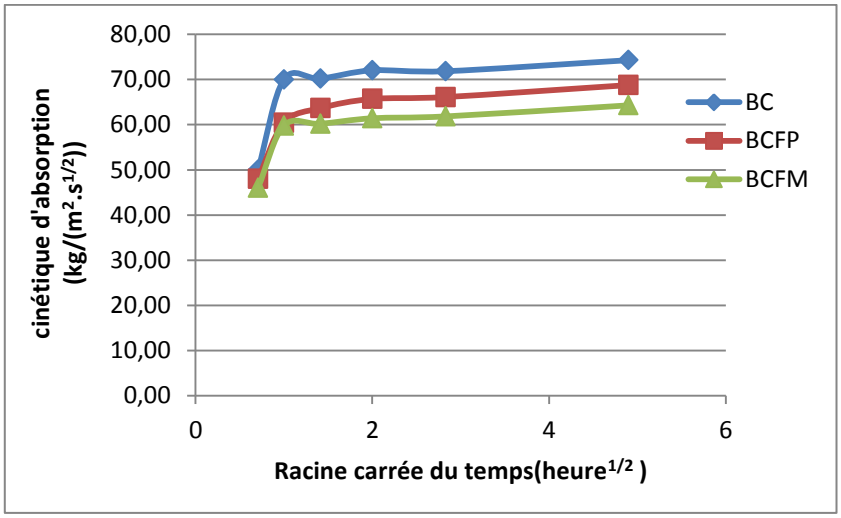


Figure 4.17. Absorption d'eau par capillarité des bétons de fibres de chanvre

Les mesures sont effectuées après 1/2h, 1h, 2h, 4h, 7h et 24h d'immersion. Ces échéances se sont avérées inadéquates pour montrer la cinétique d'absorption très rapide du béton de fibres de chanvre. D'après la figure 17, les bétons de fibres de chanvre présentent une cinétique d'absorption initiale très rapide, de telle sorte qu'ils atteignent leur absorption maximale au bout de 1 heure. Donc, il serait intéressant de réaliser des essais d'absorption capillaire à des échéances inférieures à 1 heure.

L'absorption capillaire après 24 heures d'immersion des BC, BCFP et BCFM est respectivement égale à 74.28, 69.38 et 65.3 kg/m^2. En comparant ces valeurs, on peut noter que les fibres métalliques et polypropylènes diminuent l'absorption capillaire, ceci est d'autant plus marqué pour les fibres métalliques que pour les fibres polypropylènes.

4. Conclusion

Dans cette partie, nous avons présenté les résultats d'essais mécaniques et physiques à l'état durci et à température ambiante des trois types de bétons, l'influence de l'ajout des fibres métalliques et polypropylènes sur ces caractéristiques est également abordé. Plusieurs conclusions peuvent être tirées de ces résultats:

Contrairement à ce qu'on trouve dans la littérature, le BO a présenté des résistances en compression et en traction supérieures à celles du BAP, ceci est peut-être expliqué par une perte excessive de l'eau de gâchage du BAP suite à l'utilisation des moules en bois. L'ajout des fibres métalliques et polypropylènes a diminué les résistances en compression du béton ordinaire et du béton autoplaçant, cette diminution est plus significative pour les bétons avec ajout de fibres polypropylènes que pour les bétons avec ajout de fibres métalliques et sur les BO que sur les BAP. Contrairement aux résistances en compression, les résistances en traction du BO et du BAP augmentent avec l'ajout des fibres métalliques et polypropylènes, cette augmentation est plus significative pour les BAP que pour les BO et elle est légèrement supérieure pour les bétons avec ajout de fibres métalliques que pour les bétons avec ajout de fibres polypropylènes.

Le béton de fibres de chanvre a présenté une résistance en compression et en traction meilleure que la résistance des bétons de chanvre qu'on trouve dans la littérature. L'ajout des fibres polypropylènes a augmenté les résistances en traction et en compression du béton de fibres de chanvre tandis que l'ajout des fibres métalliques les a diminuées.

Le BAP a présenté un retrait total supérieur à celui du béton ordinaire, l'ajout des fibres polypropylènes et métalliques a diminué le retrait total pour les deux types de béton. Cette diminution est plus significative avec l'ajout de fibres métalliques qu'avec l'ajout de fibres polypropylènes.

L'ajout des fibres métalliques et polypropylènes a diminué également le retrait total du béton de fibres de chanvre. Cette diminution est plus significative avec l'ajout de fibres métalliques qu'avec l'ajout de fibres polypropylènes.

Les résultats de mesure de la porosité ont montré que la porosité du BAP est légèrement supérieure à celle du béton ordinaire. Les résultats des essais ont montré aussi que la porosité augmente avec l'ajout des fibres métalliques et diminue avec l'ajout des fibres polypropylènes.

De même, la porosité du béton de fibres de chanvre diminue avec l'ajout des fibres métalliques et polypropylènes. Cette diminution est plus significative avec l'ajout de fibres métalliques qu'avec l'ajout de fibres de polypropylènes.

Les résultats d'essais d'absorption capillaire ont montré qu'il n'y a pas une grande variation d'absorption capillaire ou de cinétique d'absorption entre les différents bétons, avec une légère tendance pour les bétons ordinaires de présenter une absorption et une cinétique d'absorption plus grandes que les bétons autoplaçants.

Les bétons de fibres de chanvre ont présenté une cinétique d'absorption initiale très rapide, de telle sorte qu'ils atteignent leur absorption maximale au bout de 1 heure.

CHAPITRE 5

RESULTATS ET DISCUSSIONS SUR L'INFLUENCE DU FEU SUR LE COMPORTEMENT DES DIFFERENTS BETONS

CHAPITRE 5 : RESULTATS ET DISCUSSIONS SUR L'INFLUENCE DU FEU SUR LE COMPORTEMENT DES DIFFERENTS BETONS

1. Introduction

Bien que les différentes propriétés mesurées à température ambiante sont importantes, l'aboutissement de cette recherche concerne l'étude de l'effet du feu sur le comportement des différents bétons.

La vitesse de montée en température, la température maximale atteinte et la durée à laquelle le béton est exposé au feu ainsi que la vitesse de refroidissement sont les principaux paramètres qui influent sur le comportement au feu des bétons.

Les essais effectués dans cette partie sont conduits dans la phase résiduelle, c'est-à-dire après refroidissement des éprouvettes (19 heures après l'essai au feu). Les résultats des essais mécaniques (résistance en compression et en traction) et physiques (perte de masse et dilatation thermique) des différents types de bétons (béton ordinaire et béton autoplaçant), ainsi que l'influence de l'ajout des fibres métalliques et polypropylènes sur leurs caractéristiques sont présentés. Deux indicateurs de durabilité (porosité et absorption capillaire) des différents bétons sont également mesurés.

2. Courbes température-temps du foyer de feu

Les températures enregistrées lors de l'essai au feu sont représentées sous forme de courbes température-temps (figure 5.1)

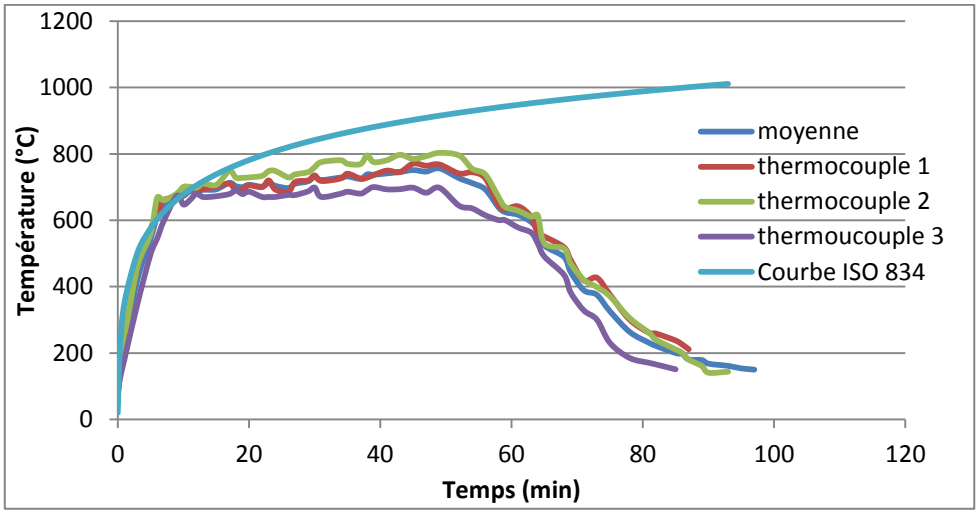


Figure 5.1. Courbes température-temps des différents thermocouples et la courbe ISO 834

La figure 1 montre que les températures ne sont pas homogènes sur tout le foyer. La durée totale de l'incendie est d'environ 85 minutes. En comparant la vitesse de montée en température de la courbe ISO 834, et la vitesse moyenne enregistrée à l'intérieur du foyer de feu, on peut dire qu'elles présentent une similarité jusqu'à l'instant t=13 minutes. A partir de cet instant, les températures à l'intérieur du foyer s'incurvent, tandis que celle de la courbe ISO 834 continue à augmenter.
L'embrasement du bois à l'intérieur du foyer peut être divisé en trois phases principales :

- **Première phase "Embrasement généralisé":** C'est la phase qui vient juste après l'inflammation du bois du foyer. Elle est caractérisée par une vitesse moyenne de monter en température très rapide, de l'ordre de 68.7°C/minute. La température au sein du foyer atteint environ 700°C au bout de 10 minutes;
- **Deuxième phase "Embrasement stable":** Dans cette phase la combustion est caractérisée par un régime d'embrasement presque stable de température de l'ordre 730°C, pendant environ 30 minutes;
- **Troisième phase "Retombée du feu":** C'est la phase où la vitesse de combustion commence à diminuer, la vitesse de diminution est de l'ordre de 10°C/minute.

3. Influence du feu sur le comportement des bétons de fibres de chanvre

Les bétons de fibres de chanvre ont subi des dégradations très importantes de telle sorte qu'on n'a pas pu les essayer (figure 5.2). Les causes de ces détériorations sont la déshydratation et la décomposition des composés principaux de la matrice chaux (décomposition du portlandite ($Ca(OH)_2$) à une température d'environ 500°C et le calcaire ($CaCO_3$) à une température d'environ 700°C [131]); la décomposition des fibres des chanvres (la cellulose se décompose entre 300 et 420°C, alors que les pectines et les hémicelluloses se dégradent entre 250 et 320°C, les lignines se décomposent vers 200°C [45]). A cela s'ajoute le régime de refroidissement très rapide (il peut créer des déformations thermiques différentielles).

