

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE MENTOURI CONSTANTINE
FACULTE DES SCIENCES DE L'INGENIEUR
DEPARTEMENT DE GENIE CIVIL

Mémoire
Présenté pour obtenir le diplôme de
magister
en Génie Civil

Option : Mécanique des Structures

TENUE AU FEU DES BETONS AUTOPLACANTS

Présentée par : BOUKNI BARIZA
Ingénieur d'état en Génie Civil

Directeur de thèse : Prof. HOUARI Hacène

Composition de Jury :

Présidente :	Prof. Mimoune Fatima Zohra	U.M.C
Rapporteur :	Prof. Houari Hacène	U.M.C
Examineurs :	Prof. Mimoune Mostafa	U.M.C
	Dr Tekkouk Abdelhadi	U.M.C

Décembre 2007

DEDICACE

Je dédié ce travaille tout particulièrement à mes parents, sœur et frères.

Aussi à tous mes enseignants de graduation et post graduation que j'avais l'honneur d'être parmi leurs étudiants.

A tous les amis, collègues, et tous les personnes qui m'ont aidés à réaliser ce travaille.

REMERCIEMENT :

Ce travail a été mené au sein du laboratoire Matériaux et Durabilité des Constructions de l'institut de génie civil, Faculté des sciences de l'ingénieur, Université Mentouri, Constantine.

Je désire donc en tout premier lieu adresser toute ma reconnaissance à mon encadreur, M. HOUARI HACENE professeur à l'institut de génie civil, pour m'avoir fait confiance et m'avoir dirigée pendant cette année. Je tiens tout particulièrement à le remercier pour sa patience tout au long de ce travail, ainsi que pour la richesse de ses idées.

J'exprime ma plus sincère gratitude à Mme MIMOUNE FATIMA ZOHRA ; professeur à l'institut de génie civil, université Mentouri Constantine ; de m'avoir fait l'honneur de présider le Jury de soutenance.

Je suis grée au Professeur MIMOUNE MOSTAFA, d'avoir accepté d'être membre de jury.

Je remercie vivement le Docteur TEKKOUK ABD EL HADI, d'avoir accepté de juger ce travail.

Je remercie également BENSEBTI SALAHEDDINE et CHABANE LAMINE pour leur aide précieuse et leurs conseils.

Mais très particulièrement et de toutes mes forces, je voudrais remercier mes parents, mes frères et soeur, de m'avoir encouragée tout au long de cette période.

En fin, une grande pensée pour remercier du fond du cœur, mes amis GHOFRANE, RADIA, SOUMIA, WIDED, NARIMA ET NADIA, pour leurs soutiens et leurs encouragements. Qu'elles trouvent ici l'expression de mon amitié et de ma gratitude.

Résumé

Lors des incendies, les structures sont soumises à des températures élevées. Pour modéliser le comportement des structures en béton en cas d'incendie, on a besoin de données expérimentales sur le comportement au feu du matériau béton concernant les propriétés mécaniques, la fissuration, l'éclatement...

Dans la zone de 100 à 200°C, les propriétés mécaniques des bétons hydrauliques apparaissent principalement influencées par ce qui se passe dans la pâte de ciment

Le béton autoplaçant est un nouveau matériau qui a vu son développement dans les dernières années, il se caractérise par sa fluidité à l'état frais ; sa mise en place par le seul effet de poids propre et sans vibration. Il se différencie du béton vibré par un volume de pâte élevé et un faible volume de granulat

L'objectif de cette étude est de déterminer si l'excès et l'ajout des additions qui caractérise le béton autoplaçant donne une différence entre le comportement de béton vibré et le BAP à haute température et qu'elle est l'influence de fibres métalliques sur ce comportement

L'étude est menée sur six bétons, cinq bétons autoplaçant avec une formulation différente contenant un volume identique de granulat et présentant un rapport ciment/liant variable qui prend les valeurs de 0.67 pour trois bétons et 0.83 pour les deux autres. deux BAP de la première formulation contient de fibres métalliques pour des pourcentage de 0,5 et 1% de volume total, un BAP de la deuxième contient 0,5% de fibres. Le dernier béton est un béton vibré. Les six bétons sont soumis à des conditions d'essais identiques, par des cycles de chauffage-refroidissement avec deux taux de chauffage.

Les pertes de poids, la résistance en compression, la résistance en traction par flexion avant et après le chauffage sont analysées. Ainsi que les variations dimensionnelles initiales et résiduelles.

Il en ressort de cette étude que les bétons autoplaçant présentent des comportements différents à ceux des bétons vibrés. A haute température, on constate une diminution de résistance pour le BAP et BV, la résistance de BAP diminue moins que le BV

L'introduction des fibres métalliques mène à l'amélioration des propriétés mécaniques à haute température.

L'augmentation de dosage de fillers a tendance à diminuer le retrait et l'introduction des fibres stabilise le comportement au retrait des BAP.

ملخص

أثناء الحرائق الهياكل تتعرض لدرجة عالية من الحرارة من أجل نمذجة سلوك الهياكل المصنوعة من الخرسانة أثناء الحريق نحتاج إلى معطيات تجريبية على سلوك مادة الخرسانة في درجات عالية من الحرارة تخص خصائص ميكانيكية تشققات تفتت.... الخ ما بين 100 و 200 درجة الخصائص الميكانيكية للخرسانة تبدو متأثرة أكثر بما يحصل في عجين الأسمنت . الخرسانة ذاتية التوضع تعتبر مادة بناء جديدة شهدت تطور في السنوات الأخيرة تتميز هذه المادة بسيولتها في الحالة الرطبة تحت تأثير الوزن الذاتي فقط دون استعمال الاهتزاز تموضعها هذه المادة تختلف على الخرسانة العادية باحتوائها على حجم كبير من العجينة الإسمنتية وحجم صغير للحبيبات (الرمل والحصى)

الهدف من هذه الدراسة هو تحديد إذا كان الإفراط في إضافة الزوائد الذي يميز الخرسانة ذاتية التوضع يشكل فرقا ما بين سلوك الخرسانة العادية والخرسانة ذاتية التوضع عند تعرضها لدرجة مرتفعة من الحرارة وما هو تأثير الألياف المعدنية على هذا السلوك

الدراسة أقيمت على ست خرساوات خمس منها هي خرسانة ذاتية التوضع بتركيبات مختلفة تحتوي حجما متساويا من الحبيبات وتعرض بنسبة الاسمنت على العجينة يساوي 0.67 لثلاث خرساوات و 0.83 للأخيرتين الاثنتين من التركيبة الأولى تحتوي على ألياف معدنية بنسبة 0.5% و 1% ومن الحجم الكلي للخرسانة وخرسانة من التركيبة الثانية تحتوي على 0.5 من الألياف الخرسانة السادسة هي خرسانة عادية .

الخراسانيات الست تعرضت لنفس شروط التجربة لدورة تسخين وتبريد مع مستويين مختلفين من درجة الحرارة . فقدان الوزن -المقاومة للضغط -المقاومة للمد قبل وبعد التسخين عرضت نتائجه وحلت كذلك التغيير في الحجم

خرجنا من هذه الدراسة بأن الخرسانة ذاتية التوضع قدمت سلوكا مختلفا عن الخرسانة العادية . وأن إضافة الألياف المعدنية يؤدي إلى تحسين الخصائص الميكانيكية للخرسانة ذاتية التوضع عند تعرضها لارتفاع في درجة الحرارة .

زيادة الزوائد تؤدي إلى نقصان انكماش الخرسانة. إضافة الألياف تؤدي إلى استقرار انكماش الخرسانة.

ABSTRAT:

At the time of the fire, the structures are subjected has high temperatures to model the behaviour of the concrete structures in the event of fire, one needs experimental data on the behaviour of the material concrete at high temperature concerning the mechanical properties, cracking, the bursting...

In the zone of 100 with 200°C, the mechanical properties of the hydraulic concretes appear mainly influenced by what occurs in the cement paste

The self compacting concrete is a new material which saw its development in the last years, it is characterized by its fluidity in a fresh state; its installation by the only effect of actual weight and without vibration. It is different from the concrete vibrated by a high volume of paste and a low volume of aggregate

The objective of this study is to determine if the excess and the addition of the additions which characterizes the self compacting concrete give a difference between the vibrated concrete behaviour and the SCC at high temperature and which it influences it of metal fibres on this behaviour

The study is carried out on six concretes, four concretes self compacting with two formulations different containing an identical volume from aggregate and presenting a variable report/ratio cement/paste which takes the values of 0.67 per two concretes and 0.83 for the two others

A SCC of each formulation contains metal fibres. The last concrete is a vibrated concrete.

the six concretes are subjected to conditions of identical tests, by cycles of heating-cooling with two rate of heating

The dimensionally variations, the losses of weight, resistance in compression, resistance in traction by inflection before and after the heating are analyzed

It comes out from it from this study that the self compacting concretes present behaviour different to those of the vibrated concretes. At high temperature, a reduction in resistance for the SCC and VC, the resistance of SCC decrease less than the VC. The introduction of fibres leads to the improvement of the mechanical properties at high temperature.

Liste des figures:

Figure 1.1: Mise en place aisée du béton SCC par un seul ouvrier : au moyen d'une benne dans le cas d'une dalle ou d'une benne munie d'un tube dans le cas d'un mur..... 22

Figure 1.2 : Domaines de classification des bétons étendus au cas des BAP [BETHMONT 05]..... 22

Figure 1.3 : Notion d'excès de pâte : la pâte remplit la porosité (1) et écarte les granulats (2). 24

Figure 1.4 : volume de pâte relatif au BAP est différent de BV..... 26

Figure 1.5: Influence de la finesse d'un filler sur le comportement rhéologique d'un béton [Billberg 01]..... 27

Figure 1.6 : Action des superplastifiants - Défloculation des grains de ciment. 27

Figure 1.7 : Interaction entre l'eau et les polysaccharides [Hasni 99] 28

Figure 1.8 : Optimisation du dosage agent de viscosité – superplastifiant, d'après [Tangtermsirikuls 91] 28

Figure 1.9 : Phénomène de blocage des granulats au droit d'un obstacle [Sedran 95]..... 29

Figure 1.10 : essai d'étalement 30

Figure 1.11 : Essai de la boîte en L (L-box test)..... 31

Figure 1.12 : Essai de stabilité au tamis 32

Figure 1.13 : Essai de ressuage à l'aéromètre..... 33

Figure 1.14 : Evolution de la résistance mécanique d'un BAP (SCC) et d'un BV (REF) correspondant [Gibbs 99] 34

Figure 1.15 : Comparaison des modules élastiques théoriques de BAP et de bétons vibrés avec leurs valeurs expérimentales [Pons 2003] 35

Figure 1.16 : Evaluation du module du béton en fonction de sa résistance, d'après le modèle réglementaire et un modèle d'homogénéisation [De Larrard 92]..... 35

Figure 1.17 : Retraits des BAP B1 (E/C=0,50), BAP J(E/C=0,43) et BO0 (E/C=0,45) [Turcry 04]..... 36

Figure 1.18 : Profondeur de carbonatation des BAP (SCC) et des bétons vibrés de même rapport E/C [Hasni 99] 37

Figure 1.19 : Perte de masse de deux BAP et d'un béton vibré pendant un test d'écaillage (NF P 18-420) D'après Rougeau 99 [Assié 04]..... 38

Figure 1.20 : les propriétés résiduelles des BAP [Person 03]. 40

Figure 1.21 : les propriétés résiduelles des BAP et de BV à 20°C..... 40

Figure 2.1 : la résistance de compression à chaud [Person 04]. 44

Figure 2.2 : courbes effort déformation [Jumpanen 91]..... 46

Figure 2.3 : courbe contrainte déformation [Jumpanen 91] 46

Figure 2.4 : Les propriétés relatives de béton avant/après l'élévation de température excepté la propriété résiduelle avec la poudre de chaux à 800°C [Persson 03]..... 47

Figure 2.5 : variation de la résistance avec la température. [Metin 06]. 48

Figure 2.6 : Courbes de la variation de la résistance en compression selon les textes codificatifs DTU et EUROCODE 2 49

Figure 2.7 : Evolution de la résistance à la traction en fonction de la température [Pimi-1999] 50

Figure 2.8 : résistance en traction d'un BO en fonction de T [Menou 04] 50

Figure 2.9: Variations de la masse volumique de différents types de bétons en fonction de la température. [Schneider 88]..... 51

Figure 2.10: Densité apparente des bétons en fonction du traitement thermique (Kalifa 98).. 51

Figure 2.11: Perte de masse durant l'échauffement et vitesse de perte de masse en fonction de la température [Khoury 99] 52

Figure 2.12: Variation de poids en fonction de la température	52
Figure 2.13: perte en masse des éprouvettes par rapport à l'état initial, en fonction de la température de conditionnement	53
Figure 2.14 : Evolution de la conductivité thermique mesurée sur différents types de bétons en fonction de la température (Collet 77)	54
Figure 2.15 : Variation de la chaleur spécifique d'une pâte de ciment (Harmathy 70)	54
Figure 2.16 : Expansion thermique de pâte de ciment [Menou 04].....	56
Figure 2.17: Expansion thermique de granulats	56
Figure 2.18 : Influence du chargement mécanique sur la déformation (Weigler, Fisher 73)...	57
Figure 2.19: dilatation thermique de ciment, d'agrégat et de béton (Person 03)	59
Figure 2.20: Porosité totale à l'eau en fonction de la température de conditionnement	60
Figure 21 : Distributions des pores d'un béton ordinaire obtenues à différentes températures [Noumowé 95].	61
Figure 2.22 : fissure dans le béton à différente température	62
Figure 2.23 : l'ajout de fibre de polypropylène. a- avant fusion, b- après fusion [Noumowe 03]	63
Figure 2.24 : Gradient thermique dans une éprouvette cylindrique [Person 03].....	64
Figure 2.25 : variation de la résistance à la compression avec la température [Metin 05]	64
Figure 2.26: Perte de masse de deux types de granulats (calcaire et siliceux) d'après Harmathy et Allen 73 [Menou 04].	65
Figure 2.27: Résistance à la compression par rapport à la résistance initiale [Person 03].....	65
Figure 2.28 : Perte de masse des bétons de différents types granulats en fonction de la température D'après Schneider [Menou 04]	66
Figure 2.29 : Vue de blocs en béton haute résistance exposés pendant deux heures à un feu d'hydrocarbures : a) bloc sans fibres de polypropylène; b) bloc avec fibres de polypropylène [Kodur 99]	68
Figure 2.30 : l'évolution de la résistance à la flexion avec la température des BO (M) et des BO avec 1% de fibre (MF) [Lau 06]	69
Figure 3.1 : résultat d'essai d'étalement.....	83
Figure 3.2 : l'aéromètre utilisé.....	84
Figure 3.3 : schématisation d'essai de traction par flexion.	86
Figure 3.4 : la presse utilisée.	88
Figure 4.1: courbe de chauffage (vitesse de chauffage 1°C/mn).....	100
Figure 4.2 : influence de filler sur la résistance initiale et résiduelle à la compression.....	103
Figure 4.3 : influence des fibres sur la résistance initiale et résiduelle en compression des bétons.....	104
Figure 4.4 : influence de l'association filler fibres sur la résistance initiale et résiduelle en compression.	104
Figure 4.5 : l'influence de la nature de béton sur la résistance initiale et résiduelle.	105
Figure 4.6 : résistance initiale et résiduelle à la traction par flexion	106
Figure 4.7 : résistance initiale et résiduelle à la traction par flexion des bétons étudiés.....	107
Figure 4.8 : influence de l'association filler fibre.....	107
Figure 4.9 : influence de la nature de béton sur la résistance à la traction.....	108
Figure 4.10 : variation de pourcentage de perte de masse en fonction de la température de palier	109
Figure 4.11: variation de pourcentage de perte de masse en fonction de la température de palier	109
Figure 4.12 : perte de masse sous l'influence de l'association filler fibre.	110
Figure 4.13 : perte de masse entre BAP et BV	110

Figure 5.1 : Comparaison des retraits de dessiccation d'un béton vibré et de cinq BAP [Hu 98]	117
.....	117
Figure 5.2 : Retrait de séchage de deux BAP et du béton vibré correspondant [Sonebi 99]	117
Figure 5.3 : Retrait de dessiccation des BAP (SCC) et des bétons traditionnels de même rapport E/C [Sakata 98]	118
.....	118
Figure 5.4:retrait de BAP1 selon trois mode de conservation.	121
Figure 5.5 : retrait de BAP2 d'après le mode de conservation.	122
Figure 5.6 : retrait de BAP1F1 d'après le mode de conservation	122
Figure 5.7 : retrait de BAP1F2 d'après le mode de conservation	123
Figure 5.8 : retrait de BV d'après le mode de conservation	123
Figure 5.9 : présentation de retrait de BAP	124
Figure 5.10 :influence des fibres sur le retrait des BAP	125
Figure 5.11 :évolution de retrait selon la nature des bétons.	126
Figure 5.12: retrait de BAP1 après chauffage à 120°C.	127
Figure 5.13 : retrait de BAP2 après chauffage à 120°C.	127
Figure 5.14 : retrait de BAP1F1 après chauffage à 120°C.	127
Figure 5.15 : retrait de BAP1F2 après chauffage à 120°C.	128
Figure 5.16 : retrait de BV après chauffage à 120°C.	128
Figure 5.17 : évolution de retrait des BAP après chauffage à 120°C	130
Figure 5.18 : évolution de retrait des BAP après chauffage à 120°C	131
Figure 5.19 : évolution de retrait des BAP après chauffage à 120°C	132
Figure 5.20 : retrait de BAP1 chauffé à 200°C.	133
Figure 5.21 :retrait de BAP2 chauffé à 200°C.	133
Figure 5.22 :retrait de BAP1F1 chauffé à 200°C	134
Figure 5.23 :retrait de BAP1F2 chauffé à 200°C.	134
Figure 5.24 :retrait de BV chauffé à 200°C.	135
Figure 5.25 : évolution de retrait des BAP chauffés à 200°C.	136
Figure 5.26 : évolution de retrait des BAP et BAPF chauffés à 200°C.	137
Figure 5.27 : évolution de retrait des BAP chauffés à 200°C.	139
Figure 5.28 : perte de masse de BAP1.	139
Figure 5.29 : perte de poids de BAP2.	140
Figure 5.33 : perte de poids de BAP1F.	140
Figure 5.31 : perte de masse de BV sous différents mode de conservation.	141
Figure 5.32 : perte de poids des BAP sous trois modes de conservation.	142
Figure 5.33 : perte de masse des BAP et BAPF.	142
Figure 5.34 : perte de masse de BAP et BV.	143
Figure 5.35 : perte de poids de BAP1 à 120°C.	144
Figure 5.36 : perte en masse de BAP2 chauffé à 120°C.	144
Figure 5.37 : perte en masse de BAP1F1 chauffé à 120°C.	145
Figure 5.38 :perte en masse de BV chauffé à 120°C.	145
Figure 5.39 : influence de filler sur les BAP chauffés à 120°C.	146
Figure 5.40 : perte de masse de BAP et de BAP1F1 chauffés à 120°C.	147
Figure 5.42 : perte de masse de BAP1 chauffé à 200°C.	148
Figure 5.43 : perte de masse de BAP2 chauffé à 200°C.	148
Figure 5.44 : perte en masse de BAP1F chauffé à 200°C	149
Figure 5.45 :perte de masse de BV chauffé à 200°C.	149
Figure 5.46 : influence de fillers sur les BAP chauffés à 200°C.	150
Figure 5.47 : influence des fibres sur les BAP chauffés à 200°C.	151
Figure 5.48 : influence de la nature des bétons chauffés à 200°C.	151

Liste des tableaux

Tableau 3.1 : les résultats de l'analyse granulométrique, module de finesse et le coefficient d'aplatissement.....	75
Tableau 3.2 : Caractéristiques physiques des granulats utilisés.	76
Tableau 3.3 : Caractéristiques physiques des granulats utilisés	76
Tableau 3.4: Caractéristiques mécaniques des granulats.	77
Tableau 3.5: Caractéristiques chimiques des granulats.....	77
Tableau 3.6 : composition chimique du clinker.....	78
Tableau 3.7 : Composition minéralogique du clinker	78
Tableau 3.8 : propriétés physiques du ciment	78
Tableau 3.9 : Résistances mécaniques du ciment (bars)	78
Tableau 3.10 : les résultats de l'analyse chimique effectuée sur cet eau	79
Tableau 3.11 : composition chimique du fillers calcaire.....	80
Tableau 3.12 : caractéristiques physiques des fillers	80
Tableau 3.13 : caractéristiques des fibres.....	81
Tableau 3.14 : les différents bétons et leur désignation	82
Tableau 3.14 : Composition en mètre cube des mélanges	82
Tableau 3.15 :les éprouvettes utilisés pour performances mécaniques.....	85
Tableau 3.16 : les résultats de l'étalement et d'affaissement.	89
Tableau 3.17 : l'air occlus des bétons utilisés.	90
Tableau 3.18 : les résultats du densité.....	90
Tableau 3.19 : résultats des résistances mécaniques.....	91
Tableau 4.1 : désignation des bétons.....	95
Tableau 4.2 : formulation et caractérisation des bétons	96
Tableau 4.3 : résistance en compression initiale et résiduelle des bétons étudiés	102
Tableau 4.4: résistance initiale et résiduelle en traction par flexion des bétons étudiés	105
Tableau 5.1 : les notations des bétons utilisés.	119
Tableau 5.2 :formulation et caractérisation des bétons utilisés.	119
Tableau 5.3 :retrait dû au choc thermique.	129
Tableau 5.4 : raccourcissement de BAP et BAP1F1 dû au chauffage	130
Tableau 5.6 : raccourcissement du BAP et BV dû au chauffage	132
Tableau 5.7 :retrait produit par un choc thermique.....	136
Tableau 5.8 :retrait dû au chauffage à 200°C.	137
Tableau 5.8 :retrait des BAP, BAPF et BV dû au chauffage à 200°C.....	138

Table des matières

INTRODUCTION GENERALE	17
CHAPITRE 1 : LES BETONS AUTOPLAÇANTS.....	21
1.1. INTRODUCTION :	21
1.1.1. Définition :	21
1.1.2. Utilisation :	22
1.2. MODES DE FORMULATIONS DES BAP.....	23
1.2.1. Les approches de formulation :	23
1.2.1.1 Méthodes basées sur l'optimisation des mortiers :	23
1.2.1.2. Méthodes basées sur l'optimisation du volume de pâte :	24
1.2.1.3. Méthodes basées sur l'optimisation du squelette granulaire :	24
1.2.1.4 Comparaisons des approches:	25
1.2.2. Particularités de la composition des BAP	25
1.2.2.1. Un volume de pâte élevé.....	26
1.2.2.2. Une quantité de fines ($\varnothing < 80 \mu\text{m}$) importante.....	26
1.2.2.3. L'emploi de superplastifiants.....	27
1.2.2.4. L'utilisation éventuelle d'un agent de viscosité (réteneur d'eau).....	27
1.2.2.5 Un faible volume de gravillon	29
1.3. CARACTERISATION DU BETON A L'ETAT FRAIS :	29
1.3.1. Mobilité en milieu non confiné	30
1.3.2. Mobilité en milieu confiné	31
1.3.3. Stabilité.....	31
a. Résistance à la ségrégation	32
b. Ressuage.....	32
1.4. PROPRIETES DU BETON DURCI.....	33
1.4.1. Résistance à la compression :	33
1.4.2. Résistance à la traction :	34
1.4.3. Module d'élasticité :	34
1.4.4. Le retrait	36
1.4.5 Fluage :	37
1.4.6 Durabilité :	37
1.4.5.1 Carbonatation :	37
1.4.5.2 Résistance de gel-dégel :	38
1.4.7. Influence des fibres :	38
1.4.8 influence de la température sur le comportement :	39
1.5 CONCLUSION :	40
CHAPITRE 2 : COMPORTEMENT DU BETON A HAUTE TEMPERATURE.....	43
2.1 INTRODUCTION :	43
2.2 PROPRIETES MECANIQUES :	43
2.2.1 Résistance à chaud:.....	43
2.2.1.1 Résistance en compression à chaud:.....	44
2.2.1.2 Résistance en traction:	45
2.2.1.3 Module d'élasticité:	45
2.2.1.4 comportement contrainte déformation:.....	45
2.2.2 Résistances résiduelles:	47
2.2.2.1 Effet de refroidissement:.....	47
2.2.2.2 Résistance à la compression:.....	48

2.2.2.3 Résistance en traction :	49
2.3 PROPRIETES PHYSIQUES :	50
2.3.1. Densité apparente.....	50
2.3.2. Perte de masse.....	52
2.4 PROPRIETES THERMIQUES:	53
2.4.1 Conductivité thermique:.....	53
2.4.2 Chaleur spécifique:.....	54
2.4.3 Diffusivité thermique:.....	55
2.4.4 Déformation thermique :.....	55
2.5 MICROSTRUCTURE:	57
2.5.1 Déshydratation de pâte de ciment:.....	57
2.5.2 Transformation des liaisons pâte granulat :	58
2.5.3 Porosité.....	59
2.5.4 Fissuration:.....	61
2.5.5 L'éclatement:.....	62
2.6 PARAMETRES INFLUENT LE COMPORTEMENT DE BETON:	63
2.6.1 La vitesse de chauffage et de refroidissement:.....	63
2.6.2 Nature de granulat:.....	64
2.6.2.1 granulats calcaires:.....	66
2.6.2.2 granulats siliceux:.....	66
2.6.3 Nature de ciment et des ajouts :	67
2.6.4 Fibres :.....	67
2.7 CONCLUSION :	69
CHAPITRE 3 : CARACTERISATION ET METHODOLOGIE D'ESSAIS.....	73
3.1. INTRODUCTION :	73
3.2. MATERIAUX DE BASE UTILISES :	74
3.2.1 Les granulats :	74
a- Analyse granulométrique :	74
b- Module de finesse :	74
c- Mesure de coefficient d'aplatissement	74
d- Détermination de la masse volumique absolue et apparente des granulats : ..	75
e- Mesure de la propreté de granulat :	76
f- Mesure de coefficient d'absorption	76
g- Caractéristiques mécaniques des granulats	77
h- Composition chimique de granulat :	77
3.2.2 Ciment:.....	77
3.2.3 Eau de gâchage :	78
3.2.4 Adjuvant (Super plastifiant).....	79
3.2.5 Les additions :	80
a- Filler :.....	80
b- Fibres:.....	81
3.3. PROGRAMME EXPERIMENTAL :	81
3.3.1 Formulation de béton :	82
3.3.2 Confection du mélanges :	83
3.3.2.1 Malaxage :	83
3.3.3 Caractérisations des mélanges :	83
a- l'étalement/l'affaissement :	83
b- Air occlus :	84
c- Densité :	84
3.3.4 Fabrication des éprouvettes :.....	85

a - Eprouvettes Cylindriques :	85
b. Eprouvettes prismatiques :	85
3.3.4.1 Remplissage :	86
3.3.4.2 Conservation :	87
3.2.3.6 Préparation des éprouvettes :	87
3.3.5 Caractérisation des mélanges à l'état durci :	87
a- Essai de compression:	87
b- Essai de traction par flexion:	87
3.4 RESULTATS DE CARACTERISATION :	88
3.4.1 L'étalement :	89
3.4.2 L'air occlus :	90
3.4.3 La densité :	90
3.3.4 Les résistances mécaniques :	90
3.5 CONCLUSION :	91
Chapitre 4 : TENUE AU FEU DES BETON AUTOPLACANT	94
4.1 INTRODUCTION :	94
4.2 RAPPEL SUR LES MATERIAUX :	94
4.2.1 caractéristiques des bétons testés :	95
4.3 METHODOLOGIE D'ESSAIS	96
4.3.1 Spécifications techniques du dispositif expérimental :	97
4.3.2 Techniques existantes :	97
4.3.3 Hypothèses concernant la réalisation de l'étude :	97
4.4 DESCRIPTION DE SYSTEME ET JUSTIFICATION DE LA DEMARCHE	
ADOPTEE :	98
4.4.1 Taille des éprouvettes :	98
4.4.2 Four :	98
4.4.3 vitesse en montée en température :	99
4.5 ESSAIS REALISES :	100
4.5.1 Essais mécaniques :	101
4.5.2 Mesure de la perte de masse :	101
4.6 RESULTATS ET DSCUSSIONS :	101
4.6.1. Résistance à la compression :	101
4.6.1.1. Influence des fillers :	102
a. Résistance en compression initiale:	102
b. Résistance résiduelle en compression:	102
4.6.1.2. Influence des fibres métalliques :	103
a. résistance en compression initiale:	103
b. résistance résiduelle en compression:	103
4.6.1.3 Influence de l'association filler-fibres :	104
4.6.1.4 Influence de la nature de béton :	104
4.6.2. Résistance résiduelle en traction par flexion:	105
4.6.2.1. Influence de filler :	105
4.6.2.2. Influence de fibre :	106
4.6.2.3 Influence de l'association filler-fibres :	107
4.6.2.4 Influence de la nature de béton :	107
4.6.3 Perte de masse:	108
4.6.3.1 Influence de filler :	108
4.6.3.2 Influence de fibre :	109
4.6.3.3 L'influence de l'association de Filler-fibres :	109
4.6.3.4 L'influence de la nature de béton :	110

4.7 CONCLUSION :	111
CHAPITRE 5 :ENDURANCE A LA CHALEUR DES BETONS AUTOPLACANTS	
Variations dimensionnelles et pondérales	113
5.1 INTRODUCTION :	113
5.2 RETRAIT DES BETON - Revue bibliographique :	113
5.2.1 Définition:	113
5.2.2 Les formes de retrait:	113
5.2.2.1 Le retrait thermique :	114
5.2.2.2 Le retrait endogène ou d'autodessiccation :	114
5.2.2.3 Le retrait de séchage ou de dessiccation	114
5.2.2.4 Le retrait de carbonatation	114
5.2.3 Les mécanismes à l'origine des retraits hydriques:	114
5.2.4 Paramètres influant	116
5.2.5 Le retrait pour les bétons autoplaçants	116
5.3 ETUDE EXPERIMENTALE	118
5.3.1 Composition des bétons testés	118
5.3.2 Moules et éprouvettes utilisées	120
5.3.3 Mode de mûrissement :	120
5.3.4 l'essai réalisé	120
5.4 PRESENTATION DE RESULTATS	121
5.4.1 Retrait	121
5.4.1.1 Retrait avant chauffage	121
a. Influence de mode de conservation	121
b. Influence de fillers	124
c- influence des fibres :	125
d- influence de la nature de béton	125
5.4.1.2 Retrait des bétons après choc « chauffage à120°c »	126
a. Influence de mode de conservation :	126
b. Influence de fillers:	129
c- influence des fibres :	130
d- influence de la nature des bétons :	131
5.4.1.3 Retrait des bétons après chauffage à 200°c:	133
a. Influence de mode de conservation	133
b. Influence de fillers	135
c- influence de fibres	136
d- influence de la nature des bétons	138
5.4.2 Perte en poids	139
5.4.2.1 Perte en poids du béton sans chauffage	139
a. Influence de mode de conservation :	139
b. Influence des fillers	141
c- influence de fibres	142
d- influence de la nature de béton	143
5.4.2.2 Perte en poids du béton chauffé à 120°c	143
a. Influence de mode de conservation :	143
b. Influence du fillers	146
c. Influence des fibres	146
d. Influence du la nature de béton	147
5.4.2.3 Perte en poids du béton à 200°c:	148
a. Influence de mode de conservation	148
b. Influence de dosage de fillers	149

c. Influence des fibres	150
d. Influence de la nature de béton :	151
5.5 COMMENTAIRES ET CONCLUSIONS	152
CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES	156
Références bibliographiques	159

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

Les bétons autoplaçants (BAP), développés depuis une vingtaine d'années, sont encore à l'heure actuelle qualifiés de « nouveaux bétons » car leur utilisation reste modeste bien qu'ils possèdent un fort potentiel de développement.

La spécificité des BAP par rapport aux bétons traditionnels réside dans le fait qu'ils sont extrêmement fluides et qu'ils ne nécessitent pas de vibration pour être mis en œuvre. Se compactant sous l'effet de leur propre poids, ils peuvent être coulés dans des zones très ferraillées ou dans des zones d'architecture complexe et difficilement accessibles.

La suppression de la phase de vibration présente également l'intérêt d'améliorer les conditions de travail sur site, ainsi que le confort acoustique au voisinage du chantier plus particulièrement en zone urbaine.

Cependant, malgré les aspects intéressants qu'ils proposent, en particulier à l'état frais, et leur utilisation en constante augmentation, les BAP ne disposent pas encore du recul nécessaire et suffisant pour être acceptés par tous les maîtres d'ouvrage et maîtres d'œuvre ce qui limite encore leur diffusion. Vu les différents incendies produits dans les tunnels : le 18 novembre 1996 dans le tunnel sous la Manche, le 24 mars 1999 dans le tunnel sous le Mont Blanc et enfin le 30 mai 1999 dans le tunnel de Tauern en Autriche où un accident entre un camion et une voiture a provoqué un incendie. En connaissant que les BAP sont des matériaux de construction privilégiés pour les tunnels à travers le monde, exige la maîtrise du comportement des BAP à haute température.

Ce mémoire s'inscrit dans cette logique a été mené pour répondre à plusieurs questions dont certaines concernent l'évolution des propriétés mécaniques du matériau béton sous conditions extrêmes.

- Du point de vue comportement au feu, et plus précisément de la résistance mécanique. Les BAP sont ils aussi performants que les BV de résistance mécanique identique ?
- Compte tenu du volume important de pâte présent dans ces bétons (lié aux quantités importantes de fines préconisées), comment évoluent les déformations différées libres (retrait) des BAP après un choc thermique
- Et quoi amène l'introduction des fibres métallique pour ces deux comportements ?

Notre étude a donc eu pour but de répondre à ces différentes questions posées par les maîtres d'ouvrage et les maîtres d'œuvre aux entreprises et aux fournisseurs de béton prêt à l'emploi.

La première partie comporte deux chapitres concernant l'état de connaissance. Le premier, a été de répertorier et de synthétiser les documents existants qui touchaient de près ou de loin aux BAP ainsi qu'à leurs propriétés mécaniques et physico-chimiques.

Le deuxième chapitre présente une synthèse des travaux réalisés sur l'évolution des propriétés physiques et mécaniques des bétons soumis à haute température. Les résultats présents dans la littérature sont variés. Cette partie a permis d'établir les bases de notre recherche en ciblant les points dépourvus de résultats et en essayant de donner des réponses claires aux questions de départ.

La deuxième partie, consacrée à l'étude expérimentale, est constituée de trois chapitres.

Dans le chapitre trois, nous exposons les matériaux testés, leurs compositions et les constituants utilisés, ainsi que la fabrication de ces matériaux et leur conservation. Et aussi tous les essais nécessaires pour caractériser ces matériaux. Les résultats de caractérisation des bétons à l'état frais et durci sont aussi exposés.

Le chapitre quatre est consacré à la présentation des essais réalisés, permettant de tester le comportement mécanique résiduel des bétons soumis à des élévations de température. Les résultats expérimentaux obtenus sont présentés et discutés dans ce chapitre. Nous présentons les résultats de la résistance à la compression, la résistance à la traction par flexion, ainsi que la perte de masse.

Les observations de l'évolution des propriétés mécaniques réalisées nous ont permis de constater que les résultats du comportement à haute température sont peu influencés par la présence de fillers dans le matériau, surtout dans la gamme de températures étudiée.

Le dernier chapitre, nous permettra de bien comprendre le comportement des bétons au feu en réalisant des essais de retrait et de perte en masse sur des bétons ayant subi un choc thermique. Les résultats nous aideront à quantifier l'eau « cause essentielle de perte de résistance dans le palier étudié des températures. Ainsi que la variation volumétrique qui nous permettra à savoir si la rétraction de pâte peut s'opposer à la dilatation de granulats.

Enfin nous terminerons notre travail par une conclusion qui englobe tous les résultats obtenus, des recommandations et perspectives .

PARTIE 1:

ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

Le but de cette étude bibliographique est de donner des informations de base et une description qualitative du matériau et le phénomène objet de la thèse. Dans le premier chapitre, on présente le matériau béton autoplaçant et ses différents ingrédients nécessaires à sa fabrication. Ces aspects seront aussi approfondis.

Ensuite, on donnera une description du comportement du béton à haute température, ceci nous permettra d'introduire les différents phénomènes qui sont entraînés lorsque le béton est soumis à des températures non usuelles.

CHAPITRE 1 :

LES BETONS AUTOPLAÇANTS

CHAPITRE 1 :

LES BETONS AUTOPLAÇANTS

1.1. INTRODUCTION :

Les bétons autoplaçants (BAP pour les éléments verticaux et BAN pour les éléments horizontaux, ou SCC, en anglais, pour self-compacting concrete) ont été utilisés pour la première fois au Japon vers la fin des années 1980 afin d'améliorer la rentabilité de la construction, d'assurer constamment une mise en place correcte avec un béton de qualité et de diminuer les nuisances sonores.

La spécificité des BAP par rapport aux bétons traditionnels réside dans le fait qu'ils sont extrêmement fluides et qu'ils ne nécessitent pas de vibration pour être mis en œuvre. Se compactant sous l'effet de leur propre poids, ils peuvent être coulés dans des zones très ferraillées ou dans des zones d'architecture complexe et difficilement accessibles.

La suppression de la phase de vibration présente également l'intérêt d'améliorer les conditions de travail sur site, ainsi que le confort acoustique au voisinage du chantier plus particulièrement en zone urbaine.

Pour cela, un premier pas consistait à rassembler un maximum de documents publiés sur ce sujet afin d'essayer d'apporter des premiers éléments de réponse à notre problème et d'orienter pertinemment notre recherche.

1.1.1. Définition :

Ces bétons sont des bétons spéciaux, très fluides, qui se mettent en place et se serrent sous le seul effet de la gravité, donc sans apport de vibration interne ou externe, même dans des coffrages très ferraillés. Ces bétons ne sont évidemment qualifiés d'autoplaçant que si le matériau durci final présente des propriétés homogènes (pas de ségrégation) et présente de très bonne performance à court et à long terme.

Le BAP et PV se différencient par les propriétés des bétons frais et le mode de mise en œuvre.

Les propriétés caractéristiques de BAP sont :

- fluidité et viscosité élevées, sans aucune tendance à la ségrégation.
- Des aérations du béton pendant son écoulement
- Excellente aptitude au béton homogène en présence de réservations d'incorporés et de ferrailage dense

Donc le fastidieux et dispendieux travail de vibration est ainsi supprimé



Figure 1.1: Mise en place aisée du béton SCC par un seul ouvrier : au moyen d'une benne dans le cas d'une dalle ou d'une benne munie d'un tube dans le cas d'un mur.

1.1.2. Utilisation :

Depuis son développement au Japon en 1988 comme une extension de la technologie de bétonnage sous l'eau, le nombre d'ouvrages réalisés avec le BAP ne cesse d'augmenter surtout au Japon où l'utilisation de ce produit est devenue populaire dans le domaine de construction.

Le BAP a vu aussi une grande utilisation dans le monde entier, en Asie, en Europe, et en Amérique dans plusieurs domaines de la construction.

Ces domaines comprennent le bâtiment, le génie civil, les tunnels, la préfabrication, et les travaux d'assainissement et de réhabilitation.

L'expérience acquise aux Pays-Bas a permis d'étendre la classification en fonction des différences existant entre les BAP et de déterminer différents domaines d'emploi, selon leurs propriétés, comme le montre la figure 1.2 :

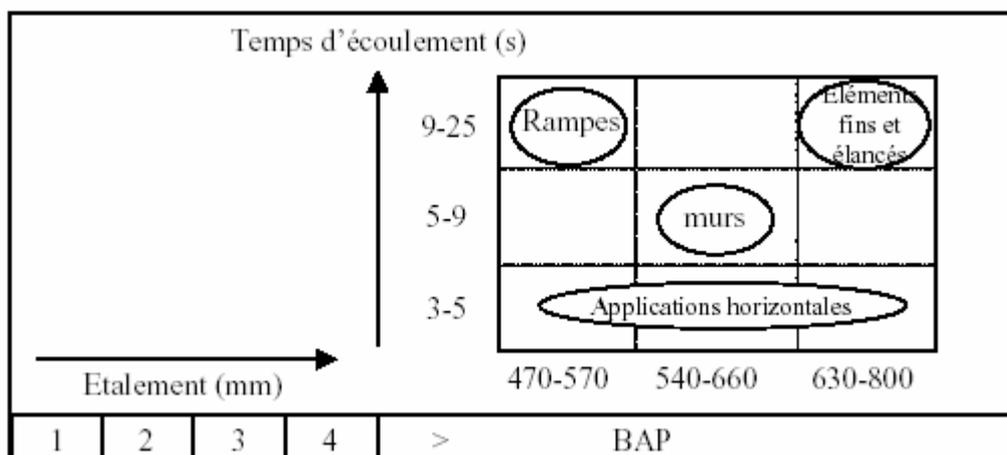


Figure 1.2 : Domaines de classification des bétons étendus au cas des BAP [BETHMONT 05].

Comparé au BV, les arguments en faveur du BAP sont les suivants :

- rendement amélioré et exécution plus rapide
- réduction des nuisances sonores durant l'exécution
- liberté accrue des formes de coffrage
- facilité de bétonnage d'éléments exigus
- qualité accrue des surfaces de béton
- réduction (suppression des travaux de ragréage)
- facilité de bétonnage d'éléments avec une armature dense ou importante
- remplissage de parties difficilement accessibles
- diminution de la pénibilité du travail et suppression de l'apparition du syndrome du vibreur

Outre l'amélioration de la productivité des entreprises, le BAP permet d'accroître la qualité et la durabilité des ouvrages en béton

1.2. MODES DE FORMULATIONS DES BAP

Par définition, un béton autoplaçant (BAP) est un béton très fluide, homogène et stable, qui se met en place par gravitation et sans vibration. Il ne doit pas subir de ségrégation et doit présenter des qualités comparables à celles d'un béton vibré classique. Le terme de béton autonivelant peut aussi être utilisé mais il concerne plutôt des applications horizontales (Dallage par exemple).

1.2.1. Les approches de formulation :

Plusieurs approches de formulation des BAP ont été élaborées ('Mix Design' du Colloque Pro 7 SCC RILEM 99) à travers le monde (approche japonaise, approche suédoise, approche du LCPC, etc.) pour répondre aux exigences d'ouvrabilité de ce type de béton.

1.2.1.1 Méthodes basées sur l'optimisation des mortiers :

[Okamura 00], le concepteur des BAP, propose de les formuler en composant en premier lieu le mortier du béton. Dans le mortier, la proportion de sable est posée arbitrairement. Il reste ensuite à trouver expérimentalement les dosages en eau et en superplastifiant, pour un liant donné (rapport massique ciment sur addition fixé), et suivant certains critères de rhéologie. La formule finale est obtenue en ajoutant au mortier un volume de gravillons limité, de manière sécuritaire, à la moitié de leur compacité.

A la suite d'une optimisation identique du mortier, [Ouchi 99] propose de doser les gravillons en cherchant expérimentalement leur volume limite menant à un blocage. Ce volume est évalué en comparant l'écoulement du mortier dans un entonnoir avec et sans gravillons.

La formulation d'un BAP par le biais de son mortier trouve sa justification dans quelques publications. [Billberg 01] et [Jacobs 99] montrent à cet effet que la rhéologie d'un béton se corrèle bien avec celle de son mortier.

1.2.1.2. Méthodes basées sur l'optimisation du volume de pâte :

Le béton est considéré ici comme un mélange biphasique, avec une phase solide, les granulats, et une phase liquide, la pâte. Dans le cas d'un BAP, la pâte joue un rôle prédominant. [Oh 99] introduisent la notion d'excès de pâte schématisée sur la figure 1.3. La formulation consiste à déterminer la quantité de pâte en excès optimale pour fluidifier le BAP et limiter les problèmes de blocage.

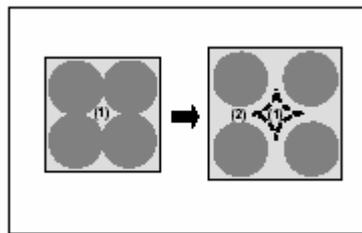


Figure 1.3 : Notion d'excès de pâte : la pâte remplit la porosité (1) et écarte les granulats (2).

[Oh 99] ont obtenu par l'expérience des équations reliant l'épaisseur de la pâte autour des granulats et les constantes du modèle de Bingham (seuil de cisaillement et viscosité) du béton, exprimées par rapport à celles de la pâte. Lors de la formulation, il faut d'abord optimiser et caractériser la rhéologie de la pâte, puis déterminer à l'aide de ces équations la proportion minimale de pâte nécessaire pour fluidifier le béton. Les auteurs ne proposent pas de méthode pour doser la pâte par rapport au blocage.

1.2.1.3. Méthodes basées sur l'optimisation du squelette granulaire :

La formulation des bétons peut passer par une optimisation de la porosité du système formé par les grains solides, du ciment aux gravillons [Baron 96]. Il est connu par exemple que la résistance à la compression augmente avec la compacité de la pâte. L'ouvrabilité est elle-aussi tributaire de l'arrangement du squelette granulaire.

Reprenons la figure 1.3, en considérant maintenant que la phase interstitielle est l'eau de gâchage, et non plus la pâte. Plus la quantité d'eau qui écarte les grains (2) est importante, plus la suspension est fluide. A quantité d'eau constante, si on minimise la porosité (1) de l'empilement de grains, on maximise en conséquence le volume d'eau disponible pour fluidifier le mélange. Cet exemple simple nous montre donc le lien entre compacité et rhéologie.

[Sedran 99] a développé un modèle décrivant mathématiquement un empilement, à partir des caractéristiques des grains qui le composent (forme, granulométrie). Le modèle permet le calcul de la compacité du béton et d'un indice représentatif de son degré de serrage. A l'aide de ces variables sont modélisées la viscosité et le seuil de cisaillement du béton.

Le modèle est implanté dans un logiciel (Bétonlab Pro2), qui permet de plus de simuler les autres propriétés du béton (résistance, déformations différées, etc...). Ses auteurs proposent un cahier des charges spécifique pour les BAP, avec des indices pour estimer la capacité de remplissage et la stabilité du béton.

1.2.1.4 Comparaisons des approches:

D'après une étude comparative des trois approches de formulation, [Turcry 04] a conclut que

- l'approche japonaise donne un béton très visqueux parce que renfermant un volume de pâte trop élevé. Déduire le volume de gravillons de leur compacité est cependant un élément intéressant pour rationaliser l'approche actuelle de la formulation.
- La méthode de formulation basée sur la minimisation de la pâte ne nous a pas permis d'obtenir un BAP répondant aux exigences du cahier des charges.
- L'utilisation du logiciel Bétonlab est certainement l'approche la plus cartésienne de la formulation des BAP (et des bétons en général) : on caractérise d'abord finement les constituants, puis on formule. C'est un outil pédagogique intéressant, puisqu'il permet d'appréhender l'influence de chaque constituant sur le comportement du béton, au moyen de simples simulations.

1.2.2. Particularités de la composition des BAP

Malgré les différentes méthodes de formulation existantes, certaines caractéristiques demeurent intrinsèques aux BAP mais peuvent légèrement différer d'une approche à l'autre.

Les composants de base d'une formulation de BAP sont identiques à ceux d'une formulation de béton vibré mais leurs proportions sont différentes. Afin d'obtenir les propriétés requises à

l'état frais d'un BAP, une importante quantité de fines et l'incorporation d'adjuvants (notamment les superplastifiants) sont nécessaires.

1.2.2.1. Un volume de pâte élevé

Les frottements entre granulats sont source de limitations vis-à-vis de l'étalement et de la capacité au remplissage des bétons. Le rôle de la pâte (ciment + additions + eau efficace + air) étant précisément d'écarter les granulats, son volume dans les BAP est donc élevé (330 à 400 l/m³).

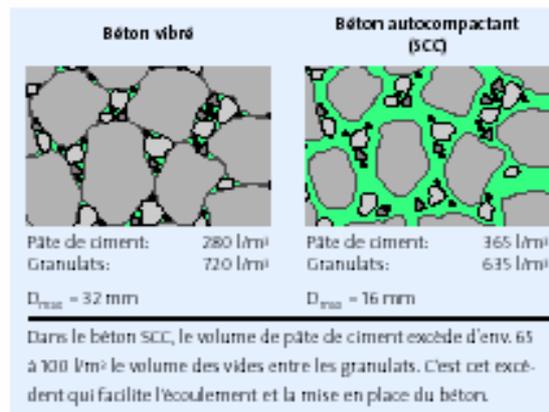


Figure 1.4 : volume de pâte relatif au BAP est différent de BV

1.2.2.2. Une quantité de fines ($\varnothing < 80 \mu\text{m}$) importante

Les compositions de BAP comportent une grande quantité de fines (environ 500 kg/m³) pour limiter les risques de ressuage et de ségrégation. Toutefois, le liant est fréquemment un mélange de deux, voire trois constituants, pour éviter des chaleurs d'hydratation trop grandes (Et un coût de formule trop élevé).

Ce sont les exigences de résistance à la compression, les critères de durabilité (DTU 21, Normes XP P 18-305 ou EN 206, etc.) et les paramètres d'ouvrabilité (fluidité) qui déterminent le choix de ces additions (cendre volante, laitier de haut fourneau, filler calcaire, etc., le filler calcaire étant l'une des additions fréquemment rencontrées dans les formulations de BAP) et leur proportion respective.

