

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

République Algérienne démocratique et populaire
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique



Mémoire Master

Présenté à l'Université de Guelma
Faculté des Sciences et Sciences de L'ingénierie

Département de : Génie Civil et Hydraulique
Domaine : Science et Technologie
Spécialité : Génie Civil, Option : Structures

Présenté par : **BENKHALFA Khalid**
ZALANI Mohammed

Comportement du béton autoplaçant à haute température

Sous la Direction de : Pr. Ben-Marce Abdelaziz

Juin 2015

Remerciements

Louange à Allah le tout Puissant, le Miséricordieux. Louange à Allah qui m'a aidé à voir l'aboutissement de ce memoire

Nous souhaitons adresser nos remerciements les plus sincères aux personnes qui nous ont apporté leur aide et qui ont contribué à l'élaboration de ce mémoire ainsi qu'à la réussite de cette formidable année universitaire. Ces remerciements sont rédigés dans un moment de relâchement intellectuel, sans véritable rigueur.

En premier lieu, je tiens à remercier mon directeur de memoire, **M. Ben Marce Abdelaziz** qui, en tant que Directeur de mémoire, se sont toujours montrés à l'écoute et très disponible tout au long de la réalisation de ce mémoire, ainsi pour l'inspiration, l'aide et le temps qu'ils ont bien voulu nous consacrer et sans qui ce mémoire n'aurait jamais vu le jour.

Enfin, on remercie tous ceux qui, de près ou de loin, ont contribué à la réalisation de ce travail.

*Thank
You*

Dédicace

Je tiens à dédie ici tous ceux qui, de près ou de loin, ont contribué à la concrétisation de ce travail. Ces remerciements sont rédigés dans un moment de relâchement intellectuel, sans véritable rigueur.

Aussi, je dédie ce mémoire :

- ✚ A mon père et ma mère.
- ✚ A mes sœurs et, mes frères
- ✚ A mes amis **amar, lhamda,houssam ,cherif, fateh, salah**, A mon binôme **Mohamed** et tous mes amis (es).
- ✚ A tous mes maîtres et professeurs : du primaire au supérieur.
- ✚ A tous ceux qui ont contribué au ce mémoire spécialement monsieur **Ben zayed mahdi**.

Benkhalifa khalid

Je dédie cet humble travail, fruit des longues années de mes études à :

La fontaine de l'amour ma mère qui m'a donné la vie, l'espoir et la tendresse.

Mon très cher père pour lequel les mots ne suffiront jamais

Et à toute la famille.

Aussi, je dédie ce mémoire :

A tous mes amis : mes connaissances et compagnons de parcours, et particulièrement mon binôme **khalid**

A tous ceux qui j'estime et m'estiment.

Zaalani Mohamed

Résumé :

L'utilisation des bétons autoplaçants (BAP) s'est considérablement développée au cours des dernières années. Le béton autoplaçant 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 ordinaire par un volume de pâte élevé et un faible volume de granulat (sable, gravier). Le travail présenté vise à une meilleure compréhension des phénomènes mis en jeu lors de l'exposition à haute température des bétons autoplaçants. Nous nous sommes plus particulièrement intéressés au comportement mécanique.

Initialement, nous avons étudié les caractéristiques de béton ordinaire et l'autoplaçants et leur structure de positionnement et une attention grandissante est portée à l'étude de leurs propriétés mécaniques à l'état durci. Ensuite, nous avons étudié le comportement des bétons ordinaire et autoplaçant à haute température et doit en particulier être évalué. Une grande partie de la recherche a été consacrée à l'étude des variations dimensionnelles et pondérales avant et après un choc thermique. Ce comportement a été étudié sur trois bétons autoplaçants de rapport (addition/ ciment) différent. En dernière investigation, une étude des propriétés mécaniques résiduelles des bétons autoplaçants a été réalisée, soumis à des températures élevées. Les résultats présentés montrent une ressemblance avec la littérature.

Mots clefs : BAP, haute température, propriétés mécaniques, perte en poids.

ملخص

استعمال خرسانة ذاتية التوضع شهدت تطورا كبيرا بمرور السنين. الخرسانة ذاتية التوضع تتميز هاته المادة بسيولتها في الحالة الرطبة تحت تأثير الوزن الذاتي دون استعمال لاهتزاز لتموضعها. هاته المادة تختلف عن الخرسانة العادية باحتوائها على حجم كبير العمل المقدم موجه الى فهم الظواهر الموجودة في حلة تعرض من العجينة الاسمنتية وحجم صغير للحبيبات (الرمل والحصى). في بادئ الأمر قمنا الخرسانة ذاتية التوضع الى ارتفاع في درجة الحرارة، اهتمامنا الأكبر موجه الى دراسة السلوك الميكانيكي. بدراسة خصائص الخرسانة العادية وذاتية التوضع وعوامل تركيبتهما ويولى اهتمام متزايد لدراسة الخواص الميكانيكية في حالة جزء كبير من هذه الدراسة تصلب. وبعدها قمنا بدراسة سلوك الخرسانة العادية وذاتية التوضع في درجات الحرارة العالية وتقييمها. أولي إلى دراسة التغيرات الحجمية والوزنية قبل وبعد تعرضها الى صدمة حرارية. من بين العوامل التي تؤثر على التغيرات في نهاية البحث قمنا بدراسة الخصائص الميكانيكية الحجمية والوزنية، نسبة الإضافة المعدنية على الإسمنت وطرق حفظ الخرسانة. تحت تأثير ارتفاع درجة الحرارة. النتائج تبين تشابه بين دراستنا والدراسات الأخرى

الكلمات المفتاحية : خ.ذبت ، حرارة مرتفعة ، خصائص ميكانيكية ، فقدان الوزن

Abstract:

The use of self-compacting concrete (SCC) has developed considerably in recent years, The self-compacting concrete 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 ordinary concrete by a high volume of paste and a low volume of aggregate (sand, gravel). The present work aims to understand the phenomena involved during exposure to high temperature of compacting concrete. We are particularly interested in the mechanical behavior. Initially, we studied the characteristics of ordinary concrete, self-compacting, and positioning structure and growing attention is paid to the study of mechanical properties in the hardened State. Next, we studied the behavior of ordinary concrete and self-compacting high temperature and in particular must be evaluated. Much research has been devoted to the study of dimensional changes and weight before and after heat shock. This behavior was studied on three compacting concrete report (addition / cement). Among the parameters influencing the dimensional change and weight before and after thermal shock, we can mention the ratio addition / cement, the water content of the concrete and the method of conservation. In the final part, a study of residual mechanical properties of self-compacting concrete was conducted. The results presented show a resemblance to the literature.

Keywords: SCC (self-compacting concrete), high temperature, mechanical properties, weight loss.

Sommaire

Résumé

Introduction générale

Chapitre I : Généralités sur le béton ordinaire	01
I.1 Introduction	02
I.2 Définition	02
I.3 Généralités sur les constituants du béton	03
I.3.1 Le ciment	03
I.3.1.1- Classification normalisée des ciments.....	03
a- Classification suivant la composition.....	03
b- Classification des ciments suivant les résistances à la compression	05
c). Classification des ciments suivant le type d'environnement.....	06
I.3.1.2-Choix du ciment pour les bétons	07
a. Dosage en ciment et taille des granulats	07
b. Dosage en ciment et résistance mécanique du béton	07
I.3.2. Les granulats (sables, gravillons)	08
I.3.2.1. Le gravier	10
I.3.2.2. Le sable	10
I.3.3- L'eau de gâchage	11
I.3.4- Les adjuvants	11
I.4 .Structure poreuse du béton	13
I.4.1. Détermination de la porosité	15
I.5 .Résistance de béton à la compression	15
I.6. Résistance à la traction par flexion	16
I.7. Conclusions	17
 Chapitre II : Généralités sur les bétons autoplaçant.....	 18
II.1.Introduction	19
II.2.Définition :	20
II.3.Concept du béton autoplaçant	21
II.4. Domaine d'utilisation des BAP	22

II.5. Les avantages des bétons autoplaçants	22
II.6. Ouvrabilité des bétons autoplaçants	23
II.7. Les critères de composition des BAP	23
II.8. Constituants d'un BAP	25
II.9. Caractérisation d'un béton autoplaçant à l'état frais	28
II.10. Caractérisation d'un béton autoplaçant à l'état durci	35
II.10.1. Les essais de compression	35
II.10.2. Les essais de traction par flexion	36
II.10.3. Les essais de compression sur demi - prismes « cube équivalent »	36
Conclusions	37
 Chapitre III : Comportement des bétons à haute température	 38
III.1. Introduction	39
III.2. Les risques de feu	39
III.3. Comportement de béton ordinaire à haute température	42
III.3.1. Introduction	42
III.3.2. Instabilité thermique du béton	42
III.3.3. Impact des hautes températures sur le béton	45
III.3.4. Les principales modifications physico-chimiques dans le béton à haute température	54
III.3.5. Mécanisme du phénomène d'écaillage et de l'éclatement du béton chauffé	56
III.3.6. Évolution du comportement mécanique avec la température	57
III.3.7. Module d'élasticité	61
Conclusion sur le BO soumis à haute température	62
III.4. Cas des BAP soumise à haute température	63
III.4.1 Résistance à la compression	63
III.4.2. Stabilité thermique	64
III.4.3. Perte de masse	67
III.4.4. Porosité	68
III.4.5 Propriétés mécaniques	69
III.4.5.1 La résistance en compression.....	69

III.4.5.2 Résistance à la traction.....	70
III.4.6. Conclusions sur les BAP soumis à de hautes températures	71
Conclusion de la partie bibliographique.....	71
Chapitre IV : Caractérisation et méthodologie d'essais expérimentale.....	74
IV .1. Introduction	75
IV.2. Caractérisation des constituants	75
IV.2. 1. Caractérisation du gravier.....	75
IV.2. 2. Caractérisation du sable.....	83
IV.2. 3. Ciment	88
IV.2. 4. Les additions	89
IV.2. 5. Eau de gâchage	89
IV.2. 6. Adjuvant (Superplastifiant)	89
IV.3. Formulation des bétons autoplaçants	90
IV.3. 1. Formulations retenues	91
IV.3. 2. Fabrication et cure	91
IV.3. 3. Essais de caractérisation des BAP	92
1. Essai d'étalement	92
2. Essai de la boîte en L	93
3. Essai de stabilité au tamis	94
IV.4. Essais sur béton durci	96
4.1. Essai de compression	96
4.2. Essai de traction par flexion	97
IV.4. Conclusion du chapitre	98
Chapitre V : COMPORTEMENT THERMOMECHANIQUE DES BAP	99
V.1. Introduction	100
V.2. Rappel des matériaux élaborés	100
V.3. Présentation des programmes expérimentaux	101
V.3.1. Traitement thermique	101
V.3.1.1 Préparation des éprouvettes	101
V.3.1.2 Conditions d'étude	101
V.3.1.3 Disposition dans le four	102

V.3.1.4 Vitesse en montée en température	102
V.3.2 Variation dimensionnelle et pondérale	103
V.3.2.1 Moules et éprouvettes utilisées	104
V.3.2.2 Essais de Retrait et de perte en poids	104
V.3.3 Propriétés mécaniques résiduelles à haute température	105
V.3.3.1 Cure	106
V.3.3.2 Cycle de chauffage	106
V.3.3.3 Mesure de la perte de masse.....	106
V.3.3.4 Essais mécaniques.....	107
a- Essai de compression	107
b- Essai de flexion	107
V.4 Résultats et discussions	108
V.4.1 Résistance à la compression	108
V.4.2 Résistance résiduelle en traction par flexion	109
V.4.3 Perte de masse	110
V.5. Conclusion	112
Conclusion générale et perspective	

Liste des figures

CHAPITRE I : généralités sur le béton ordinaire	PAGE
Figure I.1. Position d'un béton.....	2
Figure I.2. Aperçu des granulats utilisés.....	9
Figure I.3 Porosité microscopique naturelle du béton	14
Figure I.4. Description du milieu poreux avec les trois phases.....	14
Figure I.5. Machine d'essai d'écrasement (essai à la traction)	16
Figure I.6. Essai de traction par flexion.....	16
 Figures de CHAPITRE II : généralités sur le béton autoplaçant	
Photo II.1 : la tour Landmark Tower.....	22
Figure II.1 composition d'un béton ordinaire (BO) et d'un BAP.....	21
Figure II.2 Dispersion des granulats par excès de pâte	24
Figure II.3 Mode d'action des super-plastifiants - Défloculation des grains de ciment.....	25
Figure II.4 Les utilisations des superplastifiants.....	28
Figure II.5 Schéma de principe de l'essai d'étalement.....	29
Figure II.6 Essai d'étalement au cône d'Abrams (slump flow)	29
Figure II.7 Anneau Japonais – Laboratoire GC de Polytech'Orléans.	30
Figure II.8 Risque de blocage au droit des armatures.....	31
Figure II.9 Essai de la boîte en L (L-box test)	31
Figure II.10 Représentation de l'essai de stabilité au tamis.....	32
Figure II.11 Essai de stabilité au tamis.....	32
Figure II.12 Essai de ressuage.....	33
Figure II.13 Mesure de l'air occlus à l'aide d'un aéromètre.....	34
Figure II.14 Parement d'un béton autoplaçant.....	34
Figure II.15 Mesure de la masse volumique réelle.....	35
Figure II.16 Mesure de la résistance à la compression des 11x22 cm.....	36
Figure II.17 Mesure de la résistance à la traction par flexion des 4x4x16 cm.....	36
Figure II.18 Mesure de la résistance à la compression sur demi-prismes.....	37

Liste des figures

Chapitre III : Comportement des bétons à haute température

Figure III.1 Figures des cons séquences des incendies (de gauche à droite) : Tunnel sous la Manche, Tour Windsor, et Tunnel du Mont Blanc.....	39
Figure III.2 Exemple de feu naturel	41
Figure III.3 Triangle du feu	42
Figure III.4 Évolution de la résistance du béton en fonction de la température θ et du type de granulats.....	43
Figure III.5 Modèle mathématique de la relation contrainte-déformation du béton en compression aux températures élevées.....	44
Figure III.6 Dilatation du béton en fonction de la température	44
Figure .III.7 : Variation des limites supérieure et inférieure de conductivité thermique pour les bétons ordinaire (BO) en fonction de la température.....	45
Figure.III.8 : Analyse Thermique Différentielle (ATD) du gel CSH.....	46
Figure.III.9 : Évolution de la quantité des phases de la pâte de ciment Portland au cours d'un traitement thermique.....	47
Figure.III.10 : Illustration du caractère instable des granulats de silex comparé aux granulats calcaires.....	48
Figure.III.11 : Courbes ATD des différents granulats. De haut en bas : calcaire, sable siliceux, basalte, sable silico-calcaire.....	49
Figure.III.12 : Dilatation thermique de la pâte de ciment et des granulats	50
Figure .III.13 : Distributions des pores d'un béton ordinaire à différentes températures.	51
Figure.III.14 : Porosité totale à l'eau en fonction de la température de conditionnement.	52
Figure .III.15 : Perte de masse et vitesse de perte de masse en fonction de la température	52
Figure .III.16 Évolution de la perte de masse en fonction de la température pour différentes compositions de bétons	53
Figure .III.17 : Fissure dans le béton à différente température.....	54
Figure .III.18: Illustration du mécanisme d'éclatement	57
Figure .III.19 : Courbe charges-déformations déterminées à différentes températures sur un BHP d'après	58
Figure .III.20 : Courbes contrainte-déformation en compression uniaxiale à différentes	

Liste des figures

températures pour un béton ordinaire Schneider	59
Figure .III.21 : La déformation ultime en compression uniaxiale en fonction de la température pour différents niveaux de charge appliquée durant le chauffage.....	59
Figure .III.22. Comportement du béton en traction (contrainte-ouverture de fissure) à différentes températures.....	60
Figure .III.23. Évolution relative du module d'élasticité résiduel de bétons de granulats siliceux et calcaires en fonction de la température	62
Figure .III.24 : Éclatement explosif des BAP durant un feu ISO 834	65
Figure .III.25 : décomposition thermique avec l'analyse thermogravimétrique (TGA) et l'analyse différentielle ATD	66
Figure .III.26 : Variation de la perte de masse en fonction de la température.....	67
Figure .III.27 : porosité à l'eau des bétons en fonction de la température.....	68
Figure. III.28 : la résistance à la compression résiduelle des BAP et BO	68
Figure .III.29: l'évolution de la résistance en compression	69
Figure .III.30 : Variation de la résistance résiduelle à la traction par flexion en fonction de la température.....	70

CHAPITE IV : Caractérisation et méthodologie d'essais expérimentale

Figure IV.1 Procédé utilisé pour la mesure de la masse apparente du gravier.....	76
Figure IV.2 Mesure de la masse absolue.....	78
Figure IV.3 Détermination de la teneur en eau.....	79
Figure IV.4 Mesure de la propreté des graviers.....	80
Figure IV.5 Analyse granulométrique.....	82
Figure IV.6 Allure de la courbe granulométrique du gravier.....	83
Figure IV.7 Mesure de la masse volumique apparente du sable.....	83
Figure IV.8 Mesure de la masse volumique absolue du sable.....	84
Figure .IV.8 : Détermination de la teneur en eau.....	86
Figure .IV.9 : Courbes granulométrique du sable.....	87
Figure .IV.10 : Les phases de malaxage.....	92
Figure .IV.11: Mesure de l'étalement du BAP.....	92
Figure .IV.13: Mesure de la fluidité à la boîte en L pour le BAP	93
Figure .IV.13 : Photos illustrant l'essai de stabilité au tamis.....	95
Figure .IV.14 : Essai de compression.....	96

Liste des figures

Figure .IV.15: Dispositif de l'essai de traction par flexion..... 97

Chapitre V : COMPORTEMENT THERMOMECHANIQUE DES BAP

Figure V.1 : la disposition des éprouvettes dans l'étuve..... 102

Figure V.2 : courbe de chauffage (vitesse de chauffage 1°C/mn)..... 103

Figure V.3 : Presse hydraulique utilisée pour essai de compression..... 107

Figure V.4 : évolution de la résistance de compression en fonction de la température..... 109

Figure V.5 : résistance de traction par flexion en fonction de la température..... 110