Un autre paramètre dont l'effet sur la détérioration est très important, c'est la réaction de la chaux libre CaO (produite suite à la décomposition de la portlandite et le calcaire lors de l'échauffement) avec l'humidité lors et après refroidissement, ce qui forme le ($Ca(OH)_2$) qui s'accompagne d'une augmentation de volume.

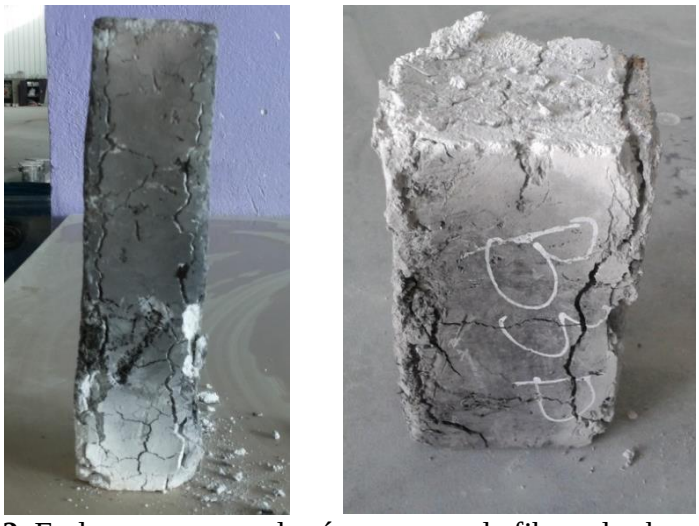


Figure 5.2. Endommagement des éprouvettes de fibres de chanvre

Dans ce qui suit, nous allons nous intéresser uniquement au comportement au feu des bétons ordinaires et autoplaçants.

3.1. Influence du feu sur le comportement mécanique des différents bétons

Les essais de résistances mécaniques des six bétons sont réalisés 62 jours après leurs coulages et 19 heures après l'essai au feu.

3.1.1. Influence du feu sur la résistance en compression des différents bétons

Les valeurs de la résistance résiduelle en compression sur cube équivalent des bétons ordinaires et autoplaçants avant et après exposition au feu sont regroupées sur la figure 5.3.

La baisse relative de la résistance des différents bétons est présentée sur la figure 5.4.

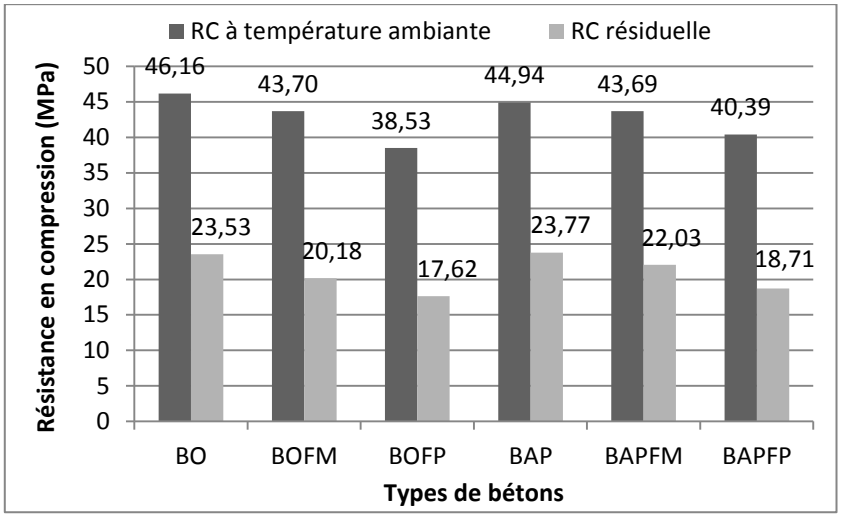


Figure 5.3. Résistance en compression avant et après exposition au feu des différents bétons

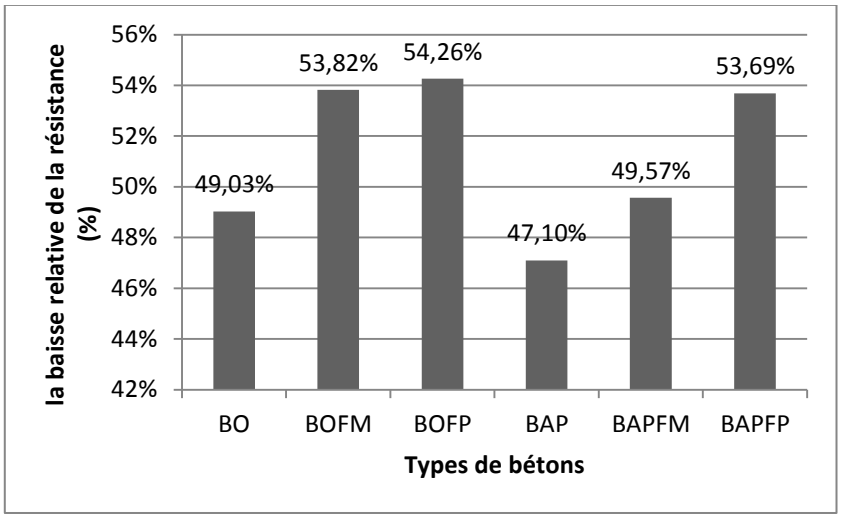


Figure 5.4. Baisse relative de la résistance en compression après exposition au feu

Aucune éprouvette n'a éclaté, néanmoins plusieurs éprouvettes du BOFM ont présenté d'importantes fissures (figure 5.5).

Figure 5.5. Fissurations dans les BOFM

Les résultats d'essais montrent que la résistance des différents bétons baisse d'une façon quasi similaire. Cette baisse est due aux différents changements physico-chimiques qui surviennent lorsqu'un béton est soumis à haute température. Les principaux changements sont l'évolution de la microstructure à cause de la déshydratation et la décomposition des différents composés chimiques de la pâte de ciment durcie et des granulats [132].

A cela, il faut ajouter l'augmentation de la microfissuration et de la porosité et les déformations différentielles entre la pâte et les granulats (retrait de la matrice provoqué par la déshydratation et l'expansion des granulats suite à leur dilatation) [73].

Les résultats montrent aussi que l'échauffement a eu plus d'effet sur les BO que sur les BAP, la baisse relative de la résistance du BO est de 47.1% tandis que celle du BAP est de 49.03%.

L'ajout des fibres polypropylènes et métalliques aux différents types de béton n'a pas amélioré la résistance en compression de ces derniers, mais au contraire, il l'a diminuée. Cette diminution est plus importante pour les bétons avec ajout de fibres polypropylènes que pour les bétons avec ajout de fibres métalliques.

L'augmentation de la porosité dans les bétons avec ajout de fibres polypropènes peut expliquer cette diminution. En effet, selon Liu et al. [94] les fibres polypropylènes fondent à environ 170°C et avec l'augmentation de la température se vaporisent, augmentant ainsi la taille des pores et leur connectivité [73], ce qui amplifie la dégradation de la microstructure des bétons, ce résultat est en cohérence avec la porosité trouvée dans cette étude.

L'ajout des fibres métalliques a diminué la résistance résiduelle des différents types de béton. Cette diminution est plus significative sur le BO que sur le BAP, elle est de l'ordre de 53.82% pour le BOFM et de 49.57% pour le BAPFM.

La raison qui peut expliquer cette diminution est la dilatation thermique différentielle importante entre la pâte de ciment (retrait) d'une part, et les fibres métalliques d'autre part (grande dilatation)

favorisée par les granulats (expansion) et amplifiée par une montée en température très rapide (68.7°C/minute) et par un coefficient de transfert de chaleur très élevé de fibres métalliques par rapport à celui du béton (le coefficient de transfert de chaleur des fibres métalliques varie entre 28 et 50 W/m C et celui du béton entre 1.1 et 1.3 W/m C [94]). Ceci conduit à une augmentation des pressions autour des fibres et par la suite des microfissures et fissures au sein du béton apparaissent lorsque la résistance en traction de la matrice est atteinte, affaiblissant ainsi la résistance des bétons.

C'est ce même raisonnement utilisé par Yining et al. [133] pour expliquer la chute de résistance d'un béton fibré (fibré par des fibres métalliques) par rapport à un béton non fibré, portés tous les deux à une température de 800°C.

Le raisonnement ci-dessus explique aussi l'apparition des fissures (figure 5.5) et l'augmentation de la porosité du béton ordinaire. Il peut également expliquer la moindre baisse du BAPFM (environ 53.82%) comparé à la baisse du BOFM (environ 49.57%). Le BAPFM est caractérisé par une porosité initiale (à température ambiante) nettement supérieure à celle du BOFM, ce qui peut laisser les fibres se dilater plus librement lors de l'échauffement, bien sûr dans l'hypothèse que la porosité supplémentaire du BAPFM est induite par les fibres métalliques.

3.1.2. Influence du feu sur la résistance en traction des différents bétons

La résistance en traction est négligée lors du calcul de la résistance des structures, néanmoins c'est une propriété importante surtout aux hautes températures parce que les fissurations et l'éclatement des bétons sont généralement gouvernés par la résistance en traction.

Les valeurs de la résistance résiduelle en traction par flexion sur éprouvettes 7x7x28 cm des différents bétons avant et après exposition au feu sont regroupées sur la figure 5.6.

La baisse relative de la résistance des différents bétons est également présentée sur la figure 5.7.