L'introduction d'additions minérales entraîne une modification de la porosité de la matrice cimentaire et influence les caractéristiques mécaniques et autoplaçantes du béton (figure 1.5) [Billberg 01].

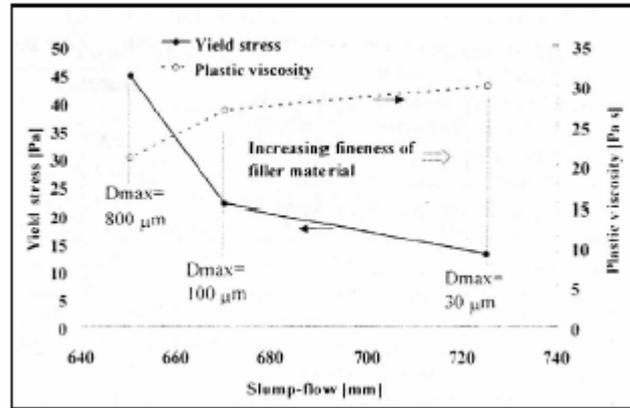


Figure 1.5: Influence de la finesse d'un filler sur le comportement rhéologique d'un béton [Billberg 01]

1.2.2.3. L'emploi de superplastifiants

Les superplastifiants permettent d'obtenir des bétons très fluides en réduisant les frottements entre grains de ciment et en libérant une certaine quantité d'eau. Ces fluidifiants sont identiques à ceux employés pour les autres types de béton, à savoir des polymères de type polycarboxylate, polyacrylate/polyacrylate ester acrylique. Cette adjuvantation ne doit pas être trop élevée (proche du dosage de saturation) sous peine d'augmenter la sensibilité du béton à des variations de teneur en eau vis-à-vis du problème de la ségrégation et du ressuage. Les superplastifiants interagissent avec les particules du ciment et des fines en s'adsorbant à leur surface pour diminuer le phénomène de floculation au contact de l'eau. Ainsi, les particules sont dispersées par combinaison d'effets électrostatiques et stériques et la proportion d'eau libre est plus importante [Baron 96].

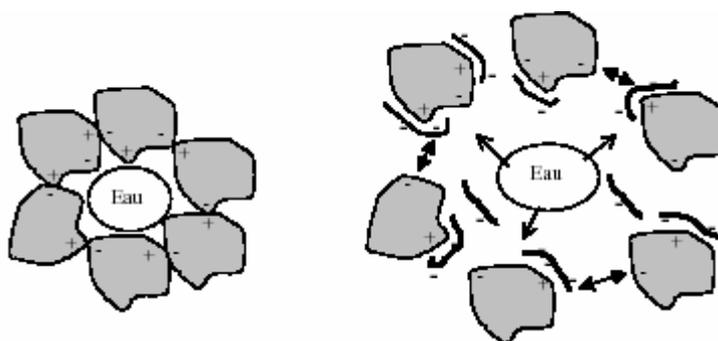


Figure 1.6 : Action des superplastifiants - Défloculation des grains de ciment.

1.2.2.4. L'utilisation éventuelle d'un agent de viscosité (rétenant d'eau)

L'ajout d'un superplastifiant ayant pour effet d'augmenter l'ouvrabilité du béton mais également de réduire sa viscosité, afin de minimiser ce dernier point, les BAP contient

souvent un agent de viscosité. Ce sont généralement des dérivés cellulosiques, des polysaccharides, des colloïdes naturels ou des suspensions de particules siliceuses, qui interagissent avec l'eau et augmentent la viscosité de celle-ci (figure 1.7). Ils ont pour but d'empêcher le ressuage et les risques de ségrégation en rendant la pâte plus épaisse et en conservant une répartition homogène des différents constituants.

Cependant, l'action de ces produits est, d'une certaine façon, opposée à celle des superplastifiants. La formulation d'un BAP requiert donc la sélection d'un couple agent de viscosité - superplastifiant compatible et l'optimisation de leur dosage (figure 1.8).

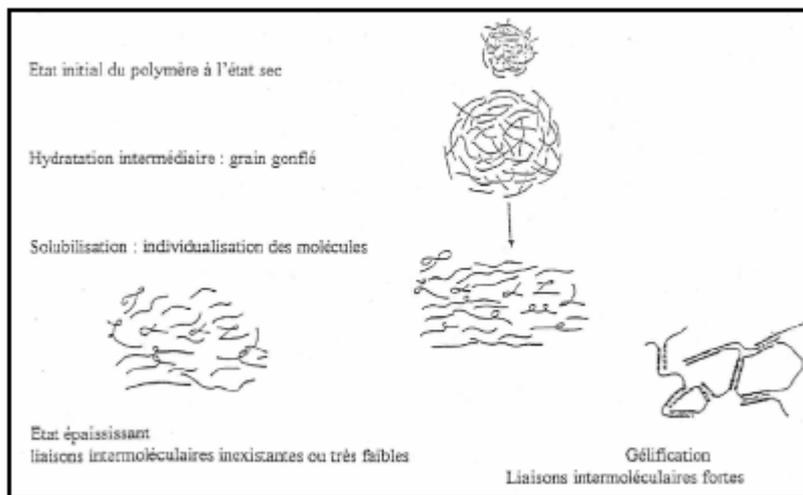


Figure 1.7 : Interaction entre l'eau et les polysaccharides [Hasni 99]

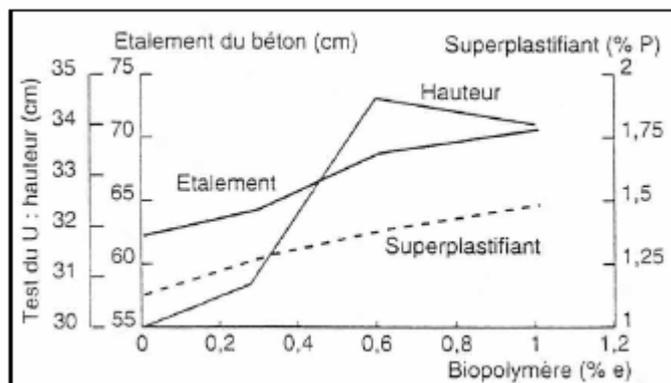


Figure 1.8 : Optimisation du dosage agent de viscosité – superplastifiant, d'après [Tangtermsirikuls 91]

Ces produits semblent utiles pour des bétons ayant des rapports eau/liant (E/L) élevés, les fines n'étant alors pas suffisantes pour fixer l'eau dans le béton. En revanche, leur utilisation

ne se justifie pas pour des BAP ayant des rapports E/L faibles (rapport eau/fines < 0,3). Pour les bétons intermédiaires, leur utilisation doit être étudiée au cas par cas.

Les agents de viscosité ont aussi la réputation de rendre les BAP moins sensibles à des variations de la teneur en eau à l'égard des problèmes de ressuage et de ségrégation, mais ils peuvent conduire à des entraînements d'air excessifs et à une diminution de la fluidité [Sedran 95].

1.2.2.5 Un faible volume de gravillon

Les BAP peuvent être formulés avec des granulats roulés ou concassés. Cependant, comme nous l'avons vu précédemment, il faut en limiter le volume car les granulats sont à l'origine du blocage du béton en zone confinée (figure 1.9). Toutefois, comme ils conduisent par ailleurs à une augmentation de la compacité du squelette granulaire du béton, ils permettent de réduire la quantité de liant nécessaire à une bonne ouvrabilité et une résistance souhaitée.

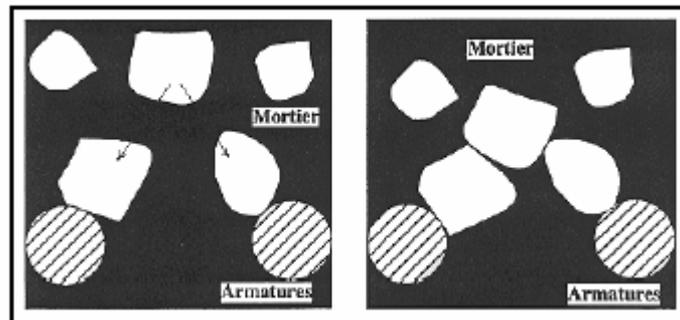


Figure 1.9 : Phénomène de blocage des granulats au droit d'un obstacle [Sedran 95]

Ces deux facteurs conduisent à prendre pour les BAP un rapport gravillon/sable (G/S) de l'ordre de 1, qui peut être corrigé suivant le confinement de la structure étudiée.

Le diamètre maximal des gravillons (DMAX) dans un BAP est compris classiquement entre 10 et 20 mm, mais comme les risques de blocage pour un confinement donné augmentent avec DMAX, cela conduit à diminuer le volume de gravillon.

1.3. CARACTERISATION DU BETON A L'ETAT FRAIS :

Il existe de nombreux procédés pour effectuer le contrôle des propriétés sur le BAP.

Les recommandations nationales [AFGC 00] prévoient de caractériser les BAP à l'état frais en prenant en compte les trois caractéristiques principales demandées :

- La mobilité en milieu non confiné,

- La mobilité en milieu confiné,
- La stabilité c'est-à-dire la résistance à la ségrégation et au ressuage.

1.3.1. Mobilité en milieu non confiné

L'essai le plus courant, car le plus facile à mettre en œuvre, permettant de caractériser la mobilité en milieu confiné est l'essai d'étalement réalisé à l'aide du cône d'Abrams (voir figure 1.10) . En effet, la valeur de l'étalement, donnée par la mesure du diamètre de la galette de béton, s'avère être plus représentative que celle de l'affaissement.

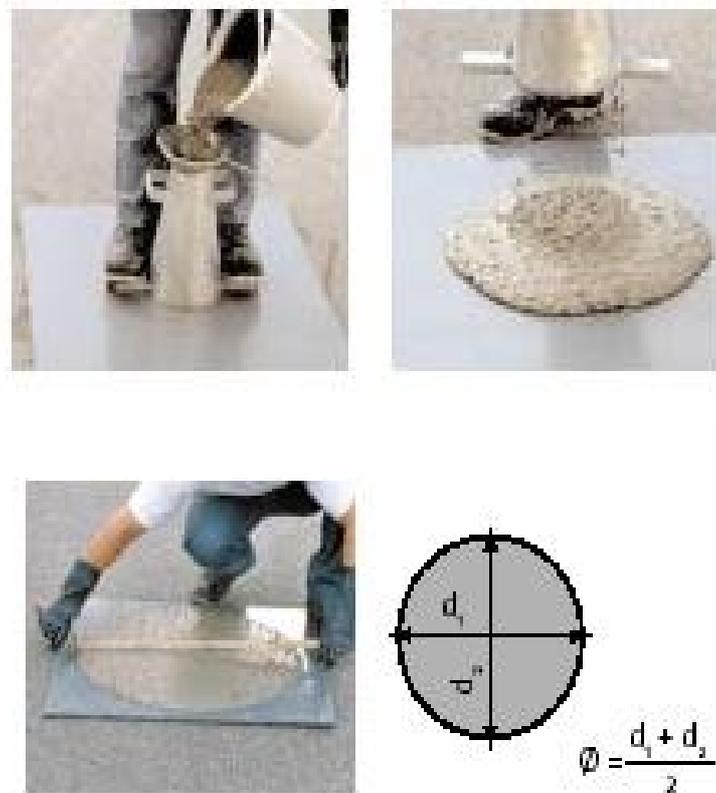


Figure 1.10 : essai d'étalement

En 2002, les recommandations en terme d'étalement admissible définissaient la fourchette : 600-750 mm [AFGC 02 cité par Bethmont 05]. Ainsi, différentes classes d'étalement ont été définies :

- Classe SF1 : étalement compris entre 550 et 650 mm
- Classe SF2 : étalement compris entre 660 et 750 mm

- Classe SF3 : étalement compris entre 760 et 850 mm

1.3.2. Mobilité en milieu confiné

Lors de leur mise en œuvre, les BAP sont soumis à différentes sollicitations. Dans un premier temps, le matériau doit s'écouler et passer à travers des armatures plus ou moins denses. Une fois le remplissage effectué, le matériau est soumis à la gravité jusqu'à la prise. Afin de rester homogène tout au long de ces différentes étapes, le matériau doit répondre à ces sollicitations de différentes manières.

Pour caractériser la mobilité en milieu confiné, c'est-à-dire la ségrégation dynamique, aucun essai de référence n'a encore fait l'unanimité, mais tous ont pour objectif d'évaluer la capacité du béton à s'écouler dans une zone confinée. Ils peuvent permettre de déceler des problèmes de blocage (par formation de voûtes des granulats) lors de l'écoulement.

L'essai de la boîte en L (figure 1.11) fait partie de ces essais. la procédure d'essai dans la boîte en L est la suivante :

la partie verticale de la boîte est remplis de béton, on lève la trappe, ce qui provoque l'écoulement du béton dans la partie horizontale à travers d'un grillage formé de trois barres d'armatures $\Phi 16\text{mm}$ distante de 50mm. Enfin quand le béton s'arrête de s'écouler, on mesure les hauteur h_1 et h_2 , on vise un rapport h_2/h_1 d'au moins 0.8 (AFGC 2000)

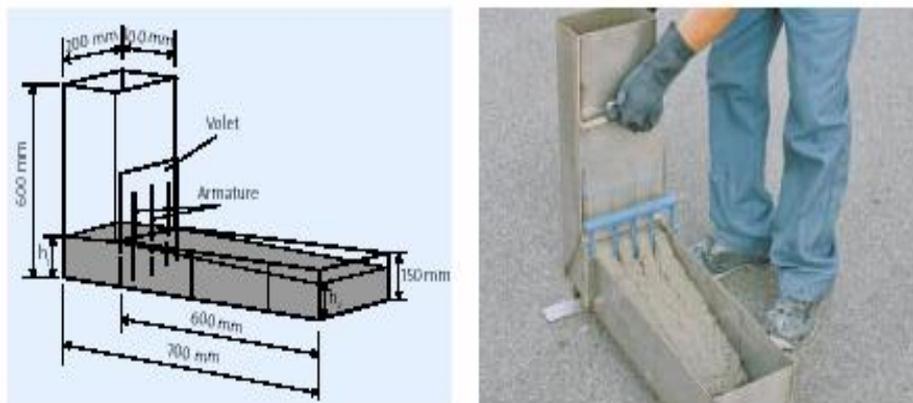


Figure 1.11 : Essai de la boîte en L (L-box test)

1.3.3. Stabilité

L'homogénéité du matériau conditionne en effet ses propriétés à l'état durci (Résistance mécanique, retrait, durabilité, etc.). Le béton doit donc être stable sous l'effet de la gravité (pas de ségrégation) et présenter une capacité de ressuage limitée.

a. Résistance à la ségrégation

Cet essai est proposé dans les Recommandations Provisoires de l'AFGC [2] (figure 1.12). Un échantillon de 10 l de béton est mis au repos pendant 15 min. Il s'agit ensuite de déverser 4,8 kg (tolérance $\pm 0,2$ kg) de l'échantillon sur un tamis. Après 2 min d'attente, le pourcentage de laitance qui est passée au travers du tamis est calculé selon l'expression [Bensebti et Houari 07]:

$$\Pi = \frac{P_{\text{laitance}} \cdot 100}{P_{\text{échantillon}}}$$



Figure 1.12 : Essai de stabilité au tamis

Le critère de stabilité de cet essai est :

- $0 \leq \Pi \leq 15\%$, alors la stabilité est satisfaisante
- $15 \leq \Pi \leq 30\%$, la stabilité est critique
- $\Pi > 30\%$, la stabilité est très mauvaise.

b. Ressuage

La capacité de ressuage peut être mesurée par l'essai à l'aéromètre modifié (développé par le LCPC, figure 1.13) : le volume d'eau libéré par l'échantillon de béton remonte au-dessus du perchloroéthylène (dont la densité est supérieure à celle de l'eau : 1,59) dans une colonne graduée où il est facile de l'estimer [AFGC 00]. Ce test semble cependant peu pratique à utiliser étant donné la nocivité du produit employé.

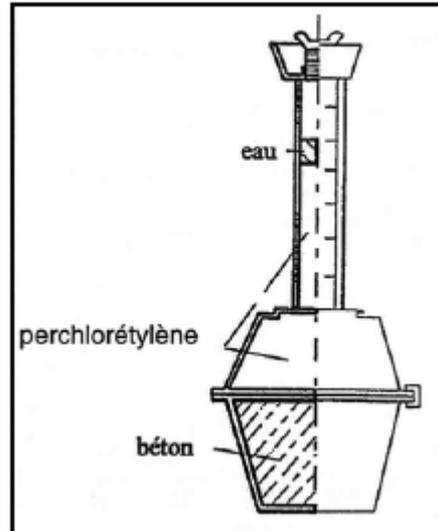


Figure 1.13 : Essai de ressuage à l'aéromètre

1.4. PROPRIETES DU BETON DURCI

Les particularités de composition des bétons autoplaçants conduisent à étudier les différentes propriétés mécaniques de ces bétons et plus particulièrement les déformations instantanées et différées, supposées différentes de celles des bétons vibrés.

1.4.1. Résistance à la compression :

Les BAP se caractérisent de rapport E/C bas, ce qui amène à des bonnes résistances mécaniques.

La résistance tend à être régie par le type et la proportion d'addition de poudre que par le rapport de E/P [Domone 06].

L'utilisation de fillers dans une formulation de béton génère une accélération de sa résistance mécanique aux jeunes âges [De Larrard 99, Pera 99]. Les particules fines du filler, lorsqu'elles sont bien défloculées par les superplastifiants, favorisent l'hydratation du ciment, principalement par un effet physique, et conduisent à une matrice cimentaire dont la structure est plus dense. Ces effets ont une influence sensible sur la résistance mécanique jusqu'à 28 jours puis deviennent moins significatifs par la suite.

Les travaux de [Gibbs 99] ont montré que la résistance à 7j est plus élevée pour les BAP que celle de BV référence, en raison de la présence de poudre de calcaire qui accélère l'hydratation et la résistance à la compression au jeune age.

[Zhu 05] ont montré que la résistance de BAP utilisant la poudre de pierre à chaux augmente de 50 à 80% de celle de référence à 7j et de 20 à 40% à 28j, ils ont expliqués cette

augmentation par la poudre à pierre à chaux accélère l'hydratation de ciment et augmente la résistance au jeune ages.

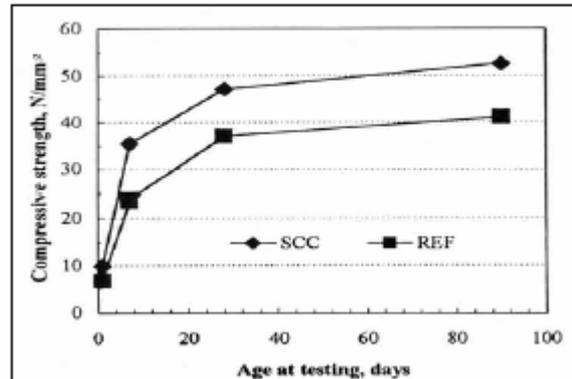


Figure 1.14 : Evolution de la résistance mécanique d'un BAP (SCC) et d'un BV (REF) correspondant [Gibbs 99]

Le dosage plus ou moins important en adjuvants dans les formulations de BAP peut aussi avoir une influence sur l'évolution de la résistance mécanique du béton.

Ainsi, l'introduction d'un agent de viscosité peut diminuer sensiblement la résistance mécanique d'un BAP aux jeunes âges [Felekoglu 03].

1.4.2. Résistance à la traction :

[Gibbs 99] ont constatés qu'il n'y aucune différence entre la résistance à la traction des BAP et celle des bétons référence. Par contre, [Gibbs 02] ont montrés que la résistance à la traction est plus grande que la résistance des bétons références.

En comparant des mélanges de BAP ont le même E/C on trouve que le type et la finesse de poudre affecte peu la résistance en traction [Gibbs 02].

2.4.3. Module d'élasticité :

Les différents matériaux de BAP peuvent montrer un différent comportement de relation contrainte-déformation si les BAP contiennent une baisse quantité de gros granulats [Burak 06]

Si on se réfère à la formule réglementaire du module ($E_{ij} = 11000 f_{cJ} 1/3$), celui-ci ne dépend que de la résistance du béton. Ainsi, à résistance égale, un béton autoplçant aurait donc le même module qu'un béton vibré.

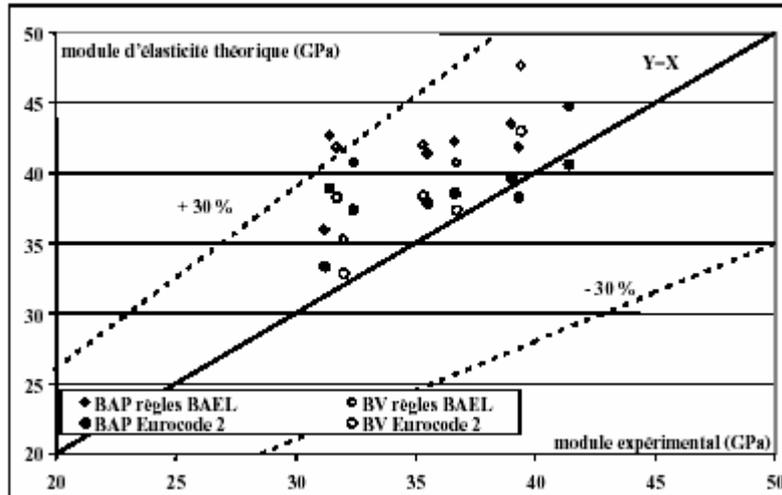


Figure 1.15 : Comparaison des modules élastiques théoriques de BAP et de bétons vibrés avec leurs valeurs expérimentales [Pons 2003]

Certains auteurs ont trouvé que le module élastique de BAP coïncide bien avec celui de BV avec des propriétés similaires quand la résistance est constante [Person 03], les mêmes résultats trouvés par [Erik et Pentti 99].

Par contre [Dehn et Al 00], le module élastique de BAP est inférieur à celui de BV donc le BAP est plus rigide.

[Jacob et Hunkeler 99] ont trouvés qu'avec une résistance donnée le module élastique de BAP est inférieur à celui de BV, ce comportement est dû à la petite dimension de grains de BAP et la quantité élevée de pâte de ciment. En effet, dans un béton formulé avec des granulats classiques, le module de la matrice (6000-25000 MPa) est environ de 3 à 15 fois plus faible que celui des granulats E_g (60000 à 100000 MPa).

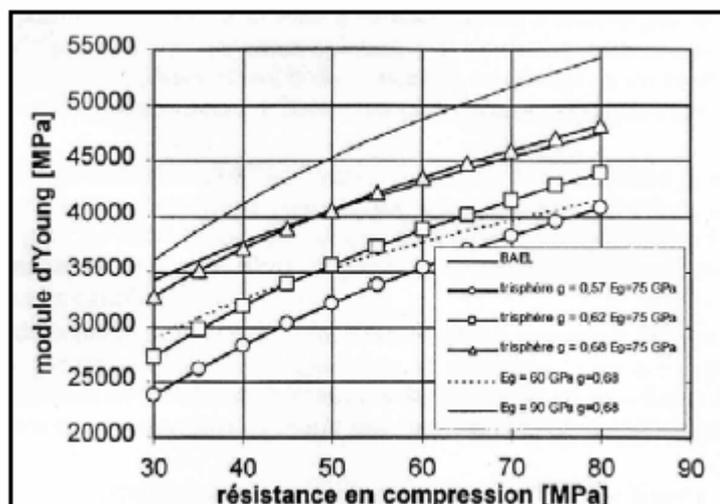


Figure 1.16 : Evaluation du module du béton en fonction de sa résistance, d'après le modèle réglementaire et un modèle d'homogénéisation [De Larrard 92]

1.4.4. Le retrait

Pour le retrait endogène

Le retrait endogène des BAP est plus faible (les valeurs s'échelonnent entre 50-200 $\mu\text{m/m}$) que celui des BV [Hu et Al 98].

Le retrait endogène est similaire pour BAP et BV, présentant le même rapport E/C [Person 99], la présence de l'addition n'a en général pas d'effet significatif ; au moins à long terme ; sur la déformation chimique

Les données sur le retrait de séchage sont très partagées d'un coté le retrait total est trouvé équivalent pour BAP et BV et de l'autre, il est trouvé sensiblement supérieur dans le cas des BAP.

[Ogawa et Al 95], constatent que le retrait de séchage des BAP est supérieur à celui des BV est ceci parce que la quantité de fine qu'il contiennent est plus importante

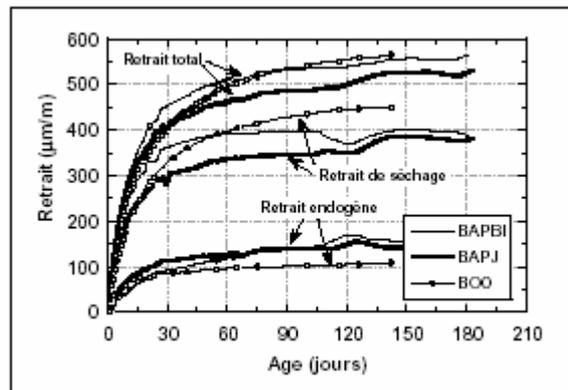


Figure 1.17 : Retraits des BAP B1 (E/C=0,50), BAP J(E/C=0,43) et BOO (E/C=0,45) [Turcry 04].

[Hayakawa 93], ils ne remarquent pas des différences notables environ 450 $\mu\text{m/m}$ pour le BV et le BAP.

[Kuroiwa 93] trouvent que le BAP est plus sensible au problème de cure et qu'à des conditions de cure identique le retrait de dessiccation des BAP était plus faible que BV

D'autre études montrent que le BAP et le BV sont peut différent en terme de retrait [Assié 04], [Vierra 03].

A l'opposé [Klug 03] trouve toujours sur une large base de données que les BAP exhibent un retrait total supérieur de 10 à 50% à celui des BV

1.4.5 Fluage :

Le fluage peut être défini comme une augmentation de la déformation sous une contrainte constante. Comme cette augmentation de la déformation peut être plusieurs fois supérieure à la déformation sous l'application d'une charge, la prise en compte du fluage est d'une importance considérable lors de calcul des structures de bétons [Neuville 00].

Selon [Casanova 96] le phénomène de fluage dépend de la distribution des efforts au sein de la structure et aussi de type de matrice de ciment.

[Proust 2003] trouve des valeurs de même ordre de grandeur de BAP et pour BV. Ces résultats sont confirmés par [Turcry 04], où il indique que en compression, le fluage total du BAP est identique à celui de BV. Par contre, [Vieir et Bitencourt 03] affirment que la déformation de fluage est de 25% supérieur à celles des BV.

1.4.6 Durabilité :

La durabilité du béton dépend donc de sa capacité à résister à la pénétration de fluides : l'oxygène, l'eau (contenant ou non des ions agressifs) et le dioxyde de carbone. à l'intérieur du matériau.

1.4.5.1 Carbonatation :

Si le front de carbonatation progresse jusqu'à la surface des armatures, la couche protectrice de passivation des aciers est dissoute et la corrosion des armatures peut se produire, à condition que l'oxygène et l'humidité nécessaires soient présents.

Les BAP et BV montre qu'il n'y a pas de différence notable entre les cinétique de carbonatation des deux types de bétons. Sakata 98 cité par [Hasni 99].

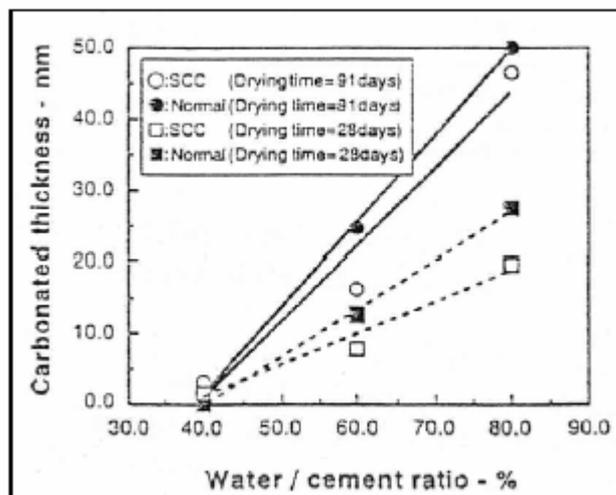


Figure 1.18 : Profondeur de carbonatation des BAP (SCC) et des bétons vibrés de même rapport E/C [Hasni 99]

De la figure 1.18 on remarque que plus le rapport E/C est important plus la profondeur de carbonatation est importante

1.4.5.2 Résistance de gel-dégel :

La résistance de gel-dégel du béton dépend de ses différentes propriétés, résistance de la pâte de ciment durci, capacité de déformation et des caractéristiques de son réseau poreux.

La résistance d'un béton vis-à-vis du gel-dégel est liée à la quantité d'air entraîné et à la répartition des bulles d'air.

Comme nous l'avons vu précédemment, les formulations de BAP comportent des quantités importantes de superplastifiants dont les effets secondaires peuvent être l'entraînement d'air dans le béton. D'autre part, l'utilisation complémentaire d'un agent de viscosité peut avoir comme effet de stabiliser ce réseau de bulles d'air.

Les résultats présents dans la littérature montrent nettement que les BAP, formulés sans entraîneur d'air, sont plus résistants au gel-dégel que les bétons vibrés (de même rapport E/C, avec ou sans entraîneur d'air) [Hasni 99].

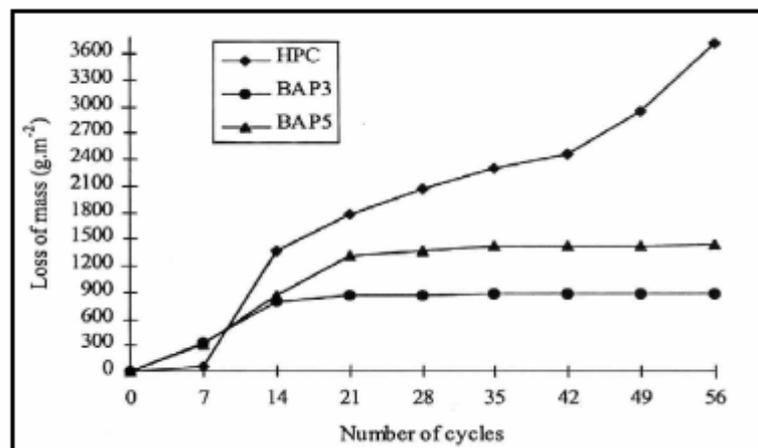


Figure 1.19 : Perte de masse de deux BAP et d'un béton vibré pendant un test d'écaillage (NF P 18-420) D'après Rougeau 99 [Assié 04].

1.4.7. Influence des fibres :

Le béton de fibre est un matériau composite (mélange de ciment, granulats, eau et fibres) mais qui doit être considéré comme homogène.

Les fibres peuvent couvrir les microfissures en retardant les macro fissures (cas de traction), et les fissures obliques (cas de compression). Tous en assurant la capacité portante et la ductilité à l'échelle de structure.

De plus, l'action de fibres est grandement influencée par leur orientation. Pour les BAP, le sens de coulage influe sur les caractéristiques mécaniques de béton durci parce que les fibres sont alignées favorablement dans le sens de coulage [Grunewald et al]. A l'inverse de BV où la vibration peut conduire à une mauvaise distribution des fibres de manière qu'on peut avoir des régions pauvres en fibres donc faible en renforcement.

Il s'agit donc d'un produit nouveau présentant notamment une résistance à la traction encore plus faible par rapport à la compression. Les différents chercheurs sont d'accord pour dire que les fibres n'apportent pas d'amélioration appréciable en compression. Tandis que pour la traction, l'augmentation de teneur de fibres peut avoir pour conséquence soit la diminution des résistances à cause de l'augmentation de l'hétérogénéité, soit leur augmentation due à l'efficacité des fibres pour contenir les microfissures soit une stagnation si on atteint la saturation en fibres. [Houari 93]

Dans le cas de résistance aux efforts de flexion, l'addition de fibres entraîne souvent une augmentation de résistance maximale et une augmentation de ductilité, due aux ponts et liaisons créés par les fibres placés stratégiquement et qui couture les fissures.

Les fibres ne semblent pas modifier le retrait du béton, par contre elles s'opposent à la fissuration provoquée par ce phénomène. Pour un béton ordinaire, [Houari 93] indique que les déformations de retrait sont généralement plus petites pour les bétons de fibres comparées à celles sans fibres.

[Oucief 06], d'après une étude sur les BAP fibrés montre que le retrait diminue en fonction de l'augmentation de teneur de fibres.

1.4.8 influence de la température sur le comportement :

La figure 1.20 montre que l'exposition de béton à haute température cause une dégradation de ces propriétés. La diminution de la résistance et le module élastique varie proportionnellement avec la température.

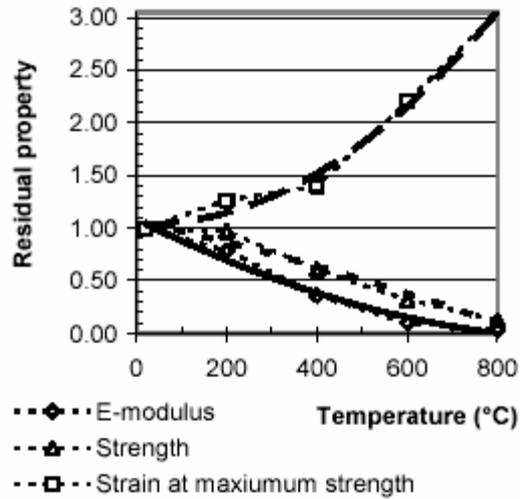


Figure 1.20 : les propriétés résiduelles des BAP [Person 03].

L'étude de [Person 03] sur différentes formulations de BAP a mentionnée que le comportement de BAP et de BV est identique. La figure 1.21, on désignant par AK : BAP avec addition de poudre à chaux, et BR : BV et AG : BAP avec l'addition de verre, montre que les différents bétons ont le même comportement.

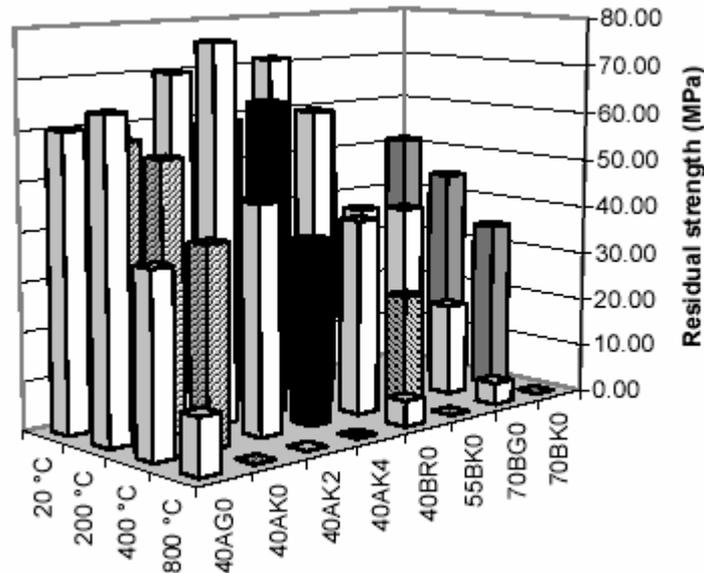


Figure 1.21 : les propriétés résiduelles des BAP et de BV à 20°C.

1.5 CONCLUSION :

Ce chapitre a été mené pour faire le point sur les connaissances relatives au comportement des BAP.

Les BAP constituent une véritable alternative au béton traditionnel, comme l'ont montré un certain nombre d'exemples. Cependant, leur formulation et le contrôle de leurs propriétés lors de la mise en œuvre nécessitent une attention particulière.

À l'heure actuelle, il n'existe pas pour les BAP de méthode de formulation généralisée, comme la méthode Dreux-Gorisse pour les bétons ordinaires.

Toutes les méthodes trouvés dans la littérature découlent des trois approches (japonaise, minimisation de pâte de ciment, optimisation de squelette granulaire), demandent un certain nombre d'essais pour caractériser les constituants ou leurs interactions. Les essais en laboratoire sont pratiquement indispensables à une formulation scientifique des BAP.

Dans notre cas on a choisis d'utiliser l'approche japonaise parce qu'elle est sécuritaire conséquence de dosage de pâte élevé. Et elle ne nécessite pas d'outil informatique et sa procédure de réalisation est très simple. L'utilisation de superplastifiant et d'une grande quantité de pâte est alors nécessaire pour obtenir un matériau très fluide. Afin de limiter le coût de la formulation et d'éviter une élévation excessive de la température lors de l'hydratation, une partie du ciment est remplacée par des additions minérales.

On peut conclure de la diversité des domaines des travaux réalisés, que le BAP est un nouveau matériau qui n'est pas encore maîtrisé. Peu de recherches sont faites pour étudier le comportement au feu.

De plus, les possibilités de variation des paramètres d'étude pour de tels bétons sont nombreuses (utilisation de différentes additions minérales, de superplastifiant, variation du volume de pâte, du rapport G/S, du rapport E/C, etc.), donne une gamme très variée pour la recherche.

Donc le but de notre travail est d'étudier le comportement d'un BAP à la chaleur formulé avec la méthode japonaise en utilisant des matériaux locaux, on varie le dosage d'addition. et on le compare avec des BV. Mais avant d'entamer ce sujet on a d'abord besoin d'information sur le comportement des bétons à haute température.

CHAPITRE 2 :
COMPORTEMENT DU BETON A HAUTE
TEMPERATURE

CHAPITRE 2 :

COMPORTEMENT DU BETON A HAUTE TEMPERATURE

2.1 INTRODUCTION :

Chaque année des incendies surviennent dans des tunnels et des installations industriels. Les dommages causés montrent qu'une évaluation précise de la protection contre l'incendie des ouvrages doit être réalisée. L'occurrence de telles situations accidentelles soumet les structures en béton à des élévations de température importantes et rapides

Le béton est un matériau dont le comportement est contrôlé par celui des granulats et par celui de la matrice cimentaire

L'échauffement de béton cause des modifications du point de vue

- Propriétés mécaniques
- Propriétés thermiques
- Microstructure

Dans ce chapitre, nous présentons une étude ; d'après la littérature ; de l'influence de la température sur les propriétés mécaniques, physiques, thermiques et microstructure de béton.

2.2 PROPRIETES MECANIQUES :

Le béton est un matériau qui s'endommage sous l'effet de la température, il subit de fortes modifications physico-chimiques qui influencent l'évolution de ses propriétés mécaniques avec la température. La déshydratation, les réactions de transformation, la pression dans les pores, la dilatation différentielle entre la pâte de ciment et les granulats engendrent des effets importants sur la résistance de béton à haute température.

2.2.1 Résistance à chaud:

Tous les auteurs s'accordent sur le fait que la résistance en compression du béton varie en fonction de la température à laquelle il est exposé ou a été exposé. Des comportements différents peuvent être observés selon que les essais sont effectués au cours de chauffage ou après refroidissement

2.2.1.1 Résistance en compression à chaud:

La résistance en compression à chaud dépend de la composition du béton, de la nature de ses constituants, de son âge, de sa teneur en eau, des formes et dimension des pièces, du fait qu'il est chargé à chaud ou non.

De manière globale, la résistance en compression du béton baisse légèrement de 15-20% de la résistance à la température ambiante causée par le départ d'eau libre contenue dans le béton

En dépassant 120°, on constate une augmentation à la résistance en compression, ceci peut être expliqué par l'augmentation du processus de séchage. Le départ d'eau adsorbée provoque l'accroissement des forces de surface entre les particules de gel de CSH qui assurent la résistance de la pâte de ciment

Après 300°C, le béton est complètement sec, on constate une rapide dégradation des propriétés mécaniques du béton. Cette diminution de résistance peut être attribuée à une modification de structure de béton conséquence des différences de coefficient d'expansion thermique des différents constituants

Après 400°C, la dégradation du béton peut être liée à la dissociation du $\text{Ca}(\text{OH})_2$.

Entre 400°C et 600°C, la résistance en compression diminue encore plus rapidement.

Entre 600°C et 700°C, la vitesse de perte de résistance diminue. [Castillo 90] attribuent cela à la calcination des granulats calcaires utilisés qui peut intervenir à partir de 600°C.

A 800°C la résistance du béton chauffé est de l'ordre de 30% de la résistance à température ambiante.

La figure 2.1 montre l'évolution de la résistance à la compression à chaud d'un BAP on le comparant avec les différents codes [Person 04].

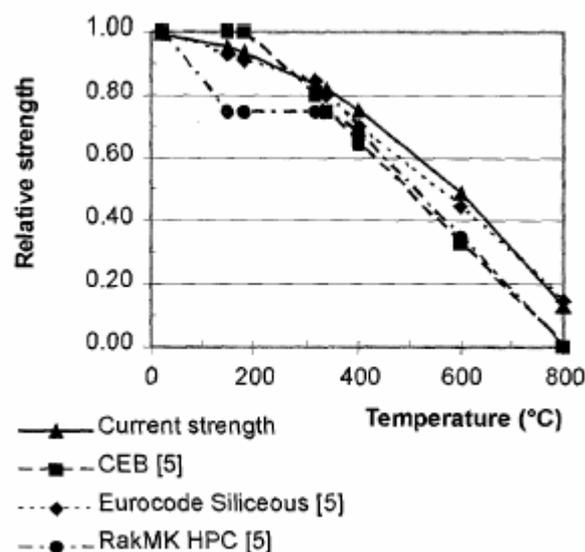


Figure 2.1 : la résistance de compression à chaud [Person 04].

Des études expérimentales montrent que si les éprouvettes sont chargées en compression pendant le chauffage, la perte de résistance est réduite. Ce qui est attribué au fait que les fissures dans une éprouvette chargée mécaniquement ne sont pas libres de se développer, ceci retarde la dégradation due aux différences de coefficients d'expansion thermiques des constituants

2.2.1.2 Résistance en traction:

Le comportement mécanique du béton en traction est moins étudié que la compression car d'une part le béton est conçu essentiellement pour résister à la compression, et d'autre part, dû à son comportement quasi fragile, l'essai de traction directe est difficile à réaliser. Par conséquent, on fait appel à des essais indirects de type flexion trois points pour identifier le comportement en traction du béton.

Peu de chercheurs se sont intéressés à la résistance en traction de béton à haute température. Des études sont menées par [Noumowe 95], montrent une sensibilité de la résistance en traction à la température

2.2.1.3 Module d'élasticité:

De nombreuses études montrent une diminution graduelle du module élastique due à la rupture des liaisons internes de la microstructure de la pâte de ciment, aussi l'accélération de processus de fluage à court terme qui a pour conséquence la diminution de module d'élasticité.

2.2.1.4 comportement contrainte déformation:

L'augmentation de température affecte le comportement contrainte déformation, on peut noter une augmentation de la ductilité du béton, la rupture est précédée de plus significatif pour les BHP, la figure suivante 2.2 présente la variation de comportement d'un béton ordinaire de 32.9 MPA .On note que la ductilité croit avec la température. La résistance en compression passe par un maximum après 150°C avant de chuter brusquement après 350°C

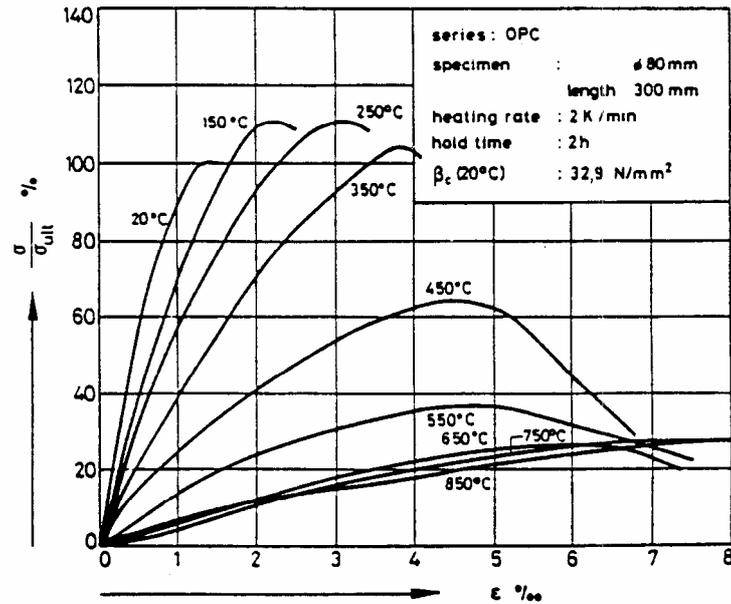


Figure 2.2 : courbes effort déformation [Jumpanen 91]

La figure 2.3 présente le comportement d'un BHP de 91Mpa contenant de cendre volante, on a un gain de résistance après 150°C et une chute brusque après 450°C.

De manière générale le BO et le BHP évoluent dans le même sens mais pas avec les mêmes proportions.

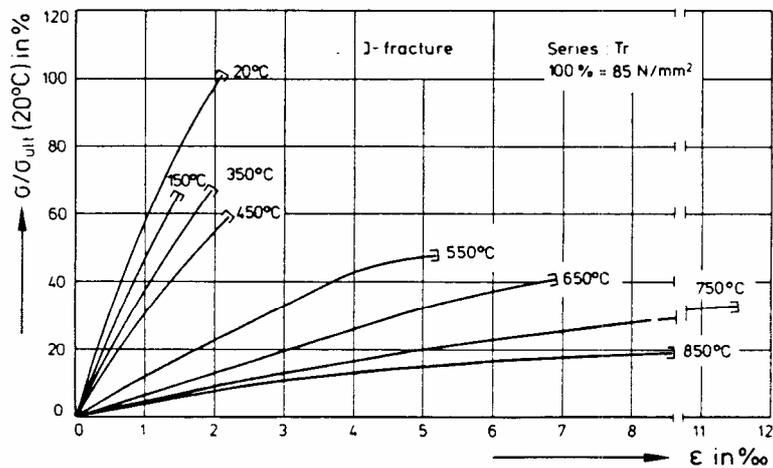


Figure 2.3 : courbe contrainte déformation [Jumpanen 91]

De nombreux facteurs influencent l'évolution de cette courbe avec la température, en particulier le type de granulats la teneur d'eau. Quelque soit le béton, la charge influe l'évolution de la déformation ultime; dans la figure une représentation de l'évolution de déformation avec la charge

A: présente le niveau de charge défini par le rapport de la contrainte appliquée sur la résistance initiale en compression uniaxiale à 20°C

2.2.2 Résistances résiduelles:

2.2.2.1 Effet de refroidissement:

Des études ont montrées que les éprouvettes subissant un refroidissement présentent des résistances différentes que celles mesurées à chaud. Ce qui est montré dans la figure 2.4 .

Le fait de refroidir le matériau, peut entraîner l'apparition d'une fissuration supplémentaire et une ré-humidification provoquant la réhydratation du gel CSH mais aussi la réaction de la CaO avec l'eau présente dans l'environnement endommageant d'avantage la structure du béton. Après un temps défini qui suit le cycle de chauffe. Il a été rapporté [Khoury 92] que le béton est capable de récupérer une partie de sa résistance. Ce phénomène d'autoréparation des bétons peut s'expliquer par la réhydratation des grains de ciment non hydratés présent dans les bétons caractérisés par un rapport E/C très faible. [Gaweska 04].

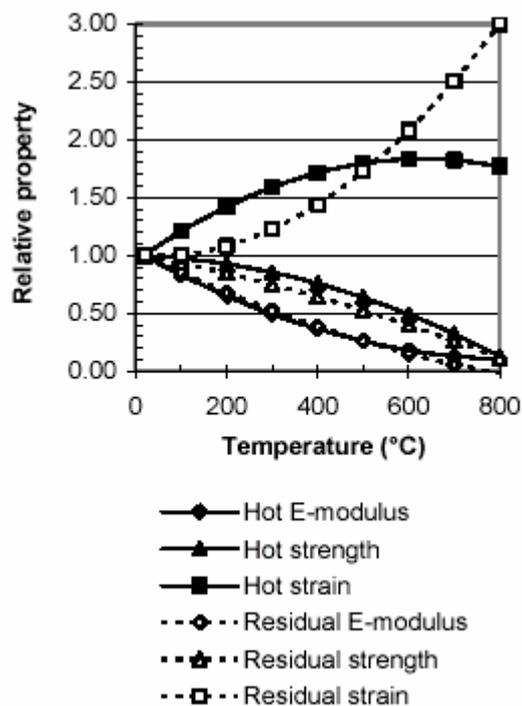


Figure 2.4 : Les propriétés relatives de béton avant/après l'élévation de température excepté la propriété résiduelle avec la poudre de chaux à 800°C [Persson 03].

Des essais sont faites sur des pâtes de ciment portlandite remplacée par de cendre volante (10, 25, 40%), des ADT ont montrés que la cendre volante réduit la quantité de Ca (OH) 2 dans la

pâte suite à des réactions pouzzolaniques. Ces essais ont montrés que même 10% de cendre élimine la fissuration visible à la surface de béton après refroidissement à l'air pour des éprouvettes chauffées jusqu'à 600°C, ce qui confirme que la fissuration est liée à la présence de chaux dans le béton au refroidissement. Une étude faite par ; [Metin 06] ; sur les micro béton ordinaire et les micro béton haute performance, refroidis à l'air et avec l'eau a montré que à 200°C, la perte de résistance des micro bétons refroidis à l'air libre est de 7%, tandis que ceux refroidis à l'eau est de 27%.