Figure V.6 : évolutions de poids en fonction de la température..... 111

Figure V.7 : Variation de la perte de masse en fonction de la température..... 111

Liste des tableaux

Chapitre I : Généralités sur le béton ordinaire

Tableau 1 : Exigences mécaniques garanties des ciments (norme NA442)	6
--	---

Chapitre II : Généralités sur les bétons autoplaçants

Tableau II.1 : Propriétés d'ouvrabilité des BAP et les moyens de mise en œuvre.....	23
---	----

Chapitre III : Comportement des bétons à haute température

Tableau III.1 : Transformations principales dues à la température entre la température ambiante et la température de la destruction du matériau béton.....	55
Tableau III.2 : les principaux résultats obtenus des BAP.	63
Tableau III.3 : Stabilité thermique des BAP étudiées	65

Chapitre IV : Caractérisation et méthodologie d'essais expérimentale

Tableau IV.1 : Résultats des mesures de la masse apparente du gravier	76
Tableau IV.2 : Résultats des essais de mesure de la masse absolue du gravie	77
Tableau IV.3 : Teneur en eau des graviers lors des essais	79
Tableau IV.4 : Résultats des mesures de la propreté des graviers	81
Tableau IV.5 : Analyse granulométrique du gravier 5/15	82
Tableau IV.6 : Résultats de la mesure apparente du sable	83
Tableau IV.7 : Résultats de la mesure absolue du sable.....	85
Tableau IV.8 : Teneur en eau des graviers lors des essais	86
Tableau IV.9 : Analyse granulométrique du sable	87
Tableau IV.10 : Résultats des essais sur le sable.	88
Tableau IV.11 : Caractéristiques physiques du ciment utilisé	88
Tableau IV.12 : Caractéristiques physique et chimique des fillers.....	89
Tableau IV.13 : Compositions et paramètres de formulation des bétons d'étude	91
Tableau IV.14 : L'étalement des BAP.	93
Tableau IV.15 : Récapitulatif des résultats des essais à la boîte en L	94
Tableau IV.16 : Critères d'acceptabilité pour l'essai de stabilité au tamis	94
Tableau IV.17 : Formulations retenues de BAP	95
Tableau IV.18 ; Récapitulatif des résultats des essais de tamis	96
Tableau IV.19 : Résistance à la compression à 7j, 14j et 28j des BAP (Mpa).	96
Tableau IV.20 : Résistance à la traction par flexion (Mpa) des BAP à 7 et 28j.	98

Chapitre V : COMPORTEMENT THERMOMECHANIQUE DES BAP

Tableau V.1 : formulations retenues avec leur caractérisation.	100
Tableau V.2 : résistance en compression initiale et résiduelle des bétons étudiés	108
Tableau V.3 : résistance initiale et résiduelle en traction par flexion des bétons étudiés...	109
Tableau V.4 : Perte de masse	110

Sigles et abréviations

ATG : Analyse Thermo Gravimétrique

ATD : Analyse Thermo Différentielle

CEM : Ciment

CHF : Ciment de Haut Fourneau

Ciments CP : Ciment a faible chaleur d'hydratation initiale et a teneur en sulfures limitée

Ciment ES : Ciment pour travaux en eaux à haute en sulfates

Ciment PM : Ciment pour travaux à la mer

CLC : ciment au laitier et aux cendres

C_{minimal} : dosage minimum du ciment

Cm³ : centimètre cube

CPA : Ciment Portland Artificiel

CPJ : Ciment Portland Composé

CPZ : ciment pouzzolanique

C₃S : Silicates Tricalcaliques

D : fumée de silice

D_{max} : diamètre maximal

d : diamètre minimal

dm³ : Décimètre cube

e : volume de l'eau de gâchage

ES : L'équivalent de sable

ESV : l'équivalent de sable visuel

G : Aire du gravier

G : gravier

g : Gravillon

g : volume des granulats

I : Type de ciment

K : Clinker

K : coefficient caractérisant le liant

K : Le coefficient fonction de la nature de ciment, de la classe de ciment, de la qualité des granulats, de leur granulométrie, et des procédés de mise œuvre

K' : coefficient caractérisant les granulats

Kg : kilogramme

K_s : correcteur qui tient compte du module de finesse du sable

K_p : coefficient selon la plasticité

L : laitiers de haut fourneau

L, LL : filler calcaire

M : la masse

M_{DE} : Coefficient micro-Deval en présence d'eau du granulats

M_{DS} : Coefficient micro-Deval sec du granulats

M_f : Module de finesse

m³ : Mètre cube

NA : Norme Algérienne

NF : Norme Française

P : paroi plane

P ou Q : Matériaux pouzzolaniques

R : Résistance à la compression

S : Laitier granulé de haut fourneau

S : La section

S : Surface totale des parois

s : Le sable

P : Périmètre

P : Le poids

T : Schiste calciné

T : Résistance à la traction

T : tonne

V : volume

V : volume du moule

v : volume d'air

V ou W : Cendre volantes

W : teneur en eau

Z : Pouzolanes

γ_{abs} : La masse volumique absolue

γ : La masse volumique apparente

Mm : Micromètre

°C : Degré celsius

Introduction générale

Le béton est le matériau le plus utilisé dans les constructions à travers le monde. En effet, sa rapidité de fabrication, sa mise en place, son faible coût et ses performances mécaniques ainsi que sa durabilité ont contribué à accroître son utilisation pour tous les ouvrages, comme des immeubles de bureaux ou d'habitation, des ponts, des centrales nucléaires, . . .

Après la recherche d'une amélioration de la résistance et de la durabilité, une étape supplémentaire est franchie avec les bétons autoplaçants (BAP). Les bétons autoplaçants possèdent une plage d'utilisation très large : des résistances couvrant la gamme des bétons ordinaires aux bétons à hautes performances, mais également des utilisations diverses (de l'habitation aux ouvrages d'art).

Les bétons autoplaçants sont des bétons spéciaux très fluides, dont la spécification est de se mettre en place sous l'effet de leur poids propre sans apport de vibration externe ou interne. Les bétons autoplaçants ont été mis au point dans les années 80 au Japon. Depuis, leur utilisation ne cesse de s'étendre en Algérie, et cela pour des raisons de d'intérêt économique et des possibilités techniques qu'ils représentent :

- ✓ Diminution du temps de réalisation lors de la mise en place du béton sur chantier,
- ✓ Diminution de la pénibilité du travail sur chantier,
- ✓ Possibilités techniques nouvelles : coulages de zones fortement ferrillées, dans des coffrages à géométrie complexe ou très encombrée, réparation de zones difficilement accessibles.

Les objectifs de la présente recherche concernent l'étude de l'influence de la température sur le comportement des BAP à différentes échéances, commençant par les premiers jours et exactement l'effet du traitement thermique (cure) sur les propriétés mécaniques, passant à moyen terme (28 jours) pour les soumettre à un choc thermique (de 150°) pour suivre l'évolution des variations dimensionnelles et pondérales avant et après ce choc thermique. Et enfin la soumission des BAP à hautes températures (jusqu'à 400°) et de quantifier les pertes de résistance à 30 jours.

Ce mémoire qui s'articule autour de deux grandes parties. Dans la première partie, une analyse bibliographique a pour rôle de répertorier et de synthétiser les documents existants qui touchaient de près ou de loin à notre thème de recherche. Dans la deuxième partie, il a été question d'une étude expérimentale concernant la première partie, qu'est composé de trois chapitres et sera détaillée comme suit :

Le premier chapitre présente une synthèse bibliographique, sur le béton ordinaire et les constituants du béton, qu'à leurs propriétés mécaniques et du comportement hydromécanique. Cette analyse tente de relier la microstructure du matériau béton, à son comportement macroscopique (structure poreuse et la durabilité). Le deuxième chapitre présente une synthèse bibliographique sur le

béton autoplaçant, les constituants et sur la caractérisation d'un béton autoplaçant à l'état frais et à l'état durci.

Le troisième chapitre est composé de deux parties, la première partie concerne le Comportement des bétons ordinaire à haute température et la deuxième partie traite l'état de l'art des BAP à haute température en présentant une synthèse des travaux réalisés sur l'évolution des propriétés physiques et mécaniques.

Tout d'abord, nous décrivons l'évolution de la composition chimique et de la microstructure du béton sous l'effet de la température. Dans la suite de ce chapitre, l'évolution des propriétés mécaniques en fonction de la température élevée est analysée. Les évolutions de la résistance en compression, résistance en traction et module d'élasticité, sont présentées en fonction des différents paramètres influençant ces comportements. En ce qui concerne la deuxième partie un état de l'art des BAP à haute température a été reparties les informations présentées relatent plusieurs aspects concernant la caractérisation des propriétés intrinsèques aux BAP et des résultats nécessaires à l'évaluation des résultats obtenus dans nos essais expérimentaux. Les particularités de la composition des BAP et leur caractérisation à l'état frais (essais spécifiques) sont ainsi abordées puis des données publiées sont citées dans les domaines des propriétés mécaniques (instantanées et différées), ainsi une synthèse des travaux réalisés sur le comportement des BAP à haute température sont présentés.

La deuxième partie composée de deux chapitres est consacrée à l'étude expérimentale. Cette partie est se focalisent sur deux problématiques inhérentes aux bétons à savoir la conception des bétons autoplaçants en utilisant des matériaux locaux et l'influence de la superposition (couplage) des paramètres de composition/température sur le comportement des BAP. Le premier chapitre de cette partie est consacré pour définir les matériaux utilisés, présentant les principes de la méthode de formulation utilisée. La caractérisation à l'état frais des BAP (l'étalement, la boîte en L, et la stabilité au tamis) est réalisée ainsi que l'air occlus et la densité. Et enfin des essais de compression, de traction par sont élaborés pour caractériser les BAP à l'état durci. Les protocoles expérimentaux qui nous ont permis de mesurer toutes les grandeurs mécaniques (résistances mécaniques). Un bref rappel sur les formulations étudiées et leur caractérisation à l'état frais et durci. Ensuite chaque partie du programme expérimental est décrite : leur conditionnement, cycle de chauffage, température, essai à réaliser. En dernier chapitre, les résultats obtenus sont exhibés, il débute par montrer l'influence du traitement thermique sur les propriétés mécaniques. Et enfin, on présente les résultats de l'évolution des variations dimensionnelles et pondérales avant et après un choc thermique.

Les conclusions générales clôturent ce mémoire, en synthétisant les principaux résultats sur le comportement des BAP du point de vue mécanique et variation dimensionnelle et pondérale en présentant le comportement des BAP à haute température, avec des perspectives sur les éventuels travaux futurs.

Chapitre I :

Généralités sur le béton ordinaire

I.1. Introduction

De nos jours, le béton fait partie de notre cadre de vie, c'est l'un des matériaux de construction les plus utilisés dans le monde. En effet, la simplicité de sa fabrication et de sa mise en place, son aspect durable et économique en plus des performances mécaniques qu'il assure, ont légitimé son utilisation pour réaliser les ouvrages les plus divers.

Le béton est utilisé dans tous types de construction : bâtiments, ouvrages d'art, monuments et éventuellement dans les éléments de décoration ... Il permet également la réalisation de produits de préfabrication, d'éléments de structures et autres ; tels que : tuyaux, blocs, poutrelles, pavés, planchers, cloisons, escaliers ...

I.2. Définition

Le béton est un composite hétérogène multiphasique constitué d'un mélange intime de granulats, sable et de pâte (ciment, eau). La pâte de ciment représente 25 à 40 % du volume total du béton [1]. Chaque constituant joue un rôle bien défini : liant hydraulique pour la pâte de ciment, remplissage atténuateur de variations volumiques (retrait) et source de résistance pour les granulats.

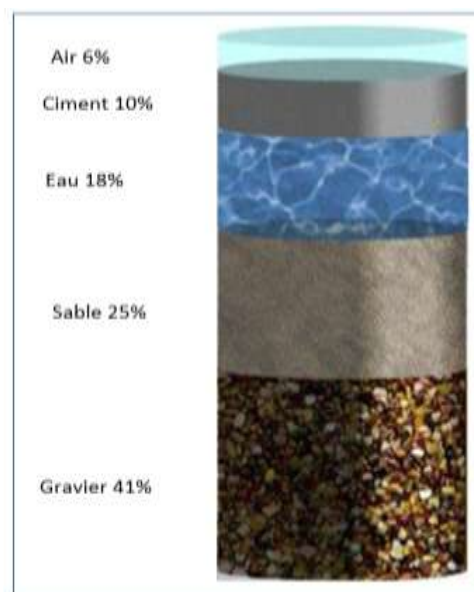


Figure I.1 : Position d'un béton

Un béton est constitué :

- ✓ D'une pâte pure (ciment+ eau),
- ✓ D'un mélange granulaire,
- ✓ De produits additionnels (adjuvants, additions minérales).

On désigne habituellement sous le nom :

- de matrice ou de mortier : le mélange (liant+ sable+ eau),
- de squelette solide ou de squelette granulaire : mélange de granulats.

I.3. Généralités sur les constituants du béton

Le ciment, les granulats, l'eau et éventuellement les adjuvants sont les principaux composants du béton. Il est donc normal de donner quelques précisions sur ces matériaux.

I.3.1. Le ciment

Le ciment est un matériau chimique composé au départ de calcaire (environ 80%) et d'argile (20%) broyée et éventuellement additionnées de produits secondaires ou de matériau apportant la silice, l'alumine et le fer. Ce mélange est ensuite chauffé dans un four à 1450 C°.

Le Ciment Portland Artificiel (le CPA), résulte du broyage du clinker avec environ 5% de gypse pour réguler la prise. Les clinkers peuvent être très différents les uns des autres du fait de la composition du cru du mode de cuisson et du refroidissement. C'est-à-dire qu'en les broyant à des finesses variées avec des teneurs en gypse plus ou moins importantes, on obtiendra des ciments Portland artificiels n'ayant pas les mêmes caractéristiques. On fabrique des ciments encore plus variés grâce à l'ajout de constituants secondaires tels que les Laitiers de Haut Fourneau(LHF), les Cendres Volantes(CV), les pouzzolanes (Z), et la Fumée de Silice(SF) [2].

Les principaux composés du ciment portland sont :

- les silicates tricalciques (alite) : $3\text{CaO}.\text{SiO}_2$ [C_3S]
- les silicates bicalciques (belite) : $2\text{CaO}.\text{SiO}_2$ [C_2S]
- les aluminates tricalciques : $3\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3$ [C_3A]
- les aluminoferrites tétracalciques : $4\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3.\text{Fe}_2\text{O}_3$ [C_4AF]

Les silicates de calcium (C_3S) et (C_2S) représentent environ 75% de la masse du ciment. Les caractéristiques granulaires du ciment sont exprimées par sa granulométrie et sa finesse de mouture. Cette finesse de mouture appelée aussi surface spécifique de Blaine peut atteindre $4000\text{cm}^2/\text{g}$ et plus pour les ciments à forte résistance au jeune âge.

I.3.1.1- Classification normalisée des ciments

La classification des ciments est faite de deux manières : soit d'après leur composition chimique, soit d'après leur classe de résistance [3], [8].

a- Classification suivant la composition

Selon la teneur des constituants autres que le gypse ajouté ou non au clinker, la norme Algérienne NA442 donne la classification suivante :

1. CEM I Ciment Portland Artificiel (CPA) ;
2. CEM II Ciment Portland Composé (CPJ) ;
3. CEM III Ciment de Haut Fourneau (CHF) ;
4. CEM IV Ciment Pouzzolanique ;
5. CEM V Ciment aux Laitiers et aux Cendres.

Ces ciments différents par le type d'ajout et sa teneur, incorporé dans le but de modifier certaines de leurs propriétés en raison des conditions d'environnement ou de performances mécaniques auquel ces ciments sont destinés. Les différents types d'ajouts normalisés sont :

a.1- Laitier granulé de haut fourneau (LHF)

Le laitier est obtenu par refroidissement rapide du laitier fondu provenant de la fusion du minerai de fer dans un haut fourneau. Il contient au moins deux tiers en masse de laitier vitreux et présente des propriétés hydrauliques après avoir subi une activation convenable.

a.2- Matériaux pouzzolaniques (Z)

Ce sont des substances naturelles ou artificielles siliceuses ou silicoalumineuses, ou une combinaison de celles-ci contenant de l'oxyde de fer (Fe_2O_3) et d'autres oxydes mais la teneur en (SiO_2) réactif doit être au moins égale à 25% en masse. Lorsqu'ils sont finement broyés, ils réagissent à température ambiante, en présence d'eau, avec l'hydroxyde de calcium [$Ca(OH)_2$] dissous.

On distingue :

- la pouzzolane naturelle (notée P) : matériau d'origine volcanique ou bien des roches sédimentaires ;
- la pouzzolane naturelle calcinée (notée Q) : matériau d'origine volcanique, des argiles, des schistes ou des roches sédimentaires, activés thermiquement.

a.3- Cendres volantes (CV)

Ce sont des produits pulvérulents de grande finesse, provenant du dépoussiérage des gaz des chaudières des centrales thermiques. On distingue deux familles de cendres volantes :

- cendres volantes siliceuses (notée V) : ce sont principalement des particules sphériques ayant des propriétés pouzzolaniques. Elles sont constituées essentiellement de silice (SiO_2) réactive et d'alumine (Al_2O_3) d'oxyde de fer (Fe_2O_3) et d'autres composants. La teneur en oxyde de

calcium (CaO) doit être inférieure à 10% en masse, la teneur en silice (SiO₂) réactive doit être supérieure à 25% en masse.