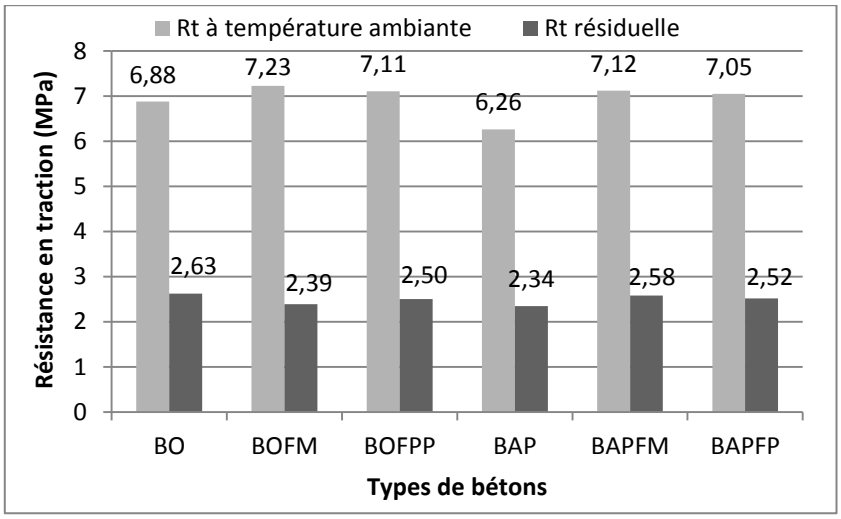


Figure 5.6. Résistance en traction avant exposition au feu et résiduelle des différents bétons

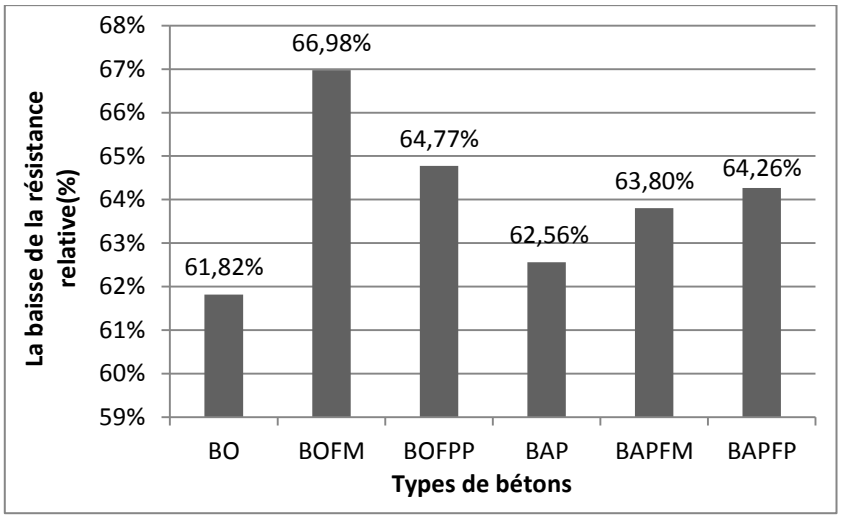


Figure 5.7. Baisse de la résistance relative en traction

Les résultats d'essais montrent que la résistance des différents bétons baisse après exposition au feu. Selon Wei et al. [134] cette diminution est attribuée au développement excessif de micro et macro fissures au sein des bétons, induits par l'incompatibilité de la dilatation thermique des différents constituants des bétons. Selon Wei et al. [134] toujours, ces fissurations influent beaucoup plus sur la résistance en traction que sur la résistance en compression, ce qui pourrait expliquer la diminution plus importante de la résistance à la traction par rapport à la résistance à la compression trouvée dans cette étude.

La baisse relative de la résistance varie d'un béton à l'autre, elle est légèrement supérieure pour le BAP (environ 62.56%) que pour le BO (environ 61.82%).

Comme pour la résistance en compression, l'ajout des fibres polypropylènes ou métalliques aux différents types de béton a augmenté la diminution de la résistance résiduelle en traction par flexion. Cette diminution est quasi similaire pour le BOFP (environ 64.77%) et BAPFP (environ 64.05%), tandis qu'elle est un peu plus élevée pour BOFM (environ 66.98%) et le BAPFM (environ 63.8%). Les raisons qui peuvent expliquer ces diminutions sont similaires à celles pour la résistance en compression.

4. Essais physiques

4.1. Mesure de la porosité

Les résultats de mesure de la porosité des différents bétons soumis ou non à l'essai au feu sont présentés sur la figure 5.8. La porosité relative (rapport entre la porosité après exposition au feu sur la porosité à température ambiante) est présentée sur la figure 5.9.

Les résultats montrent que la porosité des différents bétons augmente lorsque ces derniers sont exposés au feu. L'augmentation diffère d'un béton à l'autre et elle est plus significative sur les BO que sur les BAP. Cette augmentation est de 30.73% pour le BAP et de 48.82% pour le BO. Selon Noumowé [86], l'augmentation de la porosité est due au départ de l'eau liée et à la microfissuration engendrée par la dilatation différentielle entre la pâte et les granulats. D'autres auteurs [135] attribuent l'évolution de la porosité à l'accroissement de la taille des pores

capillaires résultant du départ de l'eau adsorbée des pores capillaires et au départ de l'eau liée des hydrates de la pâte de ciment.

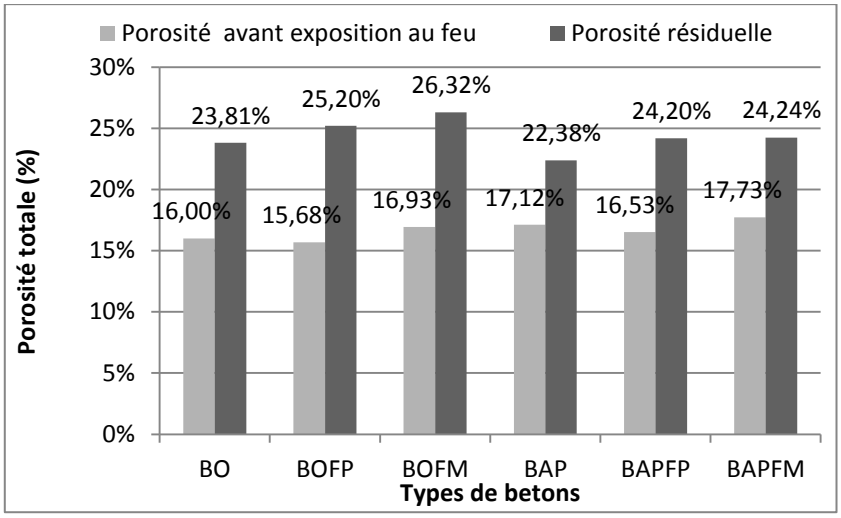


Figure 5.8. Porosité ouverte avant exposition au feu et résiduelle des différents bétons (%)

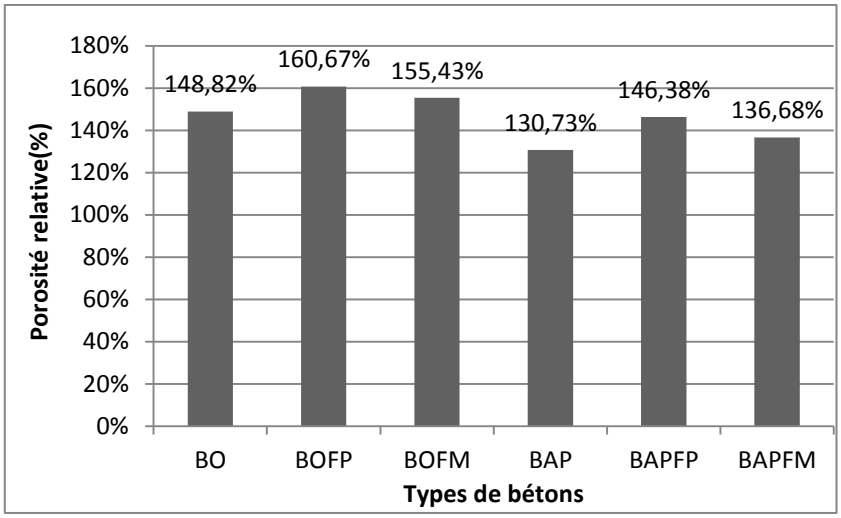


Figure 5.9. Porosité ouverte relative des différents bétons (%)

La différence des porosités du BAP et du BO renseigne sur une évolution différente de la microstructure lors de l'exposition au feu.

L'ajout des fibres polypropylènes ou métalliques aux différents bétons a amplifié l'augmentation de la porosité par rapport aux bétons sans fibres. Cette augmentation est plus significative pour les bétons avec ajout de fibres polypropylènes et pour le BOFP (environ 60.67%) que pour le BAPFP (environ 46.38%).

Selon Khaliq et al. [96], l'augmentation de la porosité dans les bétons avec ajout de fibres polypropylènes est due à l'évaporation de ces derniers, induisant ainsi une porosité supplémentaire dans les bétons.

4.2. Absorption par capillarité

L'effet du feu sur l'absorption capillaire des différents bétons est mesuré en comparant les résultats d'absorption totale après 24h et la cinétique d'absorption avant et après exposition au feu des différents bétons.

Les résultats de mesure de l'absorption capillaire montrent que la cinétique d'absorption des différents bétons augmente d'une façon très importante (figure 5.10), tandis que l'absorption capillaire totale après 24 heures des différents bétons diminue également d'une façon importante (figure 5.11).

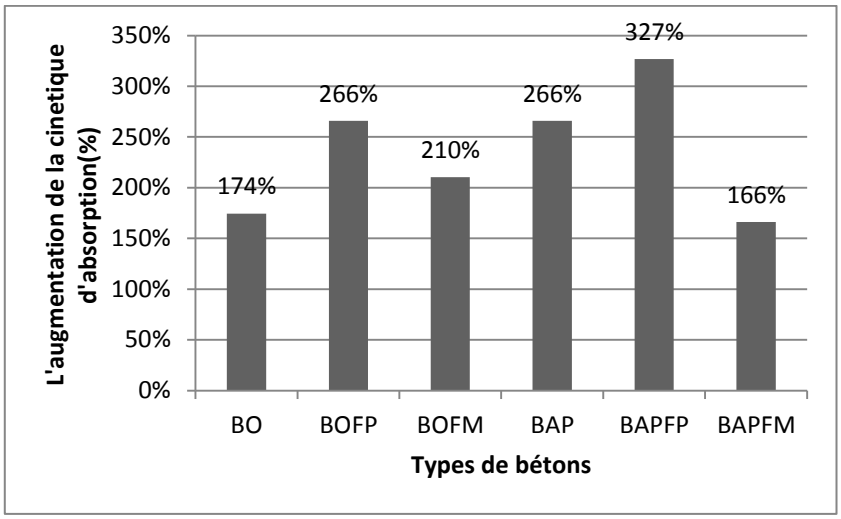


Figure 5.10. L'augmentation de la cinétique d'absorption des différents bétons après exposition au feu (%)

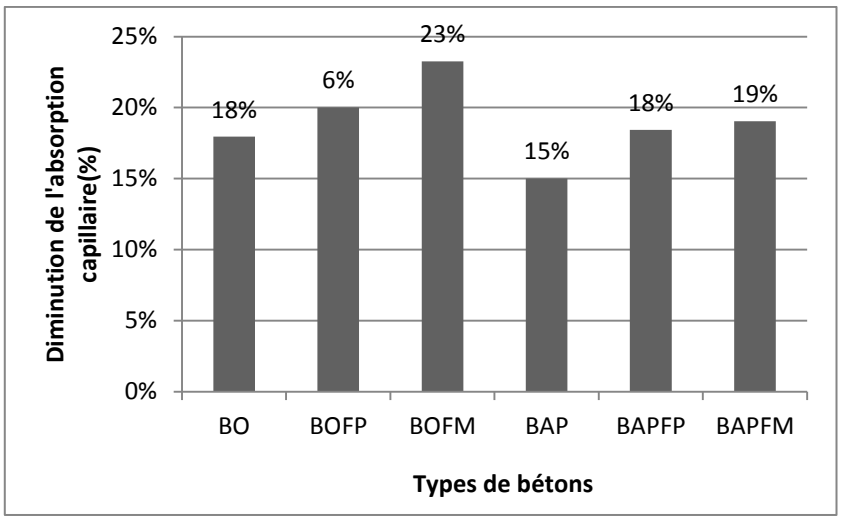


Figure 5.11. La diminution de l'absorption capillaire des différents bétons après exposition au feu (%)

L'augmentation de la cinétique d'absorption (mesurée durant les premières 4 heures de l'essai) est d'autant plus importante pour les bétons autoplaçants que pour les bétons ordinaires.