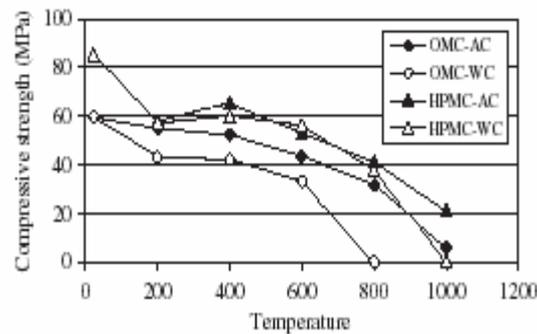


Figure 2.5 : variation de la résistance avec la température. [Metin 06].

2.2.2.2 Résistance à la compression:

Après le refroidissement le béton prend un temps pour regagner son équilibre avec le milieu ambiant, ce qui explique les résultats de nombreux essais [Noumowe 03, Metin 06, Person 03] qui montre les résistances mesurées à chaud sont plus élevées que les résistances résiduelles mesurées juste après le refroidissement.

et il y a encore des variations après le refroidissement puisque l'humidité est réabsorbée dans le béton sec. Ce changement de résistance après refroidissement, qui produit quand le spécimen se rapproche de l'équilibre de son entourage est accompagné par un changement de dimension. Dans une structure, durant la période immédiatement après un feu, ces changements peuvent causer une redistribution des contraintes et provoquer des dégâts additionnels.

Dans les documents codificatifs tels que le DTU (Document Technique Unifié) et l'EUROCODE 2 nous trouvons les courbes d'évolution de la résistance en compression avec la température. Ces courbes ont été établies en se basant sur les résultats expérimentaux, obtenus sur les bétons de compositions variées par différentes équipes des chercheurs.

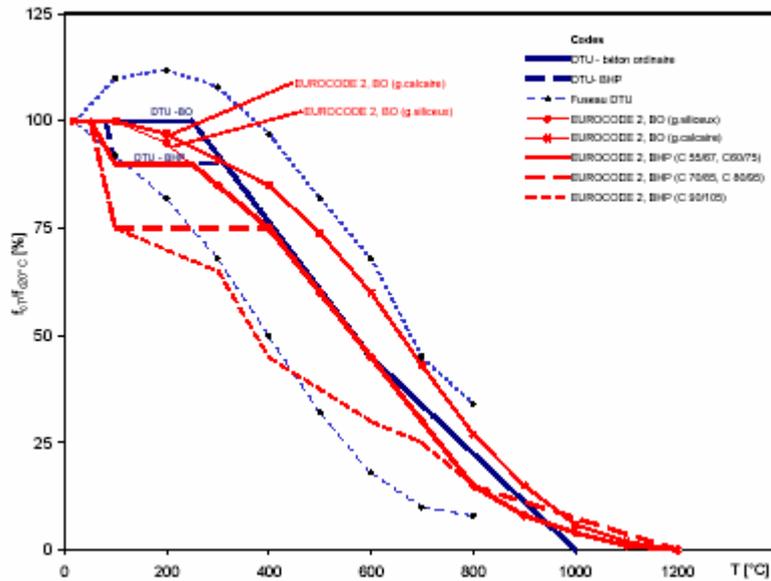


Figure 2.6 : Courbes de la variation de la résistance en compression selon les textes codificatifs DTU et EUROCODE 2

2.2.2.3 Résistance en 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. En effet la réalisation de l'essai de traction directe ou de flexion s'avère toujours difficile, compte tenu de la localisation de l'endommagement et du développement d'une microfissure généralement instable, qui mène par la suite à la rupture brutale du matériau. Les travaux réalisés à haute température montrent une chute de cette résistance avec la température. La Figure 2.7 regroupe les résistances résiduelles déterminées en flexion par Malhotra et al 1989 et en traction directe par Noumowé et al.[Noumowe 95]. Les mesures sont effectuées sur des éprouvettes ayant préalablement été refroidies. On remarque sur cette figure que toutes les valeurs déterminées se situent au-dessus de celles de DTU.

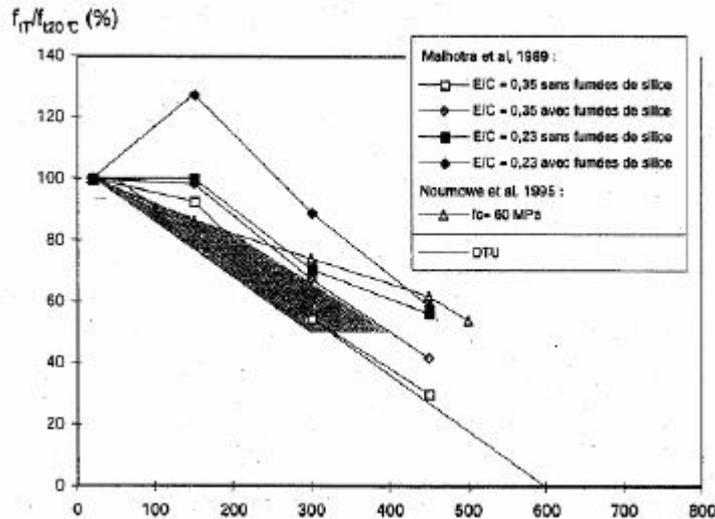


Figure 2.7 : Evolution de la résistance à la traction en fonction de la température [Pimi-1999]

Après exposition à 500 °C, les bétons gardent 60 à 63 % de leur résistance en compression alors qu'ils n'ont plus que 42 à 53 % de leur résistance en traction.

La figure 2.8 montre la variation de la résistance à la traction par flexion avec la température d'un béton ordinaire. [Menou 04].

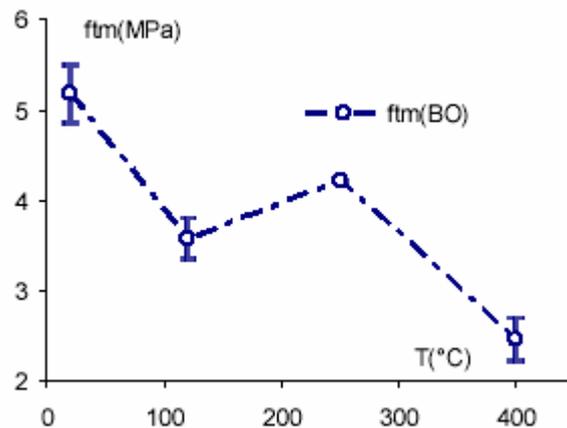


Figure 2.8 : résistance en traction d'un BO en fonction de T [Menou 04]

2.3 PROPRIETES PHYSIQUES :

2.3.1. Densité apparente

A haute température, ce paramètre dépend fortement de la nature des granulats dans le béton. La Figure 2.9 montre les variations de la masse volumique de différents types de bétons en fonction de la température. On observe une diminution quasi-linéaire jusqu'à 800°C, or le béton à granulats calcaires présente une forte diminution de la densité au delà de 800°C. Cette

baisse de la masse volumique est liée à deux phénomènes à savoir l'hydratation complémentaire des anhydres et la carbonatation de la portlandite.

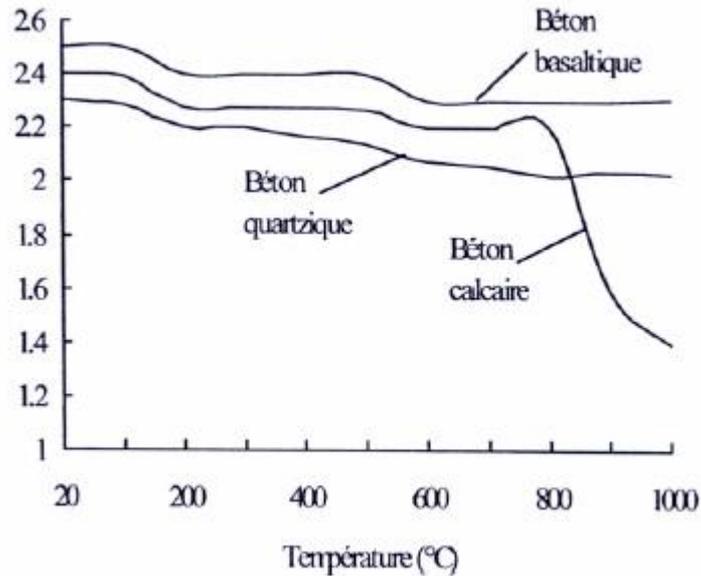


Figure 2.9: Variations de la masse volumique de différents types de bétons en fonction de la température. [Schneider 88]

Les mesures de la densité apparente pour trois bétons BHP et du BO sont représentés sur la Figure 2.10. Elle montre une légère diminution de la densité dans l'étendue des températures entre 100°C et 400°C. Nous remarquons la différence des densités entre BO et BHP à 100°C respectivement 2.28 et 2.43 [g/cm³]. Ces résultats obtenus par Kalifa et al. 1998 sont issus du Projet National BHP 2000. [Gaweska 04].

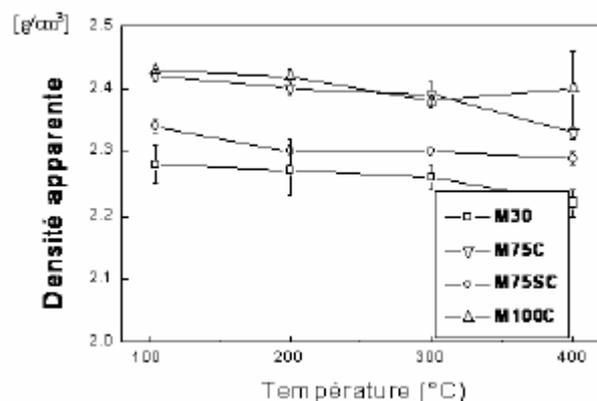


Figure 2.10: Densité apparente des bétons en fonction du traitement thermique (Kalifa 98)

2.3.2. Perte de masse

Durant l'échauffement du béton, sa masse est soumise à une variation due à l'évaporation de l'eau et la déshydratation progressive du gel CSH. Sur la Figure 2.11 nous pouvons observer une courbe caractéristique de la perte de masse durant l'échauffement, ainsi que la courbe de la vitesse de la perte de masse.

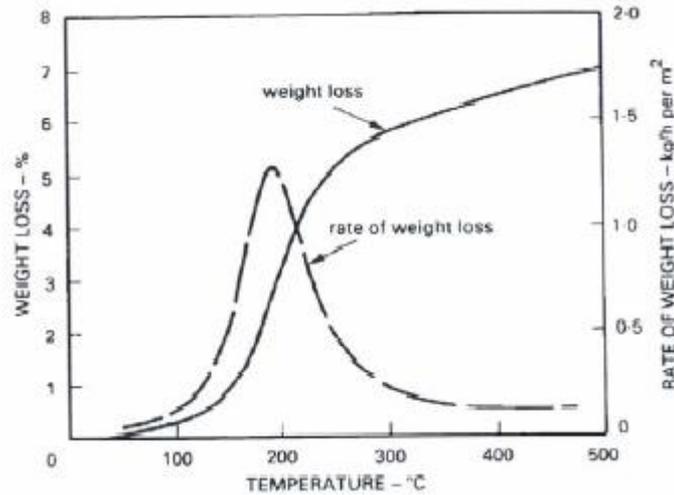


Figure 2.11: Perte de masse durant l'échauffement et vitesse de perte de masse en fonction de la température [Khoury 99]

La Figure 2.12 montre la courbe expérimentale mesurée par Noumowe [Noumowe 95] de la variation de poids en pourcentage du poids initial des BO et BHP en fonction de la température en surface

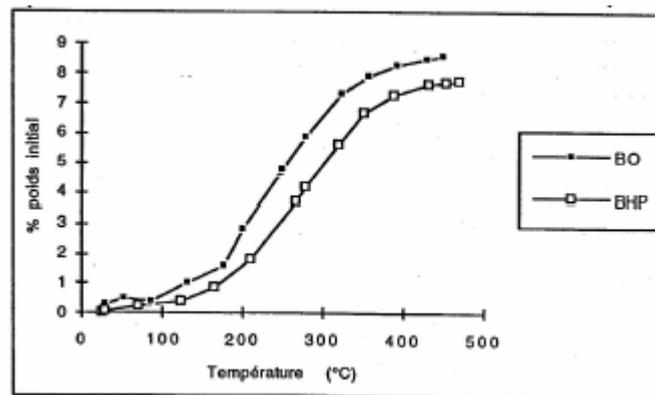


Figure 2.12: Variation de poids en fonction de la température

[Noumowé 95] a remarqué que la variation de poids est très légèrement supérieure à la quantité d'eau initiale dans le béton. Ce qui laisse penser que en plus de l'eau, il y a d'autres constituants qui se sont échappés des deux bétons.

De même, la Figure 2.13 montre l'évolution de la perte de masse par rapport à la température mesurée par Kalifa 1998. Les courbes obtenues montrent que la perte de masse du BO est plus faible que la perte de masse d'un BHP. [Menou 04]

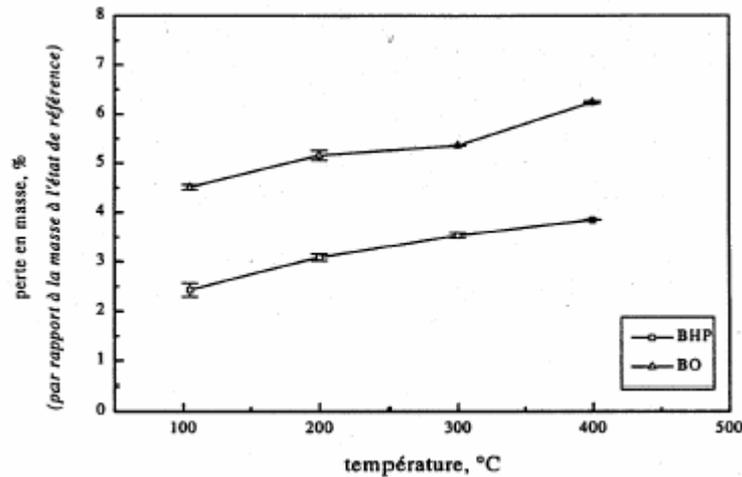


Figure 2.13: perte en masse des éprouvettes par rapport à l'état initial, en fonction de la température de conditionnement

2.4 PROPRIETES THERMIQUES:

Il a été bien établi que les propriétés thermiques du béton sont modifiées quand il est exposé aux températures élevées.

Il est difficile de déterminer les propriétés de béton avec exactitude à tous les niveaux de température à cause de nombreux phénomènes qui se produisent au sein de la microstructure du béton et qui ne peuvent pas être séparés facilement

La distribution des températures est gouvernée par les propriétés thermiques

2.4.1 Conductivité thermique:

La conductivité thermique diminue lorsque la température augmente, les principaux paramètres de cette variation sont, la teneur en eau, le type de granulat et la formulation de béton, la conduction du béton est fonction des conductivités des constituants. La diminution de conductivité thermique, en fonction de la température est marquée pour un béton de granulat silice calcaire, faible pour un béton de granulats calcaires et devient plus significative pour le béton léger [collet:77].

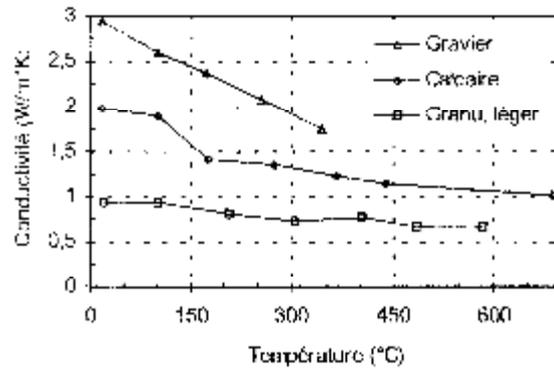


Figure 2.14 : Evolution de la conductivité thermique mesurée sur différents types de bétons en fonction de la température (Collet 77)

2.4.2 Chaleur spécifique:

La chaleur spécifique mesure la quantité d'énergie nécessaire pour faire monter de 1°C la température d'un kilogramme de matériau. Comparativement à la conductivité thermique, les variations de cette propriété avec la température sont moins maîtrisées [Neuville 00]. Une estimation de la variation de la chaleur spécifique avec la température pour une pâte de ciment est donnée par [Harmathy 70]. Le résultat est reporté sur la figure 2.15. On peut remarquer qu'entre 100°C et 800°C, il y a une forte augmentation de la chaleur spécifique due à la contribution de la chaleur latente causée par la déshydratation de ciment. Le pic observé à 500°C est associé à la déshydratation de l'hydroxyde de calcium CH. D'après [Franssen 87], les bétons humides présentent une capacité calorifique apparente qui est presque deux fois plus élevée que celle des bétons secs.

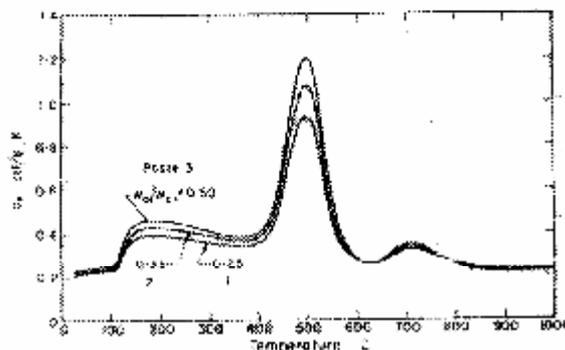


Figure 2.15 : Variation de la chaleur spécifique d'une pâte de ciment (Harmathy 70)

2.4.3 Diffusivité thermique:

La diffusivité thermique représente la vitesse à laquelle la chaleur se propage à l'intérieur d'un matériau. Elle est directement proportionnelle à la conductivité thermique et elle est inversement proportionnelle à la chaleur spécifique et à la masse volumique. [Schneider 88] cité par [Nechnech 00] a souligné l'importante dispersion observée sur les résultats de mesures expérimentales rapportés dans la littérature. L'auteur explique cette dispersion par la difficulté des mesures directes devant être réalisées en régime transitoire, et qui sont très sensibles aux conditions d'essais et au traitement thermique subi par les spécimen testés avant les mesures. On peut toutefois indiquer que la diffusivité thermique décroît progressivement avec la température.

2.4.4 Déformation thermique :

La déformation totale d'une éprouvette de béton non chargée soumise au chauffage est due à

- L'expansion thermique des constituants du béton
- Retrait de dessiccation du mortier
- Fissuration
- Détérioration physique des divers constituants

La pâte de ciment se dilate lors de chauffage jusqu'au 105c°, puis elle est sujette ensuite à un fort retrait de séchage. A 300 c°, le retrait devient très important. Des essais de dilatomètre effectués sur des pâtes de ciment indiquent qu'après l'expansion, le retrait est dû à la perte d'humidité (eau libre; eau combinée).

La Figure 2.16 montre les déformations thermiques de la pâte de ciment ordinaire (OPC), avec fumée de silice (Si), avec cendre volante (Lt), sans ajout pouzzolanique (Tr)) en fonction de la température.

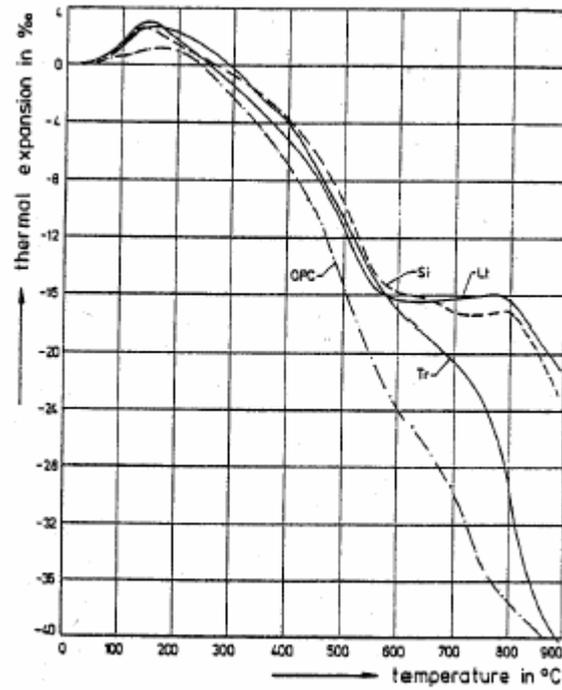


Figure 2.16 : Expansion thermique de pâte de ciment [Menou 04]

Les granulats se dilatent lorsqu'on les soumet à la chaleur, l'expansion thermique dépend de la nature minéralogique

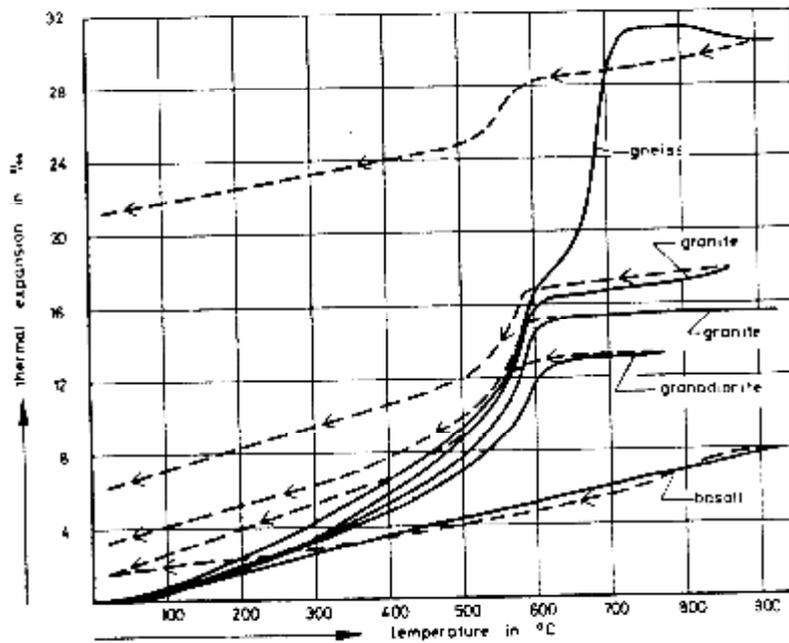


Figure 2.17: Expansion thermique de granulats

Donc à haute température, le ciment subit un retrait de dessiccation et le granulat une expansion. Généralement c'est la dilatation des granulats qui prédomine. Le coefficient d'expansion de béton est fonction de nature de granulat.

Les granulats silicocalcaire se dilatent plus que le calcaire qui a son tour se dilate plus que le basalte.

Les granulats silicocalcaire se distingue de leur forte expansion au dessus de 350°C due à la rupture de ces matériaux chauffés à 600°C le calcaire présente une expansion irréversible.

Dans la figure 2.18, les courbes d'expansion des éprouvettes chargées et non chargées mécaniquement pendant le chauffage n'ont pas du tout la même évolution. La déformation mécanique se superpose à la déformation thermique et modifie le comportement de béton.

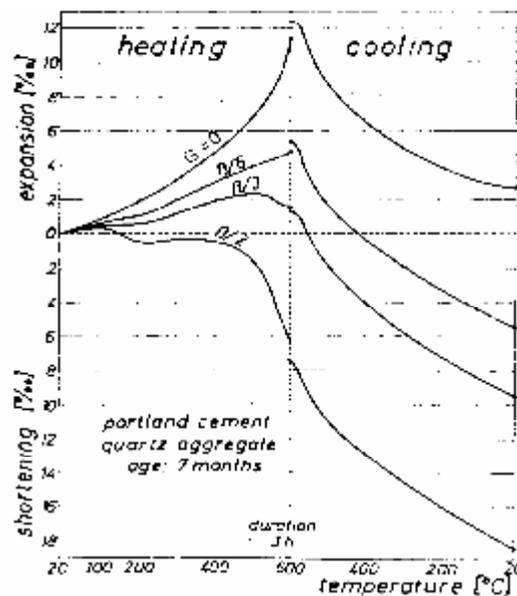


Figure 2.18 : Influence du chargement mécanique sur la déformation (Weigler, Fisher 73)

2.5 MICROSTRUCTURE:

Lorsque le béton est soumis à des températures élevées une déshydratation de gel de ciment (CSH) et une décarbonatation des granulats s'opère tout au long de chauffage.

Ces modifications entraînent une évolution des propriétés thermiques et mécaniques. Elles induisent aussi la création d'eau libre à l'intérieur de béton qui augmente la pression interstitielle.

2.5.1 Déshydratation de pâte de ciment:

Lorsque le béton est porté à une température élevée, plusieurs phénomènes physiques et chimiques surviennent entre 100°C et 900°C

- entre 30 et 120°C, l'eau libre et une partie de l'eau adsorbée s'échappent du béton. L'eau non liée est complètement éliminée
- de 180 à 300°C, la déshydratation de gel de ciment. l'eau non liée commence à s'échapper du béton
- entre 450 et 550°C, il y a décomposition de la portlandite en chaux libre
 $\text{Ca}(\text{OH})_2 \rightarrow \text{CaO} + \text{H}_2\text{O}$
- autour de 570°C se produit la transformation de quartz- α en quartz- β accompagnée d'un gonflement
- entre 700 et 900°C, décomposition de carbonate de calcium $\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$

L'introduction de fibre de polypropylène ne modifie pas ces phénomènes après 250°C, la seule différence c'est la fusion de fibres autour de 170°C

2.5.2 Transformation des liaisons pâte granulat :

L'interface ciment granulat dans un béton courant appelé auréole de transition est mieux cristallisé, plus poreux et moins résistant à cause d'un excès d'eau

Les hautes températures cause une déshydratation de cette zone (L'interface ciment granulat) qui engendre une détérioration rapide de la liaison entre le mortier et le granulat. les phénomènes de déshydratation engendrent une détérioration rapide au niveau de cette zone à cause de la dilatation différentielle entre la pâte de ciment (retrait) et les granulats (expansion). Plus le matériau est hétérogène plus la différence entre les coefficients de dilatation thermiques des constituants est importante. Ces coefficients varient en fonction de la température, et dépendent du type granulat et de ciment utilisés. [Menou 04].

Le retrait de dessiccation favorise le développement des fissures à cette interface si de petites traces d'un matériau instable tel que les oxydes de fer, sont présentes dans la pâte ou si la surface des granulats est particulièrement lisse, la liaison se détériore plus rapidement (Riley)

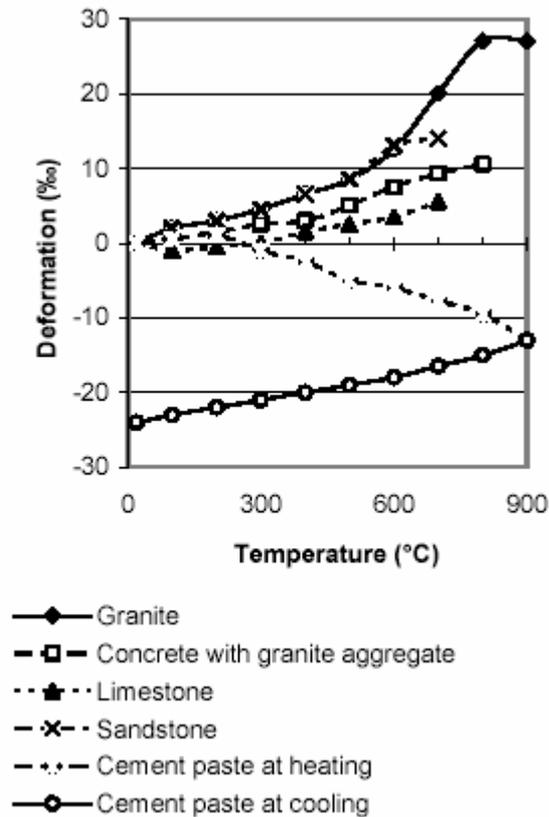


Figure 2.19: dilatation thermique de ciment, d'agrégat et de béton (Person 03)

2.5.3 Porosité

La connaissance de la structure des pores est importante puisqu'elle permet de définir la microstructure et la performance du matériau. Comme la structure de la porosité du béton possède une grande influence sur les propriétés mécaniques de béton, résistance; perméabilité durabilité..., il apparaît clairement à l'heure actuelle que la manière dont le volume poreux est distribué en terme de taille des pores est une information plus importante que la simple mesure de la porosité totale.

De nombreux chercheurs se sont intéressés à la détermination de la porosité de la pâte de ciment et du béton, des études montrent que la porosité du béton est fonction du rapport E/C initial; de l'âge du béton; des traitement subis (cure à l'eau; chauffage...)

La porosité apparente varie avec le progrès de l'hydratation [Turkmen 06]

[Neuville 95] a rapporté cela avec le progrès de l'hydratation, porosité apparente diminue rapidement parce que le volume de pores de gel est approximativement deux fois le volume du ciment anhydre, de sorte que le gel remplisse graduellement une partie de l'espace rempli d'eau original.

La Figure 2.20 montre la variation de la porosité totale en fonction de la température d'un béton ordinaire et d'un BHP mesurée par Kalifa et al cité par [Gaweska 04] par la méthode de saturation d'eau.

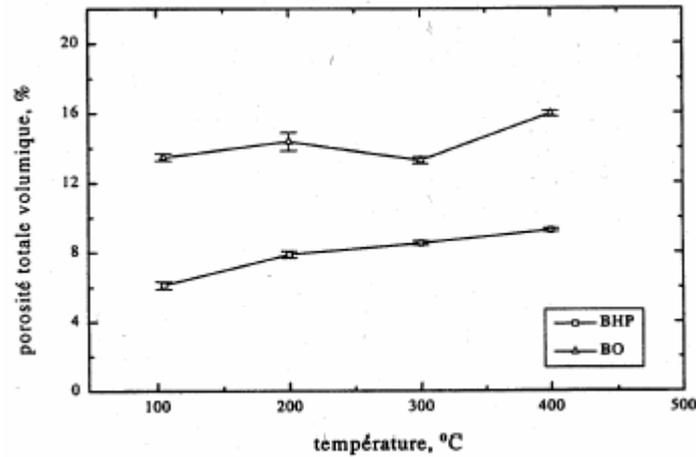


Figure 2.20: Porosité totale à l'eau en fonction de la température de conditionnement

À 105°C le pourcentage de porosité est de 1% pour le BHP et de 5 % pour les BO

Entre 105°C et 400°C, la porosité augmente de 3%. Cette croissance est associée au départ d'eau, qu'elle soit présente dans le réseau ou chimiquement liée.

Kalifa explique que la diminution de porosité du BO entre 200°C et 300°C est associée à la densification due à l'hydratation complémentaire et à une carbonatation de la portlandite en condition d'autoclavage interne, c'est-à-dire sous une pression supérieure à la pression atmosphérique. Par contre, cette densification n'est pas observable dans le BHP qui contient très peu de portlandite, grâce à la présence de fumée de silice.

A haute température, des recherches prouvent qu'il y a changement de volume de pores et de structure. La figure 2.21 présente la distribution des pores obtenue à différentes températures jusqu'à 600°C

La température engendre une augmentation du volume total ainsi que de la dimension des pores. Elles peuvent être dues à la rupture des cloisons capillaires sous l'effet de la vaporisation de l'eau durant le chauffage ainsi qu'à la microfissuration engendrée par les dilatations différentielles de la matrice cimentaire et des granulats (Noumowé 1995).

En travaillant sur la perméabilité, [Noumowe 06], ont trouvé que la perméabilité augmente quand la température dépasse 150°C, due à la densification du réseau poreux et à un accroissement du diamètre moyen.

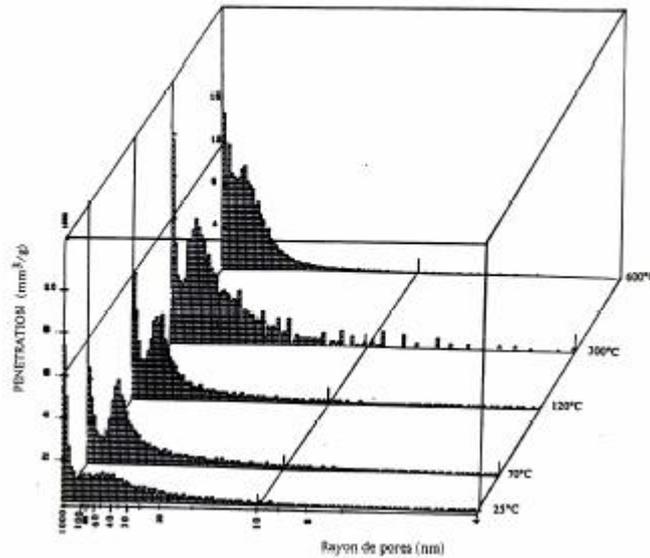


Figure 21 : Distributions des pores d'un béton ordinaire obtenues à différentes températures [Noumowé 95].

2.5.4 Fissuration:

Le chauffage du béton active le retrait de la pâte de ciment hydraté. Une haute température crée une superposition de retrait et de réactions de décomposition engendrant des fissures dans le béton. En plus du retrait, des contraintes mécaniques et dissociées à 400°C. Cette température semble être la température critique, pour un béton de ciment portland, au-dessus de laquelle il ne peut rester pour une durée significative sans désintégration et fortes fissurations dues au refroidissement à humidité atmosphérique.

La rapide dégradation des propriétés mécaniques après 300°C semble due à l'augmentation de porosité et de microfissuration au-dessus de cette température

[Doughil 68] a indiqué que la différence de déformation entre l'agrégat et la pâte de ciment peut initialement induire des petites contraintes de compression dans la pâte de ciment; quand la température augmente, les contraintes de compression diminuent et se changent en grandes contraintes de traction

[Roux 74] a conclu que les contraintes de traction peuvent être assez grandes pour causer des fissures en béton

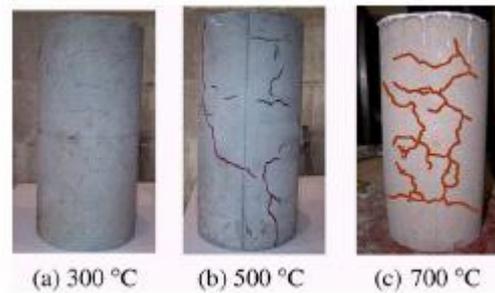


Figure 2.22 : fissure dans le béton à différente température

2.5.5 L'éclatement:

Lors d'un incendie, l'éclatement provoque la désintégration des couches superficielles du béton, exposant ainsi le noyau du béton aux températures élevées. Augmentant la vitesse de transmission de la chaleur au noyau.

L'éclatement explosif peut réduire sensiblement la capacité portante de la structure et doit être considéré en conservant les structures en béton au feu [Hertz 03].

La connaissance actuelle du sujet de l'éclatement est discutée par Hertz dans lequel il conclut que l'éclatement n'est pas un problème pour les bétons non dense; les bétons avec 3% de poids d'humidité

[Khoury 79] a annoncé que le degré d'humidité critique est autour de 2.5% pour le BHP et de 3.5% pour le BO pour donner l'éclatement

L'éclatement est attribué à la montée de la pression interstitielle lors de l'échauffement [Kodur 99]. On croit que le BHP est plus sensible à la montée de la pression en raison de sa faible perméabilité, par rapport au BO. La très forte pression de vapeur d'eau produite lors de l'exposition au feu, ne peut s'échapper à cause de la grande masse volumique et de la faible perméabilité du BHP. Elle atteint la vapeur saturante qui est d'environ 8Mpa à 300°C. Cette pression interne est souvent trop forte pour le BHP, dont la résistance à la traction est d'environ 5Mpa.

Khoury a annoncé que l'éclatement est influencé par la perméabilité, le degré de saturation, dimension et type d'agrégat, la forme et la taille de l'éprouvette.

Quelques facteurs sont critiques pour que l'éclatement se produit comme le taux de chauffage et le degré de charge.

Ce qui été confirmé par d'autres chercheurs [Kodur 99], [Persson 03]

L'éclatement de béton peut être fortement réduit par l'ajout de petites quantité (de l'ordre de 0.1% en volume) de fibres de polypropylène à température de fusion [Noumowe 02], les

fibres de polypropylène créent des canaux permettant à la pression de vapeur de s'échapper du béton empêchant ainsi les petites explosions qui provoquent l'éclatement.

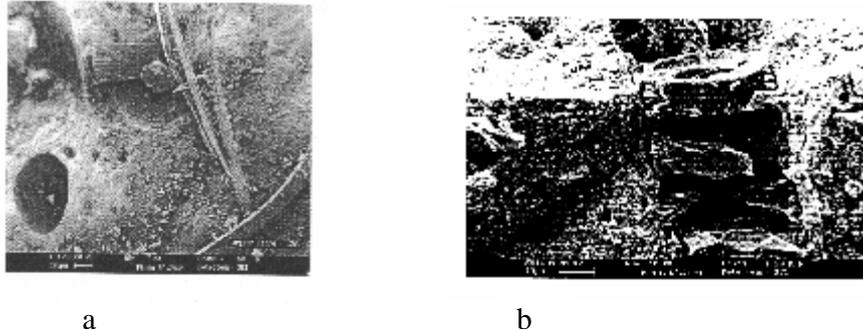


Figure 2.23 : l'ajout de fibre de polypropylène. a- avant fusion, b- après fusion [Noumowe 03]

2.6 PARAMETRES INFLUENT LE COMPORTEMENT DE BETON:

Plusieurs paramètres influencent la résistance de béton à haute température, les paramètres dominant sont la vitesse de chauffage, la nature de granulats, nature de ciment et des ajouts le taux de chargement, les fibres.

2.6.1 La vitesse de chauffage et de refroidissement:

Si la vitesse de chauffage est suffisamment lente, l'eau non liée est complètement éliminée à 120°C, si non le processus d'évaporation peut se prolonger au de la de 200°C. ce qui peut causé une augmentation de pression de vapeur au sein de béton, en plus d'un fort gradient thermique peut provoquer l'éclatement du béton, où Khoury a annoncé que la vitesse de chauffage doit dépasser 180°C/h pour avoir l'éclatement.

L'application d'eau sur un béton chaud lors de la lutte contre un incendie est équivalent à une trempe ; elle provoque une grande chute de la résistance en raison des très importants gradients thermiques créés dans le béton.

Une étude faite par [Metin 05] sur des micros béton ordinaire de 34Mpa et des microbétons à haute performance de 71Mpa refroidis à l'air et avec l'eau

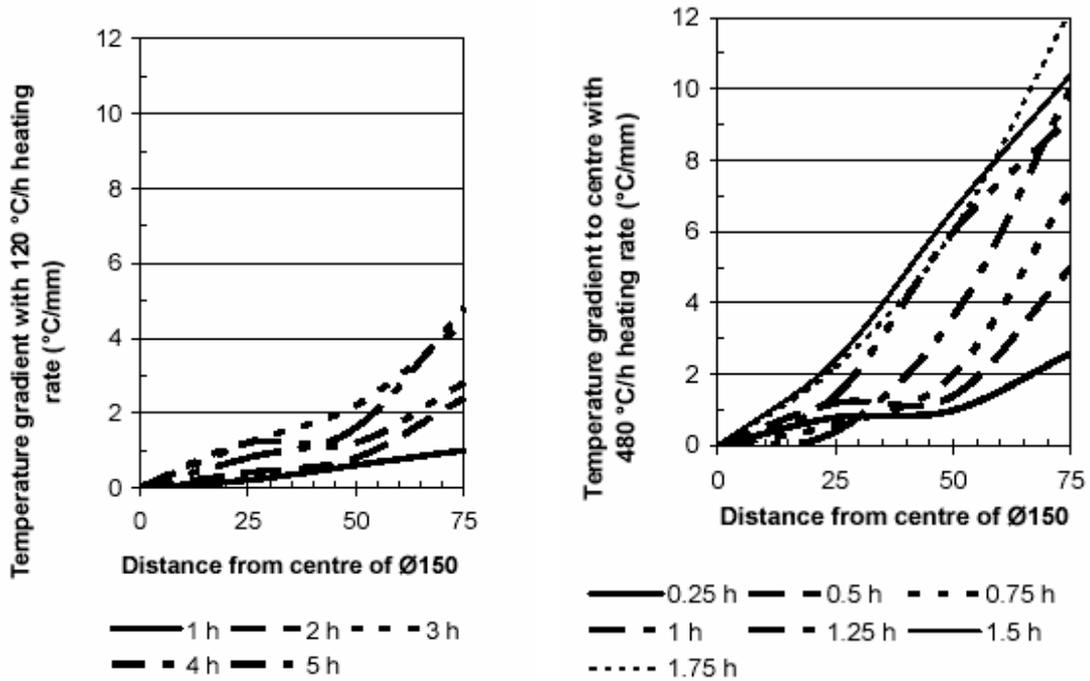


Figure 2.24 : Gradient thermique dans une éprouvette cylindrique [Person 03]

Les résultats sont présentés sur la figure 2.25 où on constate que la perte de résistance dans les spécimens refroidis à l'air est moins que les pertes de résistance des spécimens refroidis avec l'eau. Le gain de résistance est de 13% pour les spécimens refroidis à l'air et de 5% pour les spécimens refroidis avec l'eau.

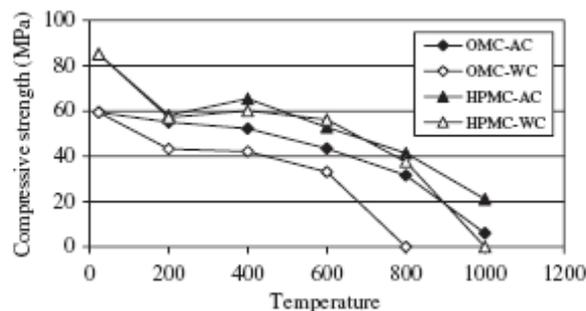


Figure 2.25 : variation de la résistance à la compression avec la température [Metin 05]

2.6.2 Nature de granulat:

Les deux granulats utilisés couramment pour faire de béton, le granulat carbonaté (surtout le calcaire) et le granulat siliceux (surtout le quartz). A haute température, les granulats se décomposent et subissent des transformations chimiques et minéralogiques importantes qui modifient les caractéristiques micro structurelles du matériau.

Une analyse thermique différentielle (ATD) permet de déterminer, par des pics endothermiques et exothermiques, les températures auxquelles une instabilité peut survenir dans les granulats. Les analyses thermo gravimétriques (ATG), donnent des indicateurs de la progression des réactions de décomposition en mesurant les variations de masse des granulats au cours du chauffage. [Menou 04]. La Figure 2.26 montre les résultats de perte de masse de deux types de granulats (calcaire et siliceux).

Les résultats d'analyses montrent que les granulats calcaires et siliceux sont relativement stables jusqu'à 500°C.

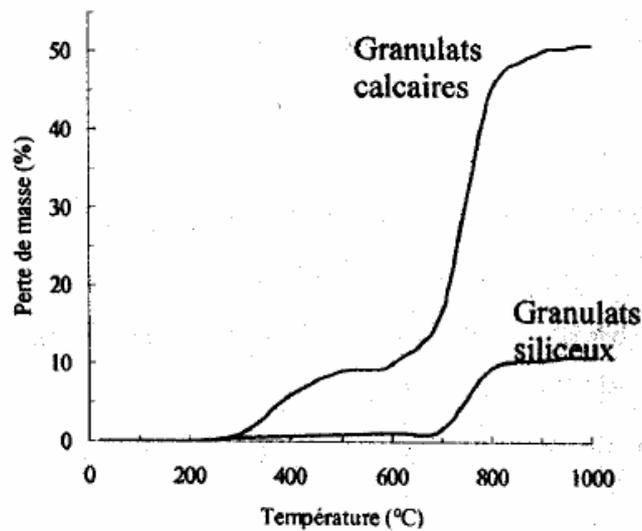


Figure 2.26: Perte de masse de deux types de granulats (calcaire et siliceux) d'après Harmathy et Allen 73 [Menou 04].

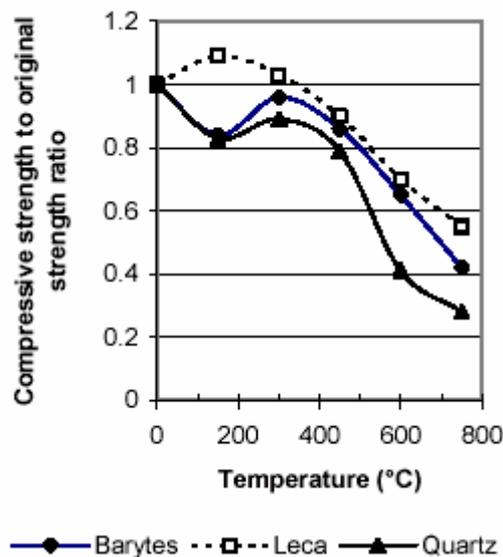


Figure 2.27: Résistance à la compression par rapport à la résistance initiale [Person 03]

et en terme de perte de poids pour les bétons contenant différent type de granulats, La Figure 2.28 montre les résultats d'analyse thermo gravimétriques (ATG) menées par différents auteurs sur des bétons comprenant différents granulats. Ils permettent globalement de suivre l'évolution de la perte de masse au cours du chauffage, on observe ainsi une perte de l'eau libre entre 20°C et 200°C, une perte de l'eau liée chimiquement entre 200 et 500°C et une perte liée aux dégradations chimiques des différents types de granulats au delà de 500°C.

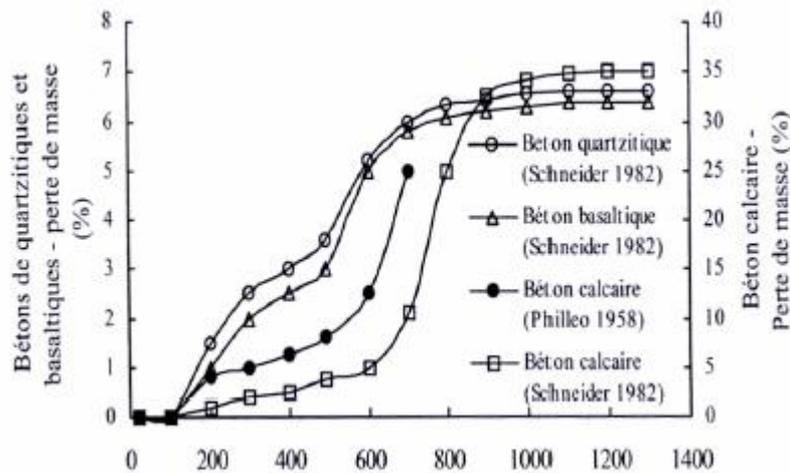


Figure 2.28 : Perte de masse des bétons de différents types granulats en fonction de la température

D'après Schneider [Menou 04]

2.6.2.1 granulats calcaires:

Assurent le meilleur tenu au feu et la plus grande résistance à l'éclatement (Kodur 1998)

La propagation de température y est retardée par la calcination du calcaire qui transforme le carbonate de calcium ou de magnésium en oxyde de calcium ou de magnésium

les risques de fusion n'existent pas car la température de fusion de l'oxyde est considérablement élevée par rapport aux températures pouvant être atteintes lors des incendies de bâtiment même avec les impuretés qui sont ordinairement présentées dans ces matériaux

Après chauffage, une exposition à l'air pour quelques semaines conduit à l'hydratation des oxydes et à la dégradation du béton. Les surfaces des bétons nécessitent des réparations après toute exposition à une chaleur considérable.

2.6.2.2 granulats siliceux:

La fissuration et la rupture d'un béton fait avec ces granulats sont causées par le changement brusque de volume. Le quartz et d'autres formes de silice changent de structure et de volume autour de 573°C. Ce changement peut se poursuivre à des températures plus élevées si le

chauffage est rapide. Le ralentissement des effets de la chaleur peut être dû aux inclusions de liquide et d'eau dans la forme hydratée de la silice. La température de la fusion est au-dessus des températures considérées pour des incendies de bâtiment.

Pour les granulats légers des études faites ont trouvées que le remplacement de granulats ordinaires par des granulats légers indique que les propriétés mécaniques du béton de granulats légers sont moins affectées par l'exposition à la haute température que celle de béton ordinaire [Noumowe 03].

2.6.3 Nature de ciment et des ajouts :

Le choix de liant est important mais aussi sa compatibilité avec le granulats utilisé. Le béton de ciment alumineux peut résister à des très hautes températures jusqu'à environ 1250°C avec des granulats de briques réfractaires concassés, jusqu'à 1600°C avec des granulats spéciaux, tel que l'alumine fondue ou le carbure de silicium.

Il n'y a pas de différence dans la perte relative de résistance entre un béton confectionné avec du ciment portland seulement et un béton comportant des cendres volantes ou de laitier de haut fourneau granulé broyé [Carette et al 82].

Le comportement des cendres volantes contenant beaucoup de chaux est sensible à la température [Neuville 00].

2.6.4 Fibres :

L'ajout de fibres de polypropylène réduit l'effritement des pièces de charpente en BHR lors d'un incendie [Kodur 00]. L'une des théories les plus répandues à ce propos veut qu'en fondant à une température relativement basse de 170 °C, les fibres de polypropylène créent des « canaux » permettant à la pression de vapeur de s'échapper du béton, empêchant ainsi les petites « explosions » qui provoquent l'éclatement. L'étude de l'IRC a montré qu'il faut environ 0,1 à 0,25 % (en volume) de fibres de polypropylène pour réduire l'effritement du béton. L'Institut poursuit ses recherches en vue de déterminer la teneur en fibres optimale pour différents bétons. La figure 2.27, qui fait voir des blocs de BHR après deux heures d'exposition au feu, illustre l'effet des fibres de polypropylène sur l'éclatement (Bilodeau et al 98).