- cendres volantes calciques (notée W) : elles présentent des propriétés hydrauliques et/ou pouzzolaniques, contenant une teneur en oxyde de calcium (CaO) réactif supérieure à 10% en masse, le reste étant de la silice (SiO₂) réactive, d'alumine (Al₂O₃), d'oxyde de fer (Fe₂O₃) et d'autres composants.

a.4- Schiste calciné (T)

Il est produit dans un four spécial à une température avoisinant les 800°C, composé de silicate bicalcique et d'aluminate monocalcique, ainsi que de petites quantités de chaux libre et de sulfate de calcium, le schiste calciné finement broyé présente, outre des propriétés pouzzolaniques, des propriétés fortement hydrauliques.

a.5- Filler calcaire (FC)

C'est un matériau très finement broyé. Il a pour rôle de remplir les vides entre les sables et les graviers, tout en présentant une certaine activité physico-chimique en favorisant l'hydratation des silicates tricalciques. Les fillers calcaires utilisés comme ajouts doivent contenir :

- la teneur en calcaire (CaCO₃) ≤ 75% en masse ;
- la teneur en argile ≤ 1.20g/100g ;
- la teneur totale en carbone organique (TOC) < 0,2% en masse pour le (FC) et ≤ 0.5% pour la (exception faite du clinker).

a.6- Fumée de silice (SF)

Elle provient de la réduction du quartz de grande pureté par du charbon dans des fours à arc électrique. Elle est formée de particules sphériques contenant au moins 85% en masse en silice amorphe. Poudre d'une extrême finesse (de 15000 à 25000m²/Kg), ce qui lui donne la capacité de se placer dans les interstices des grains de ciments en diminuant la demande en eau du mélange (effet filler). Son dosage est cependant limité à 10% de la masse du ciment pour protéger les armatures dans le béton (problème de PH).

b. Classification des ciments suivant les résistances à la compression

La norme NA442 classe les ciments courant d'après leur résistance à la compression déterminée conformément à la norme NA234, mesurée à 28 jours, en six classes de résistance suivantes (tableau 1) :

Tableau I.1 : Exigences mécaniques garanties des ciments (norme NA442)

Classe de résistance	Résistance à la compression (MPa)			
	Résistance à court terme		Résistance courante	
	2jours	7jours	28jours	
32,5	-	-	≥32,5	≤ 52,5
32,5 R	≥ 13,5	-		
42,5	≥ 12,5	-	≥42,5	≤ 62,5
42,5 R	≥ 20	-		
52,5	≥ 20	-	≥52,5	-
52,5 R	≥ 30	-		

c). Classification des ciments suivant le type d'environnement :

Certains ciments ont des propriétés supplémentaires leur permettant de s'adapter à des environnements spéciaux, tels que :

c.1-Ciment PM

(Ciment pour travaux eu mer)

Résistant à l'eau de mer, c'est un ciment courant possédant des caractéristiques physiques et chimiques complémentaires (teneur limitée en aluminat tricalcique) qui lui donne une résistance accrue à l'agression des ions sulfate en présence d'ions chlorure, au cours de la prise et ultérieurement.

c.2-Ciment ES

(Ciment pour travaux en eaux à haute teneur en sulfates) ;

Résistant aux eaux sulfatées est un ciment courant présentant des teneurs limitées en aluminat tricalcique (C_3A) afin d'avoir une résistance accrue à l'agression des ions sulfate au cours de la prise et ultérieurement.

c.3-Ciments CP

(Ciment à faible chaleur d'hydratation initiale et à teneur en sulfure limitée) ;

Pour béton précontraint, on distingue deux types de ciments qui diffèrent par leur teneur en ions sulfure : SO_4^{2-}

- ciments de la classe CP2 contenant moins de 0,2% d'ions sulfure recommandé pour la précontrainte par *pré-tension*,
- ciments de la classe CP1 contenant moins de 0,7% d'ions sulfure recommandé pour la précontrainte par *post-tension*.

Il existe par ailleurs des ciments spéciaux répondant à des conditions spécifiques (durcissement très rapide, résistance aux fortes chaleurs ou aux agressions chimiques). C'est le cas du ciment alumineux fondu, très résistant aux milieux acides.

I.3.1.2-Choix du ciment pour les bétons

Le choix du type de ciment ainsi que son dosage dépend à la fois des performances recherchées et de la nature des autres constituants.

Pour les bétons armés, la classe 32,5MP est au minimum retenue, généralement, on utilise la classe 42,5MP.

Le dosage en ciment pour le béton est un choix très délicat qui dépend de plusieurs critères :

- le type de béton ;
- la destination de l'ouvrage ;
- les granulats utilisés, ...

Le dosage en ciment s'exprime couramment en kg/m^3 (de béton mis en place).

a. Dosage en ciment et taille des granulats

Il existe plusieurs relations qui donnent les dosages minimaux en ciment en fonction de diamètre maximal des granulats. Celle retenue le plus souvent est la formule pour la règle BAEL DTU21 qui donne :

$$C = \frac{K^{0.2}}{D} \quad (\text{Eq : I.1})$$

C : le dosage en ciment kg/m^3 .

D : diamètre maximal des granulats (mm).

K = 500 pour les bétons courants. 700 pour les bétons précontraints ou exposés à des conditions agressives.

b. Dosage en ciment et résistance mécanique du béton

Le dosage en ciment a une influence directe sur la résistance mécanique du béton.

On peut dire que dans une certaine plage de dosage 250 à 500, la résistance R_c est proportionnelle au dosage en ciment :

$$R_c = K \left[\frac{C}{E} - 0.5 \right] \quad (\text{Eq : I.2})$$

Eq. 2 : Formule de Bolomey

R_c : résistance à la compression du béton.

K : coefficient qui dépend de la nature des granulats, de la consistance du béton et de la qualité du serrage.

C : dosage en ciment, E : dosage en eau.

I.3.2. Les granulats (sables, gravillons)

Le granulat est constitué d'un ensemble des grains minéraux des dimensions comprises entre 0 et 125mm. Les granulats sont obtenus en exploitant des gisements de sables et de graviers d'origine alluvionnaire terrestre ou marine, en concassant des roches massives (calcaire ou éruptives) ou encore par le recyclage de produits tels que les matériaux de démolition. Leur nature, leur forme et leurs caractéristiques varient en fonction des gisements et des techniques de production. La nature minérale des granulats est un critère fondamental pour son emploi, chaque roche possédant des caractéristiques spécifiques en termes de résistance mécanique, de tenue au gel et des propriétés physico-chimiques

Les granulats sont définis comme l'ensemble de grains inertes (sable, graviers et cailloux) dont l'origine peut être naturelle ou artificielle. Nous distinguons les granulats roulés extraits de ballastières naturelles ou de rivières, et les granulats concassés obtenus à partir des roches concassées exploitées en carrières. Les granulats sont classés selon les dimensions des grains qui les constituent et la courbe granulométrique représente la distribution, en pourcentage, des poids des matériaux passants dans des tamis de dimensions normalisées [4].

Dans le béton frais, les granulats servent au remplissage de l'espace (ils occupent environ 70 % de volume). De plus en raison de leur porosité ouverte, ils peuvent absorber une certaine quantité d'eau (effet de mouillage). Dans le béton durci, les granulats apparaissent comme des inclusions dures. Ils ont un rôle important dans la résistance mécanique et dans la consistance du béton selon :

- leur qualité mécanique ;
- leur capacité d'adhérence avec la pâte liante ;
- leur forme (roulés ou concassés) ;
- leur diamètre maximal... ;

Ils constituent l'ossature du béton et occupent 70 à 80% environ du volume d'un béton. Ils sont en principe inertes mais peuvent, dans certains cas, favoriser certaines réactions d'hydratation de certains minéraux du clinker c'est l'exemple des silicates tricalciques C_3S en présence de filler d'origine calcaire

Leur utilisation pour la confection d'un béton est motivée par le faible coût économique, par une meilleure durabilité et stabilité volumétrique par rapport au mélange (ciment/eau). En effet, la nature, la quantité, la forme, la granulométrie, la propreté, l'état de surface et le type de granulats sont des facteurs ayant une influence sur les caractéristiques du béton, aussi bien à l'état durci qu'à l'état frais.

Les principales divisions granulométriques des granulats données par la norme NA552 sont les suivantes :

- fillers 0/D où $D < 2\text{mm}$ avec au moins 70 % de passant à 0,063mm ;
- sablons 0/D où $D \leq 1\text{mm}$ avec moins de 70 % de passant à 0,063mm ;
- sables 0/D ou $1 < D \leq 6,3\text{mm}$;
- graves 0/D où $D > 6,3\text{mm}$;
- gravillons d/D où $d \geq 1$ et $D \leq 125\text{mm}$;
- ballasts d/D où $d \geq 25\text{mm}$ et $D \leq 50\text{mm}$.

Les photos suivantes présentent quelques échantillons de granulats utilisés dans le présent travail et qui sont issus des carrières de Ain Touta et de la sablière d'El Chatt [5].



(a) Gravillons 8/16C



(b) Gravillons 4/8C



(c) Sable de carrière $S_c0/4$



(d) Sable de mer (roulé) $S_R0/3$

Figure.I.2 : Aperçu des granulats utilisés

Forme des granulats :

❖ Granulats roulés :

Ils sont plus faciles à mettre en place, ne nécessitent pas de moyens de serrage importants, glissent bien entre les armatures et conviennent particulièrement au béton armé.

❖ Granulats concassés :

Ils donnent lieu à des bétons raides à mise en place difficile. Par contre, ils adhèrent bien à la pâte de ciment et procurent au béton une plus grande résistance notamment à la traction.

Les caractéristiques essentielles des granulats destinés aux bétons hydrauliques sont les suivantes :

I.3.2.1. Le gravier :

D'après la norme NA463 l'essai de propreté des graviers consiste à déterminer le pourcentage d'éléments $<0,5\text{mm}$. Le pourcentage de vase et d'argiles, éliminées lors de l'essai de propreté doit être $\leq 1,5\%$ pour gravillons n'ayant pas subi de concassage, et $\leq 3\%$ pour ce qui ont subi le concassage. La granularité du gravier est fixée par le D prescrit ou admissible pour le béton à préparer, l'absorption d'eau la norme NA451 fixe à 5% la valeur maximale pour les bétons hydrauliques.

I.3.2.2. Le sable

Les sables entrent dans la composition des mortiers, des bétons des matériaux préfabriqués où ils participent à la résistance à l'écrasement, d'où la recherche d'un sable dur, et compact. C'est souvent par la médiocre qualité du sable que périssent les bétons. Il faut que les grains de sable demeurent plus durs que la pâte de ciment durci qui les enveloppe : ils donnent de la cohésion au mélange, mortier ou béton. A côté des rôles cités précédemment :

- ✓ Il permet l'économie de liant sans réduire la résistance du mélange ;
- ✓ Il facilite la prise en assurant la porosité du mortier et son aération ;
- ✓ Il combat le retrait du ciment pur et atténue le gonflement du mortier de chaux ;
- ✓ Il constitue un excellent terrain de fondation, s'il n'est pas affouillé, du fait de son incompressibilité et de sa mobilité, ce qui permet une bonne répartition de pressions ;
- ✓ Il constitue un lit sous carrelage, et permet l'enrobage des canalisations ;

I.3.3- L'eau de gâchage

L'eau est un ingrédient essentiel du béton. Il joue deux fonctions principales : confère au béton sa maniabilité à l'état frais (propriétés rhéologiques) et assure l'hydratation des grains de ciment pour une prise et un durcissement. La quantité d'eau utilisée ou plus précisément le rapport eau/ciment a une forte influence sur la porosité du béton, sa perméabilité, les résistances mécaniques, la durabilité, la microstructure, la cinétique d'hydratation, etc. L'eau de gâchage peut avoir plusieurs origines, mais seule l'eau potable est présumée conforme aux exigences aux normes en vigueur. Les autres comme l'eau récupérée de la fabrication de bétons, les eaux d'origine souterraine, les eaux de rejet industriel, l'eau de mer et les eaux saumâtres, doivent être soumises à des essais de contrôle préliminaire (essais chimiques, physiques, etc.). Dans tous les cas l'eau utilisée pour le gâchage du béton doit respecter les deux conditions suivantes :

1) Masse limite des matières en suspension ;

- ✓ 2g/l pour les bétons des types A et B ;
- ✓ 5g/l pour les bétons du type C

2) Teneur en sels :

- ✓ 15g/l pour les bétons des types A et B ;
- ✓ 30g/l pour les bétons du type C ;

Avec :

- ✓ Type A : béton à résistance mécanique élevée (ouvrages en béton armé) ;
- ✓ Type B : béton à faible perméabilité (barrages, réservoirs) ;
- ✓ Type C : béton à résistance mécanique faible (béton peu ou non armé, massive de fondations).

I.3.4- Les adjuvants

Ce sont des produits chimiques organiques ou inorganiques, incorporés généralement en faible quantité (moins de 5% de la masse du ciment sous forme de poudre ou de solution), avant ou pendant le malaxage, dans le but de modifier certaines propriétés par une action chimique ou physique du béton. Ils ne doivent pas modifier défavorablement la durabilité du béton ou toute autre propriété du béton armé qu'il soit à l'état frais, pendant la prise et le durcissement ou à l'état durci.

Le mode d'action des adjuvants est :

- ✓ Soit mécanique : modifiant la consistance du mélange ;
- ✓ Soit physique : en agissant sur la tension superficielle des composants ;
- ✓ Soit chimique : en modifiant la vitesse de prise et la réaction d'hydratation du ciment.

Il s'agit donc de matières possédant des propriétés chimiques ou physique-chimiques appropriées au rôle assigné. Un adjuvant a en général une action principale d'après laquelle il se trouve défini et classé. Les adjuvants sont classés par la norme NA775 suivant leurs actions principales, même s'ils ont plusieurs actions secondaires en :

- plastifiant/réducteur d'eau ;
- super plastifiant réducteur d'eau ;
- rétenteur d'eau ;
- entraîneur d'air ;
- accélérateur de prise ;
- accélérateur de durcissement ;
- retardateur de prise ;
- hydrofuge de masse ;
- plastifiant/réducteur d'eau / retardateur de prise ;
- super plastifiant / haut réducteur d'eau/retardateur de prise ;
- plastifiant / réducteur d'eau / accélérateur de prise.

Il existe aussi d'autres adjuvants comme : les raidisseurs pour béton projeté, les adjuvants pour coulis d'injection, les adjuvants pour mortier stabilisé, les colorants, les inhibiteurs de corrosion, etc.

3.4.1. Domaines d'application

- ✓ Béton à hautes performances
- ✓ Béton autoplaçant
- ✓ Béton pompés
- ✓ Béton précontraints

3.4.2. Dosage

Plage de dosage recommandée : 0.5 à 2% du poids de ciment soit 0.5 à 1.85 litre pour 100kg de ciment. Le dosage optimal doit être déterminé sur chantier en fonction du type de béton et des effets recherchés.

I.3.5. Les additions minérales

Une addition minérale est une poudre minérale finement broyée et pouvant être ajoutée au ciment (et/ou substituée) afin d'améliorer certaines propriétés ou pour conférer des propriétés particulières au béton. Actuellement nous distinguons 4 types d'additions :

I.3.5.1. Additions calcaires (NFP18-508)

Les additions calcaires sont des produits secs finement divisés, obtenus par broyage de roches ; ce type d'addition peut jouer plusieurs rôles en tant :

- ✓ Que complément de la granulométrie (augmentation de la granulométrie, accroissement de la maniabilité, etc) ;
- ✓ Qu'activant améliorant les propriétés physique-chimiques de la pâte liante.

3.5.2. Cendres volantes (NF EN 450)

L'ajout de cendres volantes permet en général une amélioration de l'ouvrabilité.

3.5.3. Laitiers de hauts fourneaux (NFP 18-506)

Ils proviennent de la fabrication de la fonte.

3.5.4 : Fumée de silice (NFP 18-502)

Poudre finement divisée (diamètre variant de 0.1 à 10 μ m) résultant de la production d'alliages de silicium. Leur emploi permet une amélioration des résistances et une amélioration de la durabilité. L'utilisation d'ajouts cimentaires comme complément au ciment reste peu utilisée au niveau local, malgré l'abondance de certains produits (fillers calcaires et fumée de silice) alors que dans beaucoup d'autres pays, leur utilisation est devenue systématique.

I.4 : Structure poreuse du béton

Un mélange ciment/eau donne une pâte de ciment hydraté (ou pâte). Un mortier et des graviers donnent un béton. Les granulats ajoutés modifient la texture et la structure des bétons.

L'hydratation des composants que ce soit dans une pâte, un béton, donne un matériau poreux à l'état durci. La porosité est issue d'une part de la microstructure même des hydrates, en particulier des CSH, et d'autre part, des vides laissés par l'eau lors de l'hydratation alors que le système avait déjà commencé à se figer physiquement, ainsi que des bulles d'air piégées durant le malaxage.

La porosité peut ainsi être connectée ou occluse et d'une distribution de taille de pores très variable. Certains paramètres physiques sont utilisés pour décrire la porosité : le volume total poreux, le diamètre des pores mais aussi la tortuosité et la constrictivité, décrivant le caractère aléatoire des formes du réseau poreux. Le béton est un matériau composite caractérisé par une microstructure poreuse avec des pores de différentes tailles et de distribution aléatoire (Figure.I.3).

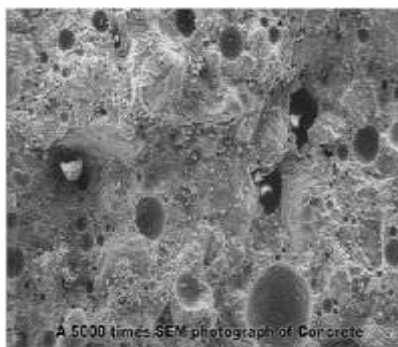


Figure.I.3 : Porosité microscopique naturelle du béton

La structure poreuse et la distribution des pores au sein du béton jouent un rôle très important non seulement sur la résistance mécanique, mais aussi sur les phénomènes de transport et d'interaction avec le milieu extérieur. Cette interaction a lieu à travers les pores interconnectés. Le réseau poreux est aussi le récipient de l'eau liquide, de l'eau en forme de vapeur et de l'air sec (Figure.I.4). Pour ces raisons, la porosité (et sa distribution) devient un paramètre très important pour la caractérisation du béton. La forme et la taille des pores changent dans chaque type de béton. L'eau en excès, utilisée pour la confection du béton et la manipulation que l'on fait lors de sa confection, forme des bulles d'air dans le béton. Ces bulles constituent le premier squelette du réseau poreux. Ensuite, le contenu et le type du ciment ainsi que les agrégats, contribuent à la taille et à la distribution des réseaux poreux. Les conditions du béton pendant sa maturation ont une influence très forte sur les réseaux poreux. Dans la pâte de ciment, les parois d'un pore sont formées essentiellement par le C-S-H, mais dans les pores on trouve aussi de l'ettringite et de la portlandite.