Contrairement à la cinétique d'absorption, la diminution de l'absorption capillaire est d'autant plus importante pour les bétons ordinaires que pour les bétons autoplaçants. Ceci peut renseigner sur une détérioration de la microstructure qui est plus importante pour les bétons ordinaires que pour les bétons autoplaçants.

Donc, on peut retenir que l'exposition au feu des différents bétons augmente la cinétique d'absorption (mesurée durant les premières 4 heures de l'essai) et diminue l'absorption capillaire totale après 24 heures. L'augmentation de la taille des pores capillaires et de leur connectivité semble agir sur ces deux propriétés, en facilitant la remontée de l'eau dans les capillaires au début, augmentant ainsi la vitesse d'absorption au début (durant les premières 4 heures de l'essai), puis une fois que la pression d'eau dans les capillaires devient faible (à cause de l'augmentation du poids des colonnes d'eau qui traversent les capillaires suite à l'augmentation du rayon de ces derniers) à l'intérieur du béton, la remontée d'eau diminue, et par la suite la quantité d'eau totale absorbée après 24 heures diminue.

4.3. Mesure de la perte de masse

Les résultats de mesure de la perte de masse totale des différents bétons avant et après exposition au feu sont présentés sur la figure 5.12. L'augmentation de la perte de masse après exposition au feu par rapport à la perte de masse avant exposition au feu est également présentée sur la figure 5.13.

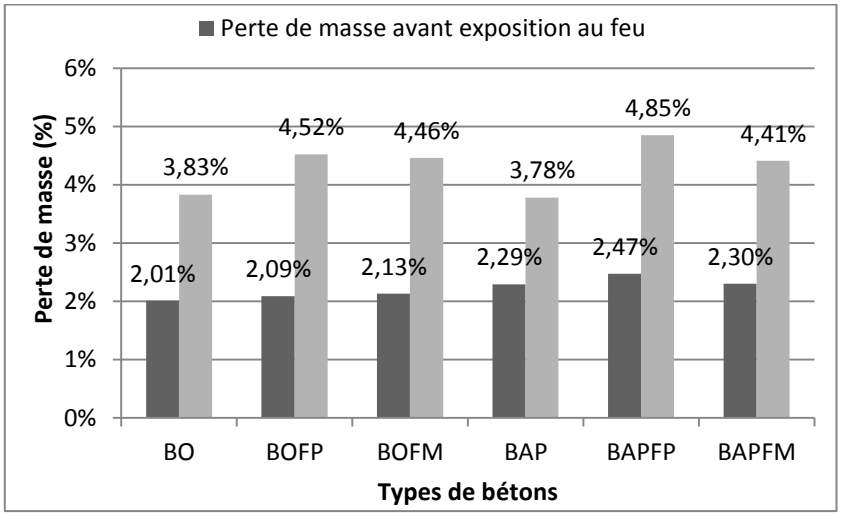


Figure 5.12. Perte de masse des différents bétons avant et après exposition au feu (%)

Les résultats de la figure 12 montrent une augmentation de la perte de masse des différents bétons après exposition au feu par rapport à celle avant exposition au feu. Cette augmentation est plus élevée pour les bétons ordinaires que pour les bétons autoplaçants, et pour les bétons fibrés que pour les bétons sans fibres.

Les bétons de fibres polypropylènes ont présenté la plus grande augmentation de la perte de masse. Celle-ci est d'autant plus importante pour les bétons ordinaires que pour les bétons autoplaçants.

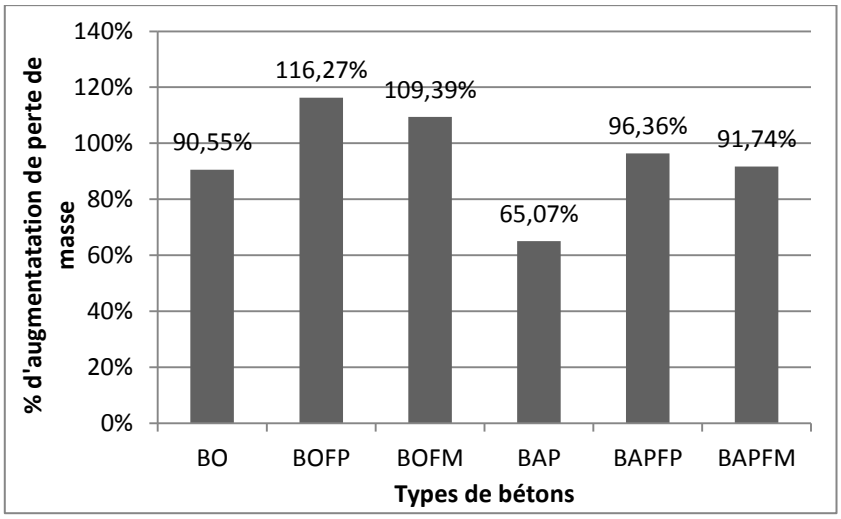


Figure 5.13. Augmentation de la perte de masse des différents bétons (%)

La perte de masse est liée principalement au départ de différentes eaux qui existent dans la microstructure du béton et également à la décomposition de certains constituants (qui s'accompagne d'une perte de masse) lors de l'échauffement.

Selon Hagar [73], la facilité à laquelle un béton peut laisser échapper la vapeur d'eau lors de l'échauffement est liée à sa porosité et sa perméabilité. Ceci est en accord avec les résultats de cette recherche (les bétons qui ont une grande porosité ont présenté une plus grande perte de masse).

4.4. Mesure de la dilatation thermique

Lorsqu'une éprouvette de béton est soumise à une élévation de la température, elle subit une dilatation thermique. Le suivi de la variation dimensionnelle des différents bétons avant et après exposition au feu est présenté sur la figure 5.14. Les résultats de mesure de la dilatation thermique des différents bétons juste après l'exposition au feu sont présentés sur la figure 5.15.

La figure 5.14 montre que les bétons ordinaires ont subi des dilatations thermiques supérieures à celles des BAP. Ceci peut être expliqué par le volume des gros granulats, qui est plus important pour les BO que pour les BAP.

L'ajout des fibres métalliques a augmenté la dilatation thermique des deux types de bétons. Cette augmentation est légèrement supérieure pour le BAPFM (une augmentation de 20.8%) que pour BOFM (une augmentation de 18.28%). Contrairement aux fibres métalliques, l'ajout des fibres polypropylènes a diminuée la dilatation thermique des deux types de bétons, cette diminution est de 6.41% pour le BAPFP et de 4,57% pour le BOFP.

La dilatation thermique plus élevée des bétons BOFM et BAPFM est liée au coefficient de dilatation thermique plus élevé des fibres métalliques que celui des autres constituants (la dilatation thermique des granulats calcaires varie entre $3x10^{-6}$/°C et $33.0x10^{-6}$/°C [73], tandis que celle de l'acier varie entre $1x10^{-4}$/°C et $7x10^{-3}$/°C [94]). La diminution de la dilatation thermique des BOFP et BAPFP est peut être liée à la porosité supplémentaire créée lors de la fusion et

l'évaporation des fibres polypropylènes. Cette porosité supplémentaire laisse les différents constituants des bétons se dilater à l'intérieur de cette dernière.

Après refroidissement (28 jours après l'essai au feu), les différents bétons ont présenté des déformations thermiques (dilatation) irréversibles (figure 5.14). Les déformations des BO sont légèrement supérieures que celles des BAP. Les déformations thermiques irréversibles renseignent sur les dégradations (fissurations) qu'ont subi les différents bétons lors de l'exposition au feu.

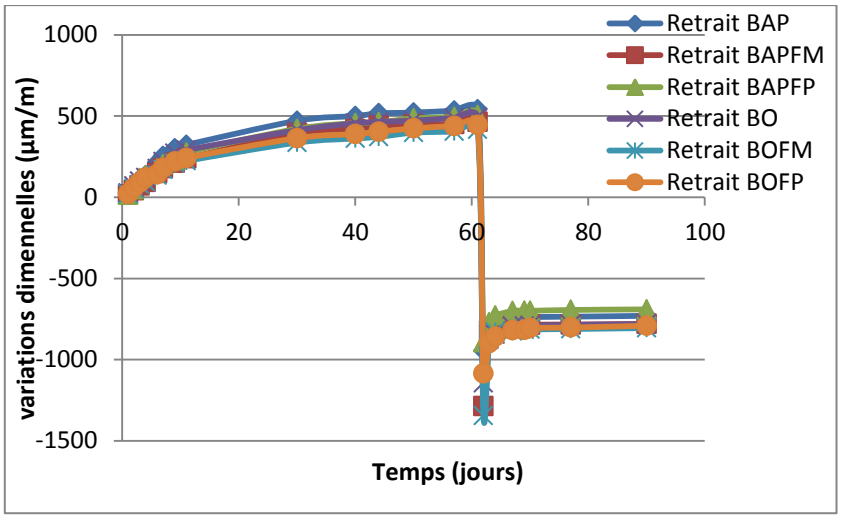


Figure 5.14. Variations dimensionnelles des différents bétons avant et après exposition au feu