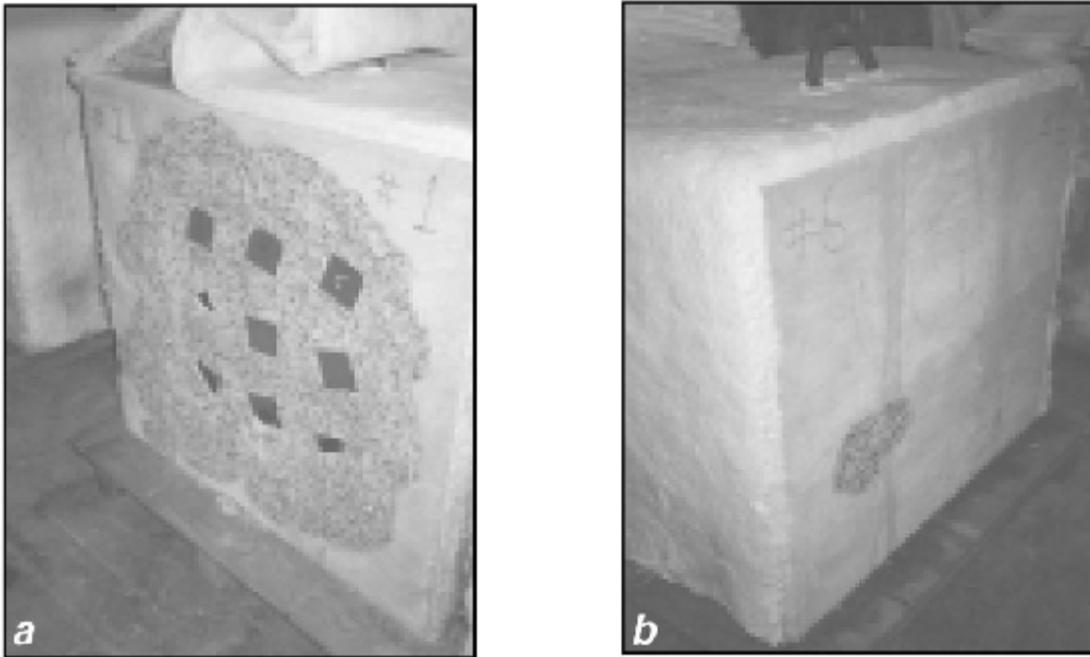


Figure 2.29 : Vue de blocs en béton haute résistance exposés pendant deux heures à un feu d'hydrocarbures : a) bloc sans fibres de polypropylène; b) bloc avec fibres de polypropylène [Kodur 99]

Les fibres d'acier réduisent aussi l'effritement du BHR et augmentent sa résistance au feu. Elles renforcent la résistance en traction du béton, même à haute température, et aident à résister à la pression interstitielle produite sous l'effet de la vaporisation de l'eau, lors d'un incendie. La résistance à la traction est alors portée à 5-7 MPa, ce qui dans bien des cas suffisent à assurer une résistance au feu de deux à trois heures sans effritement important. Des essais en vraie grandeur ont montré que l'incorporation de fibres d'acier dans le BHR améliore sensiblement la tenue au feu de poteaux d'acier tubulaires remplis d'un tel béton [Kodur 98]. Cependant, lorsque la pression interstitielle dépasse la résistance en traction du béton, il peut y avoir effritement. La figure 2.30 présente les résultats de l'étude menée par [Lau 06], sur des bétons fibrés et des bétons sans fibres. Ces résultats montrent que les fibres améliorent la résistance de béton à haute température.

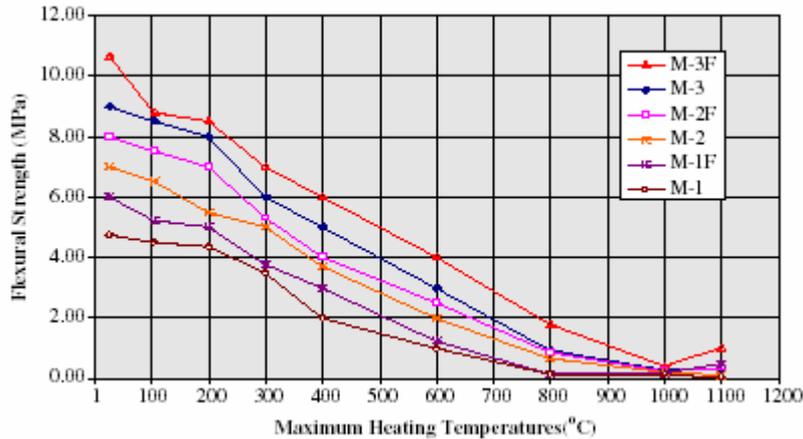


Figure 2.30 : l'évolution de la résistance à la flexion avec la température des BO (M) et des BO avec 1% de fibre (MF) [Lau 06]

2.7 CONCLUSION :

Dans cette partie, nous avons regroupé à partir des différents travaux, les évolutions des Caractéristiques thermiques, hydriques et mécaniques de différents bétons à haute température.

Parmi les paramètres significativement influençant le comportement du matériau béton à haute température figure la nature et la quantité des ajouts dans le matériau.

Ainsi, l'élévation de la température dans les bétons entraîne une destruction des hydrates constitutifs de la pâte de ciment, cette destruction implique un affaiblissement du matériau. En connaissant que le BAP enveloppe une grande quantité de pâte au détriment de granulats ceci va poser un problème dans sa tenue à haute température.

Durant l'augmentation de la température l'eau a une tendance à partir du matériau en commençant par l'eau libre faiblement liée, passant progressivement à la déshydratation des hydrates du gel CSH.

Nous proposons dans la Deuxième Partie de ce mémoire, d'étudier, en utilisant les moyens expérimentaux, l'influence des divers paramètres dont l'impact sur le comportement mécanique n'était pas encore étudié ou cette influence n'était pas déterminée dans les conditions <résiduelles> de la réalisation des observations.

Par conséquent, dans ce travail de recherche, qui a pour but la compréhension de comportement de béton autoplaçant à haut température et de comparer les BAP aux bétons vibrés de même résistance, nous nous attacherons à confirmer ou infirmer les tendances révélées par les résultats bibliographiques. Pour cela, et avant d'entamer notre sujet, il est nécessaire de caractériser les constituants de béton que nous allons utiliser. Après, la phase

de mise au point des formulations, et leurs caractérisations, nous étudierons la tenue au feu de ces nouveaux bétons(BAP), ce qui constituera les trois chapitres de la deuxième partie de ce mémoire.

PARTIE 2 :

ETUDE EXPERIMENTALE

CHAPITRE 3 :
CARACTERISATION ET METHODOLOGIE D'ESSAIS

CHAPITRE 3 :

CARACTERISATION ET METHODOLOGIE D'ESSAIS

3.1. INTRODUCTION :

Dans l'industrie nucléaire, le béton est lourdement utilisé comme matériau de structure et constitue un matériau de protection de radiation. Le béton de structure utilisé sur les sites nucléaire peut être exposé aux hautes températures et fortes contraintes mécaniques pendant des conditions de service ou accidentelles. Les gradients de température et de pression de pores dans les bétons provoquent des contraintes internes qui peuvent engendrer des microfissures et des éclatements des bétons.

Dans des conditions environnementales aussi sévères, l'intégrité du béton est à examiner. La détermination de l'effet couplé des transferts de chaleur et de masse dans ce béton devient important pour la sécurité des ouvrages. La vulgarisation de l'utilisation du béton autoplaçant n'est pas sans poser de problème.

Revenons d'abord sur les propriétés intéressantes qu'offre le matériau suivant les différentes formulations. Ensuite nous analysons l'évolution des propriétés de ce béton par rapport à l'évolution de température, les paramètres dominants, les différents changements qui s'opèrent au sein de ce nouveau béton chauffé.

La prédiction des éclatements du béton est d'un grand intérêt pour la sécurité des ouvrages, aussi bien que pour la science et la technologie du béton. La recherche bibliographique sur ce nouveau matériau et sur le phénomène de la tenue au feu nous a permis non seulement de faire le point sur l'état actuel des connaissances dans ces domaines, mais aussi de faire ressortir les différents paramètres qui influencent sur celui-ci, qui concernent d'une part le matériau lui-même (teneur de fines, nature de béton, introduction des fibres métalliques,...), d'autre part la sollicitation extrême (température de chauffage, durée, vitesse,...), et surtout le mode de conservation sous un choc thermique.

L'objectif de notre étude expérimentale est de caractériser au niveau tous les constituants rentrant dans la conception des bétons autoplaçants à base de matériaux locaux et ainsi d'un point de vue de suivre l'évolution des propriétés résiduelles par rapport à l'élévation de température, ainsi que les variations dimensionnelles et perte de masse sous un choc thermique.

Dans ce chapitre nous présenterons le programme expérimental ou matériaux testés. On décrit les matériaux ainsi que les méthodes d'essais utilisés. Les conditions de fabrication et de conservation des corps d'épreuves y sont aussi signalées.

3.2. MATERIAUX DE BASE UTILISES :

3.2.1 Les granulats :

Les normes NFP 18-101 D NF P18-541 définit les caractéristiques des granulats pouvant être utilisés pour la confection des bétons.

Les granulats utilisés dans les travaux de bâtiments et de génie civil doivent répondre à des impératifs de qualité et à des caractéristiques propres à chaque usage, il est nécessaire d'en établir les caractéristiques par différents essais de laboratoire.

a- Analyse granulométrique :

Les granulats sont d'origine naturelle concassés calcaires proviennent de la carrière Hedna de Ain Smara. De cette carrière nous avons pu commander et obtenir deux classes granulaires délivrées sous les appellations commerciales suivantes :

Sable 0/5, Gravier 8/15.

L'analyse granulométrique permet de déterminer la grosseur et les pourcentages pondéraux respectifs des différentes familles des grains constituant l'échantillon.

L'essai consiste à classer les différents grains qui constituent l'échantillon en utilisant des tamis, emboîtés les uns sur les autres, dont les dimensions des ouvertures sont décroissantes du haut vers le bas. L'échantillon étudié est mis sur le tamis supérieur et le classement des grains est obtenu par vibration de la colonne de tamis.

Dans ce qui suit, on va présenter les résultats de l'essai pour les granulats utilisés.

b- Module de finesse :

Le module de finesse est défini comme étant la somme des refus cumulés (en pourcentage ramené à l'unité) sur les tamis de modules : 23, 26, 29, 32, 35, 38 et il est souhaitable d'avoir des valeurs comprises entre 2,2 et 2,8.

c- Mesure de coefficient d'aplatissement <NF P 18-561> :

L'essai de détermination du coefficient d'aplatissement est l'un des essais permettant de caractériser la forme plus ou moins massive des granulats.

La forme d'un granulats est définie par trois grandeurs géométriques :

- la longueur L - l'épaisseur E - la grosseur G
- le coefficient d'aplatissement A d'un ensemble de granulats est le pourcentage pondérale des éléments qui vérifient la relation : $G/E > 1,58$

les analyses granulométriques pour les granulats utilisés pour tous les bétons ont été portées sur le tableau 3.1

Caractéristiques géométriques des granulats utilisés				
Tamis	Module	Granulats calcaires concassés		
		0/3		8/15
0,08	20	10		
0,16	23	15,5		
0,25	25	20		
0,315	26	22		
0,5	28	28		
0,63	29	32		
0,8	30	35,5		
1,25	32	45		
2,5	35	75		
4	37	92		
5	38	100		0
6,3	39			12
8	40			37
10	41			76
12,5	42			99
16	43			100
20	44			
25	45			
Module de finesse		3,1		/
Coefficient d'aplatissement		/		19%

Tableau 3.1 : les résultats de l'analyse granulométrique, module de finesse et le coefficient d'aplatissement.

d- Détermination de la masse volumique absolue et apparente des granulats :

<NF P 18-554> <NF P 18-555>.

Leur détermination permet de classer les granulats selon leur densité et présenté aussi une grande utilité dans les études relatives à la composition et la formulation des bétons. Les résultats obtenus sont conformes aux normes.

Le tableau 3.2 présente les résultats obtenus.

Caractéristiques physiques des granulats utilisés		
	Granulats calcaires concassés	
	0/5	8/15
Masse volumique absolue	2,76	2,63
Masse volumique apparentes	1,44	1,35

Tableau 3.2 : Caractéristiques physiques des granulats utilisés.

e- Mesure de la propreté de granulat :

La propreté de granulats peut s’apprécier de différentes façons

- en utilisant les essais équivalents de sable <NF P 18-598> qui permettent, selon un processus normalisé, de quantifier la notion de propreté d’un sable.
- Par l’essai au bleu de méthylène <NF P 18-592> qui permet d’évaluer le degré d’activité des particules fines argileuses qui sont responsables, dans un large mesure de désordres et de non qualité dans les bétons.

f- Mesure de coefficient d’absorption <NF P 18-555>

Certains matériaux granulaires peuvent présenter une porosité interne qui est préjudiciable, en particulier, à la résistance au gel des bétons. En effet l’eau incluse dans le granulat provoque l’éclatement du béton lorsque celui-ci est soumis de manière prolongée à des basses températures.

Les résultats de nos essais ; conformes aux normes ; sont montrés dans le tableau 3.3

Caractéristiques physiques des granulats utilisés		
Propriétés mesurées	Granulats calcaires concassés	
	0/5	8/15
Equivalent de sable (%)	78,67	/
Valeur au bleu de méthylène	0,39	/
Coefficient d’absorption	1,1	1,35

Tableau 3.3 : Caractéristiques physiques des granulats utilisés

g- Caractéristiques mécaniques des granulats :

Lors de fabrication de béton, le malaxage est source de frottement intense entre grains. Si ceux-ci ne sont pas assez résistants, ils peuvent se casser en produisant des sables ou des éléments fins. Les essais effectués sont :

- Résistance au choc ; essai Los Angeles : cet essai est décrit en détail dans la norme NF P 18-573
- Résistance à l'usure ; essai Micro Deval : conforme à la norme NF P 18-572

Le tableau suivant regroupe les résultats obtenus. Ces résultats sont conformes aux normes.

Caractéristiques mécaniques des granulats utilisés		
Propriétés mesurées	Granulats calcaires concassés	
	0/5	8/15
LA (Les Angles)	20	23
FD (Fragmentation DYNAMIQUE)	19	18
MD (Micro Deval)	16	17

Tableau 3.4: Caractéristiques mécaniques des granulats.

h- Composition chimique de granulat :

Les essais chimiques effectués sur les différents granulats ont été réalisés au niveau du laboratoire des travaux publics de l'est <LTP Est>

Les résultats obtenus conformes aux normes sont représentés dans le tableau suivant

Caractéristiques chimiques des granulats utilisés	
Propriétés mesurées	Granulats calcaires concassés
Insoluble%	1,9
Sulfates %	Traces
Carbonates %	89
Chlorure %	0,29

Tableau 3.5: Caractéristiques chimiques des granulats.

3.2.2 Ciment:

Les ciments utilisés pour notre étude expérimentale sont un ciment de type CEM II/A 42,5 provenant de l'usine d'EL-Hamma région de Constantine.

Les différentes caractéristiques que se soit chimiques, physiques ou mécaniques du ciment utilisé sont établies sur des fiches techniques élaborées au niveau des laboratoires de l'usine même. Les différentes caractéristiques sont présentées dans les tableaux suivants.

Tableau 3.6 : composition chimique du clinker											
SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	chlorures	CaO libre	Résidus insolubles	P.A.F
27,83	6,21	3,12	57,22	0,94	2,02	/	/	0,00	0,88	2,28	2,41

Tableau 3.7 : Composition minéralogique du clinker		
Eléments	Abréviation	Teneur (%)
Silicate tri calcique	C ₃ S	56,60
Silicate bi calcique	C ₂ S	22,98
Aluminate tricalcique	C ₃ A	9,87
Alummino-ferrite tetracalcique	C ₄ AF	8,25

Tableau 3.8 : propriétés physiques du ciment					
Temps de prise		Expansion le chatelier		Surface spécifique (BLAINE)	Consistance normale
début	Fin	à chaud	à froid		
2h 50min	4h 06min	2,9	1,65	3891	26,91

Tableau 3.9 : Résistances mécaniques du ciment (bars)			
Essais	Age		
	2jours	7jours	28jours
Compression	143,2	266,4	433,1
Flexion	35,7	58,3	77,9

3.2.3 Eau de gâchage :

L'eau utilisée dans notre cas est l'eau de robinet, provenant de la source Fesguia qui alimente notre laboratoire.

Nous avons soumis un échantillon de cette eau à une analyse chimique dont les résultats recueillis sont présentés au tableau 3.10

Les résultats obtenus répondent aux prescriptions de la norme NF P 18-303 relative à la concentration en matières en suspension et sels dissous

Tableau : concentration en matières et sel dissout dans l'eau (mg/l)	
Echantillons	Concentrations
Matière en suspension	Traces
Sels dissous	1470
Sulfates (SO ₄ ⁻²)	413,56
Chlorures (Cl)	298,2
PH	7,9
Calcium (Ca ⁺²)	36
Magnesium (Mg ⁺²)	60
Bicarbonates (HCO ₃ ⁻)	27
Carbonates	3,5
Temperature (°C)	19

Tableau 3.10 : les résultats de l'analyse chimique effectuée sur cet eau .

3.2.4 Adjuvant (Super plastifiant) (EN934-2) :

Les adjuvants sont des produits solubles dans l'eau qui incorporés aux bétons à des doses qui doivent être inférieures ou égales à 5% du poids de ciment permet d'améliorer certaines de ses propriétés,

Dans notre étude on a utilisé le Super plastifiant MEDAPLAST SP 40: (Haut réducteur d'eau / Conforme à la norme EN 934-2), permettant d'obtenir des bétons et mortiers de très haute qualité. En plus de sa fonction principale de super plastifiant, il permet de diminuer considérablement la teneur en eau du béton.

Le MEDAPLAST SP 40 est introduit dans l'eau de gâchage, Il est recommandé d'ajouter l'adjuvant dans le béton après que 50 à 70% de l'eau de gâchage ait été introduite.

Il se caractérise par :

- Forme.....Liquide
- Couleur.....Marron
- PH.....8,2
- Densité..... 1,20 ± 0,01
- Teneur en chlore.....< 1g/L

Grâce à ses propriétés le MEDAPLAST SP 40 permet :

Sur béton frais :

- d'améliorer la fluidité
- d'augmenter la maniabilité
- de réduire l'eau de gâchage
- d'éviter la ségrégation
- de faciliter la mise en œuvre du béton

Sur béton durci :

- d'augmenter les résistances mécaniques même à jeune âge
- de diminuer la porosité
- d'augmenter la durabilité
- de diminuer le retrait

3.2.5 Les additions :

a- Filler :

Les additions que nous avons utilisées dans notre recherche sont des éléments qui représentent des dimensions inférieurs à 80µm. des fillers calcaire, de provenance ENG d'El Khroub, noté FC ; dont les principales caractéristiques que nous présentons proviennent des fiches techniques élaborées au niveau des laboratoires de l'ENG.

Composant	Teneur en %		Composant	Teneur en %
SiO ₂	0.06		Al ₂ O ₃	0.09
Fe ₂ O ₃	0.02		CaCO ₃	99
MgO	0.01		SO ₃	0.01
Perte au feu	43.8		PH	9

Tableau 3.11 : composition chimique du fillers calcaire.

Fillers	Poids spécifique	Densité apparente	Blancheur	Prise d'huile	Humidité
FC	2.7 Kg/l	1.23	92%	18%	0.1%

Tableau 3.12 : caractéristiques physiques des fillers

En ce qui concerne les morphologiques du filler calcaire utilisé, le diamètre moyen des grains des fillers <diamètre pour lequel 50% des fillers sont inférieur> est de l'ordre 19µ. 98% des

éléments du fillers présentent un diamètre inférieur à 200 μ , et 26% un diamètre inférieur à 10 μ .

b- Fibres:

les fibres utilisés dans nos essais, sont des fibres métalliques industrielles de 50mm de longueur et 2mm de largeur et 0,4 d'épaisseur, de forme ondulés, provenant du complexe industriel Granitex, Oued Smar, Alger. Le choix de ce type de fibre est justifié par la forme qui donne une bonne adhérence avec la matrice.

Les caractéristiques des fibres utilisés sont donnés dans le tableau 3.13

Type	Long (mm)	Larg (mm)	Epais (mm)	forme	Elancement Long/epais	Masse volumique (kg/m ³)
Acier	50	2	0,4	ondulé	125	7200

Tableau 3.13 : caractéristiques des fibres.

3.3. PROGRAMME EXPERIMENTAL :

Les bétons soumis aux essais dans la présente étude sont des bétons à base de matériaux locaux. La conception de tous les bétons (bétons autoplaçants, béton vibré, bétons autoplaçants renforcés de fibres métalliques) et tous les essais ont été réalisés au sein du laboratoire Matériau et Durabilité des Constructions. Tous les essais normalisés ont été effectués dans le cadre des normes AFNOR (et leurs équivalentes de Normes Algériennes NA).

Notre objectif est de trouver des bétons autoplaçants fluides comme le stipulent les normes au cahier des charges et un béton vibré (BV) d'égale résistance avec le béton autoplaçant de référence BAP1.

Quelques essais préliminaires ont effectivement montrés que l'ouvrabilité (affaissement, étalement, écoulement) des différents bétons est fortement influencée par la teneur des fines, l'introduction d'un superplastifiant et la présence de fibres.

Ainsi, différentes méthodes de formulation des mélanges sont comparées

- bétons autoplaçants BAP : méthode japonaise
- béton vibré BV : méthode Dreux-Gorisse
- bétons renforcés de fibres BAPF : méthode Baron-Lesage (Delarrard)

Nous envisageons de travailler sur le comportement au feu des bétons élaborés. Nous abordons les problèmes par analogie avec les nombreuses études menées à travers le monde mais dans le contexte Algérien (conditions et matériau locaux)

Le tableau 3.14 récapitule les différents compositions utilisés dans notre étude.

Différente compositions utilisées dans la recherche		
N°d'ordre	Notations	Type de BAP
1	BAP1	Béton autoplaçant de référence avec F/F+C=0.33
2	BAP2	Béton autoplaçant avec F/F+C=0.16
3	BAP1F1	BAP1 avec (0,5% de volume) fibres métalliques
4	BAP2F	BAP2 avec (0,5% de volume) fibres métalliques
5	BAP1F2	BAP1 avec 1% de volume de fibre métallique
6	BV1	Béton Vibré avec une résistance égale à celle de BAP1

Tableau 3.14 : les différents bétons et leur désignation

3.3.1 Formulation de béton :

La méthode utilisée est la méthode japonaise à cause de sa simplicité et elle ne nécessite pas des logiciels qui ne sont pas disponibles. Le principe de cette méthode est le suivant :

- la teneur volumique aux gravillons du béton est fixée à 50% du volume de solide
- le volume de sable est fixé à 40% de volume total du mortier
- l'optimisation de la pâte s'effectue sur un mortier dont la teneur volumique en sable est égale à 40%
- l'eau, le superplastifiant et les fines sont ajustés pour les mortiers pour obtenir une viscosité suffisante et une fluidité importante

Les dosages obtenus sont regroupés dans le tableau 3.15

	Ciment	filler	Eau	Super plastifiant	gravier	sable	fibre
BAP1	400	200	211	9.60	772	762	0
BAP2	500	100	221	10.80	772	762	0
BAP1F1	400	200	211	9.60	745	762	38.25
BAP2F	500	100	221	10.80	745	762	38.25
BAP1F2	400	200	211	9,60	718	762	76,5
BV	400	0	228,5	0	914,35	850,92	0

Tableau 3.14 : Composition en mètre cube des mélanges

3.3.2 Confection du mélanges :

pour la confection des gâchés, nous avons utilisés plusieurs équipement et fournitures courants afin d'avoir un composant bien homogène (balance, récipient, spatules, truelles, huile de coffrage...), mais également des appareils de mesure tel que malaxeur, cône d'abrams, maniabilimètre LCPC, aéromètre....

3.3.2.1 Malaxage :

L'utilisation du malaxeur est impérative dans le béton. Un malaxeur à axe vertical et mouvement planétaire de capacité 200 litres, le temps de malaxage suivant la norme NFP18-404 est de :

Un mélange à sec de ciment, granulat, filler pendant 120 seconde. Ensuite la solution de l'eau + super plastifiant, le tout malaxé encore pour 120s

3.3.3 Caractérisations des mélanges :

a- l'étalement/l'affaissement :

C'est l'essai le plus couramment utilisé car il est très simple à mettre en œuvre. Il est utilisable tant que la dimension des granulats ne dépasse pas 40mm. Cet essai est traditionnellement utilisé pour mesurer l'affaissement d'un béton et ainsi définir son caractère plus ou moins plastique <norme NFP 18 451 (NA 431)>. L'affaissement des BAP étant total, c'est une mesure du diamètre de la galette obtenue après étalement qui est réalisée. Cette mesure permet de déterminer la capacité du matériau à s'écouler en milieu non confiné et sans obstacle. Voir figure 3.1



Figure 3.1 : résultat d'essai d'étalement

b- Air occlus :

La mesure de l'air occlus a été effectuée au moyen d'un aéromètre de huit litres modèle « CONTROLS ». figure 3.2

On commence d'abord par remplir la chambre inférieure de l'appareil, sur trois couches égales tout en vibrant à chaque fois, on fixe ensuite la chambre supérieure, on injecte de l'eau à l'aide d'une pissette dans le premier robinet, le deuxième est ouvert, quand l'eau commencera à sortir de ce dernier 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 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.



Figure 3.2 : l'aéromètre utilisé.

c- Densité :

On se sert toujours de la chambre inférieure de l'aéromètre remplis par le mélange avant la mesure de l'air occlus , si les poids de la chambre pleine et vide sont successivement P et P₀

,la densité du mélange frais est r tel que : $r = \frac{P - P_0}{V}$ (V = 8 litres , volume de la chambre inférieure)

3.3.4 Fabrication des éprouvettes :

Le programme expérimental comprend trois types d'essais devant être effectués à des échéances bien précises, chaque type d'essai comprend plusieurs :

- Eprouvettes cylindriques
- Eprouvettes prismatiques

Le tableau 3.15 définit le programme expérimental et le nombre d'essais effectués dans chaque cas s'explique d'abord par l'importance des sollicitations pour l'objectif envisagé.

Les nombres indiqués correspondent aux essais les plus significatifs, les cas aberrants étant exclus.

Le programme expérimental s'est étendu sur une période d'environ de 6 mois, à raison d'une configuration au maximum chaque 10 jours.

	Compression			Traction par flexion		
	Type	dimension	nombre	type	dimension	nombre
BAP1	cylindrique	16x32cm	3	prismatique	7x7x28cm	3
BAP2	cylindrique	16x32cm	3	prismatique	7x7x28cm	3
BAPF1	Cylindrique	16x32cm	3	prismatique	7x7x28cm	3
BAPF2	cylindrique	16x32cm	3	prismatique	7x7x28cm	3
BAP1F2	cylindrique	16x32cm	3	prismatique	7x7x28cm	3
BV1	cylindrique	16x32cm	3	prismatique	7x7x28cm	3

Tableau 3.15 :les éprouvettes utilisés pour performances mécaniques.

a - Eprouvettes Cylindriques :

Conformément à la norme NF P18-406 (NA427), les éprouvettes cylindriques s'élancent 2, dont les extrémités ont été préalablement rectifiées sont utilisées pour l'essai d'écrasement compression simple.

Ce type d'éprouvette a été conçu pour la détermination de la résistance de la compression, la charge de rupture est la charge maximale enregistrée au cours de l'essai à 28 jours.

b. Eprouvettes prismatiques :

Ces éprouvettes sont réalisées pour les essais de traction par flexion selon les normes NFP18-407(NA428),qui précisent les détails d'exécution ,les éprouvettes sont des prismes de section carré et l'élancement 4 .

Dans notre cas des prismes 7x7x28cm, le croquis suivant décrit le dispositif de chargement destiné à cet essai.

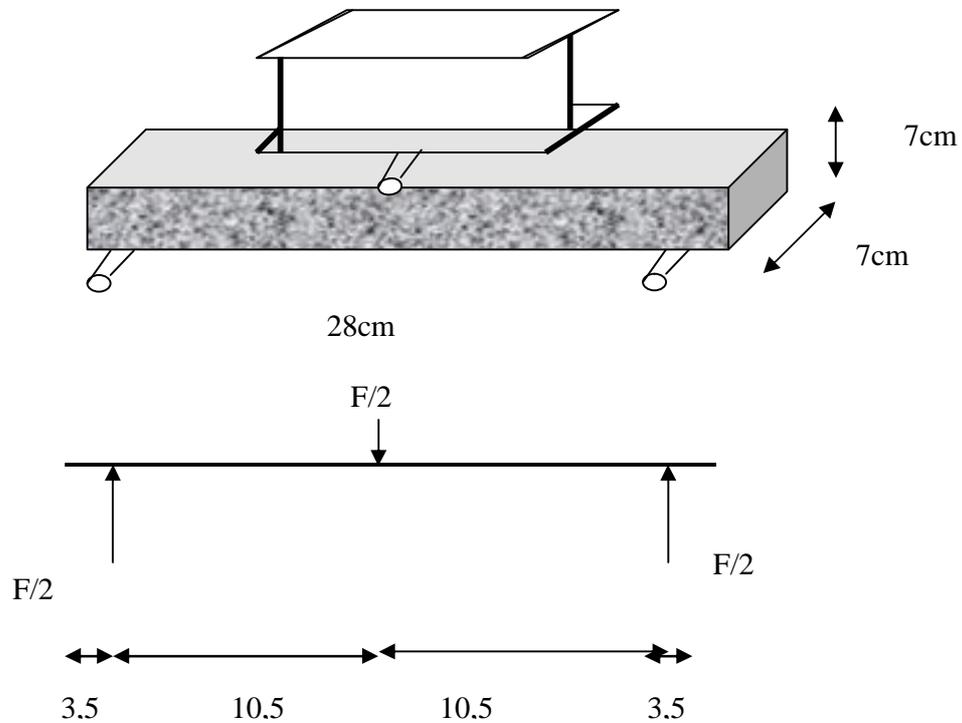


Figure3.3 : schématisation d'essai de traction par flexion.

3.3.4.1 Remplissage :

Le remplissage se fait en deux ou trois couches successives suivant les dimensions des moules, jusqu'au meilleurs remplissage.

La vibration est le moyen le plus courant pour donner au béton traditionnel (vibré) sa compacité maximale par élimination des vides d'air. Une table vibrante à été utilisé.

Les BAP se distinguent des BV, par leur propriété à l'état frais. Il sont capable de s'écouler sous leur propre poids, donc l'absence de vibration,... La finition de la surface est effectuée à l'aide d'un règle.

Après mise en place du béton dans les moules (fabrication des éprouvettes), ils sont laissés pendant 24 heures dans la salle de fabrication sous protection d'un film de plastique souple, Après 24 heures, les éprouvettes sont démoulées. on a remarqué que la qualité des produits finis (aspect apparent) était très bonne.

3.3.4.2 Conservation :

Pour chaque formulation des éprouvettes cylindriques 16x32cm destinées pour l'essai de compression et des éprouvettes prismatiques 7x7x28cm destinées pour l'essai de traction par flexion ont été confectionnés.

La cure consiste à maintenir des conditions de température et d'humidité propices à l'hydratation de ciment. L'eau doit être continuellement disponible aux particules de ciment pour que l'hydratation se poursuive. Cette hydratation continue rendra le béton plus fort, moins poreux et plus durable [Benmarce 05]. Pour maintenir l'humidité, les éprouvettes sont protégées de la dessiccation par des couvercles en plastique et conservées à température ambiante pendant 24 heures. Après démoulage, les éprouvettes sont conservées dans des emballages plastiques dans une salle à atmosphère ambiante jusqu'au moment de l'essai qui s'effectue à 28 jours.

3.2.3.6 Préparation des éprouvettes :

Surfaçage norme NFP18-416 (NA 427)

Deux heures avant l'essai, les éprouvettes destinées aux essais de caractérisation traditionnelle (16X32 cm) pour les essais de compression) ont été surfacées par coulis, par contre les éprouvettes destinées aux essais de traction par flexion été surfacées par meulage

L'opération de surfaçage permet d'obtenir deux surfaces planes parallèles entre elles et perpendiculaires à l'axe de l'éprouvette

3.3.5 Caractérisation des mélanges à l'état durci :

a- Essai de compression:

la machine d'essais est une presse de classe B et d'une capacité maximale 2000KN. Conformément au normes NFP18-412 (NA 2832).voir figure 3.4

b- Essai de traction par flexion:

Des éprouvettes de 7x7x28cm, sont utilisées, les mesures sont effectuées à 28j suivant la procédure décrit dans le paragraphe précédent sur la même machine d'essai avec un dispositif approprié.



Figure 3.4 : la presse utilisée.

3.4 RESULTATS DE CARACTERISATION :

La principale différence, entre un BAP et un béton traditionnel, réside dans le comportement du matériau à l'état frais et donc dans sa mise en oeuvre. En effet, leur composition spécifique nécessite la mise en place d'un contrôle soutenu de leur formulation, ainsi qu'un contrôle de leurs propriétés à l'état frais, avant mise en oeuvre.

Dans cette partie, on présente les différents résultats obtenus de la caractérisation classique des six bétons testés.

Les résultats obtenus peuvent être sensibles à trois niveaux

- la variabilité dans les matériaux : du façon générale, nous avons obtenus une reproductibilité dans les mélanges, aussi bien à l'état frais, qu'à l'état durci. Ceci est d'autant plus important que la fabrication s'est étalée sur plusieurs semaines.
- La variabilité dans la fabrication des éprouvettes : en effet, le mode opératoire au moment de la fabrication peut, même avec une procédure adopté, produire des différences incontrôlées.
- La variation dans le dispositif expérimental : le dernier niveau de la variabilité , peut provenir du montage expérimental lui-même, car il est impossible de garantir que deux échantillons soient identiques

Chaque composition est mesurée sur

- béton frais : mesure de densité

mesure de l'étalement et de l'affaissement

mesure de l'air occlus

testes instantanés

- béton durci : essai de compression sur cylindre 16x32cm

essai de traction par flexion sur prisme 7x7x28cm

testés à 28j

3.4.1 L'étalement :

Pour fixer les compositions pondérales, des essais préliminaires comme le réclament les recommandations en vigueur, pour la conception des bétons autoplaçant, les bétons vibrés et les bétons renforcés de fibres.

Les résultats d'essai d'étalement pour les BAP et l'essai d'affaissement pour le BV sont présentés dans le tableau 3.16

	BAP1	BAP2	BAP1F1	BAP2F	BAP1F2	BV
Etalement/affaissement (mm)	690	670	640	600	620	80

Tableau 3.16 : les résultats de l'étalement et d'affaissement.

L'étalement spécifié était respectivement compris entre 60 et 69 cm. Le tableau 3.16 montre que cette exigence du cahier des charges a été convenablement remplie par les différents bétons.

Pour toutes les compositions de BAP, l'aurole de laitance à la périphérie des galettes de béton était très faible.

De plus, les gros granulats ont toujours été entraînés correctement par la matrice cimentaire et ne sont pas restés amoncelés au milieu des galettes de béton.

Pour les compositions de BAP fibrés, les fibres sont restés amoncelés au milieu de galette surtout pour les BAP dosé à 1% de volume.

La diminution de l'étalement entre 690mm pour le BAP1 et 670mm pour le BAP2 est du probablement à la diminution de dosage de filler de 200Kg/m³ pour le BAP1 à 100Kg/m³ pour le BAP2, malgré l'augmentation du dosage de superplastifiants. Les résultats montrent que plus il y a de filler en remplacement du ciment, moins il faut de superplastifiants pour atteindre un étalement donné. [Zhu 05]

3.4.2 L'air occlus :

Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau suivant 3.18

Béton	BAP1	BAP2	BAP1F1	BAP2F	BAP1F2	BV
Air occlus (%)	2,8	2,7	3,4	3,2	3,8	3

Tableau 3.17 : l'air occlus des bétons utilisés.

L'introduction des additions minérales entraîne une modification de la porosité de la matrice cimentaire. Le pourcentage d'air pour les BAP est inférieur que celui de BV. Les additions minérales telles que le filler calcaire, donnent au BAP une microstructure plus dense que les bétons vibrés de même rapport E/C. [Trägårdh 99]

L'introduction des fibres métalliques augmente la quantité d'air occlus.

3.4.3 La densité :

Il n y a pas de grande différence de la densité entre le BAP et le BV

Bétons	BAP1	BAP2	BAP1F1	BAP2F	BAP1F2	BV
Densité (Kg/m ³)	2383	2352	3385	3291	3458	2361,3

Tableau 3.18 : les résultats du densité.

Les fibres métalliques entraînent une augmentation de la densité

3.3.4 Les résistances mécaniques :

Tous les résultats obtenus sont regroupés dans le tableau ci-dessous 3.19.

Nous constatons que le résistance à la compression sur éprouvettes 16x32cm à 28j varie d'un mélange à l'autre. Elles atteignent plus de 5 à 50% respectivement pour les BAP2 et BAP1F2 par rapport au béton BAP1 de référence.

L'augmentation de dosage de ciment pour le BAP2 est responsable de l'augmentation de résistance à la compression.

La quantité de superplastifiants utilisée dans la formulation de BAP2 est aussi bien Supérieure à celle employée dans la formulation de BAP1 (respectivement de 10,80 à 9.60 kg/m³) et de tels produits peuvent avoir une influence bénéfique sur la résistance mécanique.

On peut dire que les fibres d'acier apportent une certaine amélioration appréciable en compression. Nous avons constaté un changement de comportement et en particulier lors des essais d'écrasement jusqu'à la rupture.

Il est important de signaler l'obtention d'un béton ordinaire (vibré) d'égale résistance avec le béton de référence BAP1, respectivement de 25,68 et 25,80Mpa.

Concernant les résultats des essais mécaniques en traction sur éprouvettes 7x7x28cm à une échéance de 28j, on peut dire

- la teneur en fines n'a pas d'influence significative sur les résistances en traction

la présence de fibres d'acier (0,5% et 1%) améliore la résistance à la traction. Cette amélioration est très importante, respectivement de 50% pour le béton BAP1F1 et BAP2F et 70% pour le béton BAP1F2 par rapport au béton de référence BAP1.

les résultats sont présentés dans le tableau qui suit

	BAP1	BAP2	BAP1F1	BAP2F	BAP1F2	BV
Compression 16x32 cm	25,80	34,90	27,53	35,70	40,11	25,68
Traction par flexion 7x7x28 cm	5,09	5,19	7,61	7,94	9,09	6,32

Tableau 3.19 : résultats des résistances mécaniques.

3.5 CONCLUSION :

Ce chapitre a successivement abordé les points suivants :

- il présente les programmes expérimentaux en détail en précisant les corps d'épreuves utilisés et les modes opératoires suivis lors des essais.
- Il donne les informations nécessaires de tous les constituants rentrant dans les compositions retenues et étudiées avec les paramètres d'influence.
- Il regroupe l'ensemble des résultats obtenus des six bétons à l'état frais qu'à l'état durci.

Deux types de bétons autoplaçants à dosage de fines variables sont comparés. Deux pourcentages de fibres métalliques utilisés comme renfort de la matrice de référence BAP1 sont aussi comparés.

Un béton vibré d'égal résistance avec le béton de référence est obtenu. Le fait que ces deux types de bétons (BV et BAP1) correspondant à deux méthodes très différentes de formulations est souligné.

Les compositions de tous les bétons sont justifiées. Elles ont toutes en commun d'utiliser les mêmes matériaux locaux.

Les essais d'écrasement mécaniques menés sur les variétés de bétons montrent que la teneur en fines et la présence des fibres augmentent les performances mécaniques, le pourcentage des fibres étant le facteur prépondérant.

L'incorporation des fibres métalliques pour un dosage de 1% améliore de façon appréciable les résistances mécaniques.

CHAPITRE 4 :
TENUE AU FEU DES BETONS AUTOPLACANTS

CHAPITRE 4 :

TENUE AU FEU DES BETONS AUTOPLACANTS

4.1 INTRODUCTION :

Tous les auteurs s'accordent sur le fait que la résistance en compression du béton (ordinaire, BHP, BAP...) varie en fonction de la température à laquelle il est exposé.

La résistance en compression du béton diminue lorsque l'on porte celui-ci à haute température de manière irréversible.

Le comportement à la chaleur va dépendre de la composition, de la nature de ses constituants, de son âge, de sa teneur en eau, de formes et dimensions des pièces et du fait que le béton soit ou non soumis à des contraintes de chargement pendant le chauffage.

De manière globale, les propriétés mécaniques et thermo physiques varient en fonction de la température, comme précisé dans le deuxième chapitre. L'information que nous cherchons dans le cadre de notre étude est d'estimer les modifications possibles de tenue au feu des nouveaux bétons très fluides, grâce à l'ajout des fines et fibres métalliques dans la matrice.

La recherche est expérimentale et comparative en essayant de remplir au mieux les objectifs généraux que nous venons d'évoquer

Les matériaux testés sont ceux présentés dans le chapitre 3. Une caractérisation préliminaire a été réalisée. L'étude de la tenue au feu constitue le gros de ce mémoire.

Dans un premier temps, nous présenteront le processus expérimental en précisant le mode d'essai et les caractéristiques des matériaux étudiés ainsi que celles des chauffage.

La deuxième partie est consacrée à l'exposé des résultats obtenus en mettant en évidence l'influence des paramètres.

4.2 RAPPEL SUR LES MATERIAUX :

Les propriétés mécaniques du béton se détériorent pendant le chauffage. Plusieurs paramètres semblent gouverner cette modification de propriétés mécaniques. Les propriétés thermiques aussi sont considérablement modifiées.

Le programme expérimental établi dans notre laboratoire étudie le comportement au feu des bétons autoplaçants et sans renforts. Nous utilisons les mêmes formulations de bétons que celles définis au chapitre précédent.

4.2.1 Caractéristiques des bétons testés :

Cette étude du comportement au feu des bétons autoplaçants a permis de tester six compositions différentes dont la référence BAP1. Les paramètres de composition et d'essais sont étudiés séparément, tandis que les variables sont maintenus constants.

Des compositions identiques ont été retenus pour la détermination des caractéristiques à l'état frais et durci et pour l'étude du comportement au feu. Le tableau 4.1 rappelle la désignation des différentes compositions retenues.

Différente compositions utilisées dans la recherche		
N°d'ordre	Notations	Type de BAP
1	BAP1	Béton autoplaçant avec F/F+C=0.33
2	BAP2	Béton autoplaçant avec F/F+C=0.16
3	BAP1F1	BAP1 avec (0,5% de volume) fibres métalliques
4	BAP2F	BAP2 avec (0,5% de volume) fibres métalliques
5	BAP1F2	BAP1 avec 1% de volume de fibre métallique
6	BV1	Béton Vibré avec une résistance égale à celle de BAP1

Tableau 4.1 : désignation des bétons

Les essais des bétons à l'état frais ont été systématiquement effectués instantanément, par contre les essais des bétons à l'état durci à l'âge de 28j à 20°C avec une HR de 55%, après conservation dans une salle, couverts d'un film protecteur à une température de 20°C et 80% d'humidité relative.

Nous indiquons au tableau 4.2, tous les informations nécessaires du caractérisation des différents mélanges.

	BAP1	BAP2	BAP1F1	BAP2F	BAP1F2	BV
Ciment	400	500	400	500	400	400
filler	200	100	200	100	200	0
eau	211	221	211	221	211	228,5
Super plastifiant	9,60	10,80	9,60	10,80	9,60	0
gravier	772	772	745	745	718	914,35
sable	762	762	762	762	762	580,92
fibres	0	0	38,25	38,25	76,5	0
Étalement/ Affaissement (mm)	690	670	640	600	620	80
Densité (Kg/m ³)	2383	2352	3385	3291	3458	2361,3
Air Occlus (%)	2,8	2,7	3,4	3,2	3,8	3
Compression 16x32 cm	25,80	34,90	27,53	35,70	40,11	25,68
Traction par flexion 7x7x28 cm	5,09	5,19	7,61	7,94	9,09	6,32

Tableau 4.2 : formulation et caractérisation des bétons

4.3 METHODOLOGIE D'ESSAIS

Une des étapes importantes de ce travail expérimental consiste à mettre au point un équipement expérimental et établir un mode opératoire pour la réalisation des observations sur les échantillons du béton.

Dans ce chapitre, l'équipement d'expérimentation est présenté. Cet équipement spécifiques et complexe est constitué d'un four régulé permettant de chauffer des éprouvettes jusqu'à 500°C. Nous présentons la conception du matériel d'essais, les contraintes et les hypothèses concernant la réalisation des mesures.

4.3.1 Spécifications techniques du dispositif expérimental :

Le dispositif expérimental se devait de répondre à un cahier des charges très précis. Voici les principales spécifications

- Les corps d'épreuve doivent pouvoir être chauffés avec une vitesse de montée en température de valeur constante
- Le champs de température doit respecter une homogénéité suffisante.
- Le four et ses éléments chauffants doivent être protégés des éventuels éclatements des échantillons soumis aux hautes températures.
- Afin de ne pas endommager le four, l'arrêt du four doit être automatique en cas de rupture des éprouvettes.

4.3.2 Techniques existantes :

Afin de pouvoir faire les bons choix concernant la conception des systèmes expérimentaux décrit par les auteurs cités dans la partie bibliographique de ce mémoire ont été analysés, [khoury 1983, Shneider 1976, Diederichs 1992, Noumowé 1994]

4.3.3 Hypothèses concernant la réalisation de l'étude :

En réalisant le système d'étude, nous pouvons faire des hypothèses concernant le comportement au feu. Notamment nous supposons que :

- les effets de structure liés au gradient thermiques sont limités, par le choix de la vitesse d'échauffement, de la taille et forme de l'éprouvette. Cependant les effets des structures ne sont pas totalement éliminés en sachant que les observations sont réalisés en régime stationnaire des températures.
- L'application de la chaleur se réalise de façon uniforme et de valeur constante au cours de l'essai
- L'état de contraintes est considéré comme uniaxial, le phénomène de frettage est limité.
- Les zones de dégradations sont homogène de point de vue de la température du four et de l'éprouvette.

4.4 DESCRIPTION DE SYSTEME ET JUSTIFICATION DE LA DEMARCHE ADOPTEE :

L'équipement d'expérimentation est présenté sur la figure 4.1. Cet équipement spécifique est constitué notamment d'un four programmable permettant de chauffer des éprouvettes jusqu'à 500°C. Le régulateur permet la réalisation des programmes prédéfinis par l'opérateur (cycle de chauffe, paliers de stabilisation de la température et leur durée, vitesse de montée en température...)

4.4.1 Taille des éprouvettes :

La tenue au feu est réalisée sur des cylindres de 16x32cm et prismatiques de 7x7x28cm, la taille des corps d'épreuves est le résultat d'un compromis. Il faut, d'une part, que celle-ci soit suffisamment importante pour que le matériau puisse être considéré comme représentatif. Ceci est en particulier à relier à la taille des granulats et la longueur des fibres.

Une taille importante d'éprouvette entraîne d'autre part une plus grande hétérogénéité de la température et de la teneur en eau dans le matériau qui implique l'adoption des vitesses de montée en température plus faibles et des données d'essais plus importantes.

L'éclatement des éprouvettes a été choisi égale à 2 et 4 comme le veut l'usage.

4.4.2 Four :

L'éprouvette cylindrique ou prismatique placée dans le four au moyen de trois éléments chauffants, haut, milieu et bas, pilotés automatiquement.

La résolution de ce type de thermocouples de régulation est de 0,001°C et la précision des mesures a été de 0,1°C dans la gamme de température de 20 à 200°C, de 0,3°C de 200 à 400°C. A la température de 500°C la précision diminue à 0,6°C.

Les éléments chauffants sont protégés d'éventuels éclatements de l'éprouvette ; durant l'essai, par un tube joue un rôle important d'uniformisation du flux de chaleur transmis des chauffants vers l'échantillon. Le matériau isolant (laine de roche) de l'épaisseur de 4cm est utilisé pour limiter toutes pertes de chaleur et la température de la surface extérieure de four.

Le four est une construction métallique à double chambre avec isolement thermique. Intérieur, étagères et intérieur de porte en acier inoxydable. Panneau de contrôle avec interrupteur de mise en marche, voyant de signalisation, thermorégulateur électrique et indicateur digital de température

Capacité	Dimension intérieure	Dimension extérieure	poids	puissance	Température max
150 l	50x60x50cm	77x90x68cm	63kg	2000w	200°C

4.4.3 Vitesse en montée en température :

L'éprouvette est chauffée à une vitesse de montée en température constante. Selon les recommandations de la RILEM2000 concernant les essais en régime stationnaire, la vitesse d'échauffement doit être choisie en fonction du diamètre de l'éprouvette pour limiter les gradients thermiques dans l'échantillon. Pour un diamètre de 100mm, la RILEM recommande une vitesse $dT=0,5^{\circ}C/min$, mais pour un diamètre de 80mm il passe à $2^{\circ}C/min$. Pour des raisons de sécurité (durée d'essai très importante) nous choisissons la vitesse de $1^{\circ}C/min$ comme référence pour la majorité des expériences.

Dans les essais qui étudient l'influence de la température sur les propriétés d'un matériau, les échantillons subissant un échauffement préalable aux essais. Nous pouvons les classer selon les conditions de la mesure : régime transitoire d'échauffement ou en température stationnaire. C'est ce dernier qui est adopté dans notre étude. Les essais sont réalisés après un certain temps de stabilisation de température pour éviter les perturbations provoquées par les gradients thermiques présents dans l'échantillon.