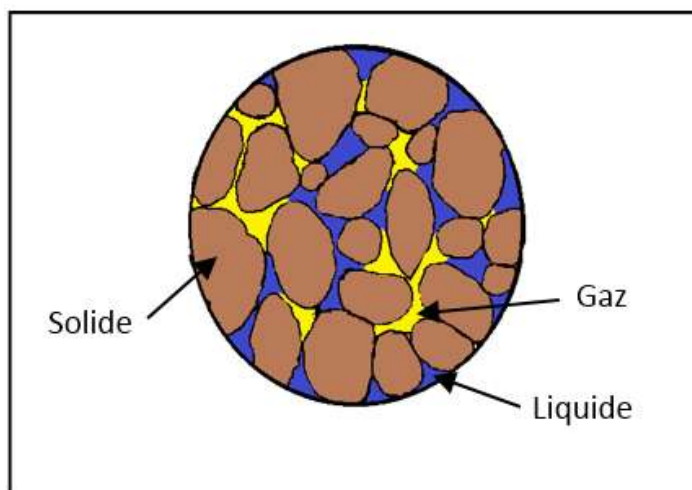


Figure .I.4 : Description du milieu poreux avec les trois phases

I.4.1. Détermination de la porosité :

La porosité (ou le volume poreux) est définie comme le volume cumulé des pores par unité de volume de milieu poreux. Sa détermination est généralement une technique destructive. Les techniques les plus usuelles utilisées sont :

- Porosité à l'eau : la porosité totale est mesurée avec cette méthode. Elle permet de connaître la quantité d'eau totale contenue dans le béton après le séchage et la saturation de l'échantillon
- Porosité au mercure : permet de connaître la porosité en poussant du mercure à travers les réseaux de pores ouverts du béton. La quantité de mercure qui entre dans le béton à différentes pressions permet de lier la pression aux différentes tailles des pores et d'obtenir donc la distribution de la taille des pores. Avec cette méthode on peut explorer des pores de tailles 50 Å 100µm c'est à dire la région des pores capillaires.

La principale limite des méthodes de détermination de la porosité est liée au fait que, indépendamment du fluide utilisé pour la percolation, tous les pores ne vont pas être remplis par la phase mouillante. En plus, il faut aussi prendre en compte le fait que certains liquides (notamment l'eau) ne sont pas inertes vis-à-vis de la matrice cimentaire ils entraînent un changement de la microstructure. L'utilisation de la technique de pénétration au mercure est alors très répandue vu le fait que la plage des pores qui sont remplis par ce fluide correspond aux pores capillaires les pores qui sont les plus concernés par les phénomènes de transport et qui, donc, nous intéressent pour l'étude du matériau béton.

V.5. Résistance de béton a la compression

L'essai de compression est mené sur des éprouvettes de forme cylindrique normalisée et d'éclatement 2 (16x32) cm ; norme NF P 18-406, NA 427. La vitesse de chargement est constante. La machine d'essai est une presse de force de classe « B » et d'une capacité maximale de 1500 KN conforme à la norme NF P 18-412 (NA 2832).

Les éprouvettes (Figure.I.5) sont conservées sans être déplacées pendant 24 heures. Après démoulage, les éprouvettes sont conservées jusqu'à réalisation des essais dans le même milieu ambiant. L'essai a pour but de connaître la résistance à la compression. L'éprouvette étudiée est soumise à une charge croissante jusqu'à la rupture.

La conduite de l'essai est la suivante : l'éprouvette, une fois rectifiée doit être centrée sur la presse d'essai avec une erreur inférieure à 1% de son diamètre. La mise en charge doit être effectuée à raison de 0.5 MPa avec une tolérance de ± 0.2 MPa.

Pour des éprouvettes de (16x32) cm, cela signifie une montée en charge de 10 KN /s \pm 4 KN / s. La charge de rupture est la charge maximale enregistrée au cours de l'essai. La résistance à la compression est le rapport entre la charge de rupture et la section transversale de l'éprouvette [6].



Figure.I.5 : Machine d'essai d'écrasement (essai à la compression)

I.6. Résistance à la traction par flexion

Des éprouvettes prismatiques de dimensions (7 x 7 x 28) cm sont soumises à un moment de flexion par application d'une charge au moyen de rouleaux supérieurs et inférieurs. La charge maximale enregistrée au cours de l'essai est notée et la résistance à la flexion est calculée.

Les mesures sont faites sur une presse qui répond aux normes NF P 18-407 (NA 428), munie d'un banc de flexion à 4 points [7].

Pour une charge totale P , le moment de flexion constant entre les deux points d'application de la charge est : $M = P \times a / 2$ et la contrainte de traction correspondante sur la fibre inférieure est $f_t = 6M / a^3$ où on trouve la relation finale permet de calculer la résistance : $f_t = 3P / a^2$



Figure.I.6 : Essai de traction par flexion

I.7. Conclusion

Ce chapitre a été consacré au choix et à la caractérisation des constituants du béton. Cette synthèse bibliographique a été menée pour faire le point sur les connaissances relatives aux principaux constituants du béton, à savoir les ciments, les granulats, l'eau de gâchage, les adjuvants et les additions minérales. Certains de ces constituants (ciment, eau de gâchage, granulats) sont toujours présents, les autres (adjuvants et ajouts cimentaires) sont parfois utilisés pour améliorer certaines performances du béton. Dans tous les cas de figure, les constituants du béton ont des caractéristiques chimiques, physiques et mécaniques que tout bon ingénieur doit maîtriser, et la moindre négligence entraînera à coup sûr, des bétons de qualités médiocres. La qualité et la durabilité du béton dépendent dans une large mesure de choix de ses composants.

Chapitre II :
Généralités sur les bétons autoplaçants

II.1.Introduction

Les maîtres d'œuvres, architectes, ingénieurs, entreprises, fabricants de béton ont toujours recherché un béton permettant :

- une mise en place aisée,
- un bon remplissage des coffrages,
- un parfait enrobage des armatures.

La vibration a toujours été le moyen d'obtenir ces caractéristiques. Devant la complexité croissante des structures, formes variées, fortes concentrations d'armatures, les formulations de bétons ont dû s'adapter. Les bétons sont devenus de plus en plus fluides, malgré la réduction de la quantité d'eau de gâchage, à tel point que la vibration n'est devenue plus nécessaire. Cette hyper fluidité du béton a été rendue possible par l'arrivée sur le marché des dernières générations d'adjuvants « superplastifiants ».

Le Japon a été dans les années 80 le pionnier dans le développement de cette nouvelle technique et qui s'est progressivement répandue à travers le reste du monde, de nombreux termes définissent ces bétons :

- Béton auto-compactant (BAC).
- Self-compacting concrete (SCC, en Anglais).
- Béton hyper fluide.

L'appellation la plus usitée aujourd'hui est le béton autoplaçant (BAP) [9]. Beaucoup de structures actuelles se caractérisent par la complexité de leur architecture (formes variables et courbures multiples), ainsi que par une forte concentration en armatures, ce qui rend souvent difficile l'utilisation des bétons de plasticité conventionnelle.

Afin d'adapter les bétons à ces ouvrages, des recherches ont été menées au cours des dernières années dans le but de développer des formulations de bétons se caractérisant par une haute ouvrabilité, tout en étant stables (ségrégation, ressuage et tassement faible), avec de bonnes caractéristiques mécaniques et de durabilité.

Pour des raisons économiques, on substitue une partie du ciment par des matières plus ou moins hydrauliques. L'utilisation de ces additions minérales et la forte adjuvantation conduisent à une modification de la cinétique d'hydratation des BAP [3].

Ce deuxième chapitre fait l'objet d'une initiation au béton autoplaçant, il comporte des notions fondamentales relatives aux caractéristiques des BAP.

Ces bétons connaissent un essor important au Japon, de par leurs deux principaux intérêts technico-économiques, à savoir:

- ✓ La diminution du temps de travail et du nombre des ouvriers lors de la mise en place du béton sur chantier. Cela est d'autant plus important qu'elle devient de plus en plus coûteuse et génératrice de délais, étant donné la complexité croissante des coffrages (formes , Ferrailages ;)
- ✓ L'obtention d'une meilleure qualité du béton, in situ, pratiquement indépendante du savoir-faire des ouvriers durant la réalisation. Cela va dans le sens d'une durabilité accrue des ouvrages [10].

II.2. Définition

Les BAP se distinguent des bétons ordinaires principalement par leurs propriétés à l'état frais, qui sont le résultat d'une formulation spécifique. Cette dernière doit pouvoir concilier deux propriétés a priori contradictoires : une très grande fluidité et une bonne résistance à la ségrégation (stabilité). L'Association Française de Génie-Civil définit dans ses recommandations provisoires les BAP comme des bétons « très fluides, homogènes et stables » [11].

La mise en place, sous le seul effet de la gravité, nécessite une grande fluidité du matériau, mais il est aussi indispensable que le béton conserve une stabilité satisfaisante et une parfaite homogénéité. Ces deux propriétés contradictoires sont obtenues par l'ajout et le dosage adéquat de superplastifiants et de / ou l'emploi d'agents de viscosité.

Un BAP doit être assez fluide pour pouvoir être mis en place avec un débit suffisant et remplir les coffrages sans apport de vibration sous l'effet de son propre poids tout en restant homogène. Cependant, lors de l'écoulement d'un béton fluide au droit d'un obstacle (par exemple, une armature de ferrailage), les gravillons ont tendance à venir en contact pour former des volutes solides qui bloquent l'écoulement.

C'est ce que l'on appelle le risque de blocage. Ainsi, le béton doit présenter une bonne résistance à la ségrégation en phase d'écoulement y compris au droit des armatures. Un béton autoplaçant doit aussi avoir une bonne résistance à la ségrégation statique (une fois mis en place) jusqu'à sa prise et rester homogène afin de satisfaire aux propriétés mécaniques souhaitées. Ainsi la difficulté du cahier des charges d'un BAP est la recherche d'un compromis satisfaisant entre une grande fluidité et une bonne résistance à la ségrégation aussi bien au repos qu'en écoulement.

II.3. Concept du béton autoplaçant

Au Japon, le nombre d'ouvriers qualifiés dans la construction n'a cessé de diminuer depuis le début des années 1980, engendrant une perte de connaissance, notamment dans les techniques de vibration du béton. L'utilisation de bétons très fluides, ne nécessitant pas d'apport d'énergie extérieure pour le serrage, est apparue comme une solution possible à ce problème. Outre leur facilité de mise en œuvre, de tels bétons présentent aussi l'intérêt de réduire le temps de travail sur chantier.

Les bétons autoplaçants (BAP) se distinguent donc des bétons dits ordinaires (BO), ou bétons vibré, par leurs propriétés à l'état frais [46]. Ils sont capables de s'écouler sous leur propre poids, quel que soit le confinement du milieu, et restent homogènes au cours de l'écoulement (absence de ségrégation dynamique) et une fois en place (absence de ségrégation statique). Pour parvenir au cahier des charges, les BAP sont formulés différemment des BO.

Dans leur cas, la pâte, définie comme le mélange du ciment, de l'eau et d'une addition, est privilégiée au détriment des gravillons (Figure II.1). En général, les BAP possèdent un même dosage en ciment et en eau que les BO, ainsi qu'un volume de sable assez proche. C'est donc principalement l'ajout d'une addition qui sert de substitut aux gravillons. Les proportions exactes de chaque constituant dépendent bien sûr de la méthode de formulation choisie.

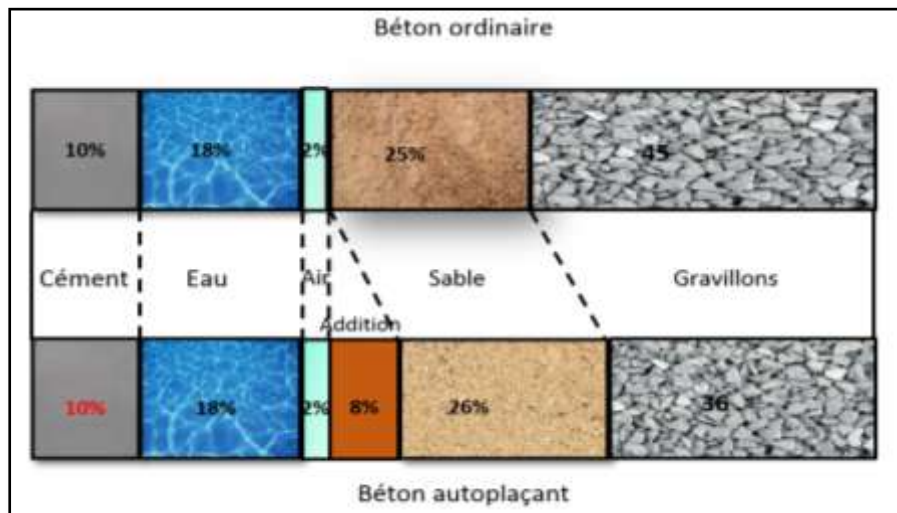


Figure II.1 : Composition d'un béton ordinaire (BO) et d'un BAP.

Le rôle de la pâte est de séparer les gravillons pour limiter les contacts, en particulier dans les milieux ferraillés, et ainsi prévenir la formation de voûtes susceptibles de bloquer l'écoulement. Le volume important d'éléments fins permet aussi de garantir le compromis entre la stabilité et la maniabilité. Mais il n'est pas suffisant pour atteindre la fluidité. Il est nécessaire d'ajouter aux bétons un dé flocculant, sans lequel la demande en eau du mélange serait trop élevée.

II.4. Domaine d'utilisation des BAP

Les BAP sont utilisables aussi bien pour la réalisation d'ouvrages horizontaux que verticaux, sur tous les types de chantier, de bâtiments ou de génie civil et pour la réalisation de nombreux produits préfabriqués en béton [12]. La plupart des ouvrages peuvent être réalisés en BAP (voiles, poteaux, piles, poutres, planchers, dalles, dallages, fondations, éléments de façade, mobiliers urbains, etc.).

Les BAP sont particulièrement adaptés à la réalisation de structures pour lesquelles la mise en œuvre d'un béton classique est délicate, c'est-à-dire, présentant des :

- ❖ densités de ferrailage importantes ;
- ❖ formes et géométries complexes : voiles, courbes, ... ;
- ❖ voiles minces et de grande hauteur : piles de ponts, ... ;
- ❖ voiles complexes avec de nombreuses réservations ou de grandes ouvertures ;
- ❖ exigences architecturales et qualité de parement particulière.

A titre d'exemple, nous citons quelques réalisations avec les BAP :

- La tour Landmark Tower (photo01), où un béton autoplaçant d'une excellente déformabilité a été mis en place avec succès dans 66 colonnes de 40 m de hauteur chacune (HAYAKAWA et coll.1995)



Photo II.1 : La tour Landmark Tower.

II.5. Les avantages des bétons autoplaçants

- ❖ l'absence de vibration et donc de nuisances sonores.
- ❖ des aspects de surface d'une bonne régularité.
- ❖ une diminution de risque de fissuration
- ❖ un gain de temps sur les bétonnages.
- ❖ une pénibilité fortement réduite pour les maçons.
- ❖ une suppression des risques d'accident liés à la manutention de la benne.
- ❖ une économie de mains d'œuvres et un meilleur enrobage des armatures.
- ❖ une bonne planimétrie du support fini [1].

II.6. Ouvrabilité des bétons autoplaçants

Un béton est qualifié d'autoplaçant s'il satisfait les propriétés précitées, en trouvant le bon compromis entre des caractéristiques presque contradictoires (fluidité et résistance à la ségrégation). Pour résumer, nous présentons dans le tableau II.1, les propriétés des BAP, les moyens pour les caractériser et les actions entreprises pour leur mise en œuvre.

Tableau II. 1 : Propriétés d'ouvrabilité des BAP et les moyens de mise en œuvre

Propriétés d'un BAP	Moyens d'obtention	Actions à mener dans la formulation
Remplissage (fluidité)	Réduction des frictions entre les particules	Augmentation du volume de pâte
	Optimisation de la pâte	Utilisation de superplastifiants
		Optimisation du rapport E/C
Résistance à la Ségrégation	Réduction de l'eau libre dans le béton	Utilisation de matériaux de grande surface granulaire
	Réduction de la séparation de phases	Utilisation d'agents de viscosité Réduction du rapport E/C
		Réduction de la taille maximale des granulats
Capacité de passage	Réduction de blocage des Granulats	Réduction de la taille maximale des granulats ainsi que le volume granulaire

II.7. Les critères de composition des BAP

Après plusieurs recherches effectuées en laboratoires, les essais ont montré que pour répondre aux exigences du cahier des charges, la composition d'un béton autoplaçant doit avoir certaines caractéristiques [13], soit :

7.1. Un volume de pâte important

Les frottements entre granulats sont source de limitation 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 les uns des autres, son volume dans les BAP est donc élevé (Figure .II.2)

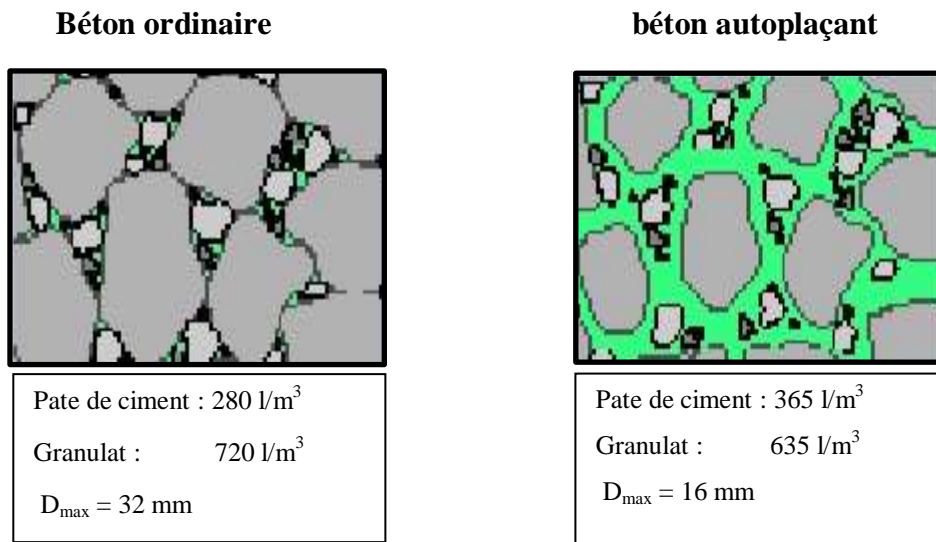


Figure .II.2 : Dispersion des granulats par excès de pâte [14].