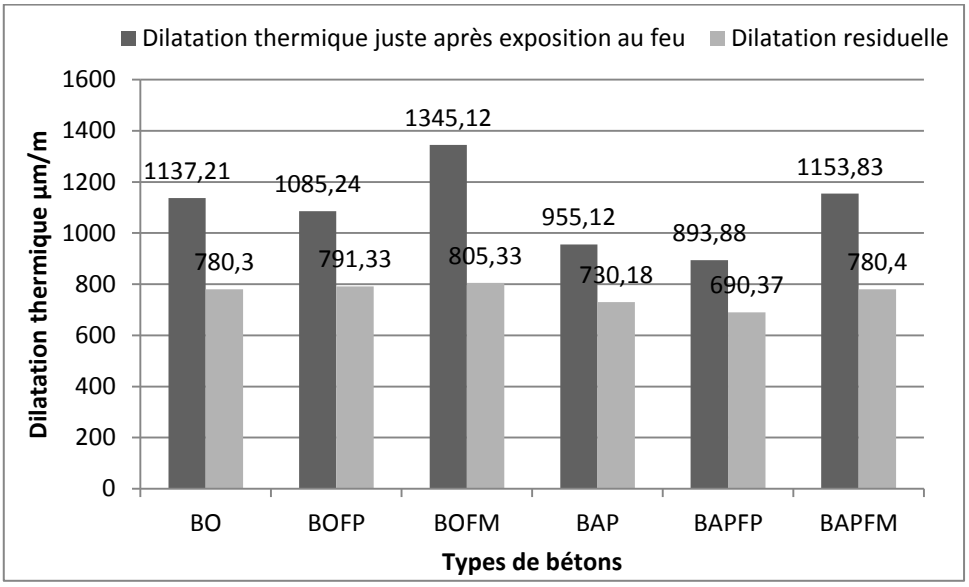


Figure 5.15. Dilatation thermique des différents bétons juste après exposition au feu et résiduelle

5. Influence du mode de conservation après exposition au feu sur le comportement mécanique des différents bétons

Pour explorer l'effet du mode de conservation sur la résistance à la compression et à la traction des bétons après exposition au feu, trois éprouvettes de chaque béton sont conservés dans l'eau pendant 28 jours après l'exposition au feu et trois autres éprouvettes du même béton sont laissées pendant la même durée à l'air ambiant. Les éprouvettes conservées dans l'eau sont retirées de celle-ci deux heures avant les essais de résistance mécanique afin d'éliminer l'effet de l'eau sur la résistance.

5.1. Influence du mode de conservation sur la résistance en compression

Les résultats de l'essai montrent une légère amélioration de la résistance à la compression des différents bétons (figures 5.16 et 5.17). Cette amélioration est légèrement supérieure pour les BAP que pour les BO et pour les bétons sans fibres que pour les bétons fibrés. Les bétons fabriqués avec ajout de fibres métalliques ont présenté la plus petite amélioration de résistance. L'amélioration de la résistance à la compression a été également observée par Chen et al [84]. Ils attribuent cette amélioration à l'hydratation des grains de ciment non hydratés avant l'exposition aux hautes températures.

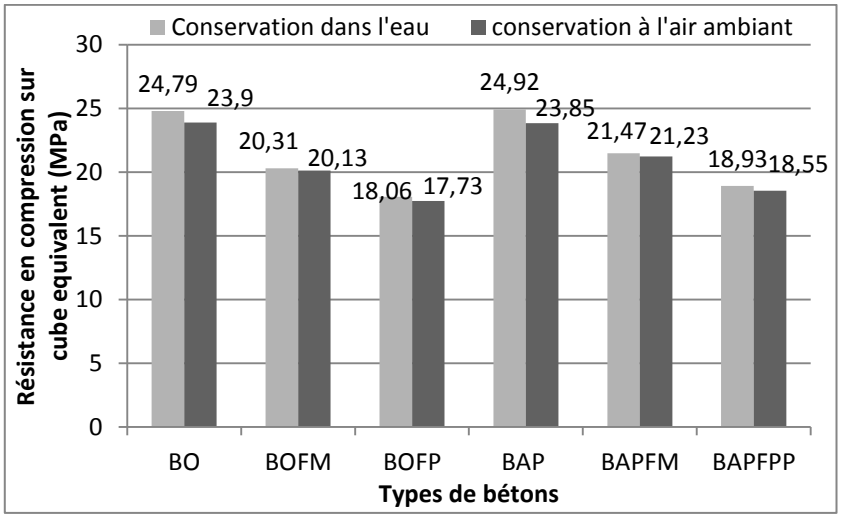


Figure 5.16. Résistance en compression des différents bétons conservés dans l'eau et dans l'air ambiant

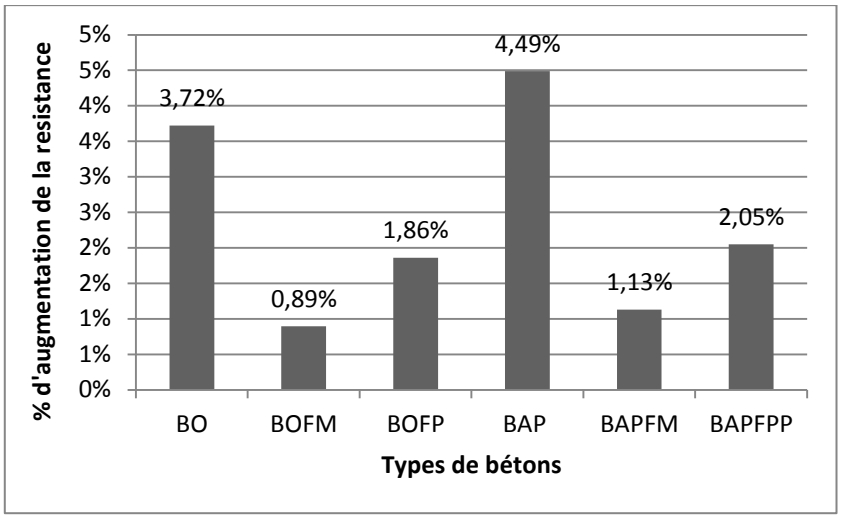


Figure 5.17. Augmentation de la résistance en compression des différents bétons conservés dans l'eau

5.2. Influence du mode de conservation sur la résistance en traction des différents bétons

Contrairement à la résistance en compression, la résistance en traction des différents bétons diminue lorsqu'on les conserve dans l'eau (figures 5.18 et 5.19). La diminution est sensiblement la même pour tous les bétons, la diminution de la résistance du BO est de 3.53%, celle du BAP est de 2.63%.

Le BOFM et le BAPFM ont présenté la plus petite diminution par rapport aux bétons sans fibres et les bétons avec ajout de fibres polypropylènes.

La réaction de la chaux libre CaO (qui provient de la décarbonatation ($CaCO_3 \longrightarrow CaO+CO_2$) des granulats calcaires lors de l'échauffement entre 600 et 900°C) présente dans le béton avec l'eau et sa transformation en ($Ca(OH)_2$) qui s'accompagne d'une augmentation de volume de 44% semble expliquer la diminution de la résistance en traction observée sur les différents bétons .

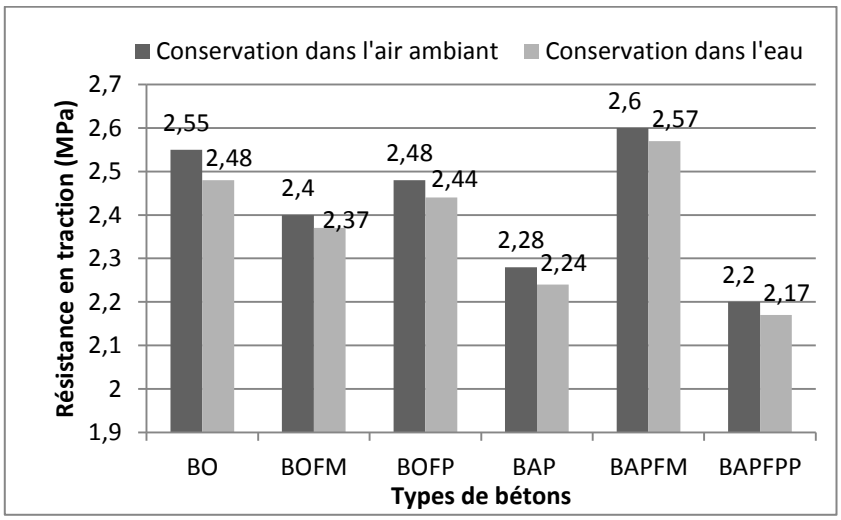


Figure 5.18. Résistance en traction des différents bétons conservés dans l'eau et dans l'air ambiant

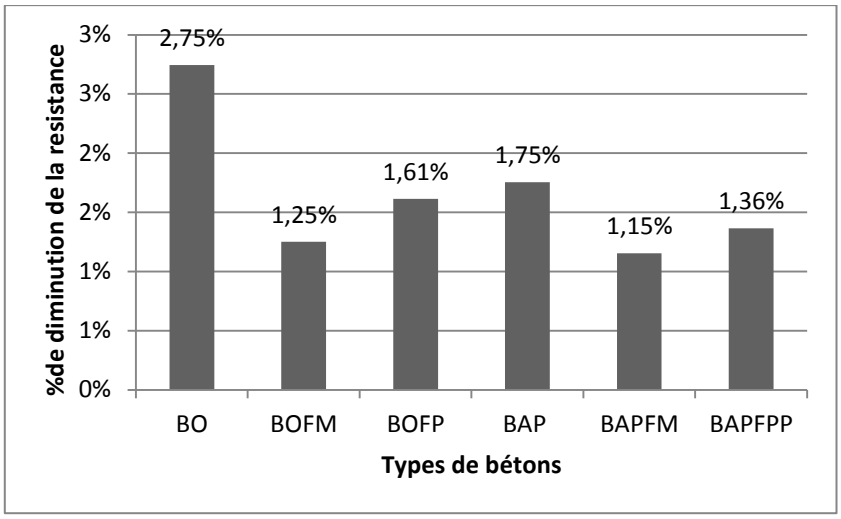


Figure 5.19. Diminution de la résistance en traction des différents bétons conservés dans l'eau

6. Conclusion

Ce chapitre a traité les comportements mécanique et physique des différents bétons après exposition à un feu réel.

Les bétons de fibres de chanvre ont subi une détérioration très importante de telle sorte qu'on n'a pas pu les essayer.

Les résultats d'essais ont montré que l'exposition au feu des différents bétons diminue leurs résistances en compression et en traction. Les résultats ont montré également que l'exposition au feu a eu plus d'effet sur les BO que sur les BAP.