La durée du palier dépend de la taille de l'éprouvette, de la température de stabilisation mais aussi de la spécification de l'essai mécanique. Ces essais peuvent être réalisés « à chaud », après refroidissement ou après un certain temps suivant le refroidissement.

Les vitesses de chauffage et de refroidissement ont été l'objet d'une attention particulière compte tenu du fait que l'on désire engendrer un endommagement d'origine thermique uniquement. En effet, des vitesses trop élevées engendreraient des gradients thermiques entre la surface et le cœur de l'éprouvette ; ces gradients thermiques seraient alors la cause de dilatations thermiques empêchées au sein du matériau qui, à cause des contraintes internes en résultant engendreraient un endommagement d'origine mécanique important.

La vitesse initialement retenue était de $1^{\circ}C/min$ pour les phases de chauffage et refroidissement afin d'éviter les risques d'éclatement des bétons chauffés. Ce choix a essentiellement des justifications bibliographiques en effet les publications [Cast-1998], [Khou-1996], [Pimi-1996] cités par [Menou 04], montrent que des vitesses importantes (de l'ordre de $4^{\circ}C/min$) sont souvent à l'origine d'un état d'écaillage important. La vitesse de chauffage est de $1^{\circ}C/min$, le chauffage à vitesse lente permet de mieux caractériser le matériau (Recommandation RILEM).

[Noumowé 96] montre que le refroidissement n'engendre pas des modifications notables si la vitesse de chauffage est lente.

Les éprouvettes sont chauffées suivant la courbe 4.1.

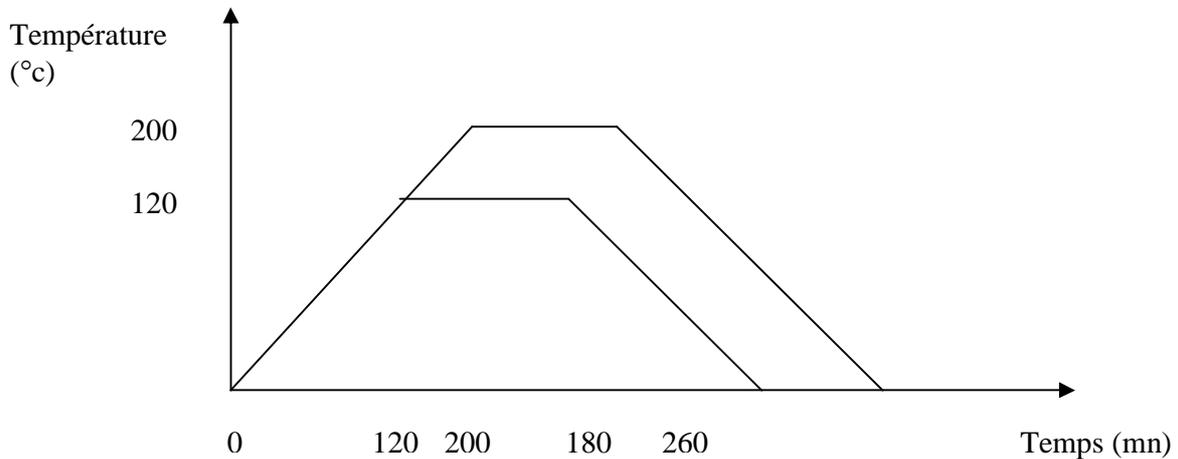


Figure 4.1: courbe de chauffage (vitesse de chauffage 1°C/mn)

4.5 ESSAIS REALISES :

les deux principaux buts à atteindre de cette études sont :

- Identifier les paramètres influençant le comportement à chaud des bétons autoplçants. Il s'agit des paramètres liés à la réalisation des essais mais également des paramètres liés à la composition du matériau
- Dégager les paramètres qui manquent à la description du comportement à chaud des BAP pour bien programmer l'étude expérimentale présentée dans le chapitre cinq de ce mémoire à savoir l'influence de la tenue au feu sur les variations dimensionnelle (retrait) et pondérales (perte de masse) de BAP.

Ces objectifs peuvent être réalisés :

- Les essais à chaud donnent une réponse du matériau plus précise. La réalisation des essais est plus complexe et les mesures plus difficiles à effectuer
- Essais durant la phase de refroidissement permettent de suivre l'évolution de la propriété étudié durant cette phase.
- Essais après un certain temps après le refroidissement. Les essais sont effectués après un temps défini qui suit le cycle de chauffe. Ici le béton est capable de récupérer une partie de sa résistance. C'est le phénomène d'autoréparation des bétons.

4.5.1 Essais mécaniques :

Des essais résiduels sont effectués après le cycle d'échauffement décrit dans le paragraphe précédent à la température ambiante sur

- des éprouvettes cylindriques d'élanement 2 (16x32cm) âgées de 28 jours destinées pour la détermination de la résistance résiduelles à la compression.
- Sur des éprouvettes prismatiques d'élanement 4 (7x7x28cm) âgées de 28 jours destinées pour la détermination des résistances résiduelles à la traction par flexion.

Un minimum de trois éprouvettes pour chaque taux de chauffe est effectués.

Pour chaque série de bétons, des essais d'écrasement sont conduit sur les trois éprouvettes vierges de la même gachée, juste après les essais du comportement au feu. Les essais sont réalisés sur les six bétons sur une presse décrite dans le chapitre précédent.

4.5.2 Mesure de la perte de masse :

Cette partie d'étude a eu pour but d'évaluer les quantité de l'eau libre présente dans les matériaux testés. Elle permet également d'observer les cinétique du processus de séchage et de déshydratation des BAP. Les mesures sont réalisés sur les six bétons avant et après l'essai d'échauffement stationnaire. Les pesés ont été effectués avec une balance de résolution 0,1g.

4.6 RESULTATS ET DSCUSSIONS :

Les granulats sont supposés thermiquement stables dans le domaine de température étudié. L'instabilité du béton entre 20 et 200°C provient de la pâte de ciment. Aucun éclatement de béton n'a été observé au cours des cycles de chauffage - refroidissement. Il apparaît que la pression de vapeur d'eau et les contraintes d'origine thermique dans le béton sont inférieures à la résistance du matériau pour les bétons testés.

4.6.1. Résistance à la compression :

La résistance mécanique en compression est une caractéristique essentielle du matériau béton et l'un des paramètres fondamentaux de notre étude. Par conséquent, sa détermination et son évolution ont été suivies pour toutes les compositions de béton étudiées, cette résistance mécanique a été calculée en conservant une échéance indispensable réglementaire à 28 jours par la moyenne des résistances d'une série de trois échantillons cylindriques 16x32 cm.

	BAP1	BAP2	BAP1F1	BAP1F2	BAP2F	BV
Résistance en compression initiale (Mpa)	25,80 (100%)	34,90 (100%)	27,53 (100%)	40,11 (100%)	35,70 (100%)	25,68 (100%)
Résistance en compression résiduelle à 120°C (Mpa)	20,88 (80,95%)	33,20 (95,14%)	21,13 (76,75%)	31,55 (78,67%)	28,96 (81,12%)	21,08 (82,09%)
Résistance en compression résiduelle à 200°C (Mpa)	19,19 (74,40%)	30,64 (87,81%)	24,73 (89,82%)	31,55 (78,67%)	30,97 (86,75%)	25,32 (98,60%)

Tableau 4.3 : résistance en compression initiale et résiduelle des bétons étudiés

Le cycle de chauffage-refroidissement retenu a une influence sur les propriétés mécaniques des bétons: une baisse de résistance allant 4,86 à 19,05% pour la température de 120°C, et une perte de performances d'environ 1,4 à 25,6% pour la température de 200°C.

4.6.1.1. Influence des fillers :

a. Résistance en compression initiale:

Les essais de résistance en compression sont effectués avant et après le chauffage sur des éprouvettes d'éclatement 2. La résistance initiale est déterminée sur des éprouvettes non chauffées (vierge) et la résistance résiduelle sur des éprouvettes ayant subi le cycle chauffage refroidissement. Le BAP2 présente une résistance supérieure à celle de BAP1, cela est dû à l'augmentation du dosage en ciment et diminution du dosage en filler.

b. Résistance résiduelle en compression:

Les résultats (Figure 4.2) indiquent que dans les domaines de température étudiés le comportement des deux BAP est similaire. Une diminution de résistance à 120°C et continue à diminuer à 200°C. La diminution du dosage en filler améliore la résistance au feu. Les résultats montrent que le BAP2 est moins affecté par l'exposition à la température d'où on

note une diminution entre 4,86 et 12,19MPa, tandis que la perte de résistance pour le BAP1 est entre 19,05 et 25,6 Mpa.

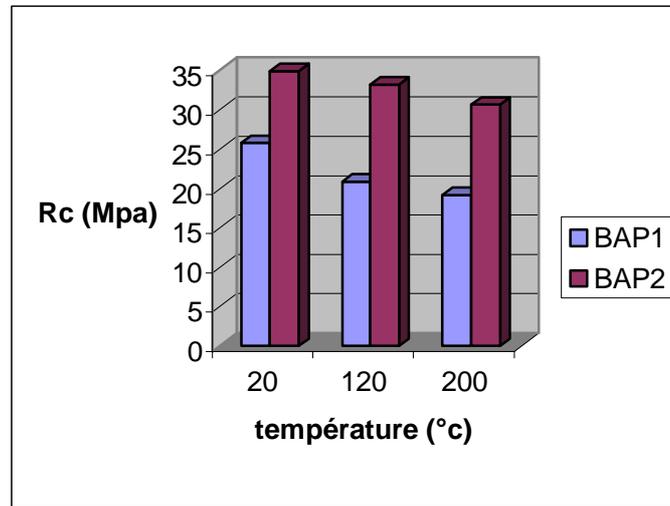


Figure 4.2 : influence de filler sur la résistance initiale et résiduelle à la compression

4.6.1.2. Influence des fibres métalliques :

a. résistance en compression initiale:

L'ajout de fibres métalliques entraîne une augmentation de la résistance à la compression due probablement à l'orientation privilégiée des fibres dans le sens de coulage

b. résistance résiduelle en compression:

L'introduction de fibres métalliques améliore la résistance des BAP à 200°C, mais à 120°C, une diminution de la résistance des BAP avec fibres plus accentuée que celle des BAP sans fibres. Les BAPF présentent un pourcentage d'air occlus supérieur à celui des BAP, ce qui donne l'occasion à l'eau de s'échapper plus vite du béton, causant la diminution de résistance à 120°C. puis une augmentation de résistance à 200°C, conséquence de la densification de la pâte de ciment.

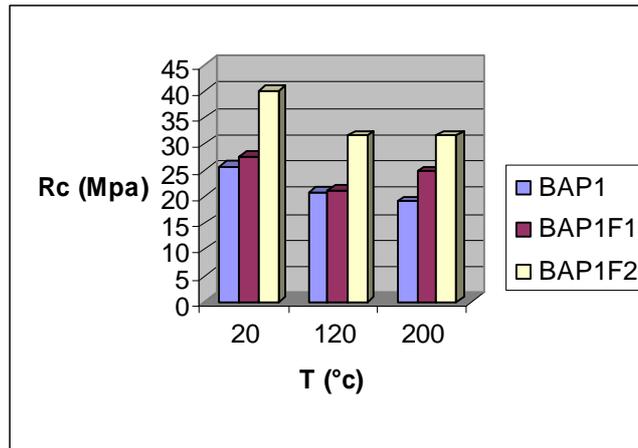


Figure 4.3 : influence des fibres sur la résistance initiale et résiduelle en compression des bétons

4.6.1.3 Influence de l'association filler-fibres :

La figure 4.4 présente les résultats obtenus. On observe une baisse significative de la résistance pour le BAP1F1 et pour le BAP2F en fonction de la température. En effet, on atteint respectivement 23,25% et 18,88% de baisse à 120°C. Une reprise de résistance à 200°C, atteint 89,82% pour BAP1F1 et de 86,75% pour le BAP2F de la résistance initiale. Ces résultats montrent que en présence de 0,5% de volume totale de fibres métalliques, la diminution de dosage de fillers influe positivement sur le comportement à la chaleur.

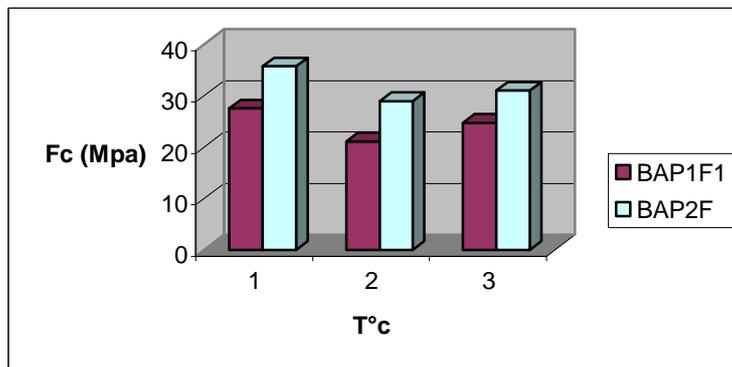


Figure 4.4 : influence de l'association filler fibres sur la résistance initiale et résiduelle en compression.

4.6.1.4 Influence de la nature de béton :

Le cycle de chauffage-refroidissement retenu a une influence sur les propriétés mécaniques des bétons: une baisse de résistance (de 17,91% pour le BV, et de 19,05 pour le BAP) pour la

température de 120°C, et une perte de performances d'environ 25,6% pour le BAP et une reprise de 95% pour le BV de la résistance initiale pour la température de 200°C.

Les résultats montrent que le béton vibré est moins affecté par l'exposition à 200°C que le béton autoplaçant, mais à 120°C les deux bétons ont un comportement similaire.

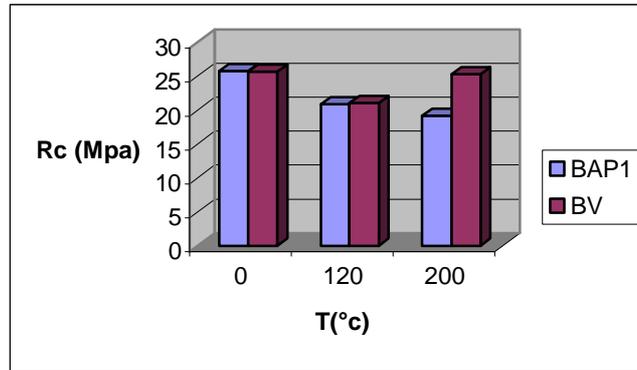


Figure 4.5 : l'influence de la nature de béton sur la résistance initiale et résiduelle.

4.6.2. Résistance résiduelle en traction par flexion:

Les résultats sont présentés dans le tableau suivant 4.4 :

	BAP1	BAP2	BAP1F1	BAP1F2	BAP2F	BV
Résistance en traction par flexion initiale (Mpa)	5,09 (100%)	5,19 (100%)	7,61 (100%)	9,09 (100%)	7,94 (100%)	6,32 (100%)
Résistance en traction par flexion résiduelle à 120°C (Mpa)	5,23 (102,71%)	5,95 (114,64%)	6,31 (82,94%)	10,41 (114,55%)	6,74 (84,88%)	4,52 (71,52%)
Résistance en traction par flexion résiduelle à 200°C (MPa)	5,99 (117,75%)	7,96 (153,34)	7,94 (104,34%)	9,92 (109,20%)	8,02 (101,01%)	5,75 (90,98%)

Tableau 4.4: résistance initiale et résiduelle en traction par flexion des bétons étudiés

4.6.2.1. Influence de filler :

Les résultats sont présentés dans la figure 4.4.

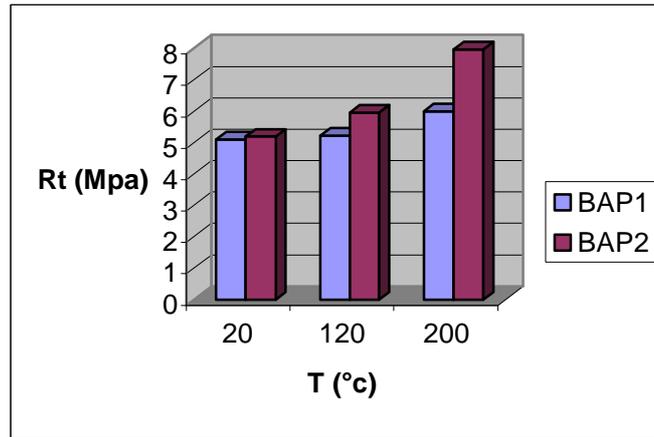


Figure 4.6 : résistance initiale et résiduelle à la traction par flexion

Dans le palier des températures étudié les bétons autoplaçants présentent une résistance qui varie proportionnelle avec l'élévation de température jusqu'à 200°C. La diminution de dosage de filler cause un meilleur comportement à chaleur. Les bétons autoplaçants présentent une augmentation de résistance de traction à haute température, ceci est du probablement à l'amélioration de la zone de transition entre les granulats et la pâte de ciment à cause du dosage élevé de la pâte. Le béton vibré est plus affecté par l'augmentation de température que les bétons autoplaçants.

4.6.2.2. Influence de fibre :

La température élevée influe beaucoup plus sur les bétons autoplaçants avec fibres que ceux sans fibres. A 120°C, le BAP montre une augmentation de résistance de 2,71% de la résistance initiale, tandis que le BAPF avec 0,5% de fibre présente une diminution de 17,06% ; quand le BAP1F2 avec 1% de fibre marque une augmentation de 14,55%. A 200°C, à cette température on note que la résistance de BAP1F2 diminue au moment où les deux autres BAP présentent une augmentation. L'augmentation de pourcentage de fibres (de 0,5 à 1%) a un effet favorable pour la tenue de BAP au feu.

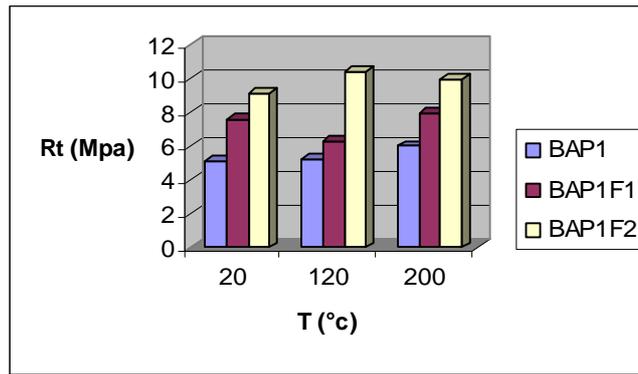


Figure 4.7 : résistance initiale et résiduelle à la traction par flexion des bétons étudiés

4.6.2.3 Influence de l'association filler-fibres :

Les résultats obtenus sont présentés dans la figure suivante 4.8

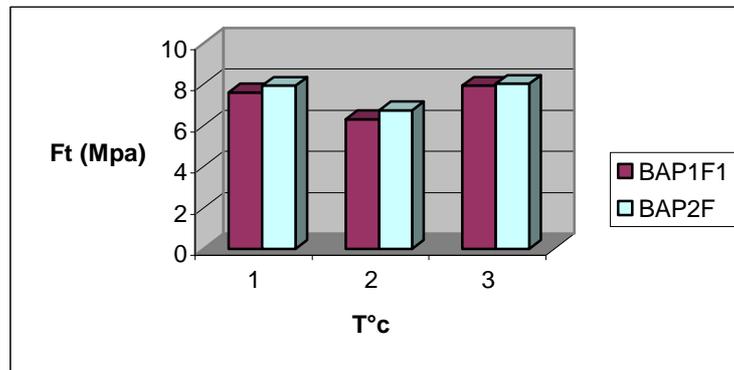


Figure 4.8 : influence de l'association filler fibre

L'augmentation de la porosité, conséquence de l'introduction des fibres métalliques influence l'évolution des propriétés des BAP. En effet on constate une baisse de l'ordre de 17,06 et 15,12% respectivement pour BAP1F1 et BAP2F, de la résistance à la traction entre 20 et 120°C, suivie d'une reprise de plus de 101,01 et 104 34 % de la résistance initiale à 200°C. La baisse relativement importante de la résistance à la traction de la pâte à 120°C peut être expliquée par le départ de l'eau libre et par la décomposition des hydrates à partir de 100°C.

4.6.2.4 Influence de la nature de béton :

On observe une augmentation de résistance de traction par flexion de 2,71 à 53,35% pour les bétons autoplaçants tandis qu'on constate une diminution de 9,08 à 28,48% pour le béton vibré.

A 120°C, le BV subit une baisse de résistance et à 200°C il subit une reprise de résistance. Ce résultat est confirmé par d'autres auteurs [Menou 04], tandis que le BAP subit une augmentation de sa résistance, dû probablement au départ d'eau et à la rigidité de la pâte. Donc les BAP se comporte différemment du BV, dans le palier de 20 à 200°C.

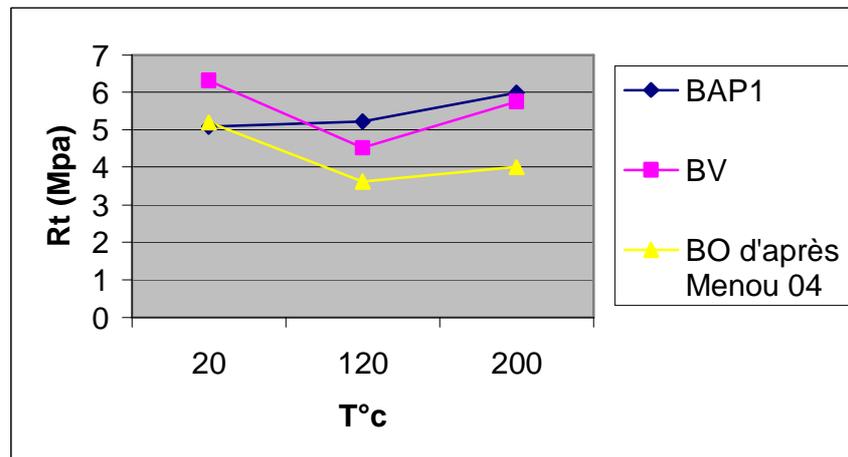


Figure 4.9 : influence de la nature de béton sur la résistance à la traction

4.6.3 Perte de masse:

Vu l'importance de la partie hydrique dans les phénomènes de transport de chaleur et de masse, nous avons également étudié l'évolution de la perte de masse au cours des essais.

La perte de masse a été obtenue en mesurant la masse de l'éprouvette avant et après le cycle de chauffage refroidissement. Le bilan de masse nous a permis ensuite d'avoir l'évolution de la masse d'eau évaporée en fonction de la température.

4.6.3.1 Influence de filler :

Les masses des échantillons sont relevées avant et après chauffage. La figure 4.10 montre l'évolution des masses des bétons.

Le dosage de filler influe sur la perte d'eau, on observe de la figure 4.10 que le départ d'eau pour le BAP1 est plus rapide que le BAP2 entre 20 et 120°C. Mais à 200°C, le départ d'eau pour le BAP2 se précipite et devient plus rapide que le BAP1.

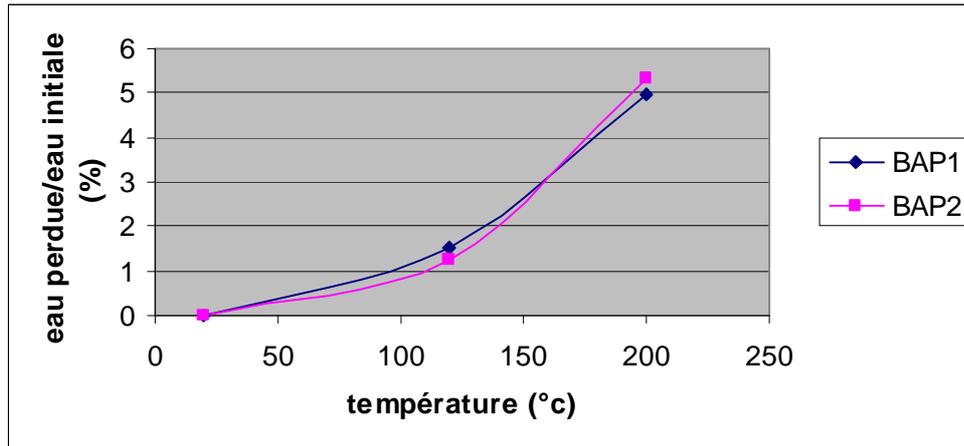


Figure 4.10 : variation de pourcentage de perte de masse en fonction de la température de palier

4.6.3.2 Influence de fibre :

Les masses des échantillons sont relevées avant et après chauffage. La figure 4.11 montre l'évolution des masses des bétons. L'introduction de fibres rend les bétons autoplaçants plus poreux. Le départ de l'eau cause une diminution de résistance, une fois le béton est sec, la résistance augmente.

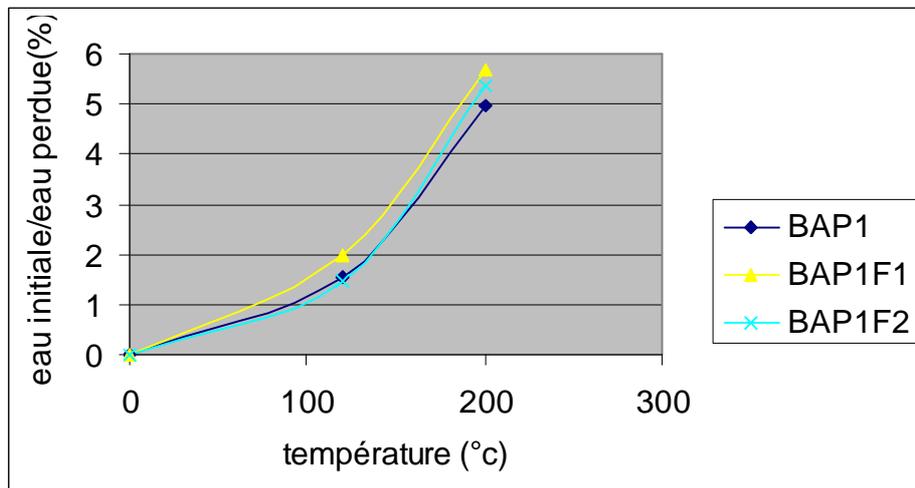


Figure 4.11: variation de pourcentage de perte de masse en fonction de la température de palier

4.6.3.3 L'influence de l'association de Filler-fibres :

L'introduction de fibre augmente la vitesse de départ d'eau pour les deux BAPF. La précipitation de départ d'eau de BAP2F est remarquable pour le BAP2 sans fibre, ce qui nous

amène à dire que ce comportement est du au dosage de filler et que les fibres favorisent l'écoulement par l'intermédiaire des fibres similaires à des buses (drainage).

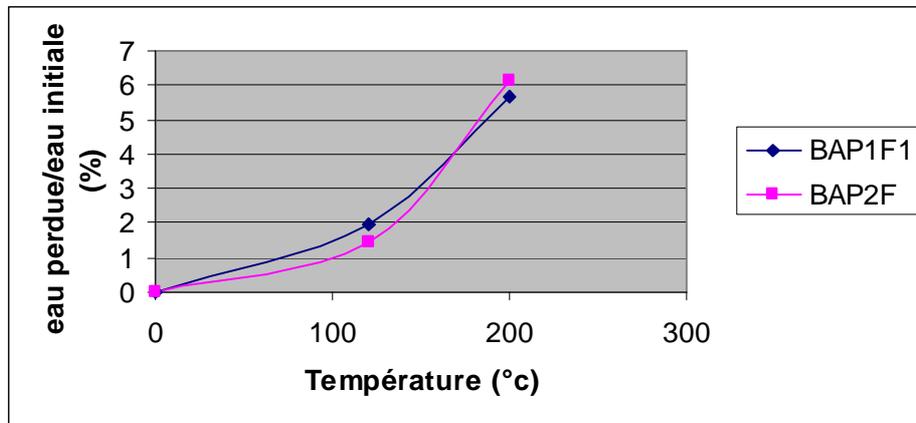


Figure 4.12 : perte de masse sous l'influence de l'association filler fibre.

4.6.3.4 L'influence de la nature de béton :

La perte de masse de béton vibré est plus élevée que les bétons autoplaçants parce que les bétons autoplaçants sont plus denses que le béton vibré. L'eau s'échappe de béton vibré plus rapidement que les bétons autoplaçants ceci peut s'expliquer par la variation de la résistance de béton vibré, le départ de l'eau cause une diminution de résistance, une fois le béton est sec, la résistance augmente.

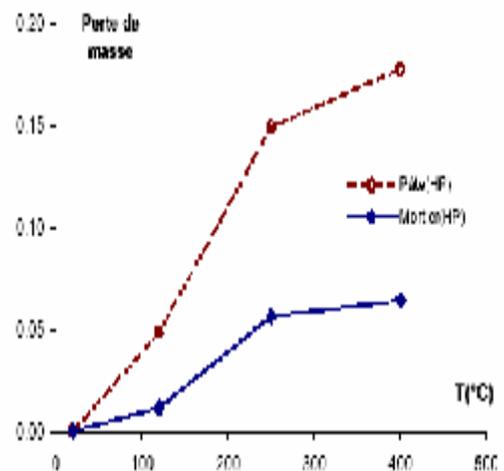
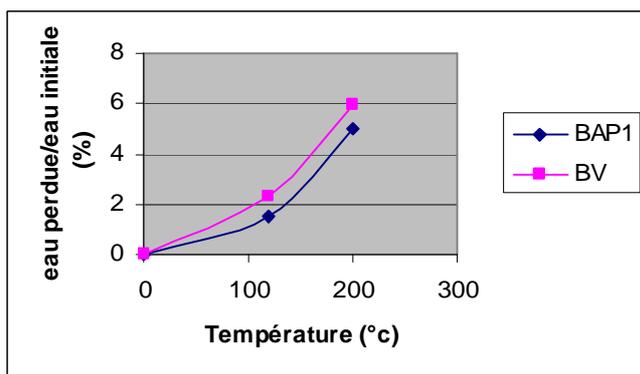


Figure 4.13 : perte de masse entre BAP et BV

L'eau part du béton lentement entre 20 et 120°C puis il se précipite entre 120 et 200° c. ces observations coïncident avec celles effectuées par [Menou 04].

4.7 CONCLUSION :

Dans ce chapitre, on est intéressés à l'étude des performances mécaniques des BAP soumis à un comportement au feu.

Les résultats de la résistance à la compression et à la traction par flexion sous l'influence de différents paramètres (dosage de filler, l'introduction de fibres métalliques, et nature de béton), sont présentés. Il ressort de cette étude que dans le palier de température étudié

- l'augmentation de dosage de filler au détriment de dosage de ciment cause une diminution de la résistance de béton autoplaçant à température ambiante.
- la résistance résiduelle est améliorée en diminuant le dosage en filler.
- à 120°C, le béton vibré et le béton autoplaçant présentent le même comportement mécanique; la résistance à la compression diminue de même ordre de grandeur tandis qu'à 200°C, la résistance en compression de béton vibré augmente mais la résistance de bétons autoplaçants continue à diminuer.
- l'introduction des fibres métalliques dans le béton autoplaçant améliore les propriétés mécaniques initiales et résiduelles.
- à 120°C, le béton autoplaçant avec et sans fibres présentent le même comportement mécanique; la résistance à la compression diminue de même ordre de grandeur tandis qu'à 200°C, la résistance en compression des bétons autoplaçants fibrés augmente mais la résistance de bétons autoplaçants continue à diminuer.
- pour la résistance à la traction, le béton vibré est plus affecté par l'augmentation de la température, il subit une diminution à 120°C et une augmentation à 200°C. Le béton autoplaçant présente une résistance plus élevée à haute température qu'à température ambiante.
- l'eau s'échappe du béton vibré plus rapide que le béton autoplaçant parce qu'il est moins dense que le béton autoplaçant.
- les fibres augmentent la teneur de pore au sein de béton, cela est signifié par l'échappement de l'eau; l'eau s'échappe du béton autoplaçant fibré plus rapidement que pour le béton autoplaçant.

CHAPITRE 5 :

ENDURANCE A LA CHALEUR DES BETONS AUTOPLACANTS

Variation dimensionnelles et pondérales

CHAPITRE 5 :

ENDURANCE A LA CHALEUR DES BETONS AUTOPLACANTS

Variations dimensionnelles et pondérales

5.1 INTRODUCTION :

Le retrait est nuisible avant tout aux structures présentant une large surface à l'air libre.

A haute température, du fait de l'incompatibilité thermique, les contraintes développées sont plus grandes et peuvent causer des fissures, celles-ci se développent principalement entre les granulats et la pâte de ciment. La structure de ciment est donc affaiblie et la pâte de ciment n'est plus capable de retenir l'expansion des granulats.

Le résultat est que l'expansion thermique du béton s'approche de celle des granulats. La fissuration est irréversible, ce qui entraîne de larges expansions résiduelles du fait de refroidissement. Ceci illustre donc la relation complexe entre le séchage, les mouvements thermiques des composants et la fissuration.

Nous avons testé une gamme importante du BAP, il nous a surtout paru intéressant de tester des bétons de compositions assez éloignées, en plus de l'introduction des fibres.

Le premier objectif de l'étude est la comparaison du retrait des BAP, des BAP renforcés des fibres et des bétons ordinaire. Le deuxième objectif est de suivre l'évolution des variations dimensionnelles et pondérales après un choc thermique des différents bétons retenus sous différents modes de conservation (ce que l'on appelle l'endurance à la chaleur). Il serait logique de comparer des bétons de même résistance (BAP1 et BV), car c'est souvent la première caractéristique d'un cahier des charges d'un chantier. Les autres bétons testés n'ont pas nécessairement la même résistance (BAP2, BAPF). En effet, dans la pratique, un BAP est formulé en dehors des considérations de résistance, c'est sa fluidité que l'on recherche en priorité.

5.2 RETRAIT DES BETON - Revue bibliographique :

5.2.1 Définition:

C'est un phénomène de raccourcissement qui accompagne la prise du ciment, on peut l'assimiler à l'effet d'un abaissement de température entraînant un raccourcissement.

5.2.2 Les formes de retrait:

Après la prise, le béton, qui est devenu un solide poreux, va subir quatre formes de retrait.

5.2.2.1 Le retrait thermique :

Les réactions d'hydratation libèrent en fin de prise une certaine quantité de chaleur. Un élément en béton subit alors un échauffement, fonction des conditions d'échange avec le milieu extérieur. En découle une dilatation, suivie d'une contraction, qualifiée de retrait thermique, lorsque sa température diminue jusqu'à la température ambiante. A première vue, le retrait thermique ne devrait pas avoir de conséquence pour le béton, car la contraction n'est que le retour au volume initial, d'avant la dilatation (si, bien sûr, le coefficient de dilatation thermique est supposé constant). Cependant, les propriétés mécaniques évoluent très vite au jeune âge. Le module élastique, en particulier, est plus grand pendant la phase de refroidissement. Contrairement aux variations de température, il n'y a donc pas réversibilité des contraintes engendrées par un empêchement des déformations. Il en résulte une contrainte de traction résiduelle, pouvant mener à la fissuration du béton.

5.2.2.2 Le retrait endogène ou d'autodessiccation :

Après la prise, l'hydratation se poursuit. Le retrait endogène est la conséquence macroscopique de la contraction d'origine chimique.

5.2.2.3 Le retrait de séchage ou de dessiccation

est la déformation volumique créée par le séchage à la surface du béton. Le moteur de la dessiccation est un déséquilibre hydrique : après la prise, l'humidité relative est plus élevée au sein du béton que dans l'air ambiant.

5.2.2.4 Le retrait de carbonatation :

A la surface d'un béton, la pâte de ciment peut réagir avec l'eau et le gaz carbonique de l'air ambiant. Cette réaction, la carbonatation, s'accompagne d'une contraction volumique. La peau du béton peut en conséquence se fissurer : on parle de faïençage.

5.2.3 Les mécanismes à l'origine des retraits hydriques:

Le béton est un matériau poreux, dont les vides représentent, suivant la quantité d'eau initiale, de 15 à 20% du volume total. Outre la macroporosité constituée par l'air entraîné, il existe deux types de porosité:

La première, la porosité capillaire, se situe à l'échelle du micromètre ; c'est un reste de la porosité du squelette granulaire d'avant la prise, qui s'est comblée progressivement au cours de l'hydratation.

La seconde, à l'échelle du nanomètre, est constituée par les vides au sein des hydrates, environ 30% de leur volume. Dans les pores, trois phases sont en présence : l'eau sous forme liquide, la vapeur et l'air. A température constante, l'équilibre des phases est dépendant d'un paramètre, l'humidité relative, c'est-à-dire le rapport de la pression de vapeur sur la pression de vapeur saturante.

Deux phénomènes perturbent cet équilibre : le séchage et l'hydratation.

L'humidité relative dans les pores est initialement de 100%. L'air ambiant est en général à une humidité relative inférieure (dans la région nantaise, par exemple, l'humidité est en moyenne de 70%). Le déséquilibre hygrométrique entre l'intérieur et l'extérieur va donc provoquer une dessiccation, c'est-à-dire une migration de l'eau hors du béton [Miao 92]. L'échange d'humidité dépend du coefficient de diffusion, soit de la taille de la porosité ouverte sur l'extérieur [Turcry 04].

Les réactions d'hydratation du ciment consomment l'eau liquide des pores. Une partie seulement du volume d'eau consommée est remplacée par un volume solide (les hydrates) ; l'autre partie, égale au retrait chimique, vient augmenter le volume de gaz. La pression de la vapeur, et par conséquent l'humidité relative, diminue au cours de l'hydratation. Le béton subit une autodessiccation [Hua 92].

Hydratation et séchage ont pour conséquence de diminuer l'humidité relative dans le réseau poreux. C'est la diminution d'humidité relative qui est à l'origine des retraits hydriques. Plusieurs mécanismes physiques permettent de faire le lien entre retraits et humidité [Breugel 00] cité par [Turcry 04].

Leur importance respective ne fait cependant pas l'unanimité dans la communauté scientifique [Benboudjema 02].

Nous n'évoquerons donc que les deux principaux mécanismes : pression capillaire et pression de disjonction. Ces mécanismes sont souvent retenus entre 60% et 100% d'humidité relative, plage "utile" pour un séchage à l'air ambiant. En outre, l'hydratation s'arrête en dessous de 70%.

- **La pression capillaire:**

Elle résulte de l'équilibre liquide vapeur dans la porosité capillaire du béton. La diminution de l'humidité relative au sein du béton (du fait du séchage) induit une diminution de la pression de l'eau liquide, provoquée par la vaporisation de celle-ci. La coexistence des phases liquides (eau) et gazeuses (vapeur d'eau et air sec) entraîne la formation d'un ménisque à l'interface liquide/gaz, et donc l'apparition de tension capillaire. Elles entraînent alors la contraction du squelette solide et provoquent ainsi le retrait de dessiccation

- **La pression de disjonction :**

L'eau associée à la pression de disjonction est en équilibre avec l'humidité relative environnante. Une diminution relative entraîne un départ de cette eau. Il se produit alors une diminution de la pression de disjonction. Il en résulte alors une déformation du squelette solide qui correspond à la déformation de retrait.

5.2.4 Paramètres influant:

Les données sur l'influence des paramètres de composition sur le retrait sont nombreuses dans la littérature et sont souvent contradictoires :

- Rapport E/C : le rapport E/C a des effets contradictoires sur le retrait. Les réactions d'hydratation ont un besoin en eau limité (environ 0,25). On considère qu'au dessus de 0,4, l'hydratation n'occasionne pas de forte baisse d'humidité relative, donc pas de retrait important.
- Le volume de pâte : le retrait est une fonction croissante du volume de pâte, parce que les granulats ne connaissent pas de retrait. Le volume de pâte est un paramètre majeur contrôlant le retrait du béton. Son influence est plus grande que le rapport E/C.
- Effet des additions : les études sur les fillers calcaires sont plus rares, car leurs dosages dans les bétons ordinaire avec l'emploi d'un filler calcaire, si sa finesse permet l'augmenter la compacité du squelette, et donc réduire les transferts d'humidité. Certains fillers semblent au contraire augmenter le retrait des BAP.
- Effet des adjuvants : les résultats su retrait divergent. Pour certains, ils n'ont pas d'effet dur le retrait , ce qui est à priori paradoxal. A l'opposé, ces adjuvants semblent augmenter le retrait, par augmentation de la diffusivité du matériau.

5.2.5 Le retrait pour les bétons autoplaçants :

Les données de la littérature sur le retrait de dessiccation des BAP sont très contradictoires. Certains auteurs [Hu 98] trouvent des déformations pour ces bétons plus importantes que celles mesurées sur des bétons vibrés (voir figure 5.1). Ce retrait apparaît être d'autant plus faible que le rapport G/S des BAP est élevé.

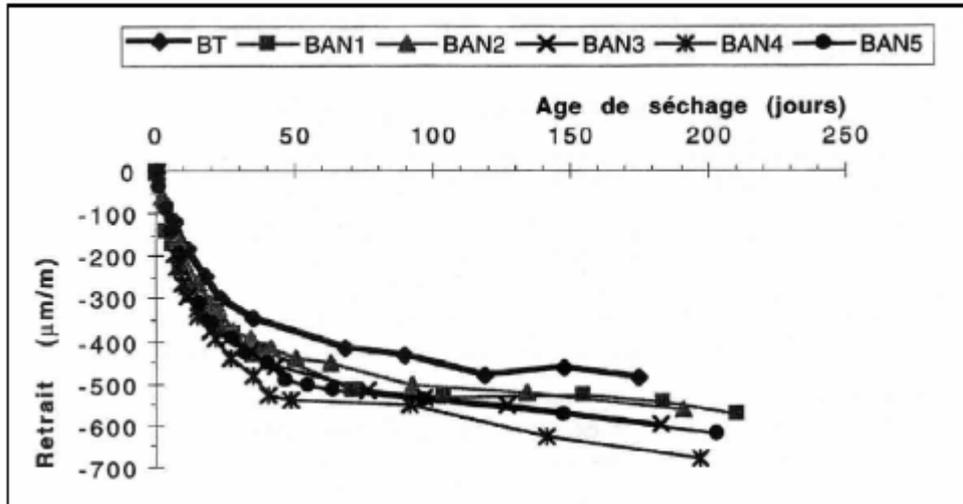


Figure 5.1 : Comparaison des retraits de dessiccation d'un béton vibré et de cinq BAP [Hu 98]

D'autres auteurs annoncent des retraits équivalents pour les deux types de béton à résistance mécanique constante [Persson 99]. D'après ces données, l'ordre de grandeur du retrait de dessiccation des BAP varie de 550 à 700 $\mu\text{m/m}$ (à 180 jours).

Enfin, d'autres auteurs (Sonebi 99) cité par [Assié 04] observent des retraits de séchage des BAP moins importants (voir figure 5.2) que ceux des bétons vibrés auxquels ils sont comparés (quantité de ciment et rapport E/C équivalents, volume de pâte différent). Le phénomène est attribué à l'effet du volume de pâte et au rapport E/L car, d'après [Neville 00], augmenter le volume de pâte pour une même quantité d'eau et diminuer le rapport E/L conduit à diminuer le retrait de séchage.

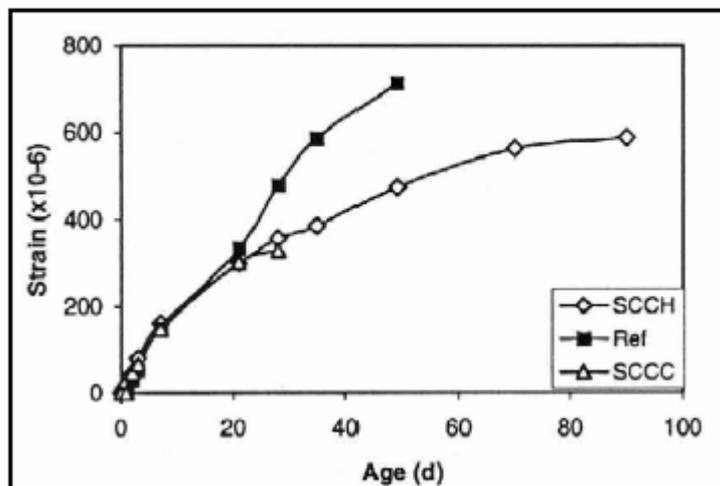


Figure 5.2 : Retrait de séchage de deux BAP et du béton vibré correspondant [Sonebi 99]

Comme expliqué précédemment, le retrait de dessiccation provient de l'évaporation de l'eau contenue dans les pores du béton vers le milieu extérieur. Le dessèchement est d'autant plus fort que la quantité d'eau initiale dans le matériau est grande et les tensions créées par cette perte en eau s'amplifient également. Contrairement au retrait endogène, le retrait de dessiccation décroît donc avec la diminution du rapport E/C et les BAP ne font pas exception à cette règle (voir figure 5.3).

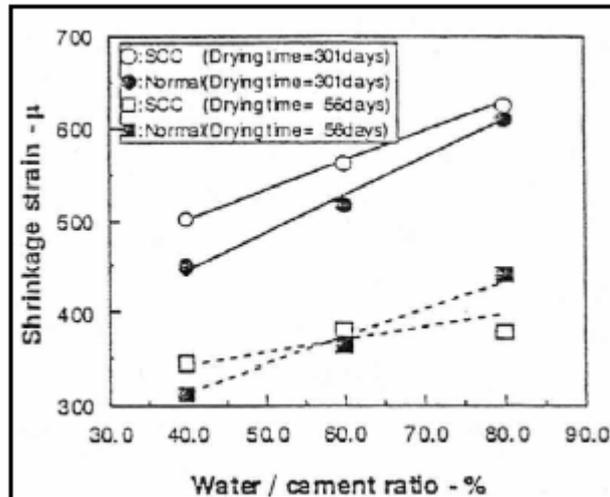


Figure 5.3 : Retrait de dessiccation des BAP (SCC) et des bétons traditionnels de même rapport E/C [Sakata 98]

Enfin, étant donné sa présence fréquente dans les BAP, il est intéressant de connaître l'effet du filler calcaire sur le retrait de ces bétons. D'après Van 99 [Assié 04], le filler calcaire peut avoir un effet positif en limitant le retrait de séchage des BAP, s'il est utilisé avec une finesse et une proportion adéquates. Cependant, la prépondérance de cet effet n'est pas toujours affirmée [Hasni 99].

A la suite de cette brève revue bibliographiques, les résultats sont souvent contradictoires. Il est d'ailleurs bon de s'interroger sur la disparité des résultats sur le retrait. Elle s'explique en partie par la diversité des constituants utilisés. La disparité des données sur le retrait trouve également son origine dans la diversité des techniques de formulation.

5.3 ETUDE EXPERIMENTALE :

5.3.1 Composition des bétons testés

Dans cette étude cinq types de bétons ont été testés et ces cinq compositions ont été utilisées au départ dans cette étude. Le tableaux 5.1 regroupe tous les bétons utilisés avec leur désignation.

Différente compositions utilisées dans la recherche		
N°d'ordre	Notations	Type de BAP
1	BAP1	Béton autoplaçant avec F/F+C=0.33
2	BAP2	Béton autoplaçant avec F/F+C=0.16
3	BAPF1	BAP1 avec (0,5% de volume) fibres métalliques
4	BAP1F2	BAP1 avec 1% de volume de fibre métallique
5	BV1	Béton Vibré avec une résistance égale à celle de BAP1

Tableau 5.1 : les notations des bétons utilisés.

Les constituants sont décrits au chapitre précédent. Le détail des formulations est donné dans le chapitre 3. Les formules obtenues sont regroupées dans le tableau suivant 5.2, avec les différentes formations sur leur caractérisations.

	BAP1	BAP2	BAP1F1	BAP1F2	BV
Ciment	400	500	400	400	400
filler	200	100	200	200	0
Eau	211	221	211	211	228,5
Super plastifiant	9,60	10,80	9,60	9,60	0
Gravier	772	772	745	718	914,35
Sable	762	762	762	762	580,92
Fibre	0	0	38,25	76,5	0
Étalement/ Affaissement (mm)	690	670	640	620	80
Densité (Kg/m3)	2383	2352	3385	3458	2361,3
Air Occlus (%)	2,8	2,7	3,4	3,8	3
Compression 16x32 cm	25,80	34,90	27,53	40,11	25,68
Traction par flexion 7x7x28 cm	5,09	5,19	7,61	9,09	6,32

Tableau 5.2 : formulation et caractérisation des bétons utilisés.

5.3.2 Moules et éprouvettes utilisés :

La mesure du retrait s'effectue sur éprouvette prismatique, de dimensions 7x7x28 cm.

Les moules utilisés équipés de plots de retrait. Les plots sont vissés au moule au moment de la mise en place du béton puis désolidarisés du moule avant le démoulage. Après durcissement les éprouvettes 7x7x28cm sont donc munies à leur deux extrémités de plots. Tous les moules étaient enduits d'huile à l'avance.

5.3.3 Mode de mûrissement :

Avant le démoulage, toutes les éprouvettes confectionnées ont été couvertes par une plaque rigide en plastique afin d'éviter les risques d'évaporation excessive et le retrait plastique.

Après 24 heures, les éprouvettes ont été démoulés et placées dans leur mode de conservation respectif à savoir :

- Milieu ambiant (à l'air) : T=20°C et HR=55%
- Couverte : T= 20°C et HR=75%
- Saturé : T=20°C et HR=100%

5.3.4 l'essai réalisé :

Il s'agit de suivre l'évolution des variations dimensionnelles et pondérales des éprouvettes avant et après un choc thermique (de 120°C et de 200°C) et d'évaluer l'endurance à la chaleur des bétons autoplacants.