7.2. Une quantité de fines (<math> <80 \mu\text{m}</math>) importante

Afin de garantir le compromis entre stabilité et maniabilité tout en limitant les risques de ségrégation et de ressuage, les BAP contiennent une quantité de fines (de l'ordre de 500 kg/m^3) supérieure à celle des bétons conventionnels.

Le choix des additions et de leur teneur respective dans les BAP est déterminé en fonction des exigences de résistance à la compression à 28 jours, des critères de durabilité et des paramètres d'ouvrabilité telles qu'imposées par les normes applicables (DTU 21, norme XP P18-305, normes produit préfabriqué en usine, etc.).

7.3. L'utilisation des 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 [15].

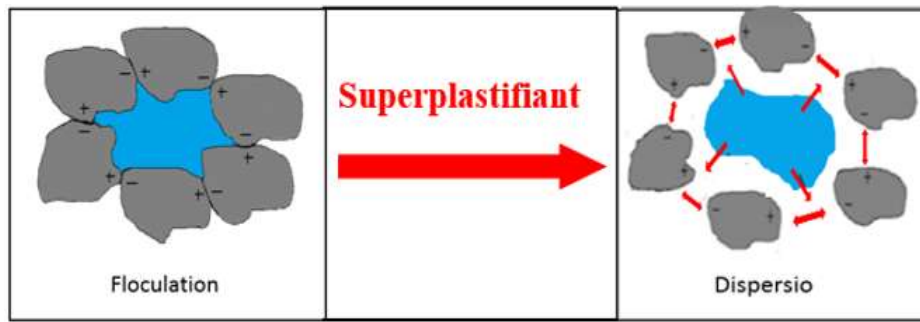


Figure .II.3 : Mode d'action des super-plastifiants - Déglocculation des grains de ciment.

7.4. Utilisation éventuelle d'un rétenteur d'eau (dit agent de viscosité)

L'ajout d'un superpalstafiant ayant pour effet d'augmenter l'ouvrabilité du béton mais également de réduire sa viscosité, afin de minimiser ce dernier point, les BAP contiennent souvent des agents de viscosité. Ce sont généralement des dérivés cellulosiques, des polysaccharides ou des suspensions colloïdales, qui interagissent avec l'eau et augmentent-la viscosité de celle-ci. Ces produits, comme les fines, ont pour rôle d'empêcher le ressuage et de limiter les risques de ségrégation des granulats en rendant la pâte plus épaisse. L'utilisation de ces produits semble se justifier dans le cas des bétons ayant des rapports eau/liant élevés car les fines ne sont pas toujours suffisantes pour fixer l'eau dans le béton.

7.5. Un faible volume de gravillon

Il est possible d'utiliser des granulats concassés ou roulés de diamètre maximal compris entre 10 et 20 mm pour la formulation des BAP. Toutefois, comme les gravillons sont à l'origine du blocage du béton en zone confinée, il faut en limiter le volume. D'un autre côté, la présence de gravillons permet d'augmenter la compacité du squelette granulaire du béton, ils permettent de réduire la quantité de liant nécessaire pour obtenir l'ouvrabilité et la résistance souhaitées. En général, ces considérations conduisent à adopter un rapport gravillon/sable de l'ordre de 1 dans les BAP.

II.8. Constituants d'un BAP

II.8. 1. Les liants et les granulats

Le liant est constitué de ciment auquel on ajoute des particules fines minérales qui correspondent à des additions normalisées ou non [19].

a. Le ciment

Le ciment généralement utilisé pour la confection d'un béton autoplaçant est soit le ciment Portland CPA-CEM I, 52,5MPa ou 42.5MPa qui contient au moins 95 % de clinker et éventuellement un constituant secondaire, soit le ciment Portland composé CPA-CEM II/A et B 42,5MPa dont l'apport en clinker est de 65 à 94 %, le reste étant composé d'un ou de plusieurs ajouts [20].

b. Les ajouts minéraux

Ce sont principalement : des fillers calcaires (calcaire, dolomite,...), des fillers siliceux ; des laitiers de haut fourneau, des cendres volantes, des fumées de silice, des déchets de brique. Les fillers calcaires sont des produits secs finement divisés obtenus par broyage industriel des roches calcaires, dont les caractéristiques sont définies par la norme NF P18 – 305. Ils augmentent la stabilité et l'ouvrabilité des BAP. Les cendres volantes ou les laitiers permet d'obtenir un maintien d'ouvrabilité le plus long. La fumée de silice conduit à une augmentation de la compacité d'un BAP donc des résistances mécaniques plus élevées. Les déchets de brique qu'on utilisera comme un ajout constituera une poudre à réactivité pouzzolanique et son incorporation au béton pourrait donner des caractéristiques mécaniques très intéressantes.

c. Les Granulats

Les granulats sont définis comme l'ensemble de grains inertes compris entre 0 mm et 40 mm (sable, graviers et cailloux) dont l'origine peut être naturelle ou artificielle [16].

Nous distinguons les granulats roulés extraits de ballastières naturelles ou de rivières, et les granulats concassés, obtenus à partir des roches concassées exploitées en carrières.

Les granulats sont classés selon les dimensions des grains qui les constituent et la courbe granulométrique représente la distribution, en pourcentage, des poids des matériaux passants dans des tamis de dimensions normalisées.

Pour faciliter l'écoulement du mélange, la confection d'un bon béton autoplaçant utilise généralement des granulats roulés de rivières et un apport de fines (par exemple des fillers calcaires) plus importants. Du fait que les frottements entre les granulats limitent l'étalement et l'aptitude au remplissage des bétons, la quantité de granulats est donc limitée, en général le rapport granulats / sable exprimé en masse est de 1 dans un BAP. Le risque de blocage dans un milieu fortement ferraillé augmente lorsque le D max augmente [16]. Ainsi, le D max des granulats doit être compris entre 10 et 20 mm.

II.8.2. L'eau

L'eau de gâchage doit être propre et ne doit pas contenir de matière en suspension au-delà des tolérances réglementaires suivantes [20] :

- 2 g/l pour les bétons à haute résistance ;
- 5 g/l pour les bétons à faibles résistances.

L'eau de gâchage ne doit pas contenir des sels dissous au-delà de :

- 15 g/l pour les bétons à haute résistance ;
- 30 g/l pour les bétons à faibles résistances.

La pâte doit assurer une mobilité suffisante mais doit aussi inhiber tout risque de ségrégation et de ressuage. Un BAP sera dès lors composé d'une quantité de fines élevée et d'une quantité d'eau relativement faible (eau/ciment rarement supérieur à 0,55 voire 0,50). La fluidité souhaitée sera obtenue par l'utilisation de superplastifiants [16].

II.8.3. Les adjuvants

Les deux adjuvants nécessaires pour la formulation des BAP sont les superplastifiants et l'agent de viscosité.

a. Les superplastifiants

Les superplastifiants sont des produits organiques qui, ajoutés à de faibles proportions (de 0,2 à 2 % environ) au béton frais permettent d'en modifier les propriétés rhéologiques durant une période plus ou moins longue. Le béton est un matériau composite poreux constitué de ciment, de granulats et d'eau et ses propriétés mécaniques finales dépendent très étroitement de la quantité d'eau introduite lors du gâchage. L'utilisation de superplastifiants nous permet d'obtenir un béton très liquide pouvant être mis en place sans vibration ni ressuage ou ségrégation [21].

Les superplastifiants permettent de répondre à deux types d'applications, selon que l'utilisateur travaille dans le domaine de la préfabrication ou du béton prêt à l'emploi. Dans le premier cas, il aura besoin d'un béton qui acquiert des propriétés mécaniques importantes de façon très rapide afin de procéder au démoulage dans les délais les plus brefs et en même temps d'un béton assez fluide pour avoir une mise en place convenable dans les moules. Dans le deuxième type d'utilisation, le béton devra pouvoir être transporté sur des parcours plus ou moins longs et présenter de bonnes propriétés de mise en œuvre sur le site de construction sans que les performances mécaniques ne soient affectées [22].

Il apparaît donc que les bétons modernes doivent satisfaire à la fois aux exigences de résistance et de maniabilité. Il s'agit de deux caractéristiques apparemment inconciliables puisque sans l'ajout de superplastifiant, l'augmentation des résistances ne s'obtient qu'avec une réduction d'eau. Or, une réduction d'eau diminue la fluidité. Un gain de maniabilité ne peut être obtenu que "en augmentant la quantité d'eau de gâchage et donc au détriment des résistances finales du matériau. L'utilisation de superplastifiant dont l'action est schématisée sur (Figure .II.4) permet de concilier la diminution de la teneur en eau et la fluidité du béton tout en conservant de bonnes performances mécaniques du matériau [23].

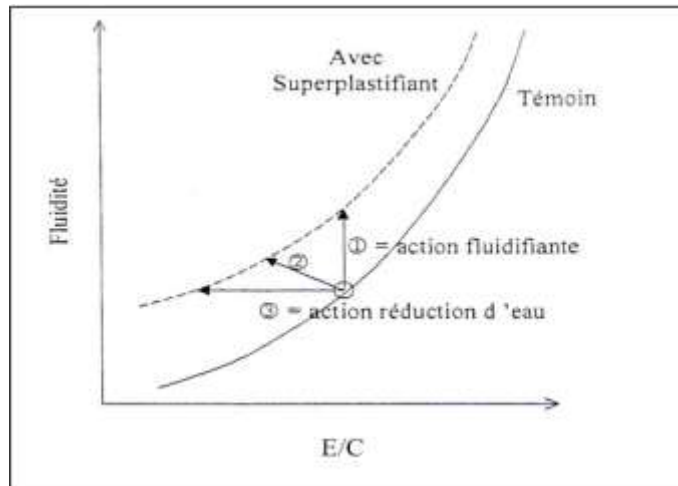


Figure .II.4 : Les utilisations des superplastifiants

- 1 – augmentation de la fluidité (teneur en eau égale)
- 2 – diminution de la teneur en eau et augmentation de la fluidité
- 3 – diminution de la teneur en eau (à fluidité égale).

b. L'agent colloïdal ou de viscosité

L'ajout d'un superplastifiant dans un béton augmente son ouvrabilité mais réduit sa viscosité. De ce fait, le matériau devient moins stable du point de vue de la ségrégation et du ressuage. L'utilisation d'agents de viscosité a pour but de stabiliser le béton en fixant l'eau dans le mélange, ce qui diminue le phénomène de ressuage et donne une plus grande cohésion au béton. Ces produits sont à la base de longues molécules polymères (polysaccharides) ou de dérivées cellulosiques. Ils se présentent généralement sous forme de poudre. L'intérêt de leur utilisation est parfois discuté du point de vue de leurs conséquences sur la rhéologie. Toutefois, il est démontré [24] qu'ils permettent, dans le contexte de la production industrielle, de diminuer la sensibilité des bétons autoplaçants aux variations de teneur en eau.

En général, pour une ouvrabilité donnée, la quantité de superplastifiant croît avec celle de l'agent de viscosité. Un dosage trop important en agent de viscosité empêche la pâte de se déformer et entraîne une perte de fluidité, il peut conduire aussi à un entraînement d'air excessif. Les agents de viscosité permettent un maintien de la fluidité et de la capacité de remplissage au cours du temps estimé à environ une heure [25].

II.9. Caractérisation d'un béton autoplaçant à l'état frais

L'ouvrabilité des bétons autoplaçants se décompose en trois caractéristiques ;

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

L'essai d'étalement modifié fut développé par J-Ring au Japon publié par le Groupe Holcim Bétons dans ces recommandations [26] et peut remplacer la boîte en L pour la mobilité en milieu confiné.

II.9.1. Mobilité en milieu non confiné

Essai d'étalement

L'essai d'étalement s'est imposé comme l'essai le plus facile à réaliser, il permet de mesurer la consistance d'un béton. Cet essai s'effectue comme un essai d'affaissement au cône d'Abrams (Figure .II.5). Cependant l'affaissement étant toujours supérieur à 25 cm, on mesure le diamètre moyen (moyenne sur deux diamètres orthogonaux) de la galette de béton obtenue au bout d'une minute, ainsi que le temps nécessaire à l'obtention du diamètre d'une galette de 50 cm de diamètre. Cette dernière valeur donne une indication sur la viscosité du matériau. Une observation permet également de constater si une ségrégation horizontale a lieu ou non. Cet essai réalisable sur chantier ne nécessite qu'un petit échantillon de béton. Une valeur de 60 à 75 cm est en général visée pour obtenir un BAP.

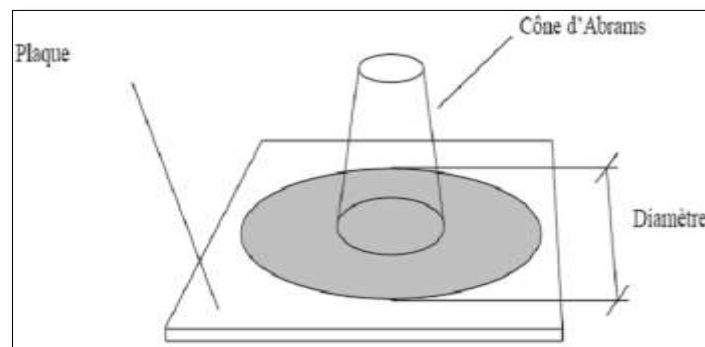


Figure .II.5 : Schéma de principe de l'essai d'étalement



Figure .II.6 : Essai d'étalement au cône d'Abrams (slump flow)

Des observations complémentaires peuvent aider à appréhender certaines propriétés à l'état frais des bétons autoplaçants :

- Un ressuage peut être détecté si de l'eau est présente en grande quantité sur les bords de la galette,
- En traçant à la truelle des lignes dans la galette, on peut vérifier si le béton se referme bien, ce qui est synonyme de bon comportement,
- La fluidité du béton peut être évaluée en mesurant les temps de passage du béton aux diamètres 50 et 60 cm durant un écoulement au cône,
- Une forme bombée de la galette traduit un effet de voute, ce qui peut nuire à l'homogénéité du béton. Toutes ces indications sont plus ou moins subjectives mais aident le formulateur expérimenté à effectuer certaines corrections en vue d'obtenir un béton qui correspond plus à ses attentes.

II.9.2. Mobilité en milieu confiné

Essai des anneaux japonais

Il est aussi appelé : essai d'étalement modifié [23]. On utilise à nouveau le cône d'Abram mais renversé, il permet de caractériser la mobilité du béton en milieu confiné et de vérifier que la mise en place du béton ne sera pas contrariée par des phénomènes de blocages inacceptables. Le cône est placé sur une plaque plane, entourée par un anneau de 300 mm de diamètre, équipé de 16 barres HA de diamètre 16 mm (Figure .II.7). Une fois le cône rempli, on soulève, ce qui laisse écouler le béton à travers les barres HA, on mesure en fin d'essai le diamètre de la galette obtenue. Un second paramètre peut être tiré du même essai : le temps mis par le béton pour dépasser le diamètre de 500 mm T50 en secondes [27].



Figure .II.7 : Anneau japonais – Laboratoire GC de Polytech'Orléans.

Essai de la boîte en L (L-box test) :

Tout comme l'essai à l'anneau Japonais, cet essai permet de caractériser la mobilité en milieu confiné, c'est-à-dire la ségrégation dynamique. Essai de la boîte en L (L-box test) est recommandé par l'AFGC [10]. Il permet de tester la mobilité du béton en milieu confiné et de vérifier que sa mise en place ne sera pas contrariée par des phénomènes de blocage (Figure .II.8).

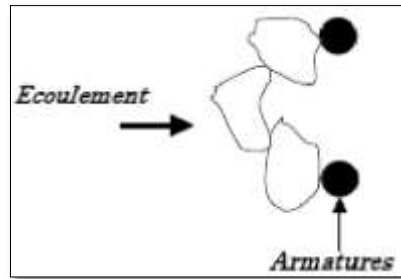


Figure .II.8 : Risque de blocage au droit des armatures [10].

Le dispositif d'essai est constitué d'une boîte en forme de L (Figure .II.9). La partie verticale est séparée de la partie horizontale par une trappe. Des armatures peuvent être intercalées avant la trappe. L'AFGC [10] , recommande l'utilisation de trois barres de 14 mm de diamètre, espacées de 39 mm. Le mode opératoire de l'essai à la L-Box est le suivant : la partie verticale du dispositif est remplie de béton (volume nécessaire de l'ordre de 13 L). Après arasement, le matériau est laissé au repos pendant 1 min. La trappe est ensuite soulevée afin de laisser s'écouler le béton à travers le ferrailage. A la fin de l'essai, les hauteurs de béton, de la partie verticale et de l'extrémité de la partie horizontale, sont mesurées (respectivement H1 et H2). Le rapport H2/H1 permet de caractériser la dénivellation et doit être supérieur à 0,8. Un mauvais écoulement du béton à travers le ferrailage et un amoncellement de granulats au niveau de la grille sont signes d'un problème de blocage ou de ségrégation.