L'ajout des fibres polypropylènes et métalliques aux différents types de bétons a diminué leurs résistances résiduelles en compression. Cette diminution est plus importante pour les bétons avec ajout de fibres polypropylènes que pour ceux avec ajout de fibres métalliques.

Comme pour la résistance en compression, la résistance en traction des différents bétons baisse après exposition au feu, l'ajout des fibres polypropylènes ou métalliques aux différents types de béton a augmenté la diminution de la résistance résiduelle en traction par flexion.

Les résultats de mesure de la porosité des différents bétons ont montré que la porosité de ces derniers augmente après exposition au feu. L'ajout des fibres polypropylènes ou métalliques aux différents bétons a amplifié l'augmentation de la porosité par rapport aux bétons sans fibres. Cette augmentation est plus significative pour les bétons avec ajout de fibres polypropylènes.

Les résultats de mesure de l'absorption capillaire ont montré que la cinétique d'absorption des différents bétons après exposition au feu augmente d'une façon très importante et l'absorption capillaire totale après 24 heures des différents bétons diminue également d'une façon importante.

L'exposition au feu des différents bétons a provoqué une dilatation thermique de ceux-ci. Les bétons ordinaires ont subi des dilatations thermiques supérieures à celles des BAP. L'ajout de

fibres métalliques aux différents bétons a augmenté cette dilatation tandis que l'ajout de fibres polypropylènes l'a diminué.

La conservation dans l'eau des différents bétons après exposition au feu a augmenté leurs résistances à la compression et a diminué leurs résistances à la traction.

CONCLUSION GENERALE

CONCLUSION GENERALE

L'objectif de ce mémoire était de constituer une base de données expérimentales sur le comportement à un feu réel de deux nouveaux bétons, un béton autoplaçant et un béton de fibres de chanvre et de comparer leurs comportements avec celui d'un béton ordinaire, ainsi que d'étudier l'influence de l'ajout des fibres polypropylènes et métalliques sur le comportement de ces trois types de bétons.

Le BAP constitue une véritable alternative au béton traditionnel grâce aux avantages techno-commerciaux qu'il offre. La fluidité du BAP et la suppression de la vibration lors de la mise en œuvre permettent d'améliorer la qualité du béton, d'avoir des géométries complexes et fortement ferraillées et de réduire le coût de production.

Les bétons de chanvre sont des éco-matériaux de construction. Ils connaissent un développement et une utilisation accrus dans le monde et permettent de réduire les consommations énergétiques ainsi que les impacts du bâtiment sur l'environnement.

L'étude bibliographique a permis également de montrer des résultats contradictoires concernant l'influence de l'ajout des fibres métalliques et polypropylènes sur le comportement mécanique des bétons.

Nous avons commencé l'étude expérimentale par la caractérisation des matériaux de base et la formulation des trois types de bétons avec des matériaux identiques et de résistance similaire pour les bétons ordinaire et autoplaçant. Le béton de fibres de chanvre a été formulé à partir d'une formulation de béton de chanvre par les fibres de chanvre. Pour étudier l'influence des fibres métalliques et polypropylènes et pour pouvoir comparer le comportement des bétons autoplaçants avec celui des bétons ordinaires, nous avons utilisé le même dosage en fibres pour les trois types de béton. Les essais de caractérisation des différents bétons à l'état frais ont donné des résultats satisfaisants en terme de respect des normes et recommandations en vigueur. Les essais à l'état durci réalisés dans cette étude sont l'essai au feu réalisé 61 jours après le coulage, les essais mécaniques et l'essai de porosité et d'absorption capillaire sur les éprouvettes soumises et non soumises au feu ont été réalisées 62 jours après le coulage. Des mesures de retrait et de perte de masse sont également réalisées avant et après exposition au feu des éprouvettes.

A l'état durci et à température ambiante, les résultats expérimentaux ont montré que le béton ordinaire a présenté un comportement mécanique meilleur que celui du béton autoplaçant, la perte excessive de l'eau de gâchage du BAP suite à l'utilisation des moules en bois est la principale explication de ce comportement. De même, le béton de fibres de chanvre a présenté un comportement mécanique meilleur que celui du béton de chanvre. L'incorporation des fibres métalliques et polypropylènes a diminué la résistance en compression et a augmenté la résistance en traction des bétons ordinaires et autoplaçants. Le retrait total du béton autoplaçant est supérieur à celui du béton ordinaire, l'ajout des fibres métalliques et polypropylènes a diminué le retrait total des trois types de béton. Les résultats expérimentaux ont montré également que la porosité du BAP est légèrement supérieure à celle du béton ordinaire. L'incorporation de fibres métalliques a augmenté la porosité tandis que l'ajout de fibres polypropylènes l'a diminuée, ceci est pour les bétons ordinaire et autoplaçant. De même, la porosité du béton de fibres de chanvre diminue avec l'ajout des fibres métalliques et polypropylènes.

L'essai au feu a été réalisé dans un foyer de dimension 1.5x2 m, la vitesse de montée en température est d'environ 68.7°C/minute, la température maximale atteinte est d'environ 800°C, la vitesse de diminution est de l'ordre de 10°C/minute, la durée totale de l'incendie est d'environ 85 minutes.

L'exposition au feu des bétons de fibres de chanvre a provoqué un endommagement très important de ces derniers de telle sorte qu'on n'a pas pu les essayer.

Les résultats d'essais ont montré que l'exposition au feu des différents bétons diminue leurs résistances en compression et en traction. Les résultats ont montré également que l'exposition au feu a eu plus d'effet sur les BO que sur les BAP, à savoir une augmentation de la porosité totale du BO par rapport à celle du BAP. De même, l'ajout des fibres polypropylènes ou métalliques aux différents bétons a amplifié l'augmentation de la porosité par rapport aux bétons sans fibres et que cette augmentation est plus significative pour les bétons avec ajout de fibres polypropylènes et pour le BOFP que pour le BAPFP.

L'ajout des fibres polypropylènes et métalliques aux bétons ordinaires et autoplaçants a augmenté la baisse de leurs résistances résiduelles en compression et en traction. Cette baisse est plus importante pour les bétons avec ajout de fibres polypropylènes que pour les bétons avec ajout de fibres métalliques.

Les résultats de mesure de l'absorption capillaire ont montré que la cinétique d'absorption des différents bétons après exposition au feu augmente d'une façon très importante et l'absorption capillaire totale après 24 heures des différents bétons diminue également d'une façon importante.

Un des résultats très importants de cette étude est la fissuration très importante du BOFM, l'explication dégagée est la dilatation très importante de fibres métalliques par rapport aux autres constituants suite à une vitesse très importante de montée en température. Ce résultat a mis en question le rôle des fibres métalliques comme moyen de prévention contre l'éclatement des bétons.

Cette étude a pu également mettre en évidence l'influence du mode de conservation après exposition au feu sur le comportement mécanique des bétons. La conservation dans l'eau des différents bétons après exposition au feu a augmenté leurs résistances en compression et a diminué leurs résistances en traction.

Références Bibliographiques

[1] Feldman R.F., Sereda P.J., *A model for hydrated Portland cement paste as deduced from sorption-length change and mechanical properties*, Colloque RILEM Munich, 1-3 Avril, 1968.

[2] Neville A. M., *Propriétés des Bétons*, traduction CRIB, Sherbrooke, Canada, Edition Eyrolles. Paris 2000.

[3] Sierra R., *Répartition de différentes formes d'eau dans la structure des pâtes pures de C_3S et de ciment Portfand*. Bull. Liaison LPC, 1982, n° 117, pp 77-81.

[4] Véronique Baroghel – Bouny, *Caractérisation microstructurale et hydrique des pâtes de ciment et des bétons ordinaires et à très hautes performances*, Thèse de Doctorat, Ecole Nationale Des Ponts et Chaussees, 21 juin 1994.

[5] D. Sidney, *Considerations in image analysis as applied to investigations of the itz in concrete*. Cement and Concrete Composites, 23:171–178, 2001.

[6] Tulin Akçaoglu, Mustafa Tokyay, Tahir Celik *Effect of coarse aggregate size on interfacial cracking under uniaxial compression*, Materials Letters 57 (2002) 828–833.

[7] Xie Ping, J.J.Beaudoin, R.Brousseau, *Effect of coarse aggregate size on transition Zone properties at the Portland cement paste interface*, Cement and Concrete Research, Vol.21.pp. 999-1005. 1991.

[8] W.P. Boshoff, V. Mechtcherine, G.P.A.G. van Zijl, *Characterising the time-dependant behaviour on the single fibre level of shcc: Part 1: Mechanism of fibre pull-out creep*. Cement and Concrete Research, 39:779-786, 2009.

[9] Rashid Hameed, *Apport d'un Renfort de Fibres sur les Performances des Structures en Béton Armé pour les Applications Parasismiques*, Thèse de doctorat, Université Toulouse III – Paul Sabatier, 06 Octobre 2010.

[10] A. Sivakumar, Manu Santhanam, *A quantitative study on the plastic shrinkage cracking in high strength hybrid fiber reinforced concrete*, Cement and Concrete Composites 29 (2007) 575–581.

[11] Sukontasukkul P., *Toughness evaluation of steel and polypropylene fibre reinforced concrete beams under bending*, Thammasat international journal of science and technology 9, 3 (Jul.-Sep. 2004) pp. 35-41.

[12] Youcef Fritih, *Apport d'un renfort de fibres sur le comportement d'éléments en béton autoplaçant armé*, Thèse de Doctorat, Université De Toulouse 08 Juillet 2009.

[13] Safeer Abbas, Ahmed M. Soliman, Moncef L. Nehdi, *Exploring mechanical and durability properties of ultra-high performance concrete incorporating various steel fiber lengths and dosages*, Construction and Building Materials 75 (2015) 429–441.

[14] H. Okamura and M. Ouchi, Self-compacting concrete. Journal of advanced Concrete, Vol. 1:5-15, 2003.

[15] AFGC. *Bétons Autoplaçants, Recommandations Provisoires*. Page 63, 2000.

[16] AFGC. (2000), *Les bétons autoplaçants : Recommandations provisoires*, Documents scientifiques et techniques, France.

[17] T. Sedran. (1999), *Rhéologie et rhéométrie des bétons. Application aux bétons autonivellants*, Thèse de doctorat de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, France.

[18] Turcry, P, *Retrait et fissuration des BAP Influence de la formulation, in Ecole centrale de Nantes*. 2004, page 230.

[19] AFGC, *Recommandations pour l'emploi des bétons autoplaçants*, Association française de génie civil, page 128 (2008).