L'essai de retrait est effectué conformément à la norme NF P15-433. L'essai est réalisé sur trois échantillons. Les mesures de la longueur ont été faites à partir de 24 heures (suivi continu, selon le mode de conservation) entre les deux plots placés suivant l'axe de symétrie de l'éprouvette. Le retrait est mesuré à l'aide d'un appareil « rétractomètre » munie d'un tige d'étalonnage invar et d'un comparateur digital précis à ±0,003mm.

Le calcul est fait comme suit

$$e = \frac{l_j - l_i}{l_i} \mu m / m$$

l_j = longueur au jour 'j' (μm)

l_i = longueur au jours 'i' (μm)

des essais en perte en poids ont été réalisés sur mêmes bétons à partir du démoulage (suivi continu à partir de 24 heures), à l'aide d'une balance.

Le suivi continu des éprouvettes des différents mélanges (retrait et perte de masse) est effectué jusqu'au choc thermique à 28 jours (soumission des corps d'épreuves à des élévations de températures suivant la courbe « chauffage refroidissement » décrite au chapitre précédent). Ensuite, un suivi continu est réalisé, après le choc thermique afin d'évaluer les modifications des variations dimensionnelles et pondérales jusqu'à l'âge de 50 jours après le démoulage.

5.4 PRESENTATION DE RESULTATS :

Dans cette partie, nous allons exposer les résultats des différents essais et mesures et en dégager des conclusions. Nous aborderons l'étude du retrait libre dans les différents modes de conservation (ambiant, couvert, saturé), suivi par celle de la perte de masse, durant trois étapes.

- Première étape : avant le choc thermique
- Deuxième étape : durant le choc thermique
- Troisième étape : après le choc thermique

Nous allons analyser l'influence de la nature du béton, le mode de conservation, la teneur en fillers, et la température du choc thermique (de chauffe), sur le retrait et la perte de masse.

5.4.1 Retrait :

5.4.1.1 Retrait avant chauffage

a. Influence de mode de conservation :

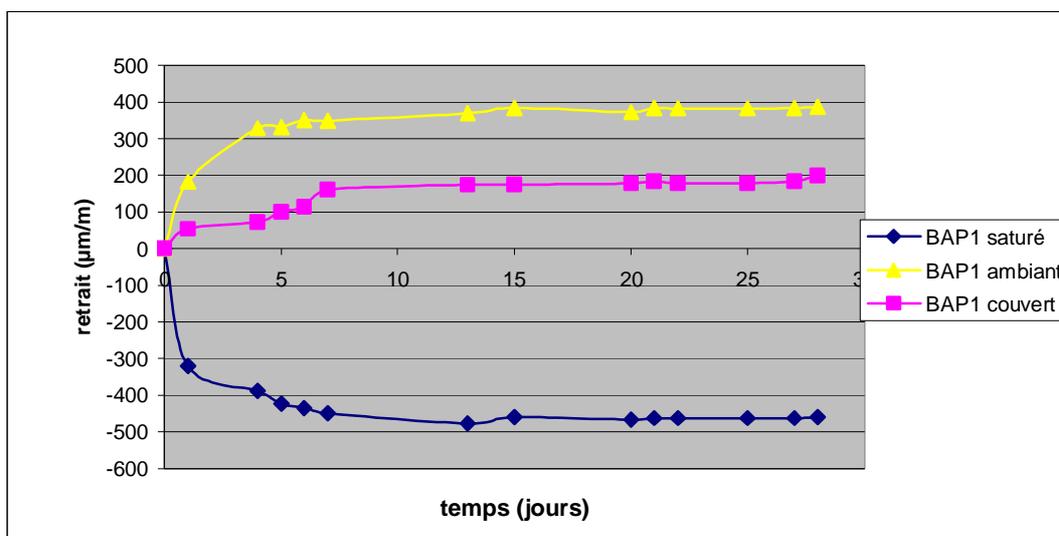


Figure 5.4:retrait de BAP1 selon trois mode de conservation.

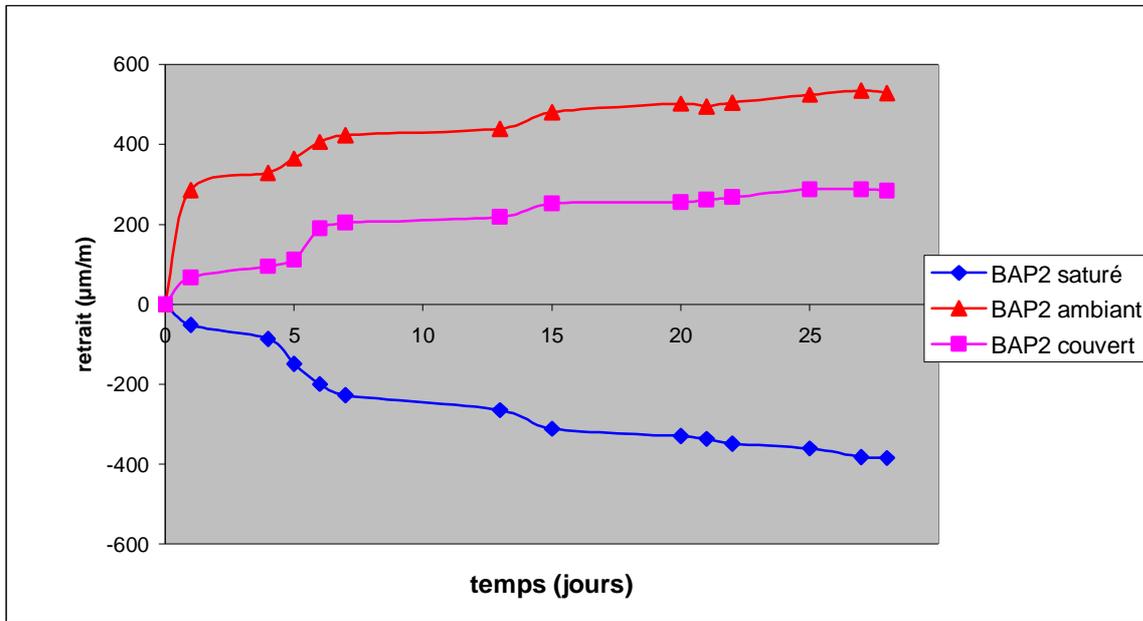


Figure 5.5 : retrait de BAP2 d'après le mode de conservation.

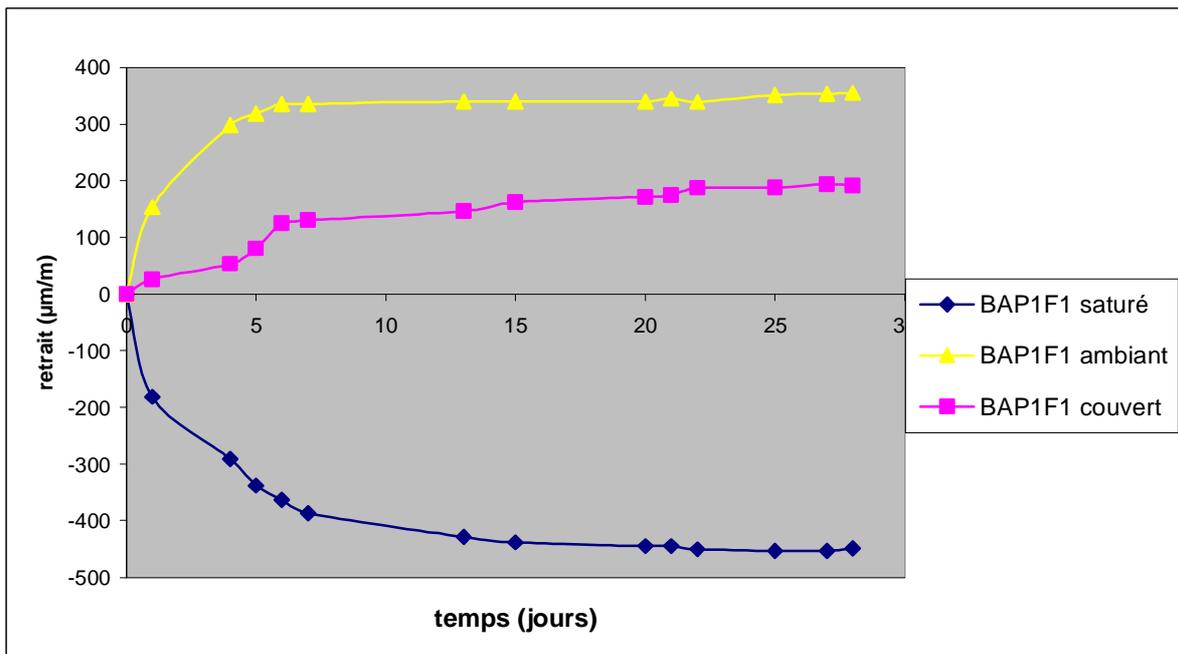


Figure 5.6 : retrait de BAP1F1 d'après le mode de conservation

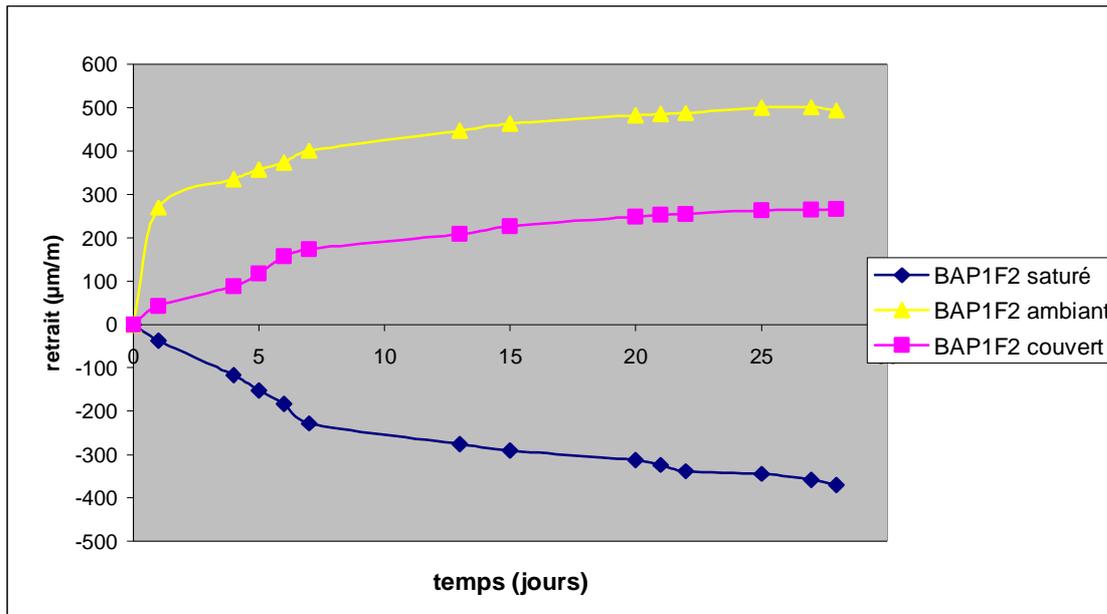


Figure 5.7 : retrait de BAP1F2 d'après le mode de conservation

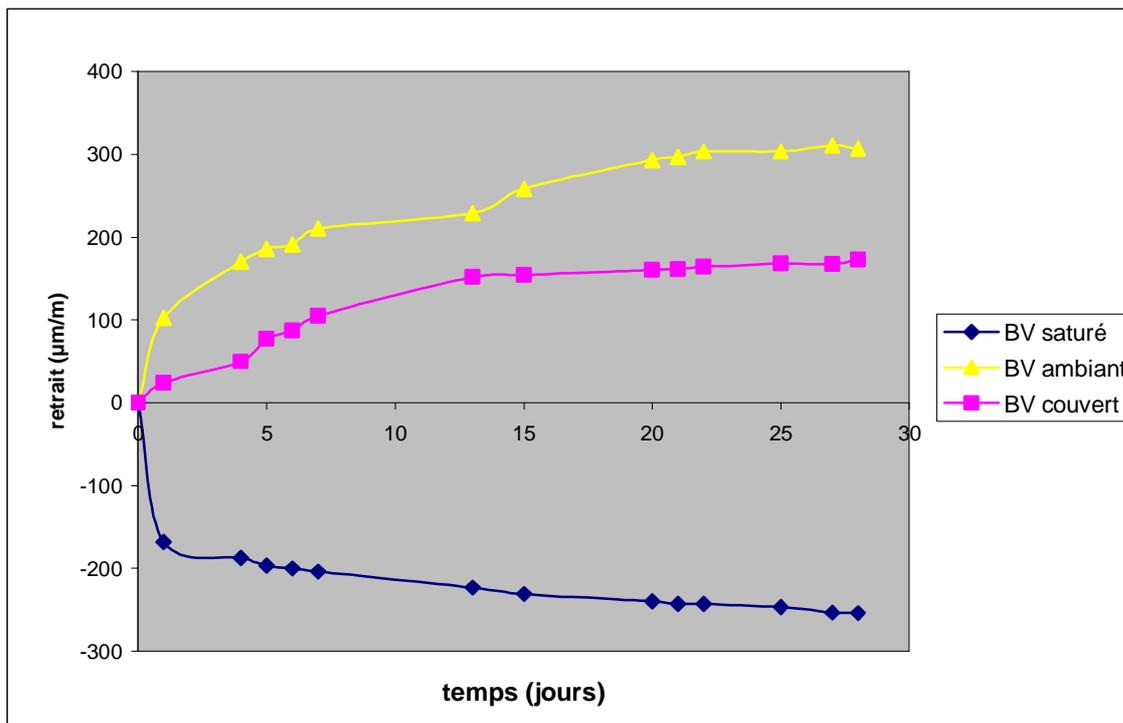


Figure 5.8 : retrait de BV d'après le mode de conservation

L'analyse des courbes des bétons testés, indique deux phases de retrait, en premier temps, la déformation de retrait est rapide et importante du fait du très forts gradients d'humidité qui existe entre le matériau testé et le milieu extérieur « voire les éprouvettes conservées à l'air libre où ce gradient est très important ». Au début de séchage, les plus gros pores capillaires se vident rapidement de leur eau engendrant des déformations de retrait importantes. Mais par

la suite, le séchage étant un processus diffusionnel, sa cinétique devient extrêmement lente. Pour les mélanges ayant subi un mode de conservation couvert, le retrait est diminué de la moitié par rapport aux mélanges conservés à l'air libre. Ceci est expliqué par la diminution du gradient d'humidité conséquence de l'empêchement des échanges hydriques avec le milieu extérieur. En mode Saturé : dans ce cas on remarque carrément un gonflement de l'éprouvette, ceci est du à l'absorption d'eau par les mélanges.

b. Influence de fillers :

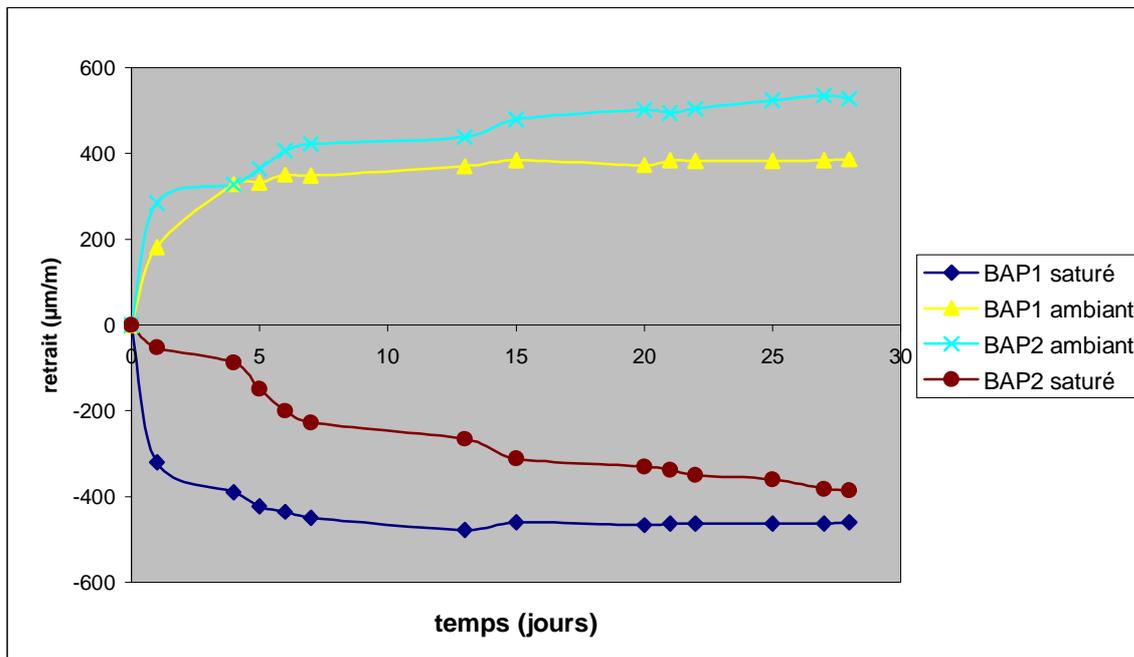


Figure 5.9 : présentation de retrait de BAP

On observe deux phases pour le retrait des BAP. La première phase, montre que le retrait se développe rapidement dans les premiers jours (1-5j). Ensuite, dans la deuxième phase, on observe une diminution de vitesse de développement de retrait, la stabilisation de retrait pour le BAP contenant plus de fillers apparaît après 15 jours de mesure. D'un point de vue pratique, pour un rapport E/C constant, le retrait augmente avec l'augmentation du dosage de ciment, la plus grande quantité de pâte de ciment hydratée est responsable du retrait. [Neuville 00]

Au cours de l'hydratation, les pores de la pâte sont remplis petit à petit par les hydrates. Si on remplace une partie du ciment par une addition, la quantité d'hydrates formés diminue.

Le filler calcaire peut avoir un effet positif en limitant le retrait de séchage des BAP, s'il est utilisé avec une finesse et une proportion adéquates Van 99 [Assié 04], ce qui est observé

dans la figure 5.9, d'où on remarque que le BAP contenant plus de fillers présente moins de retrait. Par contre en milieu saturé, le gonflement du BAP avec un dosage élevé de fillers est plus grand, ceci est expliqué par l'absorption de l'eau par le fillers.

c- influence des fibres :

La figure 5.10 montre l'influence du dosage des fibres sur l'évolution de retrait. L'introduction de 0,5% de volume de béton de fibres métalliques n'a pas un effet significatif sur la comportement de béton vis-à-vis le retrait. Le retrait de BAPF est inférieur que celui des BAP. En augmentant le dosages des fibres à 1%, le retrait devient plus élevé que le BAP sans fibres. Ceci peut être expliquer, par l'augmentation de pourcentage de l'air occlus pour les bétons renforcés de fibres métalliques..

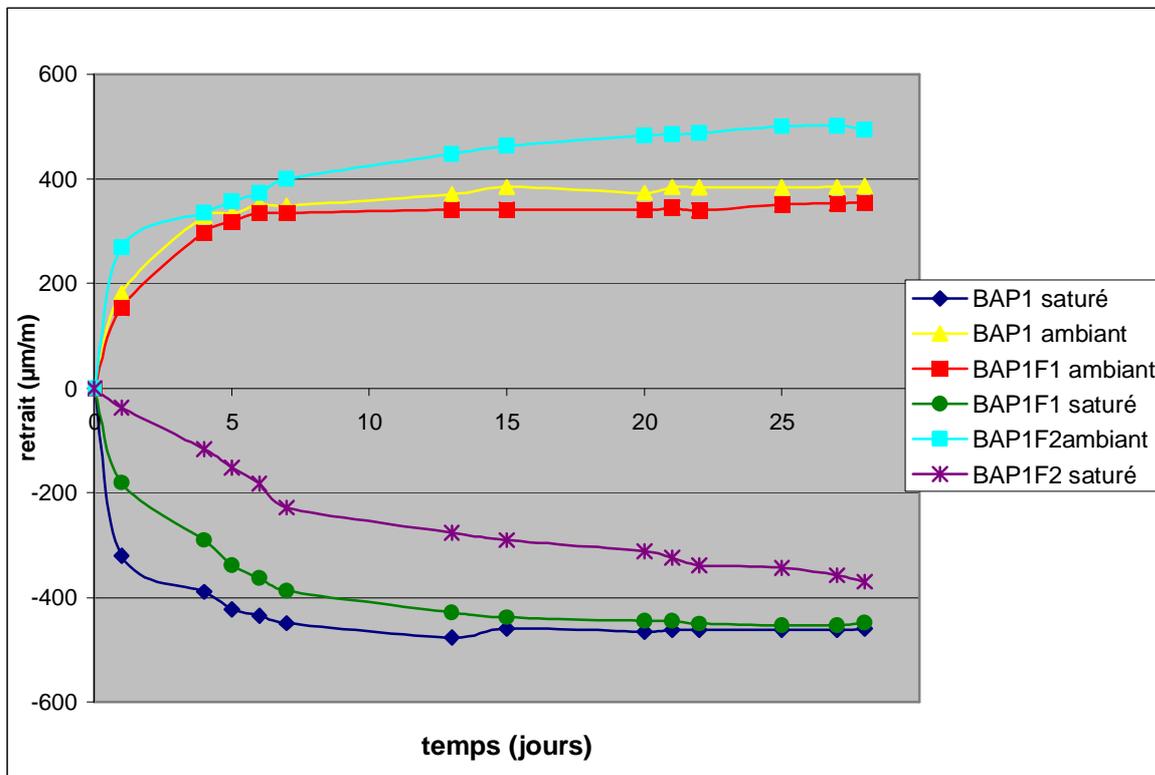


Figure 5.10 :influence des fibres sur le retrait des BAP.

d- influence de la nature de béton :

Les retraits présentent des comportements différents selon la nature de béton. Les BAP présentent un fort retrait par rapport au BV au cours des 20 premiers jours. Puis il commence à être plus lent. Tandis que le BV continu à se rétrécir, d'où sa valeur se converge à celle de retrait de BAP. La différence de retrait entre les deux bétons est de 126µm/m à 15 jours est

diminue jusqu'à quelle atteint $52\mu\text{m/m}$. Malgré que l'introduction des fibres métalliques diminuent un peu le retrait, les BAPF présentent toujours un retrait supérieur à celui de BV. Cette différence de retrait est due probablement au grand volume de pâte dans le cas des BAP. Le BAP et le BAPF retrouvent leur stabilisation après les 7 premiers jours. Le retrait de BAPF est le plus stable. D'autre part le BV montre sa stabilité après les 20 jours.

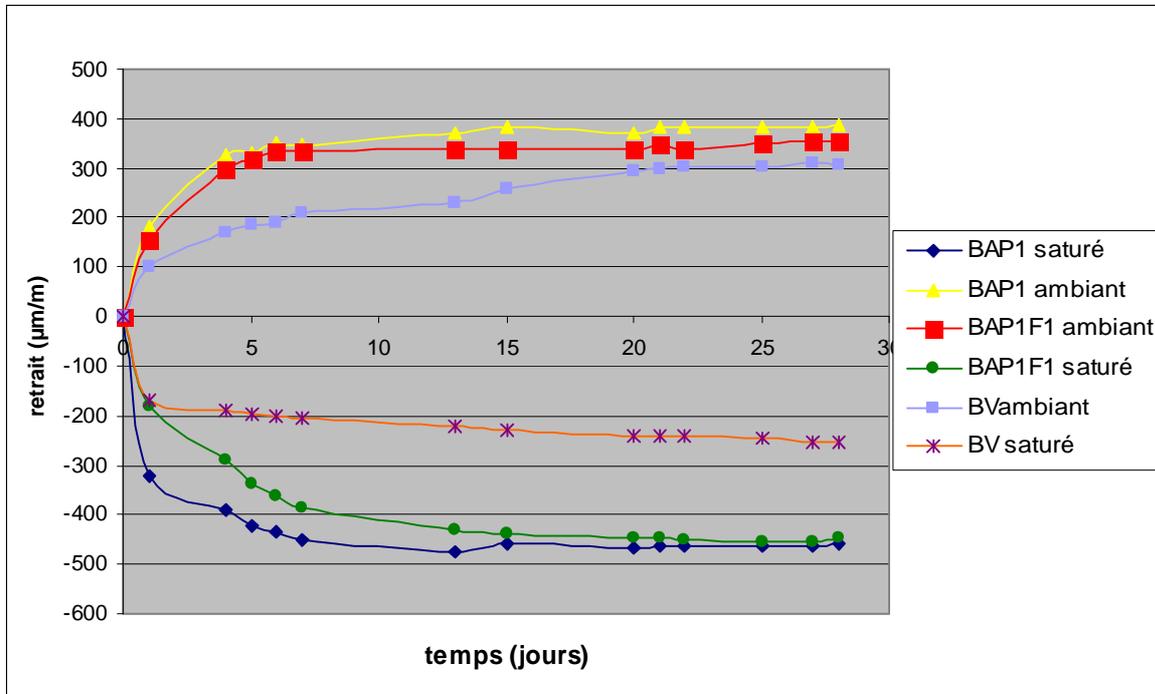


Figure 5.11 : évolution de retrait selon la nature des bétons.

5.4.1.2 Retrait des bétons après choc « chauffage à 120°C »:

a. Influence de mode de conservation :

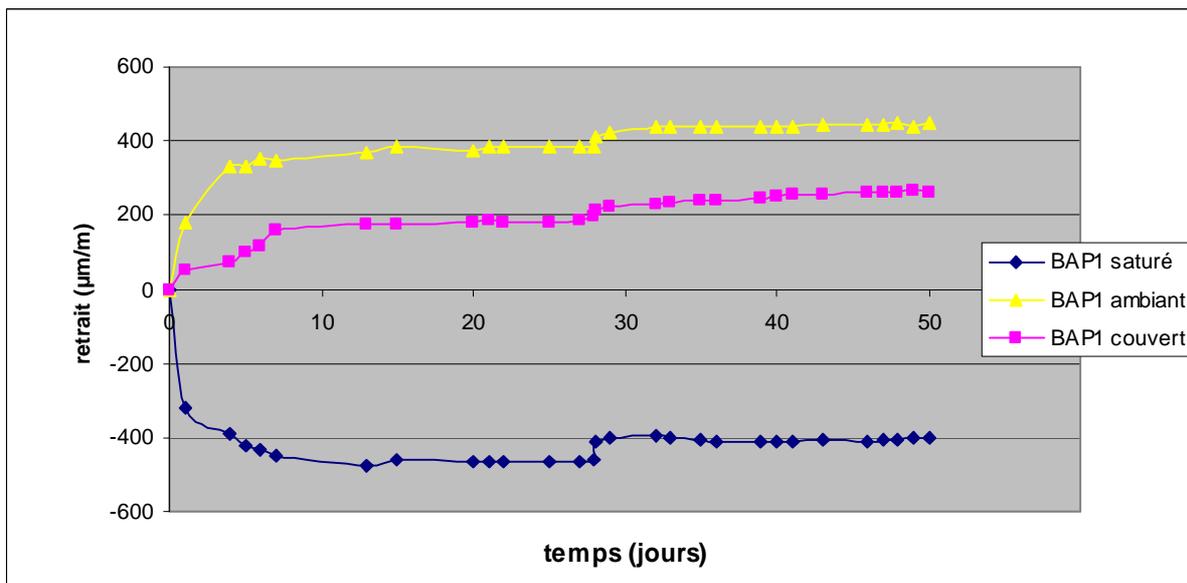


Figure 5.12: retrait de BAP1 après chauffage à 120°C.

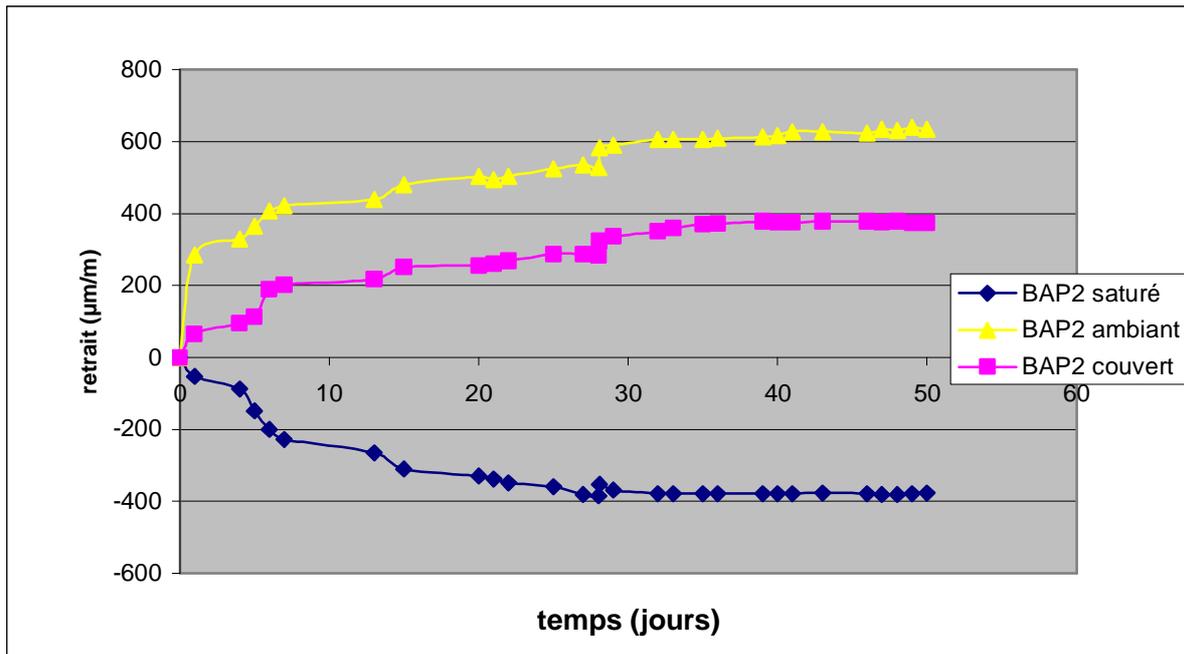


Figure 5.13 : retrait de BAP2 après chauffage à 120°C.

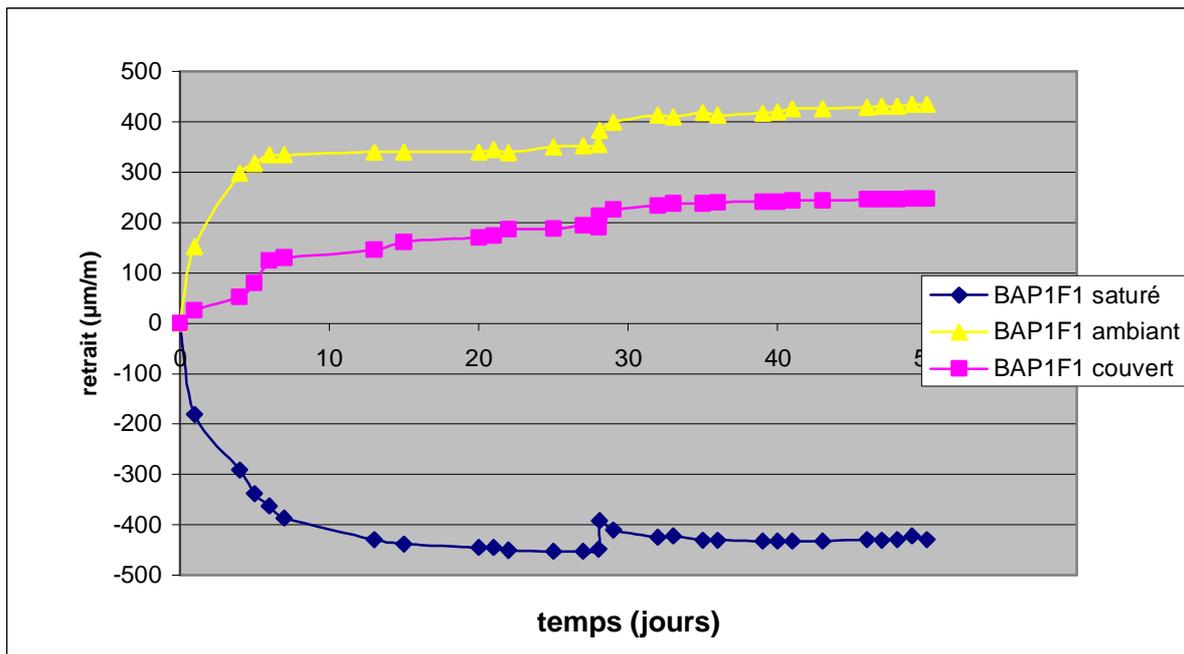


Figure 5.14 : retrait de BAP1F1 après chauffage à 120°C.

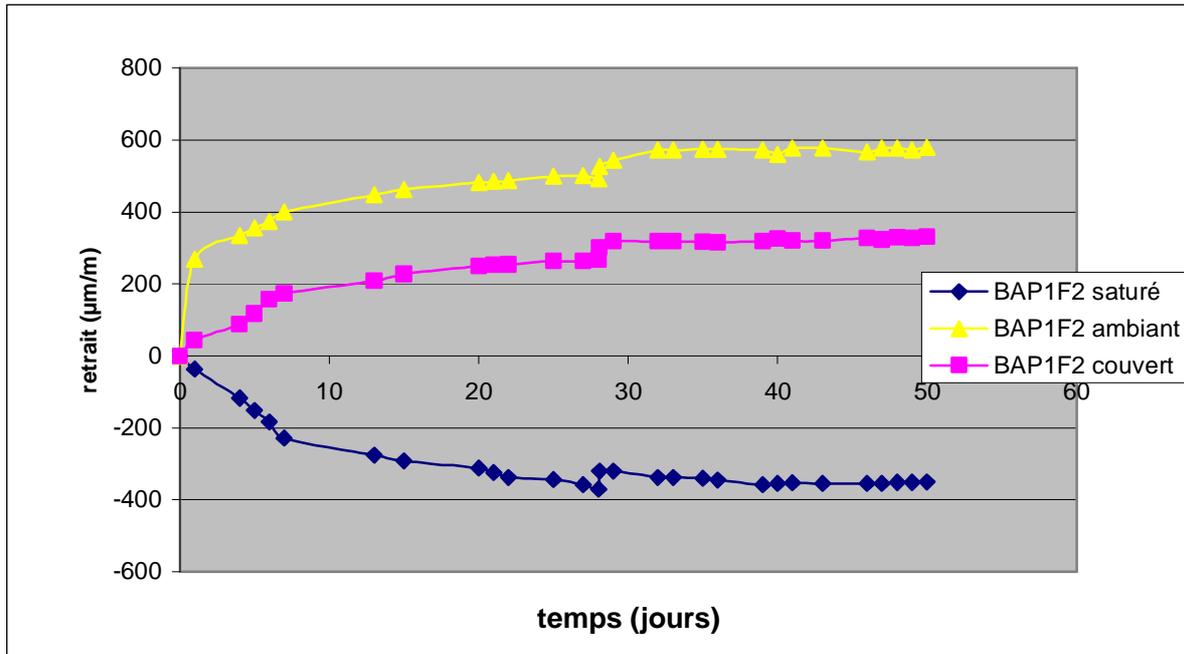


Figure 5.15 : retrait de BAP1F2 après chauffage à 120°C.

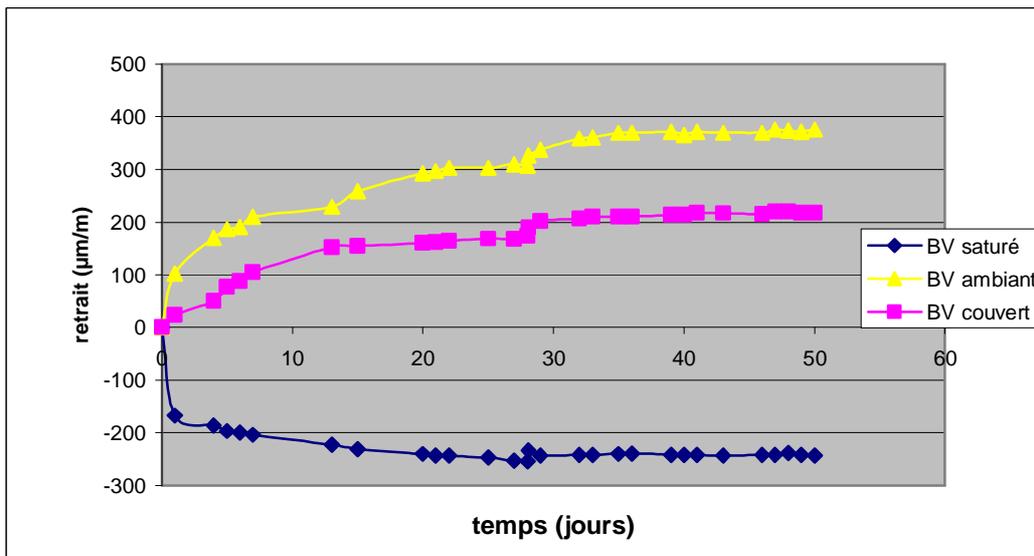


Figure 5.16 : retrait de BV après chauffage à 120°C.

Il y a un raccourcissement pour les différents bétons dû au séchage des éprouvettes soumis à un cycle de chauffage refroidissement. La quantité d'eau évaporé varie selon le mode de conservation. Comme il est montré dans les figures précédentes,

La pâte une fois sèche, rétrécit. Il n y a pas de regain de retrait une fois le spécimen se refroidit, donc il y a un raccourcissement résiduel du béton après un cycle d'échauffement et

de refroidissement du spécimen. sauf pour les éprouvettes immergées dans l'eau où il y a un regain d'humidité du probablement au réabsorption de l'eau.

b. Influence de fillers:

Après exposition à un cycle de chauffage refroidissement, les BAP contenant moins de fillers présentent un raccourcissement plus important $55\mu\text{m/m}$, deux fois plus que le BAP avec plus de fillers qui subit un retrait dû au séchage d'une valeur de $26\mu\text{m/m}$ à l'air libre. Par contre le raccourcissement en milieu saturé pour le BAP avec un grand dosage de fillers est le plus élevé conséquence de l'évaporation d'eau absorbée par le fillers durant la période qui précède le chauffage.

	BAP1		BAP2	
	ambiant	saturé	ambiant	saturé
Retrait avant choc ($\mu\text{m/m}$)	386,428	460	528	385
Retrait après choc ($\mu\text{m/m}$)	412	411	583	353
Taux de raccourcissement	25,572	49	55	32

Tableau 5.3 :retrait dû au choc thermique.

La figure 5.17 présentent l'évolution de retrait avant et après le choc thermique. Après le cycle de chauffage refroidissement, le retrait du BAP avec moins de fillers se poursuit pendant que le retrait du BAP contenant plus de fillers se stabilise. Avant le choc thermique le BAP avec plus de fillers présente un fort gonflement, d'autre part après le choc thermique il se stabilise sans aucun regain d'humidité.

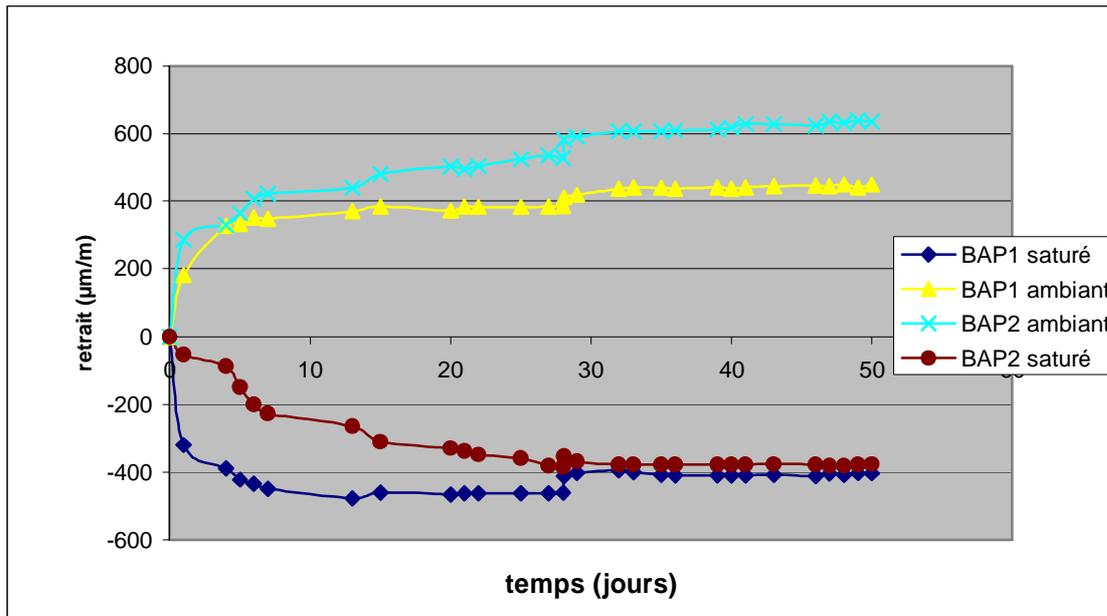


Figure 5.17 : évolution de retrait des BAP après chauffage à 120°C

c- influence des fibres :

Les résultats des raccourcissement du BAP1, du BAP1F1 et du BAP1F2 après exposition à un cycle de chauffage refroidissement à 120°C sont présentés dans le tableau 5.4. Le raccourcissement produit après le choc thermique est de même grandeur respectivement de 26 et 28µm/m pour le BAP1 et le BAP1F1, et il augmente jusqu'à 34µm/m en exhaussant le dosage de fibres métalliques à 1% de volume de béton. En milieu saturé, le raccourcissement dû au chauffage est plus élevé en introduisant 0,5% de fibres métalliques de volume de béton, et il diminue légèrement en augmentant le dosage de fibres à 1%.

		BAP1		BAP1F1		BAP1F2	
		ambiant	saturé	ambiant	saturé	ambiant	saturé
Retrait	avant	386,428	460	355	448	493	370
choc							
Retrait	après	412	411	383	392	527	320
choc							
Taux	de	25,572	49	28	56	34	50
raccourcissement							

Tableau 5.4 : raccourcissement de BAP et BAP1F1 dû au chauffage

La figure 5.18 présente le processus de retrait avant, durant, et après le chauffage. Cette figure indique que les fibres métalliques ne modifient pas le retrait des BAP. Elle montre que les courbes de retrait de BAP et BAPF avec 0,5% de dosage de fibres sont identiques. Mais l'introduction de 1% de fibres métallique augmente le retrait après le choc thermique. Les trois bétons retrouve leur stabilité après quelques jours après le choc thermique. En milieu saturé, le gonflement du BAP et du BAPF renforcé de 0,5% de fibres, a tendance à se stabiliser après un regain d'humidité pour le béton autoplaçant renforcé de fibres.

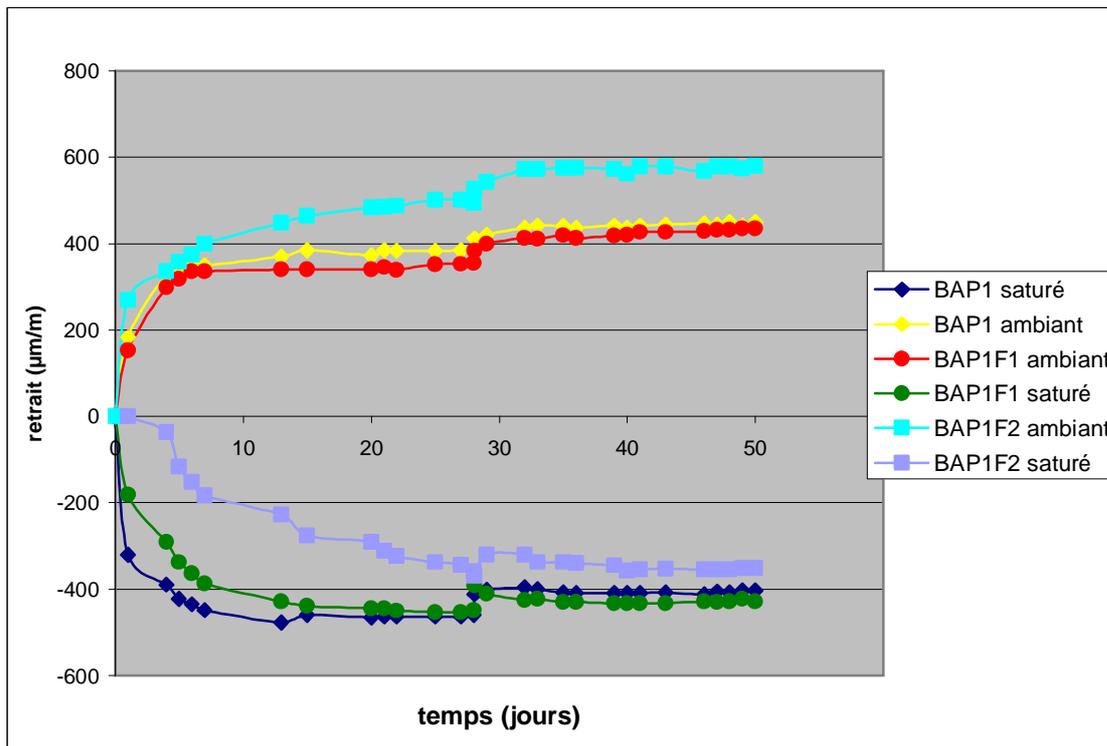


Figure 5.18 : évolution de retrait des BAP après chauffage à 120°C

d- influence de la nature des bétons :

Le choc thermique engendre un raccourcissement significatif pour les trois bétons testés. La diminution de volume pour le BAP1 est supérieure à celle de BV respectivement de 25 et 19 $\mu\text{m/m}$ pour les mélanges conservés à l'air libre. Ces valeurs augmentent pour donner un raccourcissement respectivement 49 et 21 $\mu\text{m/m}$ pour le BAP1 et le BV pour les mélanges immergés dans l'eau. L'introduction des fibres au BAP donne des rétractions plus grandes que celles de BV et de BAP sans fibres.

		BAP1		BAP1F1		BV	
		ambient	saturé	ambient	saturé	ambient	saturé
Retrait	avant	386,428	460	355	448	306,428	254
choc							
Retrait	après	412	411	383	392	326	233
choc							
Taux	de	25,572	49	28	56	19,572	21
raccourcissement							

Tableau 5.6 : raccourcissement du BAP et BV dû au chauffage

Après un cycle d'échauffement et de refroidissement, les béton autoplaçants avec et sans fibres présentent un comportement de retrait similaire à celui de béton vibré avec les différences dans les grandeurs atteintes par les bétons. Comme avant le chauffage le retrait des BV reste le plus bas. Après le choc thermique les trois bétons poursuivent leur cinétique de retrait avec une vitesse très lente et récupèrent leur stabilité après quelque jours seulement.