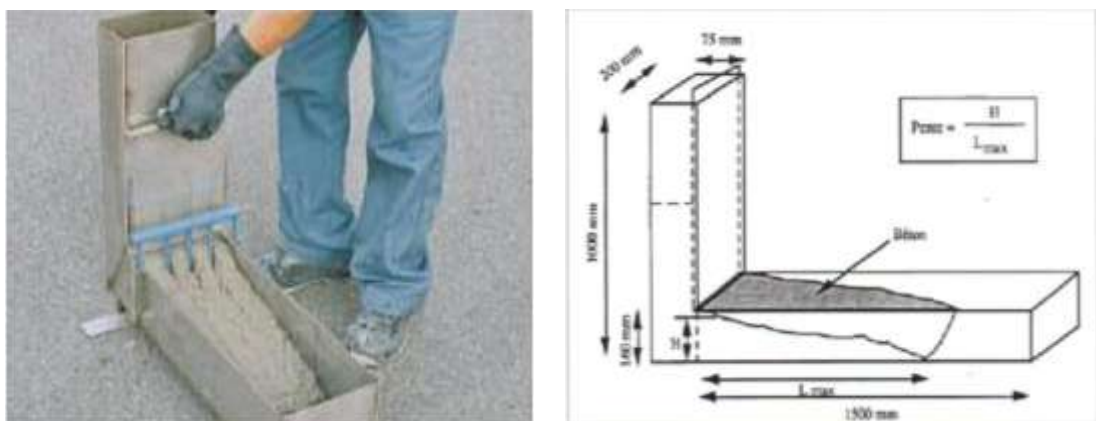


Figure .II.9 : Essai de la boîte en L (L-box test)

II.9.3. Stabilité

Essai de stabilité au tamis

Appelé aussi essai de caractérisation de la ségrégation des bétons autoplaçants, il vise à qualifier les bétons autoplaçants vis-à-vis du risque de ségrégation (Figure .II.10). Il peut être utilisé en phase d'étude de formulation d'un béton autoplaçant en laboratoire, ou pour le contrôle de réception de la stabilité du béton livré sur chantier [29].

Cet essai complète les essais permettant d'apprécier la mobilité, en milieu confiné ou non, en caractérisant la stabilité. Il consiste à évaluer le pourcentage en masse de laitance (Plaitance) d'un échantillon de béton ($4,8 \pm 0,2$ kg) passant à travers un tamis de 5 mm. Les critères d'acceptabilité d'une formulation d'un béton autoplaçant sont divisés en trois classes :

- $0\% \leq P_{\text{laitance}} < 15\%$: stabilité satisfaisante,
- $15\% \leq P_{\text{laitance}} < 30\%$: stabilité critique : essai de ségrégation à réaliser in situ,
- $P_{\text{laitance}} \geq 30\%$: stabilité très mauvaise : ségrégation systématique, béton inutilisable.



Figure .II.10 : Représentation de l'essai de stabilité au tamis



Figure .II.11 : Essai de stabilité au tamis

Essai de ressuage

Le ressuage est un type spécial de ségrégation où les particules solides ont un mouvement général inverse à celui du liquide. En fait, pendant la période dormante du béton, les particules solides qui sont plus denses que l'eau sédimentent. L'eau est ainsi chassée vers le haut dans le cas de coffrages imperméables.

Au niveau visuel, le ressuage s'observe par une mince pellicule d'eau à la surface du béton. Selon les conditions météorologiques, on assiste à une compétition entre le débit d'eau ressuée et le débit d'eau évaporée [30]. Si ce dernier est plus faible, le phénomène de ressuage est visible, sinon, la surface du béton au lieu d'être brillante, devient mate. La quantité d'eau ressuée sera de toute façon égale à la quantité d'eau stagnante ajoutée à celle déjà évaporée.

La capacité de ressuage peut être mesurée par l'essai à l'aéromètre modifié développé au LCPC (Figure.II.12). Le volume d'eau libéré par l'échantillon de béton remonte au-dessus du perchloréthylène (dont la densité est supérieure à celle de l'eau 1,59) dans une colonne graduée où il est facile de l'estimer [16]. Ce test semble cependant peu pratique à utiliser étant donné la nocivité du produit.

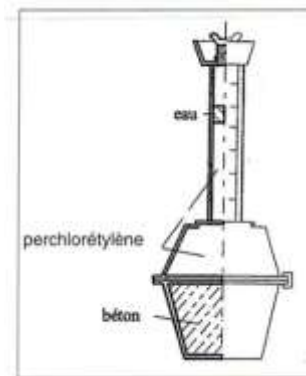


Figure .II.12: Essai de ressuage

II.9.4. Essai complémentaires sur béton frais

Mesure de la teneur en air occlus

Pour la mesure de l'air occlus dans le béton frais (Figure .II.13), on utilise la méthode dite « par pression ». Comme le seul élément compressible dans le béton frais est l'air occlus, la compression de l'air fait chuter la pression appliquée au béton frais. Cette diminution est proportionnelle à la quantité d'air présente dans le béton. Cet essai est effectué à l'aide d'un aéromètre selon la norme française [31]. Le pourcentage de l'air occlus dans les bétons autoplaçants n'est pas limité à une valeur fixe, mais, plus il augmente plus il influe négativement sur les performances mécanique de notre béton.

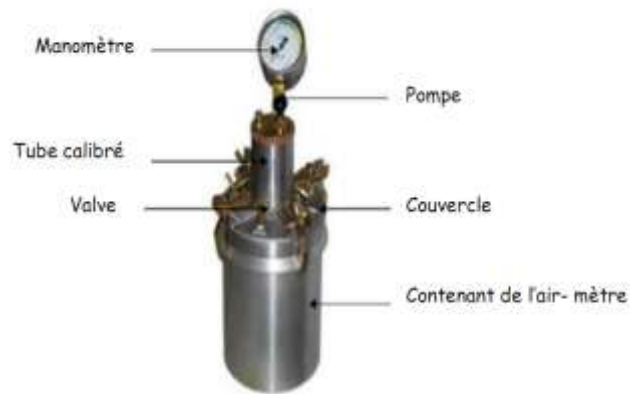


Figure .II.13: Mesure de l'air occlus à l'aide d'un aéromètre

Le parement

Le BAP offre certains avantages en matière de qualité du parement grâce à :

- Premièrement, du fait de l'absence de vibration, les désordres qui peuvent être induits par cette opération n'apparaissent plus dans un BAP ;
- Deuxièmement, le BAP est formulé pour minimiser les risques de ségrégation, cela limite très fortement ou évite les risques d'apparition des nids de graviers ;
- Enfin, le BAP présente une pâte riche en fines qui doit donner à priori une texture extérieure parfaitement régulière [32].

Pour évaluer ce parement, on confectionne une éprouvette cylindrique de (16 x 32) cm ou de qu'on démoule après 24 heures. On doit obtenir pour un béton autoplaçant, un parement de qualité, traduit par une homogénéité d'aspect, une teinte comparable à celle des bétons classiques et aucune porosité grossière apparente (Figure .II.14).



Figure .II.14: Parement d'un béton autoplaçant.

Les masses volumiques

La masse volumique réelle du béton frais doit être systématiquement mesurée. Cela permet de vérifier le rendement de la composition en comparant la masse volumique déterminée expérimentalement avec la masse volumique théorique. Elle est mesurée par la pesée d'un récipient de 8 litres (fond de l'aéromètre) remplis de béton autoplaçant sans vibrer (Figure .II.15).

Si m est la masse du récipient plein de béton (arasé à l'aide d'une règle) et m_0 celle du récipient vide, la densité est déduite par l'application de la formule suivante : $M_{VR} = (m - m_0) / V$ [kg/m³], où M_{VR} est la masse volumique réelle du béton frais et V le volume du récipient utilisé (8 litres).

La masse volumique réelle M_{VR} est normalement égale à la masse volumique théorique M_V calculée à partir de la formulation théorique du béton avec comme source d'incertitude la quantité d'air occlus.

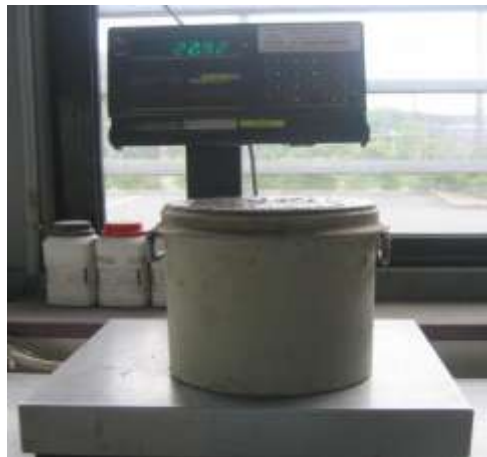


Figure .II.15: Mesure de la masse volumique réelle

II.10. Caractérisation d'un béton autoplaçant à l'état durci

Le béton doit être soumis à différents essais mécaniques de caractérisation :

- Les essais de compression ;
- Les essais de traction par flexion ;
- Les essais de compression sur demi - prismes « cube équivalent ».

II.10.1. Les essais de compression

Les essais de mesure de la résistance à la compression sont réalisés sur des éprouvettes cylindriques (16x32) cm conformément aux prescriptions de la norme [33]. Ce test fournit la force de compression [N] qui génère la rupture de l'échantillon (Figure .II.16). La contrainte de compression à la rupture [MPa] est déduite de cette force en divisant par la surface de la section sollicitée.



Figure .II.16: Mesure de la résistance à la compression des (16x32) cm

II.10.2. Les essais de traction par flexion

Cet essai très utilisé permet de simuler le type de sollicitation le plus courant dans les éléments des ouvrages (Figure.II.17). Les éprouvettes utilisées pour ce type d'essai sont propre uniquement aux mortiers, elles sont prismatiques de dimensions (4x4x16) cm.

La résistance à la traction par flexion est obtenue par l'application de la formule de résistance des matériaux suivante : $\sigma = M_f.a/2I$, (Eq II.1)

Avec le moment de flexion : $M_f = F.L/4$, (Eq II.2)

Où F est la charge de rupture, L la portée, I l'inertie de flexion, et a le côté du prisme.



Figure.II.17 : Mesure de la résistance à la traction par flexion des (4x4x16) cm

II.10.3. Les essais de compression sur demi - prismes « cube équivalent »

Les demi-prismes issus de la rupture des prismes par flexion sont ensuite testés en compression par écrasement (Figure.II.18). Ces essais sont principalement conduits à titre comparatif. En effet, les valeurs de résistances à la compression déduites de cet essai sont surestimées, du fait que l'élanement est faible et que les parois latérales sont cisailées.

La contrainte de rupture est obtenue en divisant la charge de rupture par la surface de contact presse échantillon, soit (4x4) cm.



Figure.II.18 : Mesure de la résistance à la compression sur demi-prismes

II.12. Conclusion

Cette synthèse bibliographique a été menée afin de se familiariser avec les bétons autoplaçants, l'objectif étant de les définir, ainsi que leurs multiples propriétés, les caractériser. Le béton autoplaçant est un béton qui se compacte de lui-même par effet gravitaire, sans aucun apport d'énergie de compactage (par ex. vibration, damage).

Les propriétés caractéristiques de ce béton à l'état frais sont :

- fluidité et viscosité élevées, sans aucune tendance à la ségrégation
- capacité de passage dans les milieux confinés
- excellente aptitude au remplissage des moindres recoins du coffrage par un béton homogène, même en présence de ferrailage dense. Le fastidieux travail de vibration est ainsi supprimé.

Un béton est qualifié d'autoplaçant lorsque ces trois critères sont vérifiés. Ainsi, un grand nombre de tests empiriques sont développés pour caractériser le béton vis-à-vis des propriétés d'ouvrabilité.

A l'état durci, le béton doit garantir une durée de vie prolongée de la structure et des performances mécaniques donc une résistance élevée et une perméabilité minimale sont exigées pour celui-ci.

Toutes les méthodes trouvées dans la littérature 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.

Chapitre III :
Comportement des bétons à haute
température

III.1. Introduction

Chaque année des millions de personnes décèdent à cause du feu ; ainsi que des dégâts matériels considérables sont enregistrés. Les objectifs de la sécurité incendie sont la protection efficace contre les risques d'incendie des personnes et des biens, et plus précisément ils concernent :

- La sauvegarde des vies des occupants de l'immeuble.
- La protection des vies des services d'intervention.
- La protection de l'intégrité du bâtiment.
- La sauvegarde des bâtiments adjacents.

Les exigences de base de la protection incendie consistent à :

- Réduire le développement de l'incendie.
- Eviter la propagation du feu.
- Assurer l'évacuation rapide des occupants avec une relative sécurité.
- Faciliter l'intervention du corps des sapeurs-pompiers [34].

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

III.2. Les risques de feu

Le feu est un phénomène qui occasionne chaque année des pertes importantes en vies humaines et en biens matériels. Les causes des incendies sont très diverses, de l'imprudence au court-circuit. Aussi, le mode de construction des bâtiments, leur conception vis-à-vis de la propagation du feu et le choix des matériaux sont très importants dans la limitation des conséquences, notamment dans les immeubles collectifs, les établissements recevant du public ou les établissements classés [35].



Figure .III.1 : Figures des cons séquences des incendies (de gauche à droite) : Tunnel sous la Manche, Tour Windsor, et Tunnel du Mont Blanc

Il est bien connu que la sécurité et la serviabilité des structures en béton ne peuvent pas être réalisées sans la connaissance complète des propriétés fondamentales du matériau et les conditions de service auxquelles la structure sera soumise.

L'incendie est l'une des conditions sévères à laquelle le béton peut être soumis. Historiquement, la résistance au feu du béton a souvent été prise pour acquise, compte tenu de sa nature inflammable, de sa bonne isolation thermique et de sa capacité de s'opposer à la propagation du feu [36].

Dans un feu de bac de fioul à l'air libre, les températures maximales ne dépassent pas les 800 °C, alors que dans les tunnels, ces températures peuvent atteindre jusqu'à 1300 °C. Ces températures extrêmes sont dues au fait que le feu est bien alimenté en oxygène et aussi à l'effet de four qui peut préchauffer l'air arrivant dans la zone de combustion.

La connaissance de la puissance d'un incendie ne suffit pas à déterminer les températures maximales atteintes. Il n'est donc pas nécessaire de chercher à relier la température maximale à la puissance de l'incendie, mais plutôt, utiliser de préférence une courbe représentant les températures en fonction du temps (températures-temps) « feu standard ». Toutefois, l'applicabilité générale de cette approche peut être discutée vue que dans des incendies réels, les régimes initiaux de chauffage et les phases de refroidissement peuvent être très différents.

Ces deux conditions sont reconnues comme imposant des contraintes supplémentaires aux structures en place. Il y a donc encore des lacunes évidentes dans la connaissance du comportement réel des structures en béton en situation d'incendie.

Tous ces éléments démontrent que les hautes températures causent d'importants dommages sur les bétons qui conduisent à une modification de ses propriétés. Les mécanismes de dégradation du béton à haute température ne sont pas encore bien compris.

III.2.1. Feu réel

Les courbes température-temps naturelles devront être déterminées pour un compartiment spécifique. Si le projet a été mené avec une approche performancielle, la capacité portante ou la capacité de compartimentage en alternative à la méthode qui fait référence aux classes est vérifiée vis-à-vis de l'action thermique en utilisant la courbe température-temps naturelle, cette courbe température-temps naturelle peut être déterminée comme suit :

- Modèles d'incendies expérimentaux.
- Modèles d'incendies numériques simplifiés.
- Modèles d'incendies numériques avancés [36].

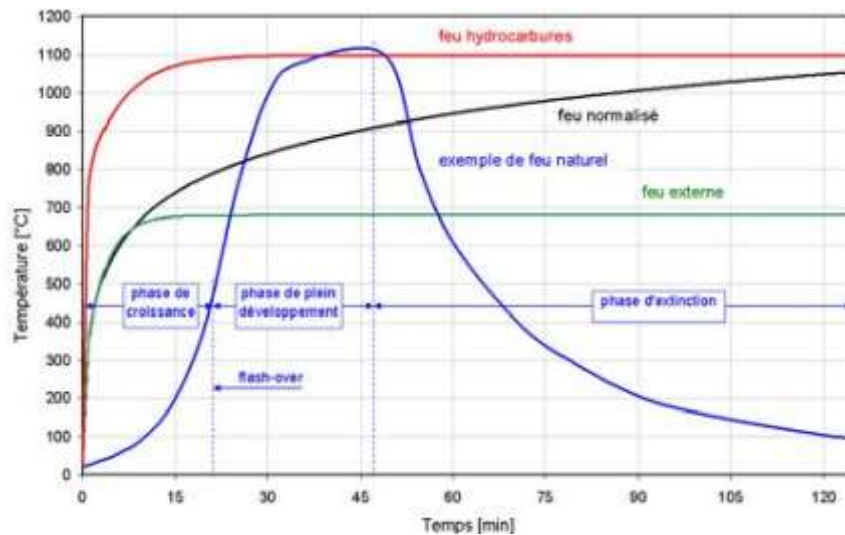


Figure .III.2 : Exemple de feu naturel [36].

III.2.2. Le triangle du feu

Pour qu'un feu (une combustion) prenne naissance, trois conditions doivent être réunies Simultanément :

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

Ces trois composantes sont souvent représentées graphiquement sous forme d'un triangle Appelé triangle du feu (Figure .III.3) [37].

L'incendie prend naissance en un point sous forme d'un foyer localisé qui résulte de la concomitance de trois éléments [37] : un combustible, un comburant et un apport calorifique. Dans le jargon de l'incendie, ces trois éléments sont universellement connus sous le nom de triangle du feu. Le triangle du feu est un moyen simple et didactique pour expliquer une combustion. Cette explication n'existe que depuis environ 200 ans, depuis que Lavoisier mit en évidence l'existence de l'oxygène pour expliquer le phénomène de combustion. Avant cette époque, la notion même de triangle du feu était impensable car la combustion s'expliquait par la présence de "phlogistique" dans les matières qui pouvaient brûler. La théorie du phlogistique, déjà chère aux alchimistes, s'est maintenue encore très longtemps après Lavoisier car elle était très solidement ancrée auprès des plus grands savants de l'époque.



Figure .III.3 : Triangle du feu [37].

III.3. Comportement de béton ordinaire à haute température

III.3.1. Introduction

L'exposition du béton à une température élevée provoque une dégradation chimique progressive du béton qui modifie sa microstructure. Pour comprendre le comportement de ce matériau à haute température, il est nécessaire de connaître les principales modifications physico-chimiques que subissent ses composants (la matrice cimentaire et les granulats). L'interface pâte-granulats est plus ou moins affectée selon la nature du ciment et des granulats. Ce chapitre décrit les principaux éléments du comportement thermique et mécanique du béton à haute température. La première partie comporte une synthèse bibliographique sur les évolutions des caractéristiques thermiques, hydriques et mécaniques de bétons avec la température. On présente également dans cette étude bibliographique le comportement mécanique du béton sous diverses sollicitations thermiques et mécaniques. La dernière partie sera consacrée à l'analyse des différentes approches d'endommagement à haute température disponibles dans la littérature.