[20] W. Zhu and JC. Gibbs. *Use of different limestone and chalk powders in self-compacting concrete*. Cement and Concrete Research, Vol. 35, N°8 :1457-1462, 2005.

[21] El-Hilali, A, *Etude expérimentale de la rhéologie et du comportement des bétons autoplaçants BAP, influence des fines calcaires et des fibres végétales*, université de cergy-pointoise 2009, pages 200.

[22] J. Baron, J.P. Olivier : *Les bétons. Bases et données pour leur formulation*. Editions Eyrolles, 1999.

[23] Assié, S, *Durabilité des betons autoplaçants* in INSA-Toulouse 2004 pages 254.

[24] Domone, P.L, *self-compacting concrete: An analysis of 11 years of case studies*. Cement and concrete composites, 2006. 28 (2): pages 197-208.

[25] Bensebti salah eddine, *formulation et propriétés des bétons autoplaçants à base de matériaux locaux*; Thèse de Doctorat, université Mentouri Constantine, juillet 2008.

[26] SU N., HSU K.C., CHAI H.W. *A simple mix-design method for self-compacting concrete, Cement and concrete Research*, vol. 31, n° 12, p. 1799-1807 (2001).

[27] EFNARC, *Specifications and guidelines for self-compacting concrete*, février 2002, 32 pages.

[28] NF EN 12350-8, *Essai pour béton frais - Partie 8 : béton autoplaçant - Essai d'étalement au cône d'Abrams*, Novembre 2010.

[29] NF EN 12350-9, *Essai pour béton frais - Partie 9 : béton autoplaçant - Essai d'écoulement à l'entonnoir en V*, Novembre 2010.

[30] NF EN 12350-10, *Essai pour béton frais - Partie 10 : béton autoplaçant - Essai à la boîte en L*, Novembre 2010.

[31] NF EN 12350-12, *Essai pour béton frais - Partie 12 : béton autoplaçant - Essai d'écoulement à l'anneau*, Novembre 2010.

[32] NF EN 12350-11, *Essai pour béton frais - Partie 11 : béton autoplaçant - Essai de stabilité au tamis*, Novembre 2010.

[33] Gibbs J.C. and Zhu W, *Strength of hardened self-compacting concrete Proceedings of First International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete (PRO 7)*, Stockholm, Suède, pp. 199-209, 13-15 September 1999.

[34] SHI C., WU Y., SHAO Y. and RIEFLER M., *Comparison of two design approaches for self-consolidating concrete, First North American Conference on the Design and Use of Self-Consolidating Concrete,* ACBM center, pp. 349-354, 12-13 November 2002.

[35] B. Felekoglu, S. Turkel, B. Baradan, *Effect of water/cement ration on the fresh and hardened properties of self-compacting concrete*. Building and materials, 2007.1795-1802.

[36] C. Parra, M. Valcuende, F. Gomez, *Splitting tensile strength and modulus of elasticity of self-compacting concrete,* Construction and Building Materials 25 (2011) pages 201– 207.

[37] ADEME. *L'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie*, France Avril 2012.

[38].Document Technique C&B, *Etat des lieux des connaissances actuelles sur le Fonctionnement Hygrothermique des matériaux biosourcés*, 2012.

[39] R. Bevan, T. Woolley, Hemp lime construction – A guide to building with hemp lime Composites, Building Research Establishment Press, 2008.

[40].http://www.ecoconstruisons.org/files/547/2008.12.conf_MAT/8.Chanvre.LGoudet.pdf

[41] Van de Weyenberg I., Chi Truong T., Vangrimde B., Verpoest I., *Improving the properties of UD flax fibre reinforced composites by applying alkaline fibre treatment*. Composites Part A, 2005.

[42] Joshi S.V., Drzal L.T., Mohanty A.K., Arora S., *Are natural fibers composites environmentally superior to glass fiber reinforced composites*. Composites Part A, 2004, 5; 371-376.

[43] Struik PC, Amaducci S, Bullard MJ, Stutterheim NC, Venturi G, Cromack HTH. 2000. *Agronomy of fibre hemp (Cannabis sativa L.) in Europe*. Industrial Crops and Products 11: 107-118.

[44] *http://www.chanvre.oxatis.com/PBCPPlayer.asp?ID=151416*

[45] David Sedan, *Etude des interactions physico-chimiques aux interfaces fibres de chanvre/ciment. Influence sur les propriétés mécaniques du composite*, Thèse de Doctorat Université De Limoges, Le 8 novembre 2007.

[46] M.R. Vignon, C. Garcia-Jaldon et D. Dupeyre, *Steam explosion of woody hemp chènevotte, International,* Journal of Biology Macromolecular, Vol. 17, 1995, pp. 395-404.s.

[47] *http://www.construction-chanvre.asso.fr*

[48] Règles Professionnelles Construction Chanvre. *Règles professionnelles d'exécution des ouvrages en béton de chanvre 2008*.

[49] Arandigoyen M, Perez Bernal JL, Bello Lopez MA, Alvarez JI. *Lime-pastes with different kneading water: pore structure and capillary porosity*. Appl Surf Sci 2005; 252:1449–59

[50] B.A. Silva, .P. Ferreira Pinto, Augusto Gomes, *Influence of natural hydraulic lime content on the properties of aerial lime-based mortars*, Construction and Building Materials 72 (2014) 208–218

[51] A. Arizzi , G. Cultrone. *Aerial lime-based mortars blended with a pozzolanic additive and different admixtures: A mineralogical, textural and physical-mechanical study*. Construction and Building Materials, 31 (2012) 135–143.

[52] J. Lanas, J.I. Alvarez, *Masonry repair lime-based mortars: Factors affecting the mechanical behavior,* Cement and Concrete Research 33 (2003) 1867–1876.

[53] Rota Rossi-Doria P. *Mortars for restoration: basic requirements and quality control*. Materials and Structure 1986;19(6):445–8.

[54] F. Pacheco-Torgal , J. Faria , S. Jalali, *Some considerations about the use of lime–cement mortars for building conservation purposes in Portugal: A reprehensible option or a lesser evil?,* Construction and Building Materials 30 (2012) 488–494.

[55] la chaux, *Techniques de L'ingénieur,* 01/12/2004.

[56] Gilles MARTINET, Philippe SOUCHU, la chaux définitions et histoire, *Techniques de L'ingénieur*, 12/09/2014.

[57] Cerezo V, *Propriété mécanique thermiques et acoustiques d'un matériau à base de particules végétales : Approche expérimentale et modélisation théorique*. Thèse de doctorat. Ecole Nationale des Travaux Publics de l'Etat, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon. 2005.

[58] Garcia Jaldon C., *Caractérisation morphologie et chimique du chanvre (cannabis sativa), prétraitement à la vapeur et valorisation*, Thèse de doctorat, Université Joseph Fourier, Grenoble, France 1995.

[59] Yacine Ait Ouméziane, *Evaluation des performances hygrothermiques d'une paroi par simulation numérique : application aux parois en béton de chanvre*, Thèse de doctorat, Univeristé Renne 2013.

[60] I. Couedel, *Le béton de chanvre comme matériau de construction, première approche mécanique du béton de chanvre*, Rapport de DEA, ENTPE, 1998.

[61] Evrard A., *Transient hygrothermal behaviour of Lime-Hemp Materials*, Thèse de doctorat, Univeristé Catholique de Leuven, Belgique 2008.

[62] *http://www.terrevivante.org/600-construire-en-chanvre*

[63] S. Elfordy, F. Lucas, F. Tancret, Y. Scudeller et L. Goudet. *Mechanical and thermal properties of lime and hemp concrete (hempcrete) manufactured by a projection process.* Construction and Building Materials, vol. 22, p. 2116–2123, 2008.

[64] *http://www.batirama.com/article/106-beton-de-chanvre-pour-le-neuf-et-la-renovation*

[65] *http:///www.grainecannabis20minutes-blogs.fr /archive /2010 /06/28/un-bureau-d-etude-se-specialise-dans-le-beton-de-chanvre*

[66] F. Collet. *Caractérisation hydrique et thermique de matériaux de génie civil à faibles impacts environnementaux*. Thèse de doctorat, INSA Rennes, 2004.

[67] Driss SAMRI, *Analyse physique et caractérisation hygrothermique des matériaux de construction : approche expérimentale et modélisation numérique*, Thèse de doctorat de l'ENTPE octobre 2008.

[68].Bruijn P. B, Jeppsson K.H, Sandin K, Nilsson C. *Mechanical properties of lime-hemp concrete containing shives and fibres*. Biosystems engineering, vol.103, 474.

[69] Camille Magniont, Gilles Escadeillas, Claire Oms-Multon,Marie Coutand, *Valorisation de granulats végétaux pour la formulation d'écomatériaux de construction*. Université de Toulouse; UPS, INSA; LMDC (Laboratoire Matériaux et Durabilité des Constructions); 2012.

[70] Faure, R.-M. et J.-F. Thimus (2004). *Contribution of On-Line Tools on Internet for the Teaching of Slopes and Tunnels Stability*. Engineering Geology for Infrastructure Planning in Europe: 59-68.

[71] Loïc Thomas Guy Archambault. *Sécurité incendie Collection Mémentos acier* .Nouvelle édition 2005.

[72] Guoqiang Li Peijun Wang, *Advanced Analysis and Design for Fire Safety of Steel Structures*, Zhejiang University Press, Hangzhou and Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2013.

[73] I. Hager, *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 Cracovie, 2004.

[74] C. Mindeguia. *Contribution expérimentale à la compréhension des risques d'instabilité thermique des bétons*, Thèse de Doctorat, Génie Civil, Université de Pau et des Pays de l'Adour, 2009.

[75] Hanaa Fares, Albert Noumowe, Sébastien Remond, *Self-consolidating concrete subjected to high temperature Mechanical and physicochemical properties*, Cement and Concrete Research 39 (2009) 1230–1238.

[76] P. Pliya. *Contribution des fibres de polypropylène et métalliques à l'amélioration du comportement du béton soumis à une température élevée*, Thèse de Doctorat, Génie civil, Université de Cergy-Pontoise, 2010.

[77] A. Noumowe; *Mechanical properties and microstructure of high strength concrete containing polypropylene fibres exposed to temperatures up to 200° C*, Cement and Concrete Research 35 (2005) 2192 – 2198.

[78] Z. Xing. *Influence de la nature minéralogique des granulats sur leur comportement et celui du béton à haute température*, Thèse de Doctorat, Génie Civil, Université de Cergy-Pontoise, 2011.