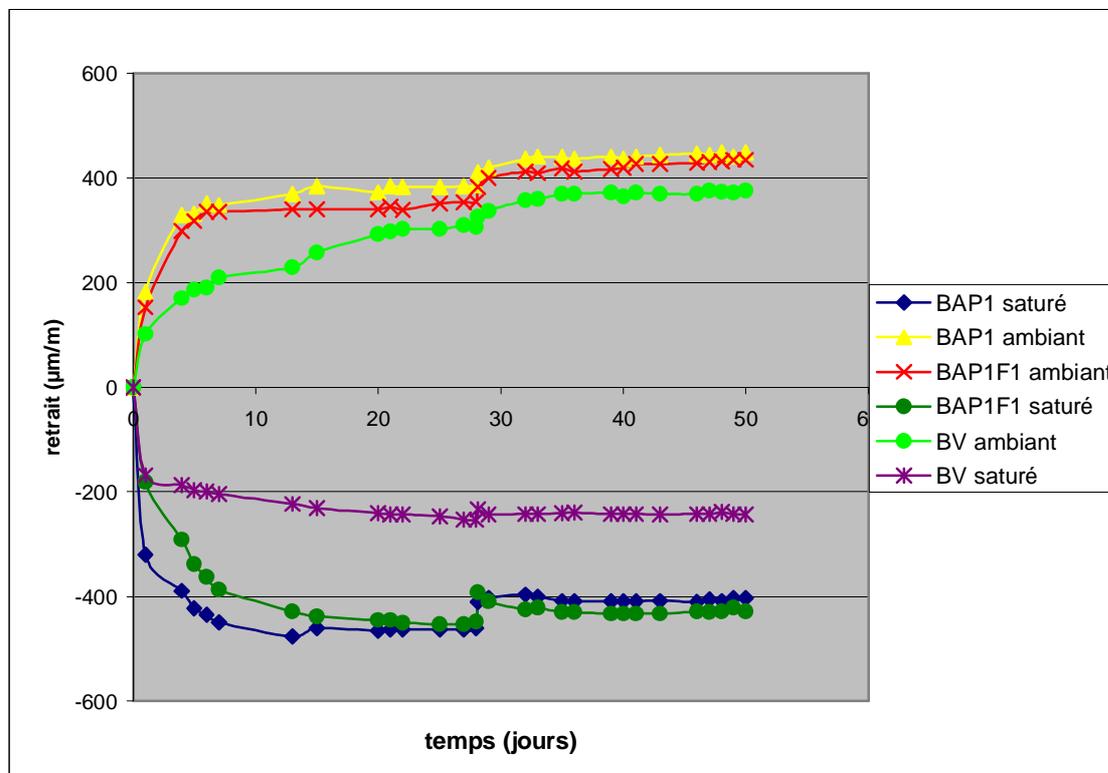


Figure 5.19 : évolution de retrait des BAP après chauffage à 120°C

5.4.1.3 Retrait des bétons après chauffage à 200°C:

a. Influence de mode de conservation :

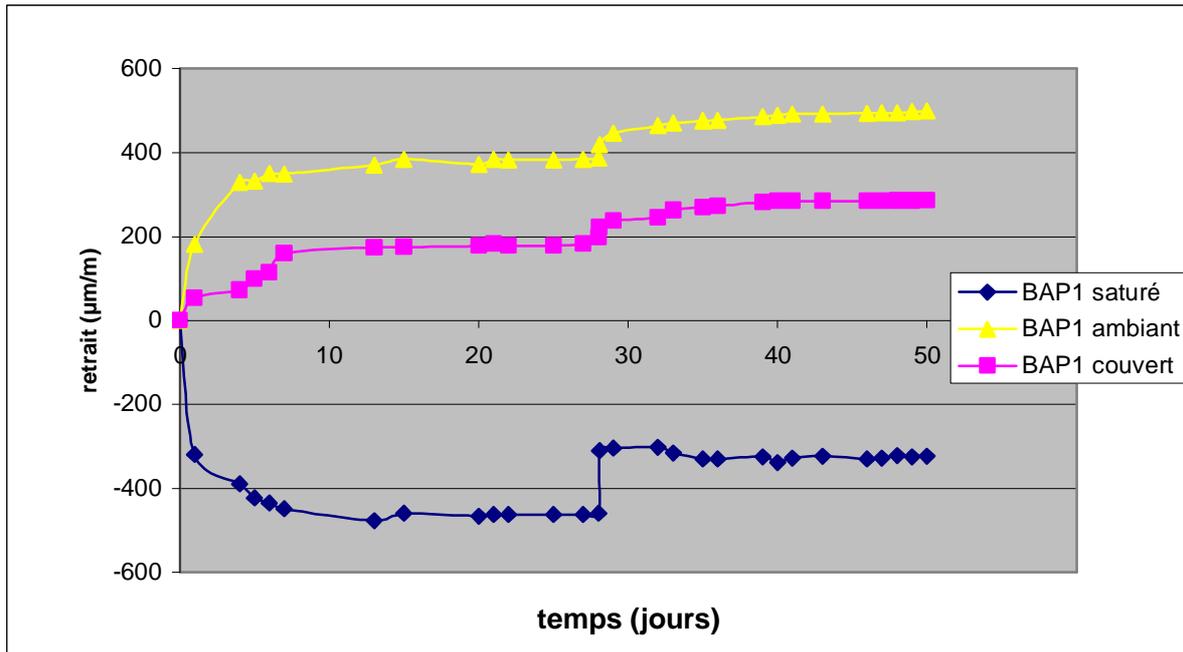


Figure 5.20 : retrait de BAP1 chauffé à 200°C

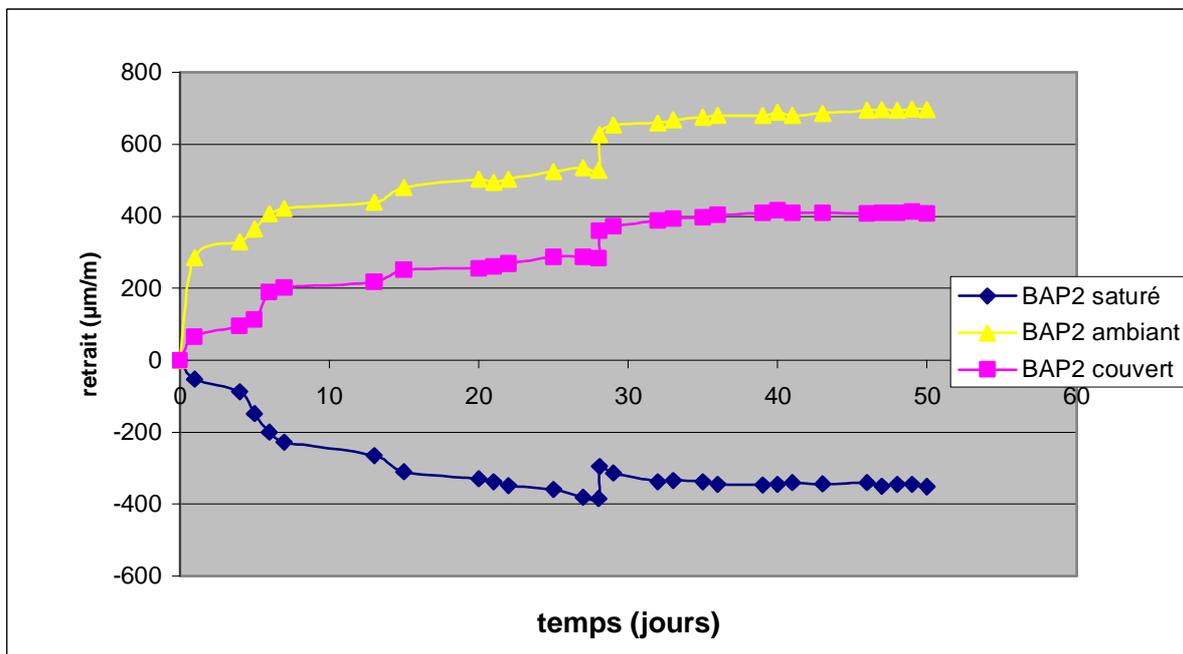


Figure 5.21 : retrait de BAP2 chauffé à 200°C.

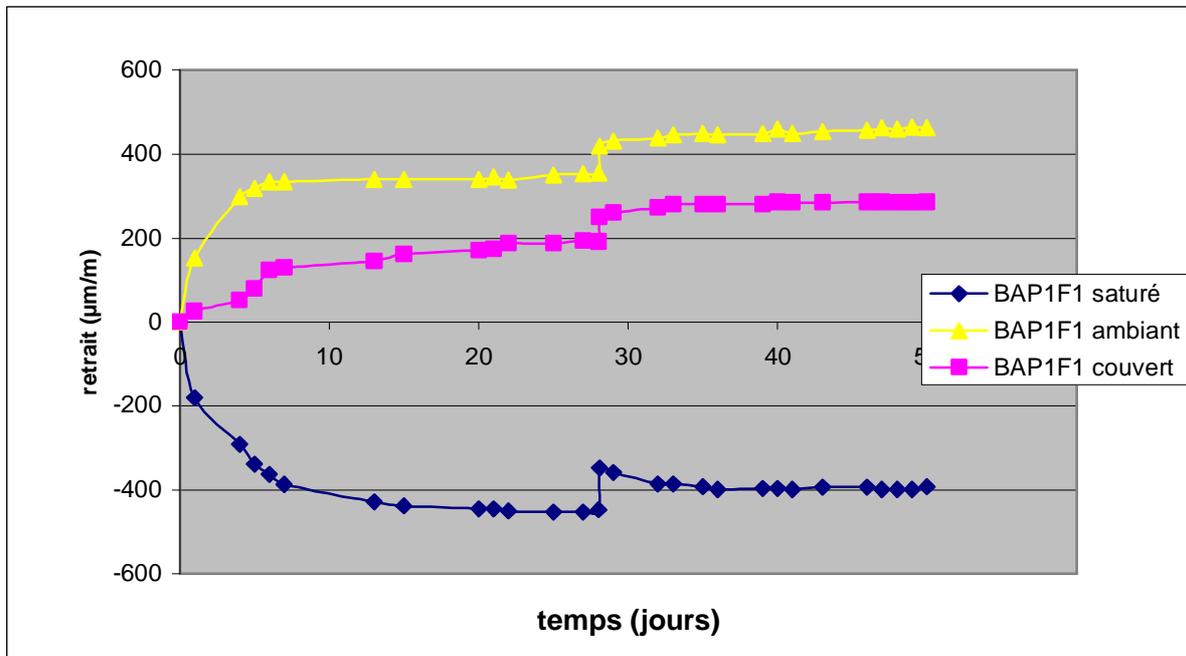


Figure 5.22 :retrait de BAP1F1 chauffé à 200°C

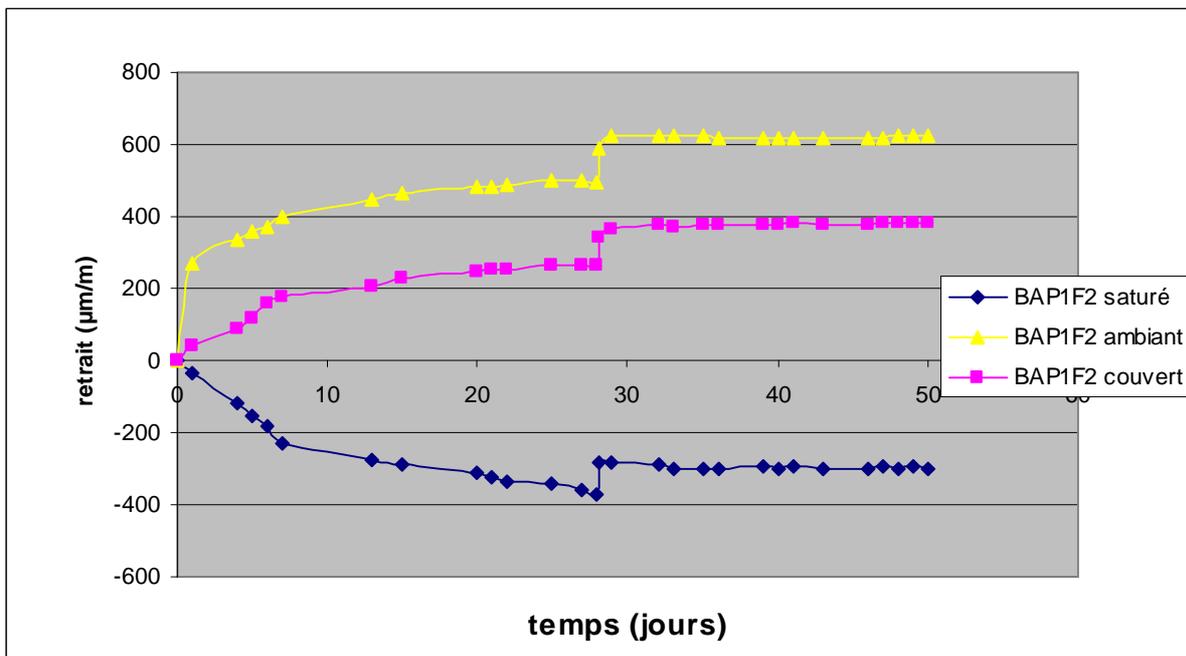


Figure 5.23 :retrait de BAP1F2 chauffé à 200°C.

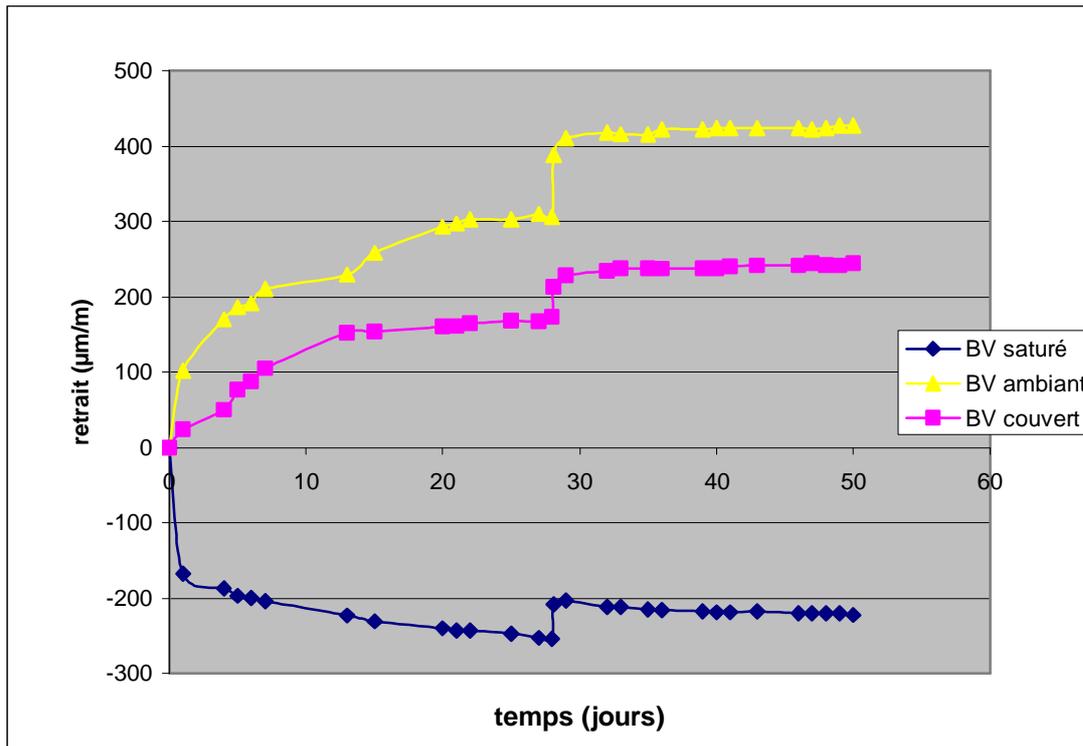


Figure 5.24 :retrait de BV chauffé à 200°C.

Le chauffage cause un fort retrait du au départ d'eau. Le taux de retrait varie selon le mode de conservation. Les bétons conservés à l'air libre présentent moins de rétraction ;lors du choc thermique ; parce qu'il contient moins d'eau. On peut l'expliquer par l'évaporation d'eau durant la conservation. Donc, le raccourcissement décroît avec la diminution d'humidité. Après cette rétraction, tous les bétons se sont stabilisés après un petit regain d'humidité pour les bétons conservés à l'eau.

La pâte une fois sèche, rétrécit. Il n y a pas de regain de retrait une fois le spécimen se refroidit, donc il y a un raccourcissement résiduel du béton après un cycle d'échauffement et de refroidissement du spécimen.

b. Influence de fillers:

A 200°C, les mélanges subit un retrait important . Ce mouvement provient de la diminution de tension capillaire de l'eau adsorbée dans la pâte de ciment. Les BAP contenant un dosage de filler élevé subit un retrait inférieur, moins de trois fois que celui de BAP contient moins de fillers.

		BAP1		BAP2	
		ambient	saturé	ambient	saturé
Retrait	avant choc	386,428	460	528	385
Retrait	après choc	419	310	628	295
Taux	de raccourcissement	32,572	150	100	95

Tableau 5.7 : retrait produit par un choc thermique.

La figure 5.25 indique l'évolution de retrait avant, durant et après le choc thermique des bétons autoplaçants avec des dosages de fillers différents.

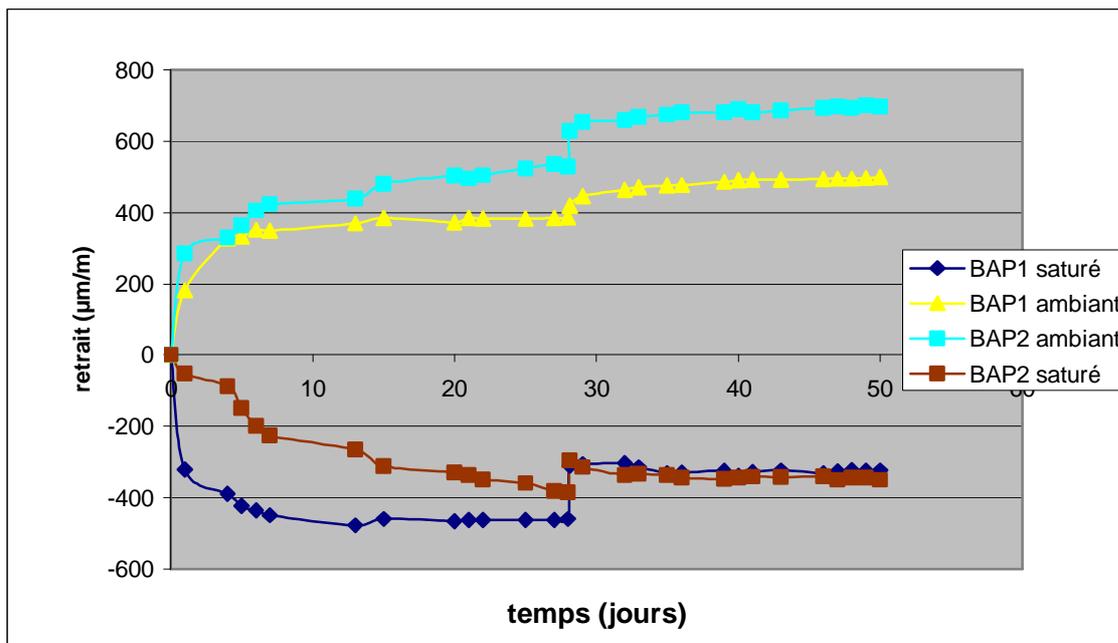


Figure 5.25 : évolution de retrait des BAP chauffés à 200°C.

c- influence de fibres :

L'exposition des bétons à un choc thermique entraîne un fort retrait dû probablement au départ d'eau de ces bétons conséquence de l'élévation de la température. Le tableau 5.8 présente les résultats obtenus. Les bétons autoplaçants renforcés de fibres métalliques présentent des raccourcissements supérieurs à celui de BAP1 respectivement le double et le triple de celui de BAP1, pour le BAP1F1 renforcé de 0,5% et le BAP1F2 avec 1% de fibres

métalliques, on peut l'expliquer, que les fibres métalliques créés des buses de drainage au sein de béton, ce qui facilite le départ de l'eau conséquence de retrait. En milieu saturé, le raccourcissement du au chauffage diminue avec l'augmentation de dosage de fibres.

		BAP1		BAP1F1		BAP1F2	
		ambiant	saturé	ambiant	saturé	ambiant	saturé
Retrait	avant	386,428	460	355	448	493	370
choc							
Retrait	après	419	310	420	348	591	281
choc							
Taux	de	32,572	150	65	100	98	89
raccourcissement							

Tableau 5.8 :retrait dû au chauffage à 200°C.

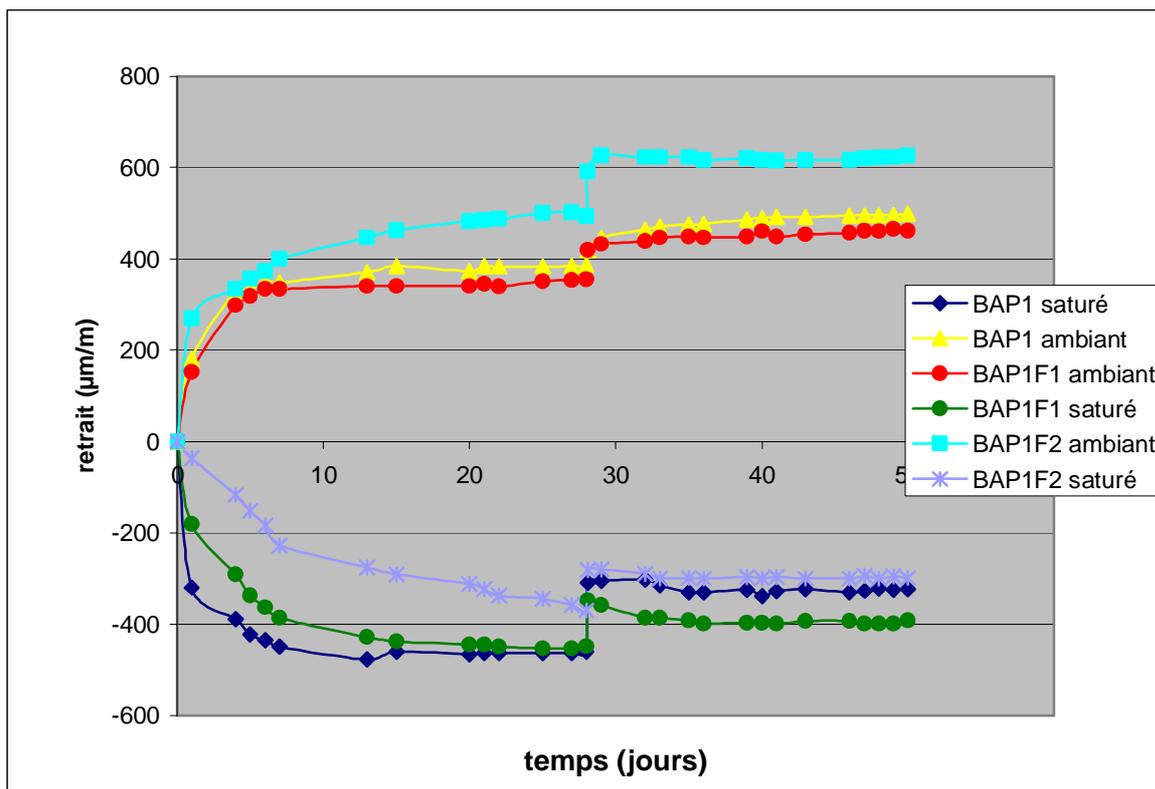


Figure 5.26 : évolution de retrait des BAP et BAPF chauffés à 200°C.

On remarque sur la figure 5.26 que l'introduction de 0.5% des fibres n'a pas de grande influence sur le retrait des BAP après le choc thermique. Le BAPF avec ce taux de fibres présente le même comportement qu'avant le choc. L'introduction de 0,5% de fibres

diminuent le retrait. Par contre l'augmentation de dosage de fibres métalliques à 1% de volume de béton est traduit par un fort retrait. Les courbes des trois bétons se sont stabilisées après le choc thermique. le gonflement est beaucoup plus influencé par l'introduction des fibres après le choc thermique à 200°C. un pourcentage de 0.5% des fibres augmentent le gonflement des BAPF conséquence de la réabsorption de l'eau, tandis qu'avant le choc thermique ce dosage des fibres diminuent le gonflement. Le dosage de 1% de fibres diminue le gonflement de béton autoplaçant.

d- influence de la nature des bétons :

Le béton vibré est plus poreux que les bétons autoplaçants . Donc l'eau s'évapore de BV plus rapidement, causant un grand retrait après q'il subisse un choc thermique. L'introduction de fibres conduis à une augmentation de la rétraction causée par le choc thermique, le double par rapport au BAP sans fibres.

	BAP1		BV		BAP1F1	
	ambiant	saturé	ambiant	saturé	ambiant	saturé
Retrait avant choc	386,428	460	306,428	254	355	448
Retrait après choc	419	310	388	208	420	348
Taux de raccourcissement	32,572	150	81,572	46	65	100

Tableau 5.8 :retrait des BAP, BAPF et BV dû au chauffage à 200°C.

Après le choc thermique, la figure 5.27 montre que les courbes présentant l'évolution de retrait des trois bétons se stabilisent après une augmentation de retrait pour le BAP sans fibres avec une vitesse très lente. En milieu saturé, les fibres augmente l'aptitude au gonflement de bétons autoplaçants après le choc thermique.

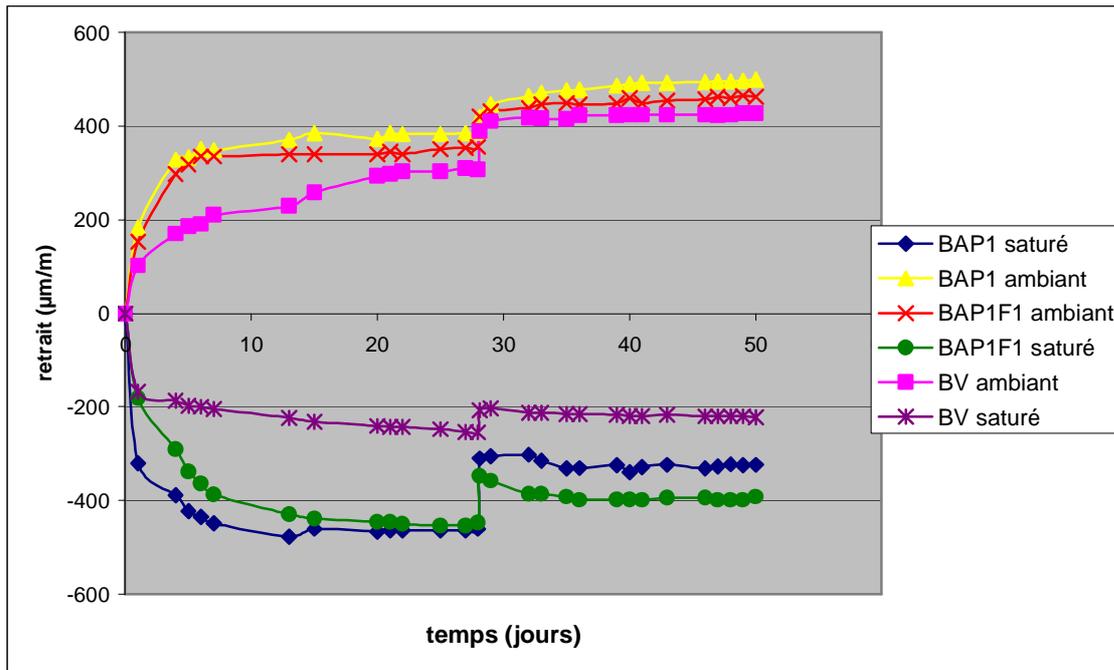


Figure 5.27 : évolution de retrait des BAP chauffés à 200°C.

5.4.2 Perte en poids:

5.4.2.1 Perte en poids du béton sans chauffage:

a. Influence de mode de conservation :

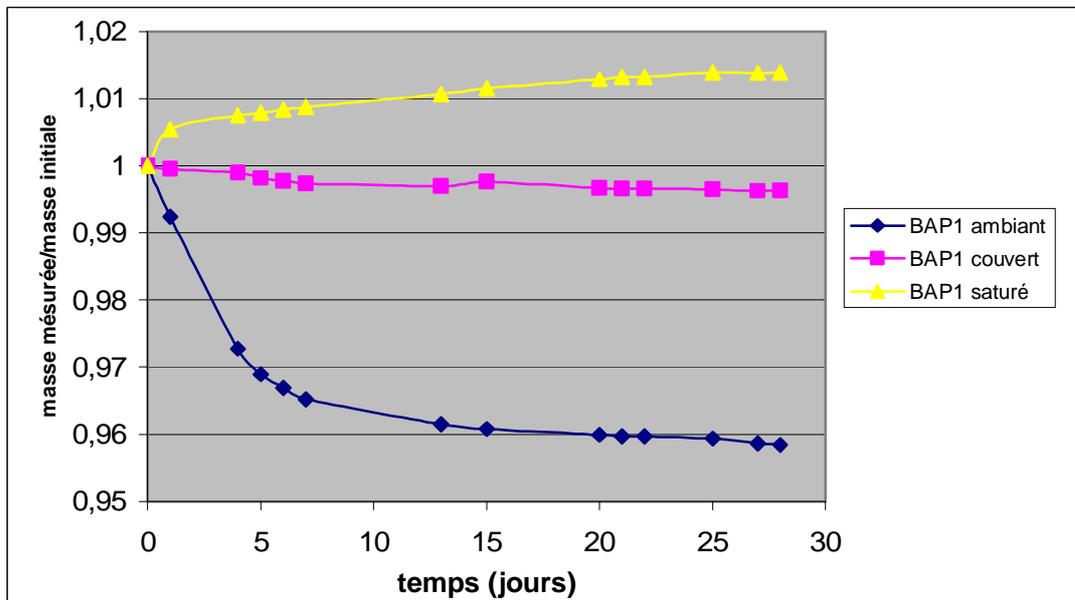


Figure 5.28 : perte de masse de BAP1.

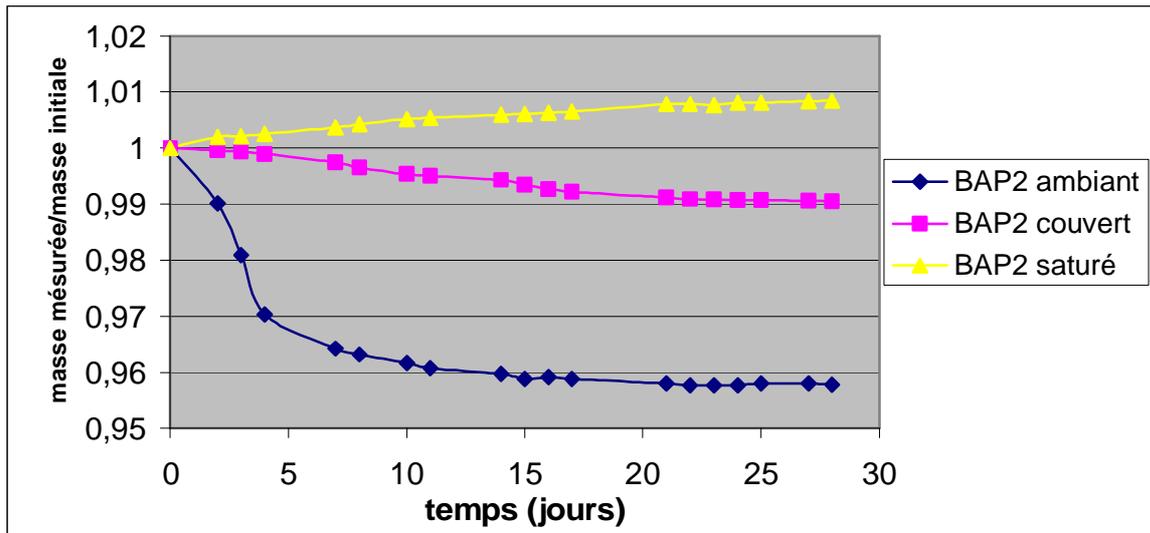


Figure 5.29 : perte de poids de BAP2.

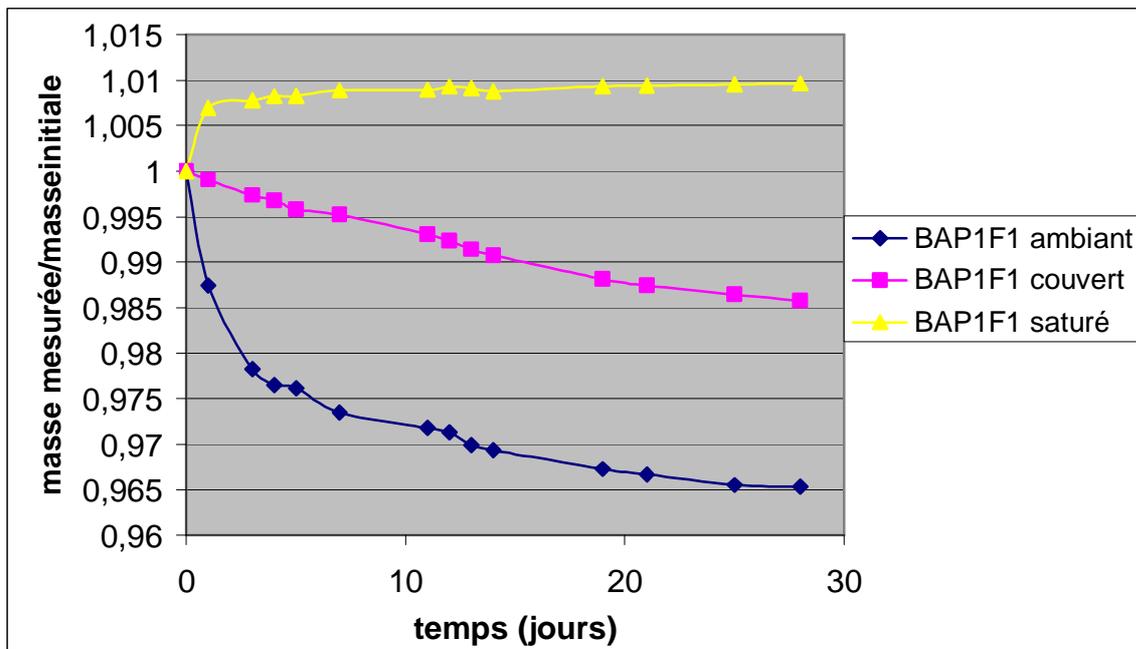


Figure 5.33 : perte de poids de BAP1F.

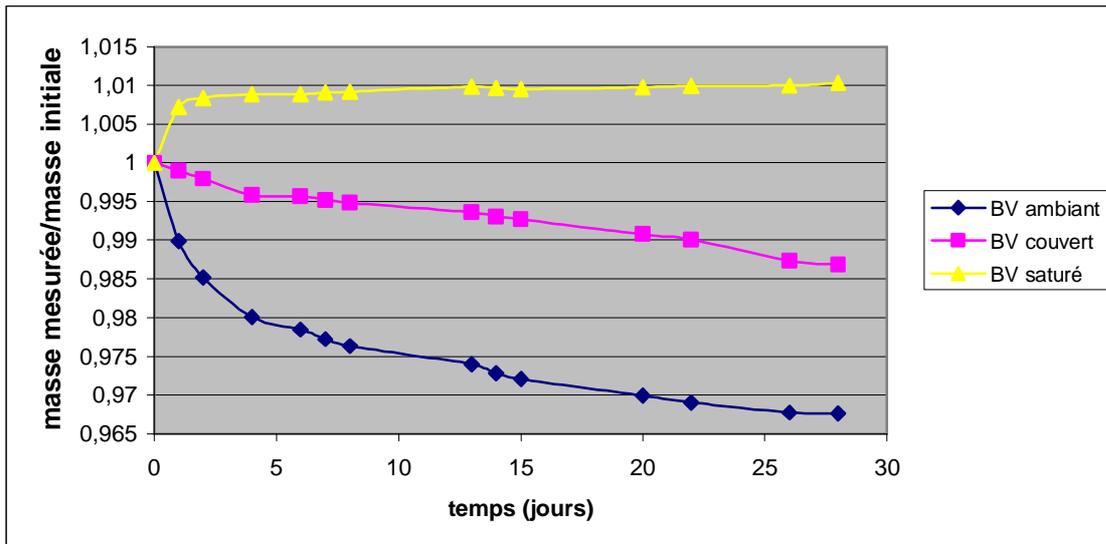


Figure 5.31 : perte de masse de BV sous différents mode de conservation.

Les figures de 5.28 à 5.31 illustrent la cinétique d'eau selon les modes de conservation.

L'évaporation et l'absorption de l'eau est directement reliées par le mode de conservation des bétons. A l'air ambiant, les mélanges subissent une évaporation de l'eau conséquence de la différence des gradients hydriques entre le milieu extérieur et le corps des éprouvettes. Le mode de conservation couvert a pour rôle d'empêcher les échanges hydriques entre les deux milieux ce qui diminue l'évaporation de l'eau. En milieu saturé, les bétons testés absorbent l'eau .

b. Influence des fillers:

La perte de masse par évaporation est mentionnée dans la courbe 5.32; la pente de la courbe représente le taux d'évaporation. Le seul paramètre de composition influant ici est le dosage de fillers: le taux augmente quand le dosage de fillers diminue à l'exception des cinq premiers jours d'où la perte de masse pour le BAP1 est plus élevée. L'essai réalisé en émergeant les mélanges dans l'eau donne un taux d'absorption beaucoup plus faible pour le BAP contenant moins de fillers.

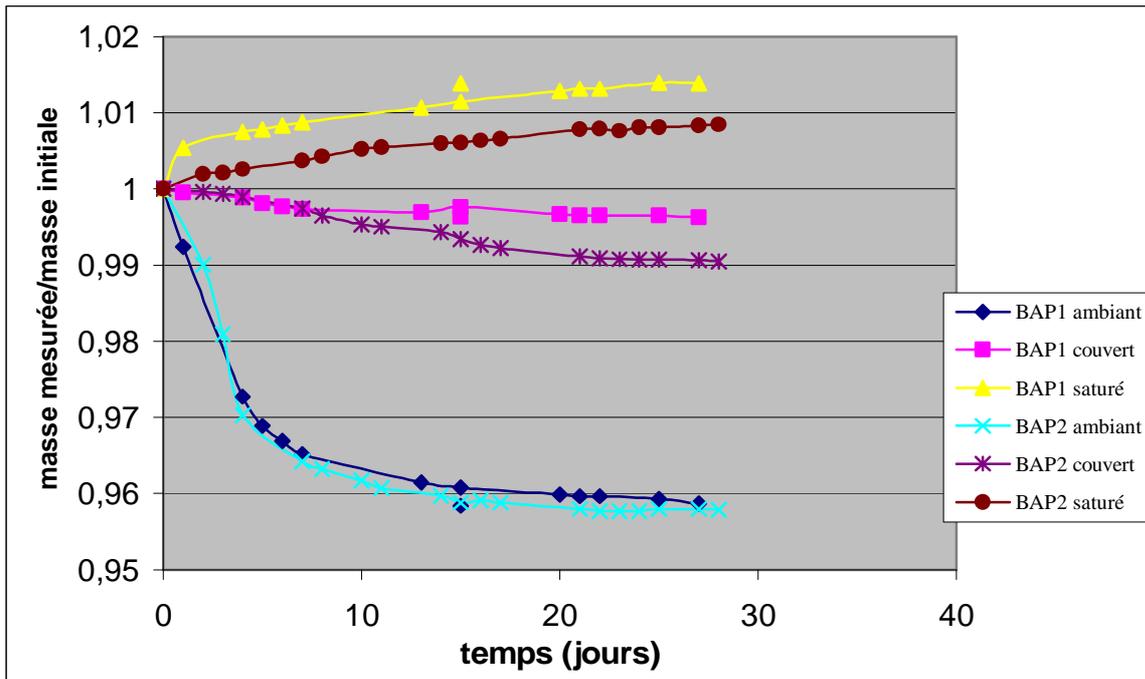


Figure 5.32 : perte de poids des BAP sous trois modes de conservation.

c- influence de fibres :

La figure 5.33 illustre la cinétique d'évaporation pour les BAP et les BAPF. Durant la première semaine l'évaporation et l'absorption de l'eau est plus rapide pour le BAPF que le BAP. Les fibres métalliques forment des buses ce qui facilite l'évaporation d'eau. Par la suite l'évaporation a tendance à se ralentir pour le BAPF.

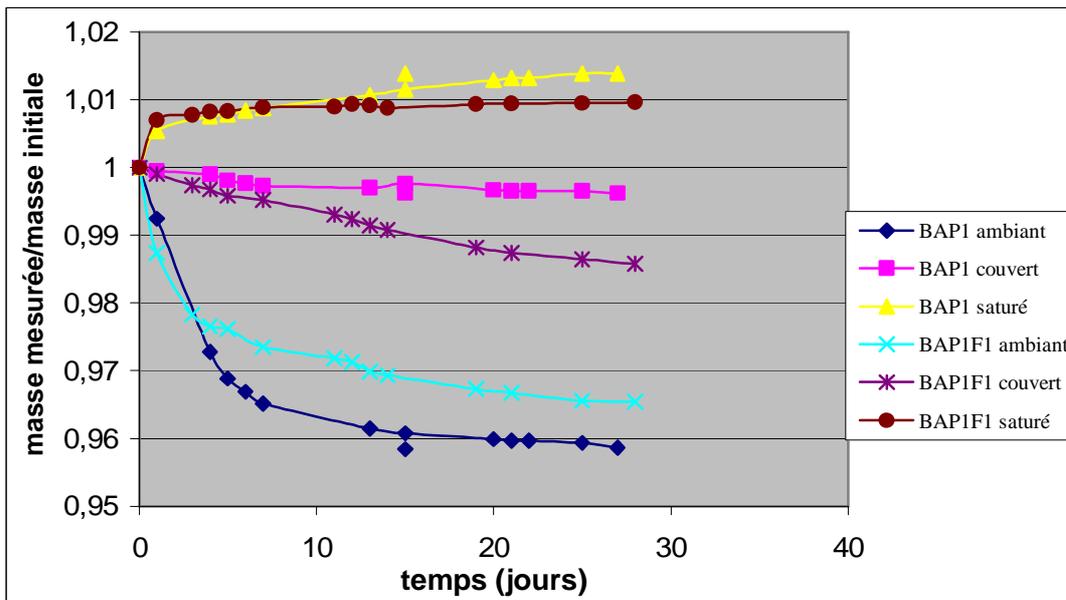


Figure 5.33 : perte de masse des BAP et BAPF.

d- influence de la nature de béton :

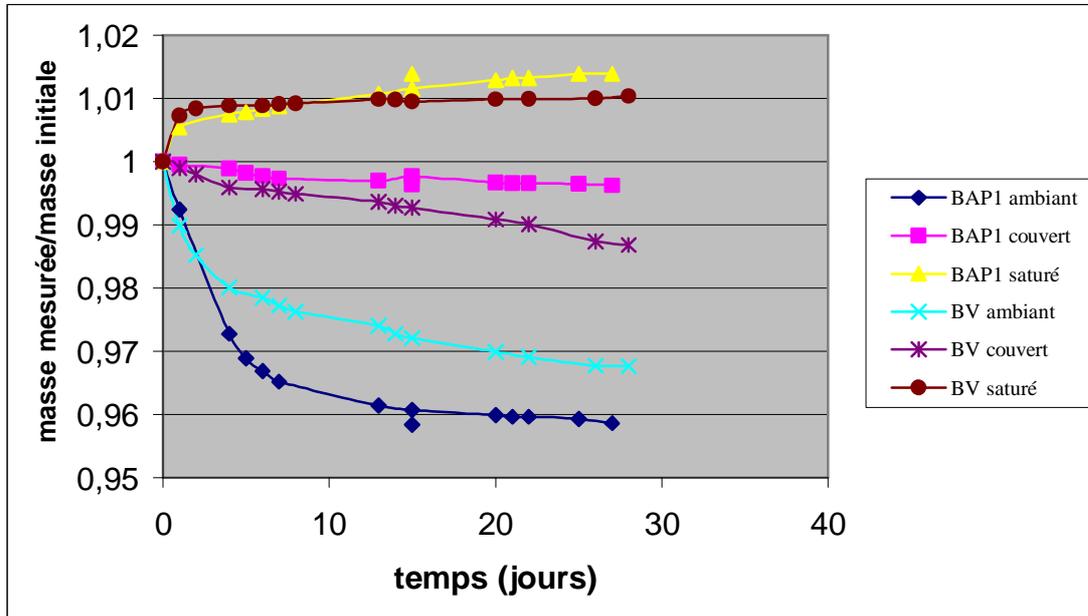


Figure 5.34 : perte de masse de BAP1 et BV.

Les résultats de perte de masse du BAP1 et de BV sont présentés dans la figure 5.34. l'évacuation et l'absorption de l'eau sont plus rapides pour le BV que le BAP1 durant les 10 premiers jours puis elles se ralentissent. Par contre l'eau pour le BAP1 continue sa cinétique d'évaporation et d'absorption et devient plus rapide que le BV. On peut expliquer cela que le BV est plus poreux que le BAP1.

5.4.2.2 Perte en poids du béton chauffé à 120°C:

a. Influence de mode de conservation :

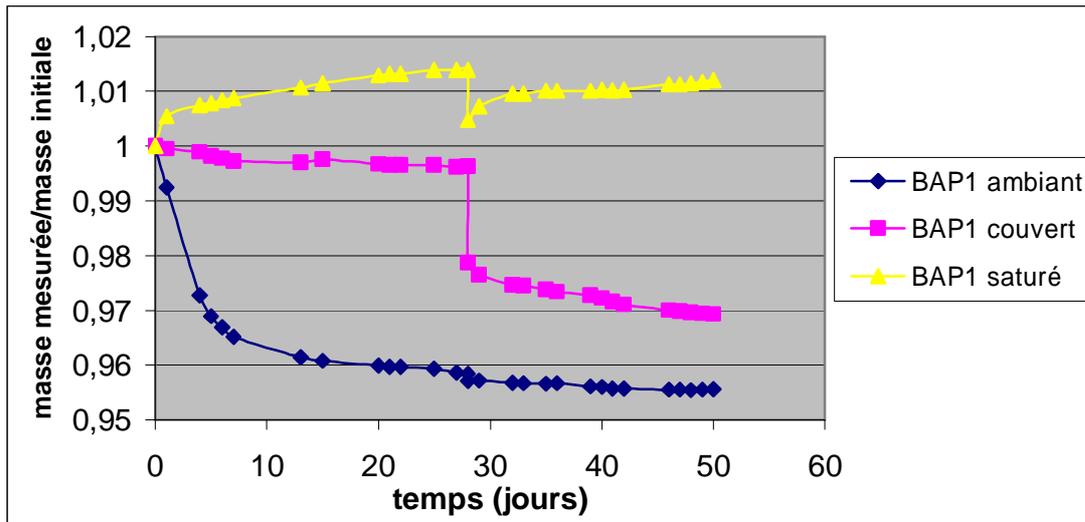


Figure 5.35 : perte de poids de BAP1 à 120°C.

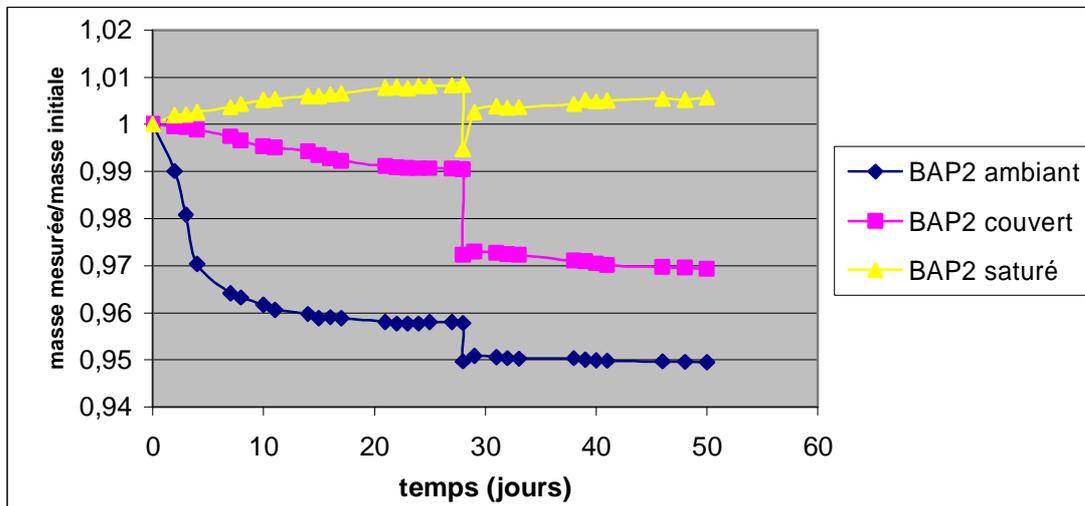


Figure 5.36 : perte en masse de BAP2 chauffé à 120°C.

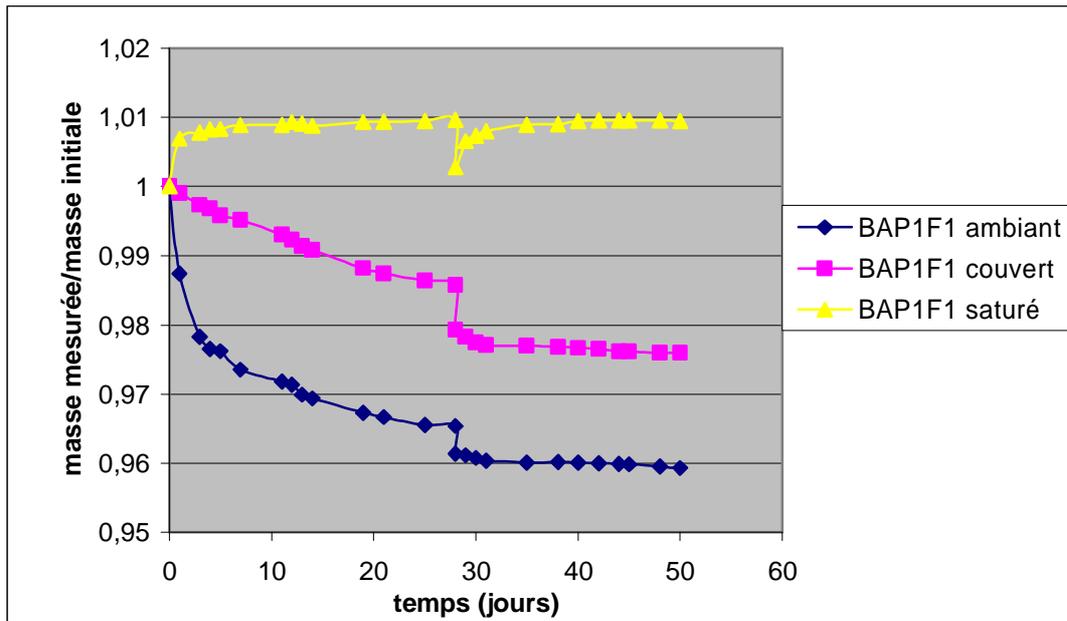


Figure 5.37 : perte en masse de BAP1F1 chauffé à 120°C.