Avant de traiter chaque partie de ce chapitre, nous rappellerons brièvement la composition chimique et la structure physique du béton et de ses composants.

III.3.2. Instabilité thermique du béton

III.3.2.1. Différentes formes d'endommagement thermique

En cas d'incendie de bâtiments, de tunnels, le béton peut présenter une instabilité thermique au-delà d'une certaine température. L'instabilité thermique du béton peut se présenter sous diverses formes [38].

– **Eclatement explosif** : ce type d'éclatement se produit pendant les trente premières minutes du feu ou d'un essai standard. Il peut se produire à une température supérieure à 100°C. L'éclatement explosif est caractérisé par un détachement brutal de petits ou gros morceaux de béton, accompagné d'un bruit fort.

- **Eclatement de surface** : couramment appelé écaillage, l'éclatement de surface est caractérisé par le détachement de petits morceaux (jusqu'à 20 mm environ) du parement exposé au feu. Il est moins violent que l'éclatement explosif.
- **Eclatement de granulats** : cet éclatement est provoqué par la dilatation thermique des granulats proches de la surface à cause de la montée en température. Les principales causes de ce phénomène sont la conversion de quartz à 570 °C. Les dommages engendrés par l'éclatement de granulats ne sont que superficiels.
- **Eclatement d'angle** : il s'observe dans les stades avancés du feu lorsque le béton est affaibli et que les fissures se développent en raison des contraintes de traction le long des bords et coins de l'ouvrage.
- **Eclatement par détachement des granulats** : ce type d'instabilité est issu de la modification de la microstructure de la pâte de ciment avec la montée en température et aussi des fissures internes engendrées par la dilatation thermique différentielle entre la pâte de ciment et les granulats.
- **Eclatement en phase de refroidissement** : il est non violent et sans bruit. Ce phénomène est causé par la présence de granulats calcaires et de la réhydratation de la chaux lors de la phase de refroidissement.

III.3.2.2. Résistance Béton ordinaire

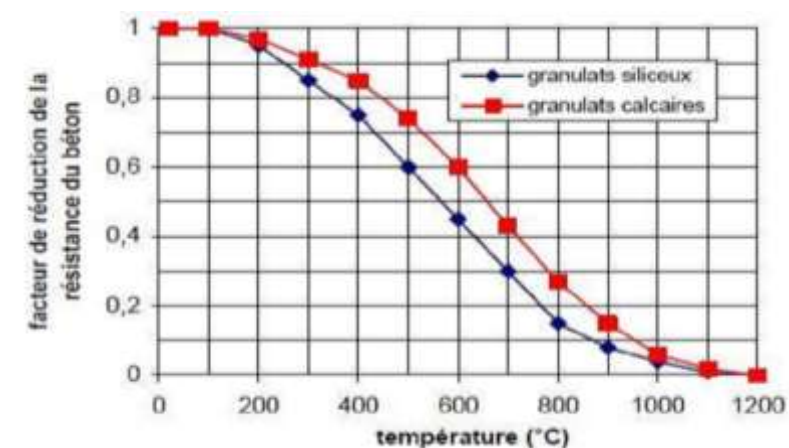


Figure .III.4 : Evolution de la résistance du béton en fonction de la température θ et du type de granulats [39]

Les bétons contenant au moins 80 % en masse de granulats calcaires sont considérés comme des bétons à granulats calcaires [39].

La figure (Figure .III.4) montre que le facteur de réduction de la résistance caractéristique du béton siliceux est moins que celui du béton à base du calcaire, que signifie que la résistance du béton siliceux est moins de celle du béton à base du calcaire.

III.3.2.3. Déformation du béton

Les propriétés de résistance et de déformation du béton sous contrainte uni axiale à températures élevées sont obtenues à partir de la relation contrainte-déformation illustrée à la (Figure .III.5).

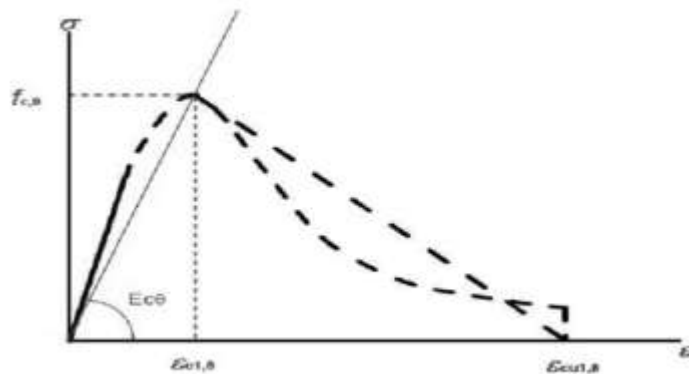


Figure .III.5 : Modèle mathématique de la relation contrainte-déformation du béton en compression aux températures élevées [39]

La relation contrainte-déformation est définie par deux paramètres :

- la résistance à la compression, f_c, θ ,
- la déformation $\epsilon_{c1, \theta}$ correspondant à f_c, θ

III.3.2.4. Dilatation thermique du béton

La déformation thermique $\epsilon_c(\theta)$ du béton en fonction de la température est illustrée à la (Figure .III.6)

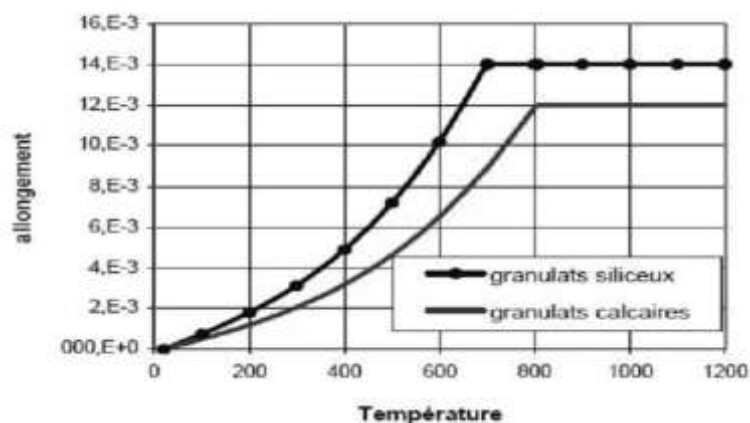


Figure .III.6 : Dilatation du béton en fonction de la température [39].

Selon [39] la dilatation du béton à granulats calcaires augmente lentement avec l'évolution de la température jusqu'à atteindre 800 C° où la dilatation devient constante malgré l'augmentation de température. De la même façon pour le béton siliceux mais avec plus d'allongement qui atteint les $14.E^{-3}$ puis devient constant.

III.3.2.5. Conductivité thermique du béton

La variation des limites supérieure et inférieure de conductivité thermique λ_c du béton, en fonction de la température, est illustrée à la figure III.7.

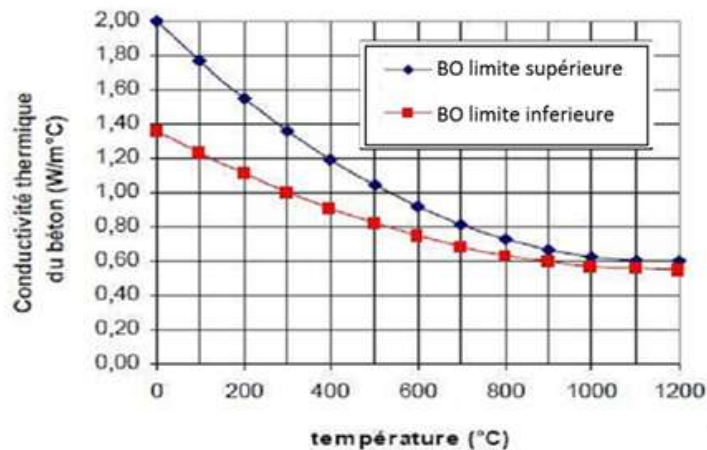


Figure .III.7 : Variation des limites supérieure et inférieure de conductivité thermique pour les bétons ordinaire (BO) en fonction de la température [39]

La limite inférieure de la conductivité thermique a été obtenue à partir de comparaisons avec des températures mesurées dans des essais au feu de différents types de structures en béton. La limite inférieure donne des températures plus réalistes pour les structures en béton que la limite supérieure qui a été obtenue à partir d'essais sur des structures composites en (acier/béton). Les courbes de conductivité thermique font apparaître à 20 °C une conductivité thermique des bétons de calcaire inférieure d'environ 20 % à celle des bétons de silice [39].

III.3.3. Impact des hautes températures sur le béton

Le béton est un matériau à nature complexe. À haute température, il est le siège 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 d'importants effets sur la résistance de béton à haute température. Les résultats issus de différentes investigations sur le comportement du béton exposé à des hautes températures conduisent à des interprétations déférentes.

III.3.3.1. Les principales modifications des constituants d'un béton à haute température

Le béton est un matériau composite formé de liant (ciment), de granulats (graviers, sable), de l'eau et éventuellement des ajouts. L'eau dans le béton existe sous diverses formes. Elle joue un double rôle d'hydratation et d'ouvrabilité du mélange. Elle se présente sous forme d'eau libre (ou capillaire) d'eau adsorbée, d'eau chimiquement liée. Du fait de son hétérogénéité, il est nécessaire de comprendre le rôle de chacun des composants du béton dans la phase de montée et /ou de baisse en température. Lorsque le béton est exposé à une température élevée, il subit diverses transformations physico-chimiques.

III.3.3.1.1. Modification de la pâte de ciment

Analyse thermique

Une analyse thermogravimétrique ou thermo-différentielle met en avant les transformations physico-chimiques qui se produisent suite à l'élévation de la température. Ces modifications sont représentées par des pics sur les thermographes. Ces essais aident à analyser les différentes étapes et les modifications qui se produisent au sein du béton.

Nous observons trois stades importants [45] :

- 1^{er} perte de masse : Avant 100°C - Cette perte correspond au départ de l'eau libre.
- 2^{eme} perte de masse : 450°C - Décomposition de l'hydroxyde de calcium (Ca) en chaux libre et eau suivant la réaction : $\text{Ca}(\text{OH})_2 \rightarrow \text{CaO} + \text{H}_2\text{O}$
- 3^{eme} perte de masse : 700°C - Décomposition de CaCO_3 qui résulte de la présence de calcaire dans la pâte testée : $\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$,

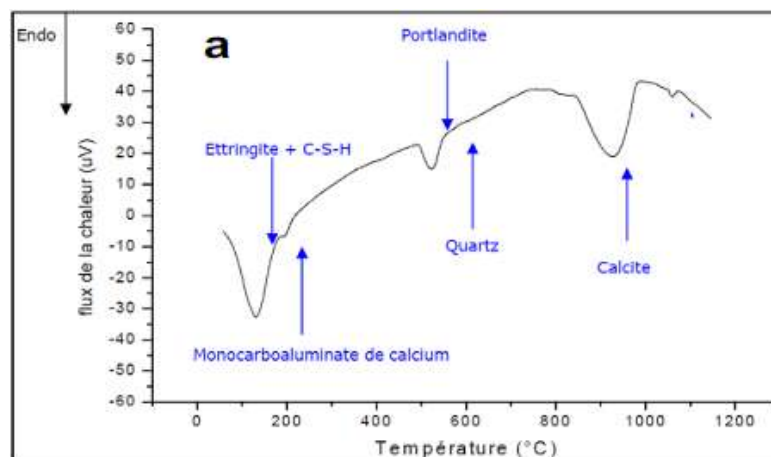


Figure.III.8 : Analyse Thermique Différentielle (ATD) du gel CSH, [41].

Mais parallèlement à ces principales modifications, les autres constituants de la pâte de ciment subissent des transformations au cours du traitement thermique. [42] et al proposent une évolution de la composition de la pâte au cours d'un échauffement grâce à la technique de la diffraction de neutrons (Voir Figure .III.9).

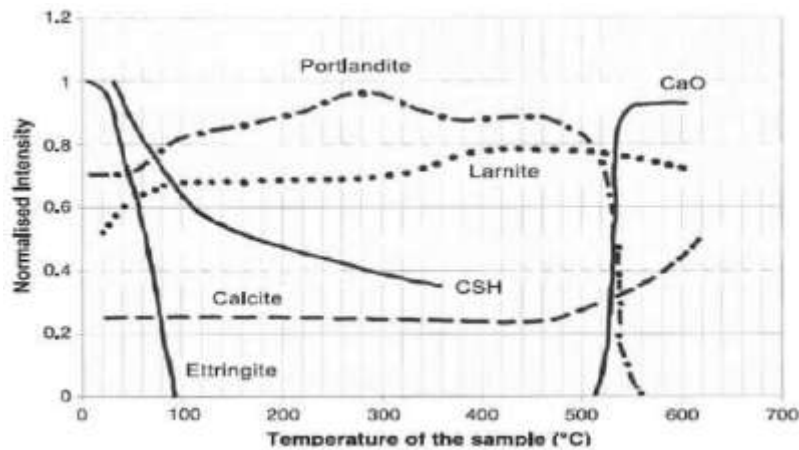


Figure.III.9 : Evolution de la quantité des phases de la pâte de ciment Portland au cours d'un traitement thermique [42].

Dès le début du chauffage, les hydrates du ciment subissent des modifications. Les auteurs observent que la disparition de l'ettringite se produit avant 100°C, avec une déshydratation progressive des C-S-H débute bien avant 100°C et se poursuit jusqu'à 400°C. A 500°C, la portlandite se décompose en CaO et en eau. Cette transformation s'appelle les déshydroxylation.

Finalement, la déshydratation reste le principal phénomène lorsqu'un béton ou une pâte de ciment subit un traitement thermique.

III.3.3.1.2. Modification des granulats

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

Chapitre III : Comportement des bétons à haute température

La nature des granulats : selon leur nature chimique et minéralogique, le comportement des granulats diffère lorsqu'ils sont soumis à une montée en température. Le coefficient de dilatation des granulats siliceux est plus élevé que celui des granulats calcaires ce qui permet aux granulats calcaires d'avoir une stabilité thermique meilleure que les granulats siliceux.

Les essais de chauffage jusqu'à 200°C de granulats silico-calcaires réalisés par [72], montrent un clivage violent des granulats de silex pour une gamme de température de 110°C à 165°C. La (figure.III.10) illustre l'instabilité thermique des granulats de silex comparée aux granulats calcaires à la suite d'un cycle thermique à 200°C.

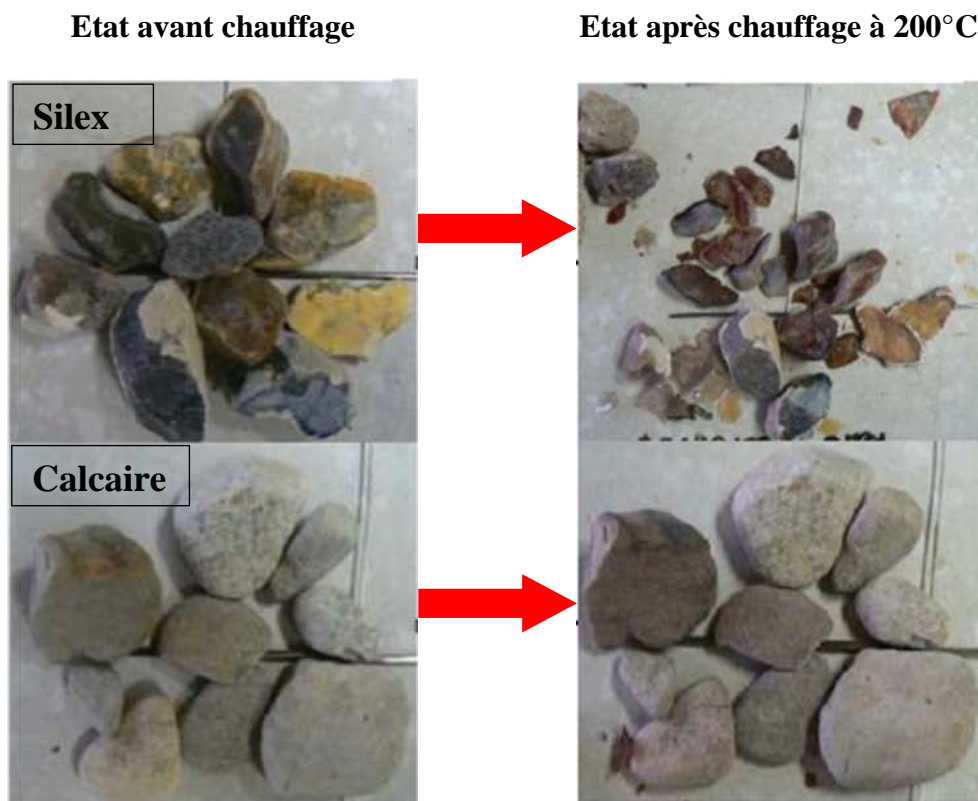


Figure.III.10 : Illustration du caractère instable des granulats de silex comparé aux granulats calcaires [72].

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 thermogravimétriques (ATG), donnent des indicateurs de la progression des réactions de décomposition en mesurant les variations de masse des granulats au cours du chauffage. Comme le montre la (Figure III.11), [43], la majorité des granulats est généralement stable jusqu'à 600°C. La structure des granulats siliceux contient dans ces minéraux environ de 20% d'eau combinée. Entre 120 et 600 °C, cette eau est capable de se libérer partiellement en réduisant la résistance de ce matériau. Ce départ de l'eau peut entraîner un clivage des granulats.

Chapitre III : Comportement des bétons à haute température

Un autre phénomène concerne le quartz à 575°C : un changement de phases avec un changement de volume de 1 à 5,7 %. Le quartz présent dans les granulats siliceux SiO_2 est un édifice de tétraèdres soudés par les sommets, en chaînes. C'est une forme stable à basse température de la silice. Au-dessus de 573°C à la pression ambiante une légère rotation de liaisons entre tétraèdres, conduit à une forme cristalline de symétrie hexagonale : le quartz β . La température de transition du quartz α - β peut augmenter avec la pression.

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

Les granulats Calcaires présentent un bon comportement thermique jusqu'à 700 °C. Cette température est le début de la décarbonatation ($\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$) qui se produit entre 600 et 900°C. Le CaO libre présent dans les bétons chauffés puis refroidis réagit avec l'humidité et se transforme en Ca(OH)_2 avec une augmentation de volume de 44%. Cette réaction peut expliquer la diminution de la résistance résiduelle (résistance mesurée après refroidissement) par rapport à la résistance à chaud des bétons à granulats calcaires chauffés au-delà de 700 °C.