[79] R. Haniche. *Contribution à l'étude des bétons portés en température / Évolution des propriétés de transfert : Étude de l'éclatement*, Thèse de doctorat, Génie Civil, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, 2011.

[80] M. Kanema. *Influence des paramètres de formulation sur le comportement à haute température des bétons*, Thèse de Doctorat, Génie civil, Université de Cergy-Pontoise, 2007.

[81] O. Arioz *Effects of elevated temperatures on properties of concrete*, Fire Safety Journal 42 (2007) 516–522.

[82] Gai-Fei Peng, Wen-Wu Yang, Jie Zhao, Ye-Feng Liu, Song-Hua Bian , Li-Hong Zhao *Explosive spalling and residual mechanical properties of fiber-toughened high-performance concrete subjected to high temperatures*, Cement and Concrete Research 36 (2006) 723–727.

[83] B. Toumi, *Etude de l'influence des hautes températures sur le comportement du béton*, Thèse de doctorat, Génie Civil, Université Mentouri de Constantine 2010.

[84] Bing Chen, Chunling Li, Longzhu Chen, *Experimental study of mechanical properties of normal-strength concrete exposed to high temperatures at an early age*, Fire Safety Journal 44 (2009) 997–100277.

[85] Y.N. Chan, G.F. Peng, M. Anson, *Residual strength and pore structure of high strength concrete and normal strength concrete after exposure to high temperatures*, Cement and Concrete Composite. 21 (1999) 23–27.

[86] A. Noumowé. *Effet des hautes températures (20-600C) sur le béton. Cas particulier du béton à hautes performances*, Thèse de Doctorat, Génie civil, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, 1995.

[87] Arupfire. *Fire resistance of concrete enclosures - Work Package 1: data collection - Work Package 2: spalling categories*, London, 2005.

[88] L.T. Phan, J.R. Lawson, and F.L. Davis. *Effects of elevated temperature exposure on heating characteristics, spalling, and residual properties of high performance concrete*. Matériaux et constructions, 34 :83–91, mars 2001.

[89] P. Kalifa, F.-D. Menneteau et D. Quenard. *Spalling and pore pressure in HPC at high temperatures,* Cement and Concrete Research, vol. 30, n°12, p. 1915-1927, 2000.

[90] G. R. Consolazio, M. C. Mcvay et J. W. Rish. *Measurement and prediction of pore pressure in cement mortar subjected to elevated temperature, International Workshop of Fire Performance of High Strength Concrete*, Gaithersburg, Maryland, p. 125-148, 1997.

[91] K. D. Hertz. *Limits of spalling of fire-exposed concrete*, Fire Safety Journal, vol. 38, n°2, p 103-116, 2003.

[92] Pierre Kalifa, Gregoire Chene, Christophe Galle, *High-temperature behaviour of HPC with polypropylene fibres From spalling to microstructure*, Cement and Concrete Research 31 1487–1499, 2001.

[93] 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 36, p.1672–1678, 2006.

[94] Liu X, Ye G, De Schutter G, Yuan Y, Taerwe L. *On the mechanism of polypropylene fibres in preventing fire spalling in self-compacting and high performance cement paste*. Cement and concrete research 2008;38:487–99.

[95] M. A. Helal, Kh. M. Heiza, *Effect of Fire and High Temperature on the Properties of Self Compacted Concrete* - The 5th International Conference on FRP Composites in Civil Engineering September 27-29, 2010, Beijing, China.

[96] Wasim Khaliq, Venkatesh Kodur, *Thermal and mechanical properties of fiber reinforced high performance self-consolidating concrete at elevated temperatures*, Cement and Concrete Research 41 (2011) 1112–1122.

[97] S. Bakhtiyaria, A. Allahverdib, M. Rais-Ghasemic, B.A. Zarrabid, T. Parhizkarc, *Self-compacting concrete containing different powders at elevated temperatures– Mechanical properties and changes in the phase composition of the paste*, Thermochimica Acta 514 (2011) 74–81.

[98] K.K. Sideris, P. Manita, *Residual mechanical characteristics and spalling resistance of fiber reinforced self-compacting concretes exposed to elevated temperatures*, Construction and Building Materials 41 (2013) 296–302.

[99] NF EN 197-1, *Composition, spécifications et critères de conformité des ciments courants*, Février 2001.

[100] XP P 18-545, *Éléments de définition, conformité et codification*, Février 2004

[101] NF EN 934-2, Adjuvants pour béton : *Définitions, exigences, conformité, marquage et étiquetage*, Septembre 2002.

[102] Dreux G, Festa J, *nouveau guide du béton et de ses constituants*, Edition Eyrolles, Paris 1995.

[103] NF P 18-404, *Confection et conservation des éprouvettes*, Essais d'étude, de convenance et de contrôle.

[104] ASTM C29-09 *Standard Test Method for Bulk Density (Unit Weight) and Voids in Aggregate American society for testing and material*.

[105] AFGC, *Recommandations pour l'emploi des bétons autoplaçants* Association française de génie civil, page 128 (2008).

[106] Domone, P.L, *self-compacting concrete: An analysis of 11 years of case studies. Cement and concrete composites*, 2006. 28 (2): pages 197-208

[107] NF EN 12350-2, *Essai pour béton frais, Partie 2 : Essai d'affaissement*, Décembre 1999.

[108] NF EN 12350-7, *Essais pour béton frais, Partie 7 : Teneur en air - Méthode de la compressibilité*, Mars 2001.

[109] NF EN 206-1, *Béton, Partie 1 : Spécification, performances, production et conformité*, Avril 2004.

[110] NF EN 12390-5, *Essai pour béton durci, Partie 5 : Résistance à la flexion sur éprouvettes*, Octobre 2001.

[111] BS 1881-119:2011, *Testing concrete. Method for determination of compressive strength using portions of beams broken in flexure (equivalent cube method).*

[112] ASTM C 116-90, *Standard test method for compressive strength of concrete using portions of beam broken in flexure, in American Society for Testing and Materials, 1990*.

[113] AFPC AFREM, *Compte-rendu des journées techniques de l'AFPC-AFREM, Groupe de travail Durabilité des bétons, Méthodes Recommandées Pour la Mesure Des Grandeurs Associées À la Durabilité* : 11 Et 12 Décembre 1997, Toulouse.

[114] A.A. Ramezanianpour , M. Esmaeili, S.A. Ghahari , M.H. Najafi, *Laboratory study on the effect of polypropylene fiber on durability, and physical and mechanical characteristic of concrete for application in sleepers*, Construction and Building Materials 44 (2013) 411–418.

[115] Cazacliu B, Loukili A, Abdi B, Le Roy R. *Malaxage d'un béton fibré à ultra hautes performances*. Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées, 2006, n° 261-262, pp 107-120.

[116] Marie David, *Optimisation de la dispersion des fibres pendant le cycle de malaxage des bétons industriels*, Thèse de Doctorat, Université Paris-est, juin 2014.

[117] A. Bentur, S. Diamond, S. Mindess, *The microstructure of the steel fibre-cement interface*, Journal Of Materials Science 20 (1985) 3610-3620.

[118] T.A. Söylev T. Özturan, *Durability, physical and mechanical properties of fiber-reinforced concretes at low-volume fraction*, Construction and Building Materials 73 (2014) 67–75.

[119] A. Izaguirre, J. Lanas, J.I. Alvarez, *Effect of a polypropylene fibre on the behaviour of aerial lime-based mortars*, Construction and Building Materials 25 (2011) 992–1000.

[120] RILEM Technical Committee Final report of RILEM TC 205-DSC: *durability of self-compacting concrete*. Materials and Structures (2008) 41:225–233.

[121] R. N. SWAMY, *Fibre reinforcement of cement and concrete*, Department of Civil and Structural Engineering, University of Sheffield, England.

[122] Jean-Marie Reynouard, Gilles Pijaudier-Cabot, *Comportement mécanique du béton*, Edition Herme Science, Paris 2005.

[123] Arnaud Evrard; *Bétons de chaux et de chanvre, Phénomènes de transferts de chaleur et de masse et Comportement sous des sollicitations dynamiques*, Juin 2005.

[124] Whitaker, S. *Simultaneous Heat, Mass and Momentum Transfer in Porous Media, a Theory of Drying*. Advances in Heat Transfer, 1977, vol.13, pp.119-203.

[125] Chin-Huai Young, *Practical prediction model for shrinkage of steel fibre reinforced concrete*, Materials and Structures/ Matériaux et Constructions, 1991, 24, 191-201.

[126] Valeria Corinaldesi, Giacomo Moriconi, *Characterization of self-compacting concretes prepared with different fibers and mineral additions*, Cement and Concrete Composites 33 (2011) 596–601.

[127] A. Izaguirre, J. Lanas, J.I. Álvarez, *Characterization of aerial lime-based mortars modified by the addition of two different water-retaining agents*, Cement and Concrete Composites 33 (2011) 309–318.

[128] A. Sivakumar, Manu Santhanam, *A quantitative study on the plastic shrinkage cracking in high strength hybrid fibre reinforced concrete,* Cement and Concrete Composites 29 (2007) 575–581.

[129] Berke NS, Dallaire MP. *The effect of low addition rates of polypropylene fibres on plastic shrinkage cracking and mechanical properties of concrete*. ACI SP- 142 1994; 59:37–66.

[130] Bayasi Z, McIntyre M. *Application of fibrillated polypropylene fibres for restraint of plastic shrinkage cracking in silica fume concrete*. ACI Mater J 2002;99(4):337–44.

[131] J. Lanas, R. Sirera, J.I. Alvarez, *Compositional changes in lime-based mortars exposed to different environments*, Thermochimica Acta 429 (2005) 219–226.

[132] MJ. Dejong and FJ. Ulm. *The nanogranular behavior of c-s-h at elevated temperatures (up to 700C).* Cement and Concrete Research, Vol. 37, N°1:1-12, 2007.

[133] Yining Ding, Cecília Azevedo , J.B. Aguiar, Said Jalali. *Study on residual behaviour and flexural toughness of fibre cocktail reinforced self-compacting high performance concrete after exposure to high temperature* Construction and Building Materials 26 (2012) 21–31.

[134] Wei Li, Zhen-Hai Guo, *Experimental research on the strength and deformation properties of concrete exposed to high temperature*, Journal of Building Structures (China) 14 (1) (1993) 8–16.

[135] C. Gallé, J. Sercombe, *Permeability and pore structure evolution of silico calcareous and hematite high-strength concretes submitted to high temperatures*, Materials and Structures 34 (2001) 619–628.