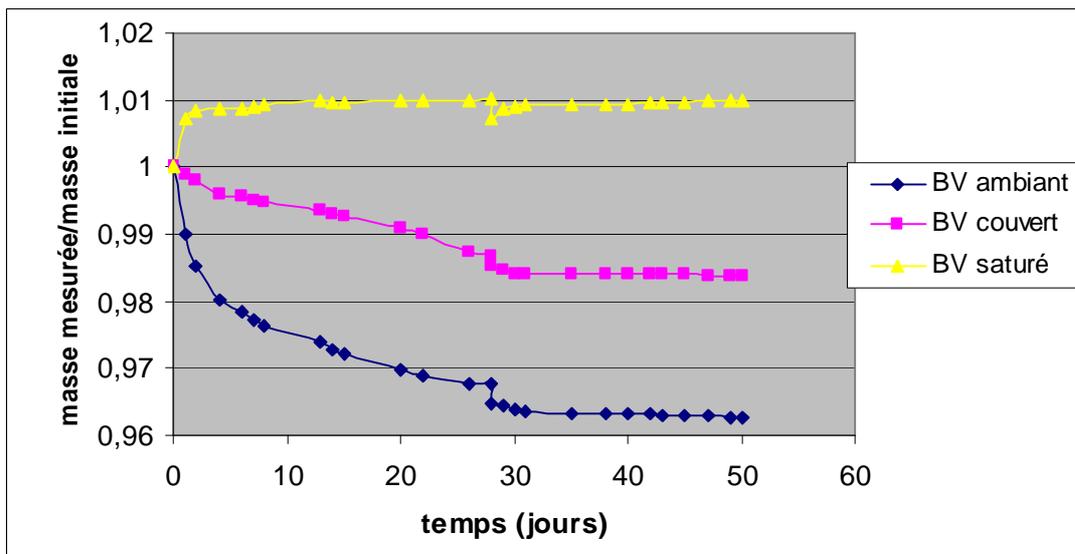


Figure 5.38 : perte en masse de BV chauffé à 120°C.

Lors de l'exposition des bétons à une température de 120°C, l'eau libre contenue dans ces bétons s'évapore. Cette évaporation présente par un saut dans les courbes des figures précédentes de 5.35 à 5.38. Le mode de conservation a une influence significative sur la cinétique d'eau. L'eau perdue après le choc thermique des mélanges immergés dans l'eau est supérieur aux autres mélanges. Par la suite, la vitesse de l'évaporation d'eau devient très lente. Et le gonflement se poursuit après une réabsorption d'eau.

b. Influence du fillers :

L'eau perdue après le choc thermique des mélanges contenant moins de fillers est plus élevée que celui avec un dosage élevé de fillers. Puis les deux bétons ont tendance à se stabiliser à l'air libre. Mais en milieu saturé les BAP regagnent leur masse.

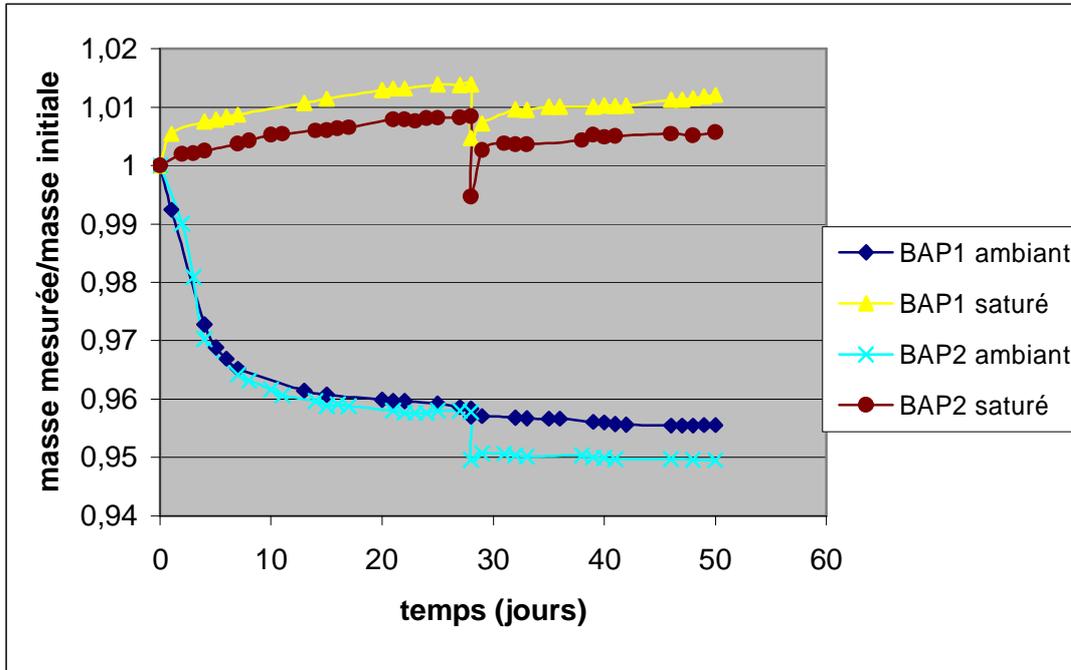


Figure 5.39 : influence de filler sur les BAP chauffés à 120°C.

c. Influence des fibres:

Les mélanges subissant un choc thermique présentent un départ d'eau schématisé par des sauts dans les courbes de la figure 5.40. L'eau perdue de béton autoplaçant renforcé de fibres métalliques est plus élevée en milieu ambiant et moins élevée pour les mélanges immergés dans l'eau. Par la suite la cinétique d'eau devient très lente.

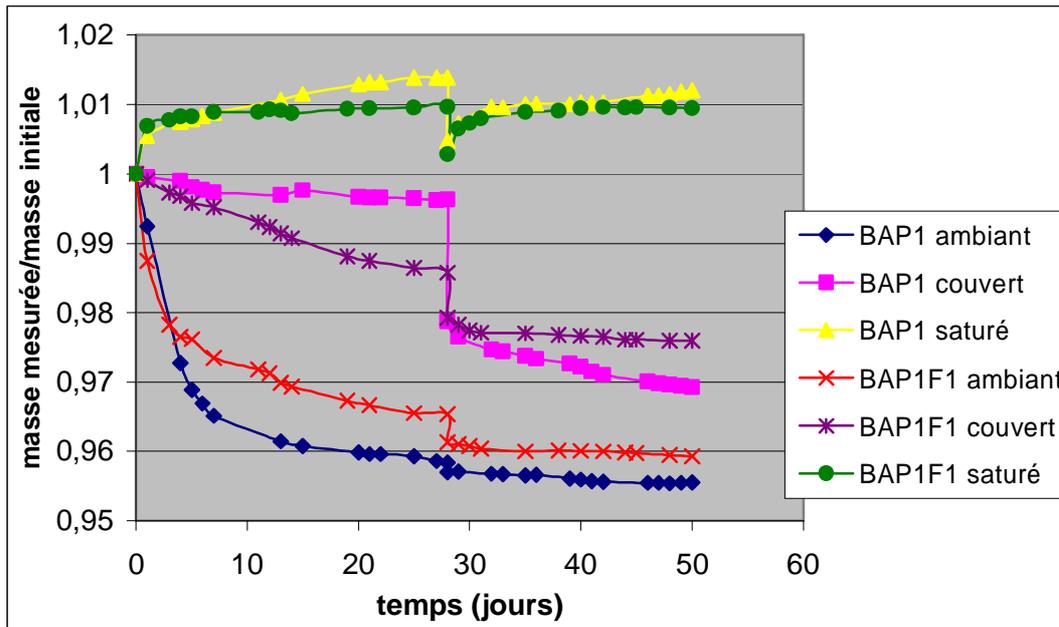


Figure 5.40 : perte de masse de BAP et de BAP1F1 chauffés à 120°C.

d. Influence de la nature de béton :

La figure 5.41 indique le comportement d'un béton autopaçant et un béton vibré. Les résultats montrent que l'eau perdue après l'exposition de ces bétons à un choc thermique est supérieure pour les BV que pour les BAP, malgré que l'évaporation et l'absorption d'eau pour le BAP sont restées supérieures à celles de BV. Par la suite la cinétique d'eau de BV est plus lente que le BAP.

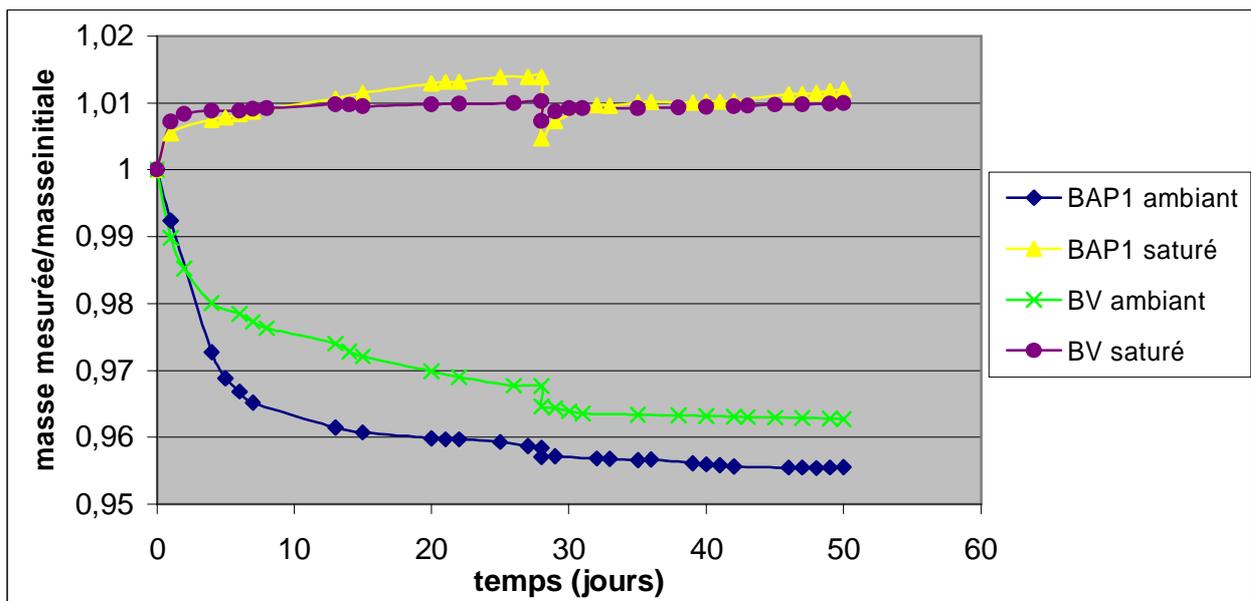


Figure 5.41 : perte de masse de BAP et de BV chauffés à 120°C.

5.4.2.3 Perte en poids du béton à 200°C:

a. Influence de mode de conservation :

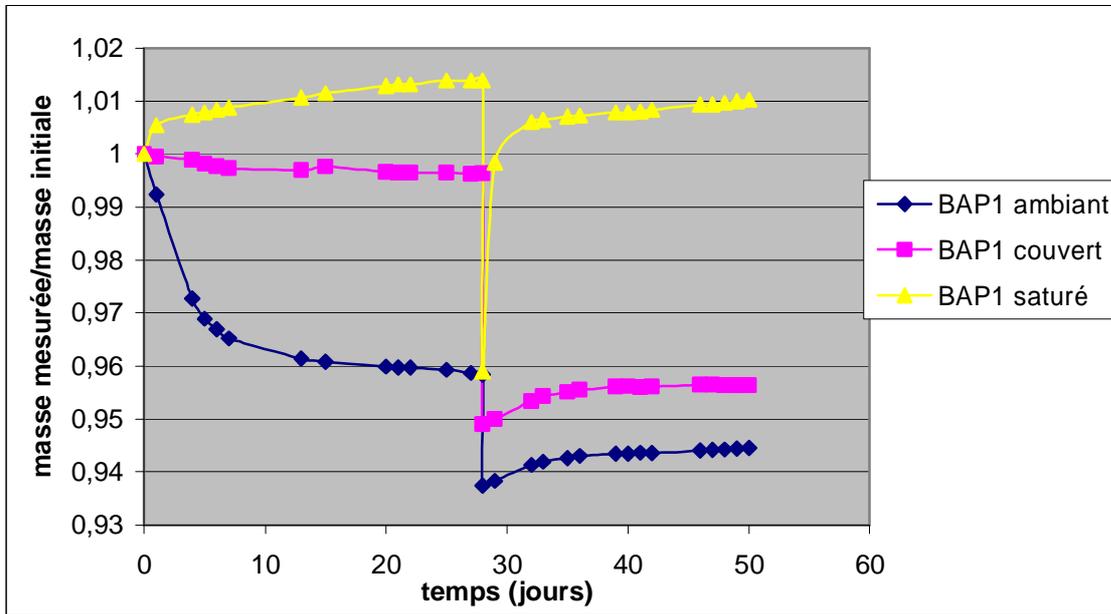


Figure 5.42 : perte de masse de BAP1 chauffé à 200°C.

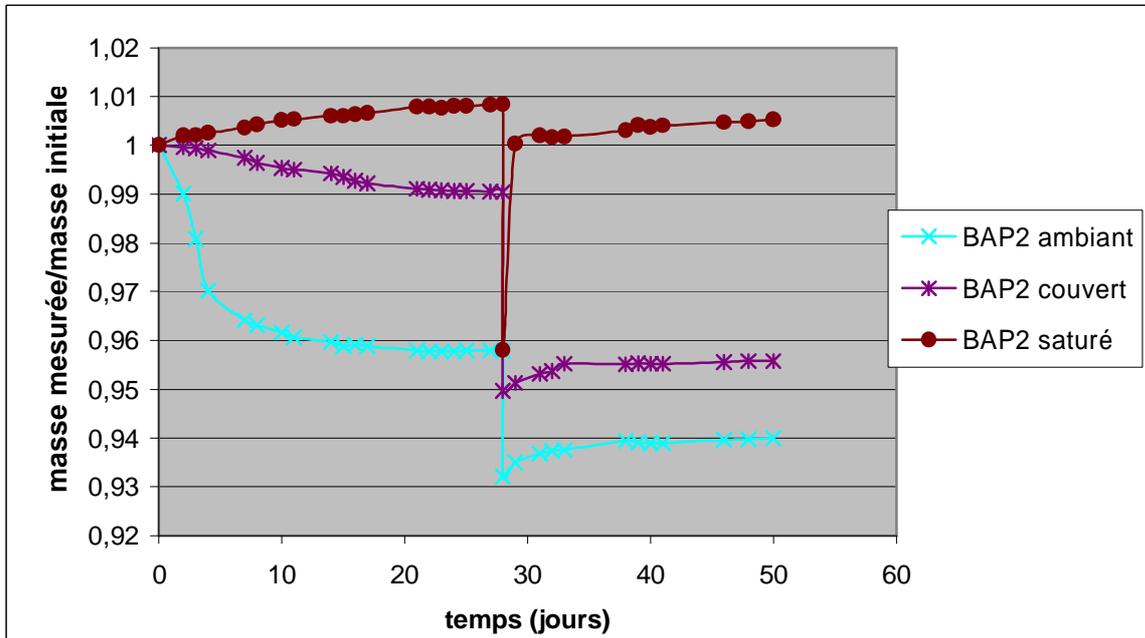


Figure 5.43 : perte de masse de BAP2 chauffé à 200°C.

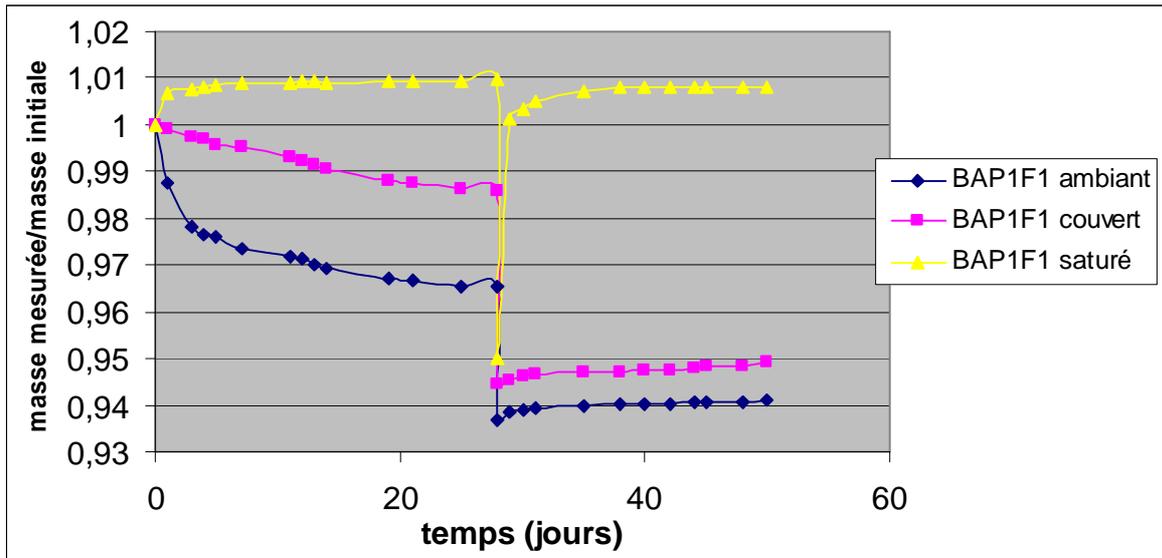


Figure 5.44 : perte en masse de BAP1F chauffé à 200°C

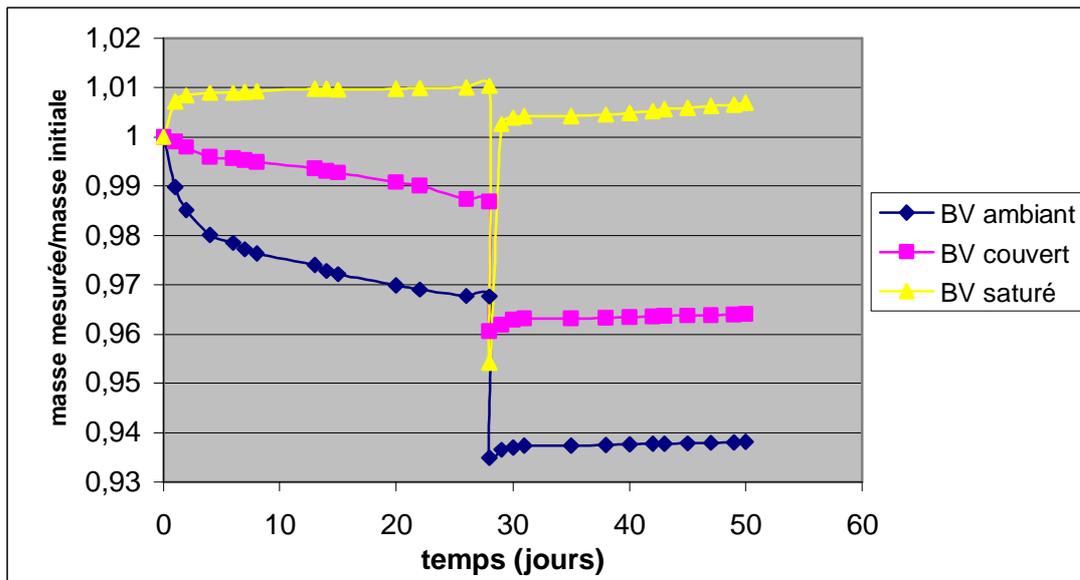


Figure 5.45 : perte de masse de BV chauffé à 200°C.

Tous les bétons testés présentent une cinétique d'eau vis-à-vis du mode de conservation. L'eau perdue à 200°C est plus élevée que celui perdue à 120°C, conséquence de départ de l'eau libre et une partie de l'eau adsorbée. L'évaporation d'eau est liée au mode de conservation. On remarque dans les figures 5.42 à 5.45 que le saut parut dans les courbes est plus grand pour les mélanges immergés dans l'eau. Ceci est dû à la quantité élevée absorbée par les mélanges durant le temps de conservation.

b. Influence de dosage de fillers :

La figure 5.46 illustre les résultats obtenus après exposition à un choc thermique à une température de 200°C de deux bétons autoplaçants possédant des dosages différents de fillers. En milieu ambiant, le BAP contenant moins de fillers perd beaucoup d'eau. Par contre en milieu saturé c'est le BAP avec un dosage élevé de fillers qui perd la plus grande quantité d'eau mais les deux BAP atteignent 96% de la masse initiale des éprouvettes testées. Par la suite et après que les deux bétons présentent un regain d'une partie de leur humidité, l'évaporation et l'absorption d'eau continuent leur mouvements et vont vers la stabilisation.

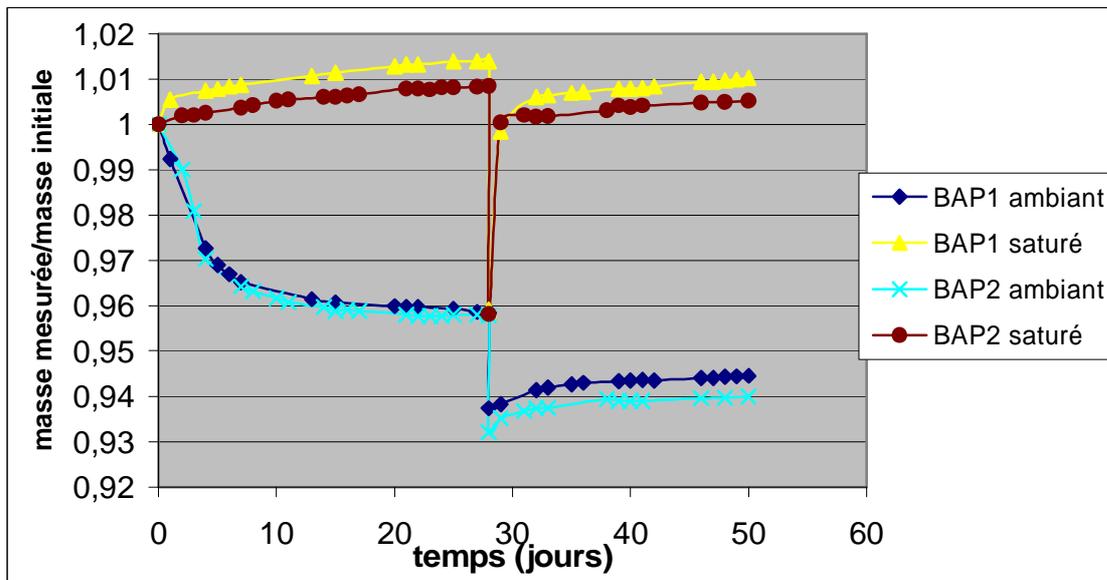


Figure 5.46 : influence de fillers sur les BAP chauffés à 200°C.

c. Influence des fibres :

On remarque que la quantité d'eau perdue par le BAP renforcé de fibres métalliques est plus élevée que celle de BAP sans fibres après le choc thermique. Par la suite un regain d'humidité s'est produit pour les deux BAP mais avec des grandeurs différentes (plus petite pour les BAPF). Puis il y a une absorption d'eau par les deux bétons mais avec une vitesse très lente pour tous les mélanges.

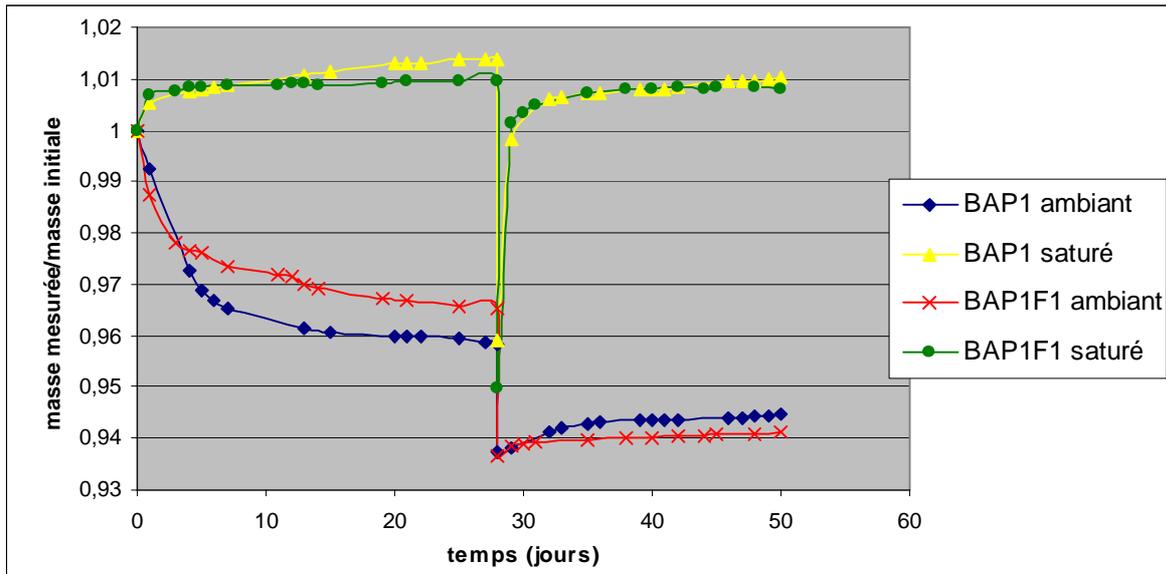


Figure 5.47 : influence des fibres sur les BAP chauffés à 200°C.

d. Influence de la nature de béton :

Le BAP et le BV ayant subi un choc thermique à 200°C. Les résultats de la perte de masse des deux bétons sont présentés dans la figure 5.48. après un cycle de chauffage refroidissement, la perte de masse pour le BV est plus grande que le BAP. Après le choc thermique le BAP regagne une part de son humidité qui est supérieure à celle de BV.

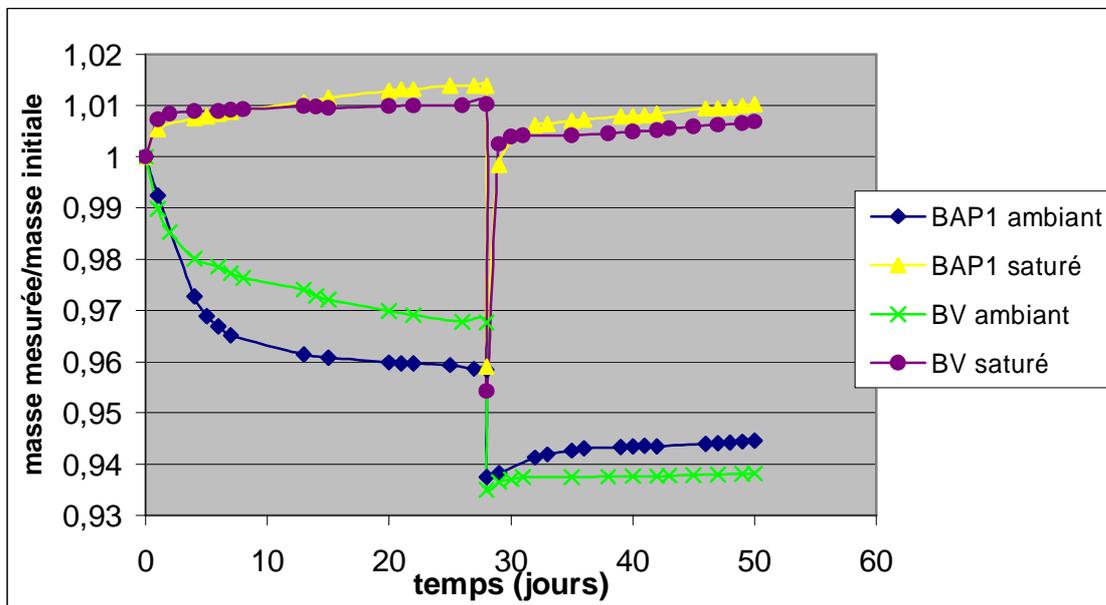


Figure 5.48 : influence de la nature des bétons chauffés à 200°C.

5.5 COMMENTAIRES ET CONCLUSIONS :

Entre 5 et 40°C, le béton sèche à température ambiante.

Dés 100°C, on constate l'influence du taux d'humidité. La vaporisation de l'eau libre et l'eau liée physiquement crée un retrait substantiel dans la pâte de ciment, ce phénomène est accompagné à cette température d'un léger gonflement des granulats.

La déformation totale d'une éprouvette de béton non chargée soumise au chauffage est due à

- expansion thermique des constituants du béton.
- Variation de teneur en eau.
- Transformations chimiques au sein du béton.
- Fissurations dues à l'expansion thermique différentielle.

Pendant le chauffage, il y a décomposition des produits d'hydratation et vaporisation d'eau contenue dans le béton. Les transformations physiques et chimiques affectent peu le poids du béton.

D'une manière générale, la perte de poids des éprouvettes de béton est due entièrement au départ d'eau évaporable et ceci est légèrement compensé par un gain de poids dû à la carbonatation.

Des propriétés du béton peuvent être modifiées par un ajout de fibres. L'étude de [Sarvaranta 92] prouve que la présence des fibres diminue la conductibilité thermique, et que le type de fibre et un paramètre majeur de l'échappement de l'eau autour de 150°C. Par contre, Hertz trouve que la présence de fibres d'acier ne réduit pas le risque d'explosion. Les fibres d'acier sont sources de formation de vapeur, conduisant à une distribution plus uniforme de vapeur.

Les propriétés du béton dépendent de la température et du taux d'humidité.

Le comportement à la chaleur du béton dépend de la composition du béton, de la nature de ses constituants, de son âge, de sa teneur en eau, des formes et dimensions des pièces et du fait que le béton soit ou non soumis à des contraintes de chargement pendant le chauffage.

Le chauffage du béton active le retrait de la pâte de ciment hydraté. Il crée une superposition de retrait et de réactions de décomposition engendrant des fissures dans le béton. En plus de retrait, la formation des fissures est favorisée par les incompatibilités thermiques des différents constituants. Il est bien connu qu'avec l'augmentation de la température, la pâte de ciment est l'objet d'un retrait significatif alors que les granulats sont l'objet d'expansion thermique.

Dans ce chapitre, une étude faite sur le retrait des BAP subissant un choc thermique après 28 jours selon trois modes de conservation. Une analyse des résultats obtenus avant et après un cycle de chauffage refroidissement suivant deux taux de température.

Avant le chauffage on a conclut que :

- L'augmentation du volume de pâte, entraînée par l'ajout de fillers supplémentaires, conduit à des déformations différées plus importantes pour les BAP en les comparant avec le BV.

- Le mode de conservation influe beaucoup sur le retrait des BAP. Les éprouvettes conservées à l'air libre présentent un retrait supérieur à celles conservées couvertes de plastique. Celles immergées dans l'eau présentent un gonflement .

- L'augmentation de dosage de fillers au détriment de ciment diminue le retrait des BAP.

- Les fibres métalliques influent peu sur la diminution de retrait des bétons.

L'exposition des bétons à un cycle de chauffage refroidissement, mène à les résultats suivants :

- le raccourcissement du au chauffage varie selon le mode conservation, à l'air libre les béton présentent moins de rétraction conséquence de l'évaporation d'eau durant la période de conservation. en milieu couvert les échanges hydriques sont empêchés, cause de l'augmentation de rétraction. Pour le milieu saturé, les éprouvettes sont immergées dans l'eau, donc les pores sont remplis d'eau ce qui donne un fort raccourcissement durant le chauffage.

- L'augmentation de dosage de fillers diminue le raccourcissement en milieu ambiant, et l'augmenter en milieu saturé.

- Les bétons autoplaçants renforcés de fibres métalliques présentent des raccourcissements supérieurs à celui de BAP1. l'augmentation de dosage de fibres augmente ce raccourcissement.

Après le choc thermique, on a aboutit au résultats suivants :

- presque tous les courbes des bétons testés sont stabilisées après quelques jours après le choc thermique.

- Le BAP avec un dosage élevé de fillers présente un petit retrait mais un grand gonflement par rapport au BAP contenant moins de fillers.

- Les fibres métalliques ont peu d'influence sur le retrait, tandis q'ils facilitent le départ d'eau en formant des buses de drainage après le choc thermique.

On parlons de perte de masse :

- le mode de conservation influe sur la perte de masse. L'eau dans les éprouvettes conservées en milieu ambiant est libre de s'évaporer. Donc c'est logique qu'après l'exposition de ces éprouvettes au choc thermique la quantité de l'eau perdue est la plus petite par rapport aux autres modes de conservation.

- les fillers diminuent l'évaporation d'eau mais ils augmentent l'aptitude d'absorption des bétons. Après le choc thermique, les deux bétons contenant des dosages différents de fillers présentent un regain d'une partie de leur humidité, l'évaporation et - l'absorption d'eau continuent leur mouvements et vont vers la stabilisation.
- Les fibres forment des buses au sein de béton, ce qui favorisent l'évaporation d'eau. Après le choc thermique, un regain d'humidité s'est produit pour les deux BAP mais avec des grandeurs différentes (plus petite pour les BAPF)
- Le BV est plus poreux que le BAP, donc il perd une quantité d'eau plus élevée que le BAP.

CONCLUSION GENERALE

CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Les BAP constituent une véritable alternative au béton traditionnel, comme l'ont montré un certain nombre d'exemples. Leur utilisation est notamment simplifiée par la suppression de la vibration et permet de réaliser des ouvrages d'une grande qualité esthétique.

Pourtant, bien que ces avantages soient tangibles et que l'intérêt qu'ils suscitent chez les industriels soit grandissant, les BAP demeurent en dessous de l'utilisation qui pourrait en être faite en raison de questions sans réponses posées par de nombreux maîtres d'ouvrage et maîtres d'oeuvre. Certaines des inconnues qui les concernent nécessitent donc d'apporter des résultats de recherches probantes quant à leur équivalence avec les bétons vibrés (BV), notamment en terme de comportement à haute température.

Les objectifs de ce travail de thèse étaient donc de donner des réponses claires à trois questions majeures. Ainsi, le premier objectif était de chercher à comprendre le comportement de BAP à haute température, en évaluant les propriétés résiduelles. Le deuxième objectif était d'évaluer les conséquences potentielles à la présence importante de fines dans les compositions de BAP sur leurs déformations différées après un choc thermique. Le troisième objectif, est de présenter les conséquences de l'introduction des fibres métalliques sur le comportement des BAP.

Les formulations de BAP se distinguent par un volume de pâte plus important (lié à la méthodologie utilisée), l'emploi de superplastifiants en plus grande quantité et l'utilisation éventuelle d'un agent de viscosité. Toutes ces formulations ont été ensuite caractérisées à l'aide d'essais spécifiques pour vérifier leurs aptitudes à être conforme aux recommandations et aux normes concernant les BAP, qui se sont révélés corrects pour la quasi-totalité des formulations.

Notre travail a ainsi donné certaines réponses aux questions qui se posaient au départ de ce projet sur les BAP.

Parmi les résultats intéressants de cette étude nous pouvons citer, la comparaison du comportement

résiduelles des bétons autoplaçants de $F/F+C$ variable (0.67 et 0.83) et le BV. Sur la base des résultats obtenus nous pouvons établir des conclusions concernant le comportement mécanique à haute température des bétons en mettant en évidence l'influence de ce facteur. Tout d'abord nous avons constaté une diminution progressive des résistances mécaniques en compression suite à l'échauffement. Les BAP contenant moins de fillers présentent un bon comportement à haut température, leur perte de résistance est plus faible.

L'évolution de la résistance (f_c) testée se déroule en deux phases bien distinctes. Dans la phase 1, entre 20 et 120°C, le béton vibré et le béton autoplaçant présentent le même comportement mécanique. La résistance réaugmente partiellement durant la phase 2 qui se situe dans la gamme des températures 150-200°C, pour le BV tandis qu'elle continue à diminuer pour les BAP.

La phase 1 a été attribuée à l'effet de l'eau présente dans la matrice cimentaire. Pour le BV, son évaporation permet la récupération d'une partie de la résistance dans la phase 2.

Ces résultats nous amènent à dire que le BAP est plus dense que le BV, conséquence de l'ajout de fillers, ce qui rend le départ de l'eau plus lent.

La mesure d'air occlus montre que les fibres métalliques rendent le BAP plus poreux. Cela permet une évacuation plus facile de l'eau et par conséquent cela accélère l'arrivée de la phase 2 (de la récupération partielle de la résistance). L'introduction des fibres métalliques dans le béton autoplaçant améliore les propriétés mécaniques initiales et résiduelles.

Contrairement à la résistance en compression, la résistance à la traction semblerait beaucoup plus influencée par la présence de fillers dans le matériau testé. Le chauffage des BAP donne des résistances plus grandes que celles à température ambiante. Cela est dû probablement à l'amélioration de la zone de transition conséquence du dosage de pâte élevé qui rend le BAP plus dense (les granulats sont bien emballés par la pâte, l'adhérence entre les granulats et la pâte est améliorée).

Une très grande attention dans cette étude a été consacrée aux variations dimensionnelles après un choc thermique.

Lorsqu'on ajoute de l'eau au ciment portland anhydre, une réaction d'hydratation intervient et donne des particules de ciment hydraté poreux. Au fil du temps, l'espace poreux contenant de l'eau continue à se remplir des produits solides d'hydratation.

Lorsque le béton est soumis à une température, outre les transformations cristallines et la décarbonatation qui surviennent principalement dans les granulats, des réactions de dégradations s'opèrent dans la structure de gel de ciment.

- entre 30 et 120°C, expulsion d'eau : l'eau libre et l'eau adsorbée s'échappent du béton.
- Autour de 200°C, première étape de la déshydratation, il y a rupture de gel de ciment. La chaleur brise le gel de ciment et arrache les molécules d'eau aux silicates hydratés. L'eau liée chimiquement s'échappe du béton.

Les résultats sont présentés en trois phases. La phase 1, présente les résultats entre 1 et 28j du retrait (ou gonflement) dépend fortement du mode de conservation des éprouvettes. Quel que soit le mode de conservation, l'augmentation du dosage de fillers diminue le retrait. La phase

2 est consacrée à l'étude du variation dimensionnelle avant et après chauffage. L'évaluation du variation dimensionnelle est le contenu du phase 3. Les résultats des variations pondérales sont aussi présentées dans ce chapitre. Les principaux résultats sont :

- Après le cycle de chauffage refroidissement, le retrait du BAP avec moins de fillers se poursuit pendant que le retrait du BAP contenant plus de fillers se stabilise.
- Les fibres métalliques ne modifient pas le retrait des BAP. Le retrait de BAP et BAPF avec 0,5% de dosage de fibres sont identiques. Mais l'introduction de 1% de fibres métallique augmente le retrait après le choc thermique.
- Après un cycle d'échauffement et de refroidissement, les béton autoplaçants avec et sans fibres présentent un comportement de retrait similaire à celui de béton vibré avec les différences dans les grandeurs atteintes par les bétons.
- Le taux d'évaporation d'eau augmente quand le dosage de fillers diminue à l'exception des cinq premiers jours d'où la perte de masse pour le BAP1 est plus élevée.
- L'évaporation et l'absorption de l'eau est plus rapide pour le BAPF que le BAP. Les fibres métalliques forment des buses ce qui facilite l'évaporation d'eau.
- L'évacuation et l'absorption de l'eau sont plus rapides pour le BV que le BAP1

La distribution de l'eau dans le béton est d'un effet significatif sur l'endurance à la chaleur. Il est montré que cette endurance augmente non pas seulement en fait de la teneur en eau, mais en fait de la surface de béton exposé à la chaleur. Le niveau des connaissances dans ce domaine n'est pas encore suffisamment développé pour permettre de traiter le problème du transfert couplé de chaleur et de masse dans sa réelle complexité.

Parmi les perspectives de ce travail de recherche :

- il est intéressant de mener des essais à très hautes températures afin de prendre en compte les transformations physico-chimiques qui ont lieu également dans les granulats. En effet, à ces stades de température les phénomènes chimiques seront de plus en plus prépondérants au delà de 400°C à cause de la décomposition des granulats supposés inertes dans la présente recherche. Aussi, il est intéressant d'étudier l'influence des différents ajouts locaux sur le comportement des BAP à haute température.

Références bibliographiques :

[ASSIÉ 04] **Stéphan ASSIÉ**, « durabilité des bétons autoplaçants », thèse de l'Institut National Des Sciences Appliquées de Toulouse 2004.

[AFGC 00] **Association Française de Génie Civil**, « Bétons autoplaçants - Recommandations provisoires », Annales du bâtiment et des travaux publics, juin 2000

[Baron 96] **BARON J. et OLLIVIER J.P.**, « Les Bétons – Bases et données pour leur formulation », éditions Eyrolles, 1996.

[Benboudjema 02] **F. BENBOUDJEMA**. « Modélisation des déformations différées du béton sous sollicitations biaxiales. Application aux enceintes de confinement de bâtiments réacteurs des centrales nucléaires ». Thèse de l'Université de Marne La Vallée, 2002.

[Bensebti 07] **Bensebti S., Houari H., Aggoun S., Duval R.** « La ségrégation des bétons autoplaçants, mise en place d'une procédure expérimentale ». Annale de bâtiment et des travaux publics, France. Juin 2007, N° 2-3- ISSN :1270-9840. P22-28.

[Bensebti 07] **Bensebti S., Houari H., Aggoun S.** « Essais de caractérisation expérimentale de la ségrégation verticale des bétons autoplaçants ». Revue sciences et technologie B-constantine. N° 25- Juin 2007- ISSN :1111-5041.

[BETHMONT 05] **Sandrine BETHMONT**, « Mécanismes de ségrégation dans les bétons autoplaçants (BAP) », Thèse de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 2005.

[Billberg 01] **BILLBERG P.**, "Influence of filler characteristics on SCC rheology and early hydration", Proceedings of 2nd International Symposium on Self-Compacting Concrete, Tokyo, Japon, pp. 285-294, 23-25 octobre 2001.

[Bissonnette 99] **BISSONNETTE B, PIERRE P., PIGEON M.**, "Influence of key parameters on drying shrinkage of cementitious materials", Cement and Concrete Research, 29(10), p. 1655-1662.

[Boukni 07] **Boukni B., Bebsebt S., Chabane A., Houari H.** “Comportement des bétons autoplaçants à haute température » journée d'étude sur les bétons hydrauliques et hydrocarbonés » université du 20Août 1955, Skikda. Mai 2007.

[Boukni 07] **Boukni B., Bebsebt S., Chabane A., Houari H.** « Les propriétés mécaniques et résiduelles des bétons autoplaçants à haute température » Séminaire national. Université Badji Mokhtar. Annaba 2007.

[Burak 06] **Burak Felekoğlu,** “comparative study on the performance of sands rich and poor in fines in self-compacting concrete”, construction and building material 2006.

[Castillo 90] **Castillo C., A. J. Durrani,** “effect of transient high temperature on high strength concrete”, ACI Material Journal, Vol 87 N°1, 1990.

[collet:77] **Collet Y.,** « Etudes de propriétés du béton soumis à des températures élevées entre 200 et 900°C », Annales Travaux Publics Belges N°4, 1977.

[Domone 06]. **P.L. Domone,** “A review of the hardened mechanical properties of self-compacting concrete”, Cement Concrete Composites 2006.

[Dupain 95] **R. Dupain, R. Lanchon, J.C. Saint Arroman,** « Granulats, sols, ciment et bétons, caractérisation des matériaux de génie civil par mes essais de laboratoire ». Edition Casteilla 1995

[Felekoglu 03] **Burak Felekoglu, Selcuk Turkel, Bulent Baradan,** “Effect of water/cement ratio on the fresh and hardened properties of self-compacting concrete” . Building and Environment 2003

[Franssen 87] **Franssen, J. M.** « Etudes du comportement au feu des structure mixtes acier-béton ». Thèse de Doctorat de l'Université de Liège, Belgique, 1987. 267p.

[GAWĘSKA 04] **Izabela GAWĘSKA** « Comportement à haute température des bétons à haute performance - évolution des principales propriétés mécaniques » ; l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées et l'Ecole Polytechnique de Cracovie 2004.

- [Harmathy70] **T.Z. Harmathy**. “Thermal properties of concrete at elevated temperatures”.
Journal of mechanics,JMLSA, 5(1) :47–74, 1970.
- [Hasni 99]. **Hasni**, « Bétons Autoplaçants », rapport de recherche N° 98-004/98-006,
Fédération Française du Batiment 1999.
- [Hertz 03] **Hertz KD**. “Limits of spalling of fire exposed concrete”. Fire Safety J
2003;38(2):103–16.
- [Houari 93] **Houari H**. « Contribution à l’étude du comportement du béton renforcé de fibres
métalliques soumis à l’action des charges maintenues et cycliques ». Thèse de doctorat, INSA
de Lyon 1993, 244p.
- [Hua 92] **C. HUA**. « Analyse et modélisation du retrait d'auto dessiccation de la pâte de
ciment ». Thèse de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 1992.
- [Jacobs 99] **F. Jacobs and F. Hunkeler**. “Design of self-compacting concrete for durable
concrete structure”. In Proceedings of the First International RILEM Symposium of Self-
Compacting Concrete.RILEM, 1999.
- [Kim 98] **KIM J.K., LEE C.S.** , “Prediction of differential drying shrinkage in concrete”,
Cement and Concrete Research, 28 (7), p. 985-994.
- [Khoury 92] **KHOURY, G.A.** ”Compressive strength of concrete at high temperatures : a
reassessment” . Magazine of Concrete Research,1992. 44, n° 161, pp 291-309
- [Khoury 99] **Khoury, G.A.** “Mechanical behaviour at high temperature”. Final report , Brite
Euram III, HITECO programme BE-95-1158. 1999.
- [Kodur 99] **V.K.R. Kodur**, « Tenue au feu des éléments de structure en béton haute
résistance », solution constructive n° 31, Déc. 1999, Conseil national de recherche Canada

[Kodur 00] **Kodur, V.K.R.** « Spalling in high strength concrete exposed to fire – Concerns, causes, critical parameters and cures », actes du congrès de l'ASCE sur les structures, Philadelphie (PA), 2000.

[Lau 06] **A. Lau, M. Anson** “Effect of high temperatures on high performance steel fibre reinforced concrete”. *Cement and Concrete Research* 36 (2006) 1698–1707

[Li 01] **LI J., YAO Y.** , “A study on creep and drying shrinkage of high performance concrete”, *Cement and Concrete Research*, 31, p. 1203-1206.

[Menou 04] **Abdellah Menou;** « Etude de comportement thermomécanique des bétons à haute température : approche multi échelle de l'endommagement thermique » ; thèse de l'Université de Pau et des Pays de l'Adour 2004.

[Metin 06] **Metin Husem,** “The effects of high temperature on compressive and flexural strengths of ordinary and high-performance concrete”, *Fire Safety Journal* 41 (2006) 155–163

[Miao 92] **B. MIAO.** « Effets mécaniques dus au retrait de dessiccation du béton ». Thèse de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 1992.

[Nechnech 00]: **Nechnech, W.** « Contribution à l'étude numérique du comportement du béton et des structures en béton armé soumises à des sollicitations thermiques et mécaniques couplées : Une approche thermo-élasto-plastique endommageable ». Thèse de génie civil; INSA Lyon Univ. Lyon I, 2000.192p.

[Neville 00] **NEVILLLE A. M.,** “ Propriétés des Bétons ”, traduction CRIB, Sherbrooke, Canada, éd. Paris Eyrolles 2000.

[Noumowe 03] **NOUMOWE, A.,** ‘Temperature Distribution and Mecanical Properties of High Strength Silica Fume Concrete at Temperatures up to 200°C’ *ACI Materials Journal*, July-August 2003

[Noumowe 02] **Noumowe, N. A., Debicki, G.**, “Effect of Elevated Temperature from 200 to 600 °C on the Permeability of HPC”, Symposium on Utilization of High Strength/High Performance Concrete. University of Leipzig. Ed.:König, G., Dehn, F., Faust, T., Leipzig. 2002,431-444.

[Noumowe 95] **Noumowé, N.A.** « Effet de hautes températures (20°C-600°C) sur le béton. Cas particulier du BHP ». Thèse de Doctorat de l'INSA de Lyon,1995.

[OH 99] **S.G. Oh, T. Nogushi, and F. Tomosawa.** “Toward mix design for rhéology of self-compacting concrete”. In Proceedings of the First International RILEM Symposium of Self-Compacting Concrete. RILEM, 1999.

[Okamura 99] **OKAMURA H. and OUCHI M.**, “Self-compacting concrete. Development, present and future”, Proceedings of First International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete (PRO 7), Stockholm, Suède, pp. 3-14, 13-15 septembre 1999.

[Okamura 00] **H. Okamura, K. Ozawa, and M. Ouchi.** “Self-compacting concrete”. Structural Concrete, (1) :3_17, March 2000.

[Ouchi 99] **M. Ouchi and Y. Edamatsu.** “A simple evaluation method for interaction between coarse aggregate and mortar particles in self-compacting concrete”. In Proceedings of the First International RILEM Symposium of Self-Compacting Concrete. RILEM, 1999.

[Persson 03] **Bertil Persson,** “SELF-COMPACTING CONCRETE AT FIRE TEMPERATURES”, Lund Institute of Technology , Division of Building Materials 2003.

[Persson 04] **B. Persson,** “Fire resistance of self-compacting concrete”, SCC Materials and Structures / Matériaux et Constructions, Vol. 37, November 2004, pp 575-584

[Sedran 95] **SEDRAN T.**, « Les Bétons Autonivelants », bulletin LCPC 196, réf. 3889, pp. 53-60, mars-avril 1995.

[Sedran 99] **T. Sedran.** « Rhéologie et rhéométrie des bétons. Application aux bétons autonivellants ». Thèse de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 1999.

[Turcry 04] **Philippe Turcry**, « Retrait et Fissuration des Betons Autoplaçants », Influence de la Formulation. Thèse de l'Ecole Centrale de Nantes et l'Université de Nantes 2004.

[Walraven 03] **Walraven**, “Structural aspect of self-compacting concrete”, proceedings of the third international RILEM conference on SCC, août 2003, Reykjavik, Islande, pp 15-22.

[Zhu 05] **Zhu et Gibbs**, “Use of different limestone and chalk powders in self-compacting concrete”, Cement and concrete research, 2005, vol 35, pp1457-1462.

[Zhu 05] **Wenzhong Zhu, John C. Gibbs**, “Use of different limestone and chalk powders in self-compacting concrete”, Cement and Concrete Research 35 (2005) 1457– 1462