Les granulats occupant 60 - 80% du volume du béton, la stabilité thermique d'un béton dépend fortement des propriétés des granulats [38]. Les propriétés du granulat du point de vue de l'utilisation à haute température sont :

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

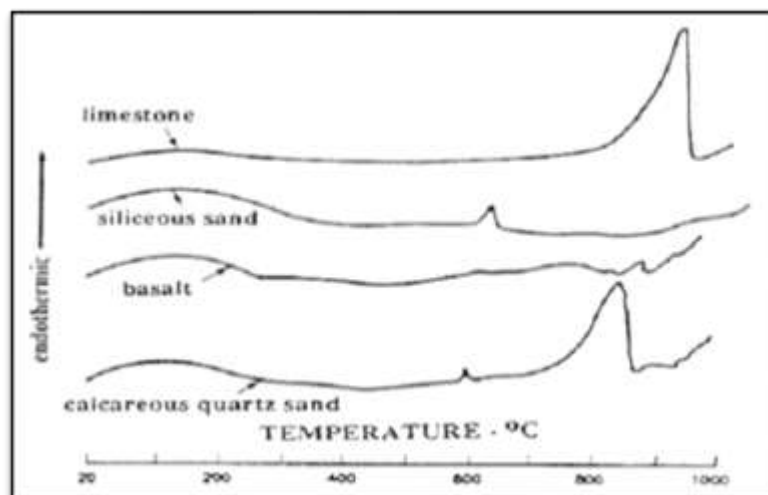


Figure.III.11 : Courbes ATD des différents granulats. De haut en bas : calcaire, sable siliceux, basalte, sable silico-calcaire. [43].

III.3.3.1.3. Dégradation de l'interface pâte-granulats

À l'élévation de la température, la matrice cimentaire et les granulats affichent deux comportements opposés. Au-delà de 105°C, la matrice cimentaire subit un retrait contrairement aux granulats qui subissent une expansion. D'après la (Figure .III.12), on peut assister à une évolution complètement contradictoire. Durant la montée en température, les granulats se dilatent de manière continue, alors que la pâte de ciment se dilate dans un premier temps, puis se contracte fortement. Cette incompatibilité de comportement à l'interface pâte de ciment/granulats induit ainsi des contraintes de traction dans la pâte de ciment et de la compression dans les granulats. Ce qui engendre des fissures [44].

Dans la Figure 36 nous avons regroupé les principaux phénomènes discutés dans l'évolution de la pâte de ciment et l'évolution des granulats liés aux changements des composants du matériau béton au cours de l'échauffement. Il est nécessaire de mentionner que les propriétés du matériau vont aussi dépendre de l'interaction entre la pâte et les granulats et du comportement de l'auréole de transition. Nous allons revenir sur ce point en examinant les déformations thermiques de la pâte et des granulats au cours de l'échauffement.

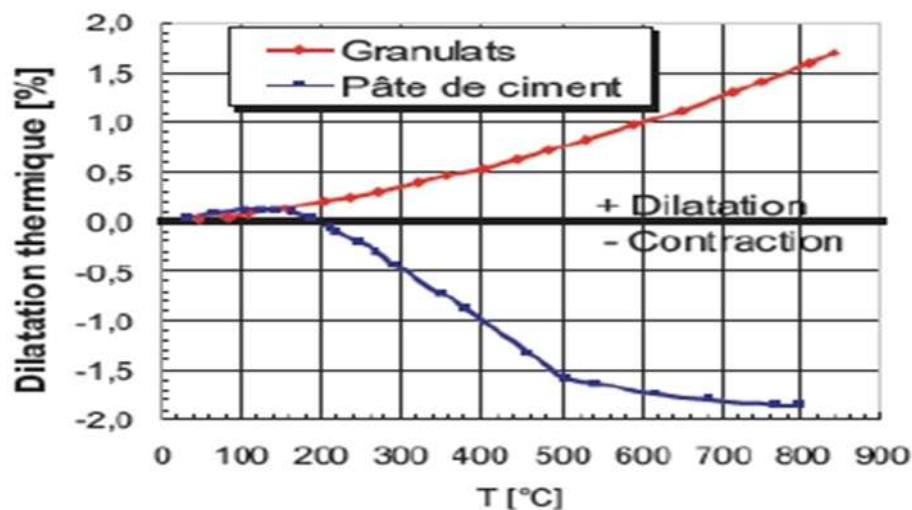


Figure.III.12 : Dilatation thermique de la pâte de ciment et des granulats [44].

Ture, les granulats se dilatent de manière continue, alors que la pâte de ciment se dilate dans un premier temps, puis se contracte fortement.

III.3.3.2. Evolution des propriétés physico du béton soumise à haute température

III.3.3.2.1. Evolution de la porosité

Concernant la porosité de la pâte de ciment à haute température, Cette augmentation est accompagnée d'une évolution de la taille moyenne des pores et du volume poreux total. Ceci est dû en partie à la rupture interne de la structure du gel de CSH lors du processus de déshydratation.

Les travaux menés par [45] montrent que la porosité augmente en fonction de la température. Cette augmentation est due en partie à l'augmentation du volume total de la dimension des pores ainsi qu'à la microfissuration engendrée par la dilatation différentielle entre la pâte et les granulats. La (Figure.III.13) montre les distributions des pores d'un béton ordinaire obtenues à différentes températures par la technique de porosimètre au mercure. Le premier pic correspond aux pores capillaires de la pâte. En effet, à 25°C nous observons une population de pores qui se situe autour de 40 nm. Sous l'effet de la température, ce pic augmente en volume et son rayon moyen augmente légèrement entre 70 et 120 °C pour ensuite rester constant jusqu'à 600°C. La Figure 2.6 montre la distribution porosimétrique obtenue par intrusion de mercure, des BHP à différentes températures (105 ; 200 ; 300 et 400°C) par [47]. A 105°C, la distribution de tailles de pores du BHP présente un seul pic relativement peu étalé (autour de 30 nm), ce qui traduit un spectre étroit de tailles de pores. Ce pic reste constant avec la température. A 400 °C, on constate la formation d'un deuxième pic (autour de 4 µm) avec une zone très étalée. [24] et al expliquent que ceci peut correspondre à la fissuration dans le BHP chauffé à 400°C.

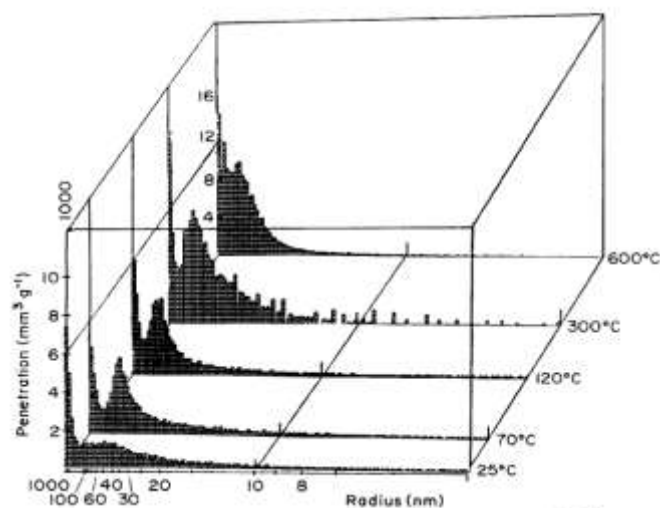


Figure .III.13 : Distributions des pores d'un béton ordinaire à différentes températures [47].

La (Figure .III.14) montre la variation de la porosité totale en fonction de la température d'un béton ordinaire et d'un BHP mesurée par la méthode de la saturation d'eau mesurée par [47].

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

[47] : expliquent que la diminution de la porosité du BO entre 200 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 pour le BHP qui contient très peu de portlandite, grâce à la présence de fumée de silice [47].

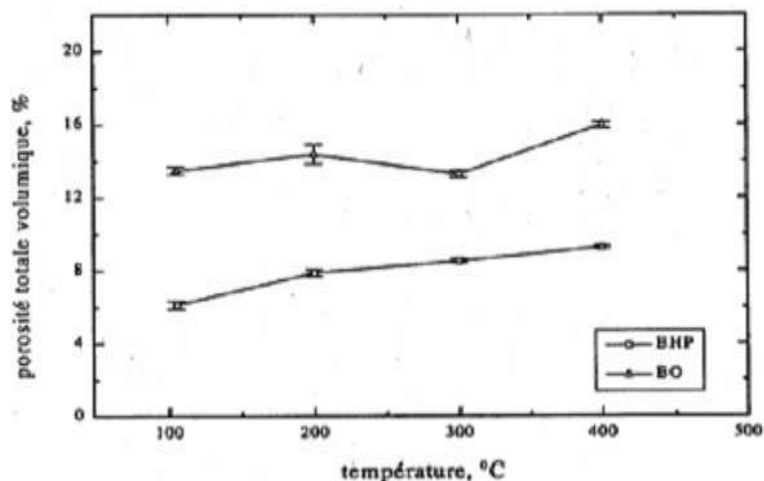


Figure.III.14 : Porosité totale à l'eau en fonction de la température de conditionnement [47].

III.3.3.2.2. Evolution de la perte de masse

Le processus de perte de masse se produit lorsque la température augmente. Le départ de l'eau est la principale cause de la perte de masse du béton avant 600°C [47]. Sur la (Figure .III.15), 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.

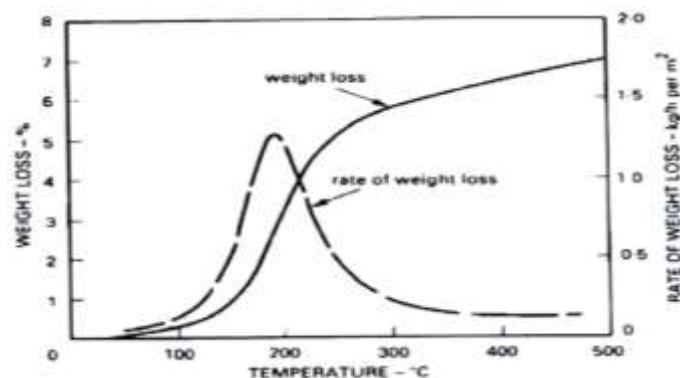


Figure .III.15 : Perte de masse et vitesse de perte de masse en fonction de la température [47]

Au cours des essais en régime transitoire, on applique une cinétique de montée en température de la température ambiante à la température cible. Il se dégage de la littérature trois domaines d'évolution de la perte de masse dans lesquels la variation de poids se fait de manière régulière et aux bornes des quelles on observe une variation sensible de la perte hydrique du béton (figure .III.16). Les bornes de ces domaines diffèrent selon les auteurs. Mais nous retiendrons de manière générale que :

- entre la température ambiante et 120°C : on observe une variation faible du poids (< 1%) due essentiellement au départ de l'eau libre des capillaires. Cette eau migre et s'échappe par les pores [71].
- De 120°C à 300°C, on observe une augmentation de la perte de poids des bétons. Cette variation de masse est due au départ de l'eau liée des hydrates et principalement du gel de C-S-H. C'est dans ce domaine que le taux de séchage passe par un maximum correspondant à la fin de la migration de l'eau évaporable [45], [69].
- 300°C à 600°C, on assiste à un ralentissement du phénomène de déshydratation du béton. C'est dans ce domaine que se déroule la déshydratation de la Portlandite $\text{Ca}(\text{OH})_2$, et du carbonate de calcium CaCO_3 , [45].

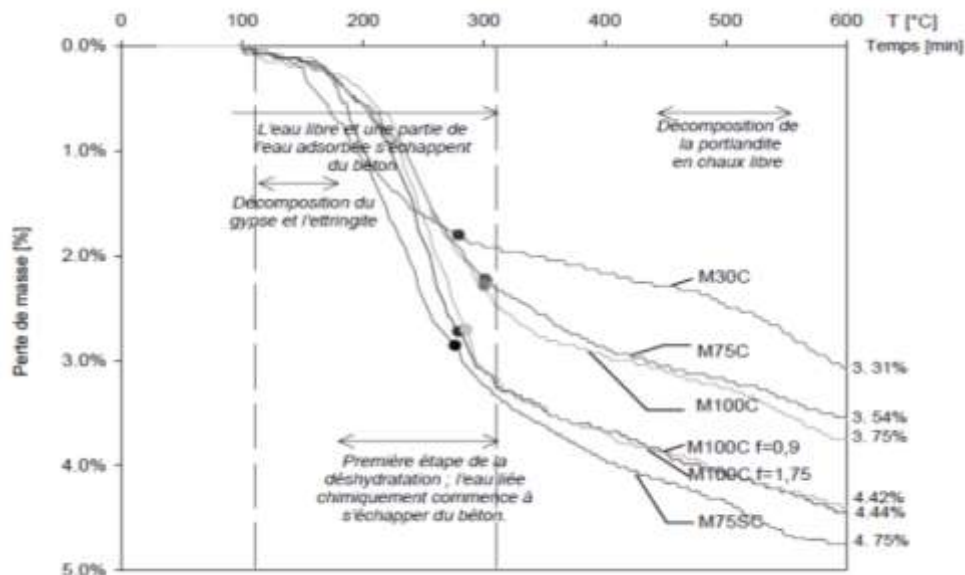


Figure .III.16 Évolution de la perte de masse en fonction de la température pour différentes compositions de bétons [69].

Le mécanisme exposé par [69] est le plus souvent retenu pour expliquer le phénomène de transport d'eau dans les bétons sollicités à haute température. Ainsi l'eau qui s'évapore dans le matériau migre dans les deux directions à travers les pores. La vapeur d'eau qui migre en direction de la région froide se condense et progressivement remplit les pores d'eau liquide.

Ce bouchon formé par l'eau liquide empêche le passage de l'air et de la vapeur d'eau et progressivement permet une augmentation des pressions dans les pores. La formation du bouchon se déroule de manière plus rapide dans les bétons à hautes performances, à cause de leur faible perméabilité. Elle permet en partie d'expliquer pourquoi leur cinétique de perte de masse est beaucoup plus lente que celle des bétons ordinaires.

III.3.3.2.3. 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

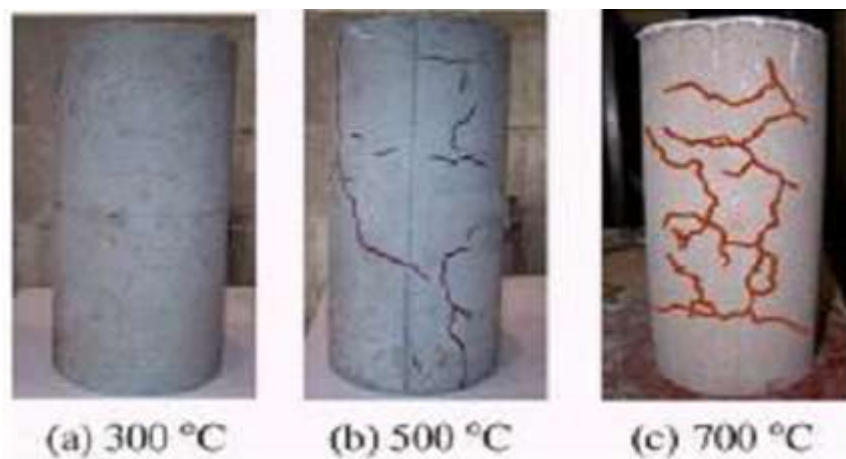


Figure .III.17 : Fissure dans le béton à différente température.

III.3.4. Les principales modifications physico-chimiques dans le béton à haute température

Lorsque le béton est soumis à des températures en augmentation, différents phénomènes consécutifs à des transformations chimiques, physiques et minéralogiques se produisent. Nous allons aussi évoquer le phénomène de la déformation thermique transitoire (ou de fluage thermique transitoire) qui pourrait réduire les contraintes dues aux déformations différentielles entre la pâte qui se rétracte et les granulats qui se dilatent [48].

Chapitre III : Comportement des bétons à haute température

Ces différents phénomènes, qui peuvent concerner aussi bien la pâte de ciment durcie que les granulats, sont les suivants :

Tableau .III.1 : Transformations principales dues à la température entre la température ambiante et la température de la destruction du matériau béton [48].

Température	Réaction physico-chimique		
20°C	Début de départ de l'eau		
100°C	80°C -150°C évaporation de l'eau des pores 150°C -170°C décomposition de gypse $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 171°C début de la déshydrations du C-S-H	Eclatement	hygrother réactions
200°C	Augmentation de la pression interne Petits pics endothermiques indiquant des effets de décomposition et d'oxydation d'éléments métalliques (ferriques) peuvent apparaître.		
300°C	Clivage des granulats silico-calcaires Température critique de l'eau (374°C)		
400°C	Décomposition de la portlandite. $\text{Ca}(\text{OH})_2 \rightarrow \text{CaO} + \text{H}_2\text{O}$	Fissuration	
500°C	Changement des phases du quartz β - α (573°C)		
600°C	Deuxième phase de la décomposition du gel CSH avec la formation de β -C2S. C'est la seconde étape de la déshydratation des silicates de calcium hydratés qui produit une nouvelle forme de silicates bicalciques		
700°C	Décomposition du carbonate de calcium. Le calcaire se décompose autour de 700°C en réaction fortement endothermique qui libère du gaz carbonique		
800°C	le calcaire se décompose (en granulats, par exemple) et devient $\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$, réaction fortement endothermique qui libère du gaz carbonique		
1300°C	Destruction complète du béton et apparition de la phase liquide		

III.3.5. Mécanisme du phénomène d'écaillage et de l'éclatement du béton chauffé

Le matériau béton offre une bonne résistance au feu car il est incombustible. Mais les accidents survenus dans les tunnels ces dernières années ont montré une certaine sensibilité à l'écaillage et à l'éclatement des bétons. En effet, leur microstructure plus dense réduit la migration de l'eau et de la vapeur d'eau et engendre donc l'apparition des problèmes d'instabilité. A première vue, ces phénomènes semblent se produire de façon aléatoire et de manière non reproductible.

Le phénomène d'écaillage et d'éclatement des bétons n'est pas complètement compris et à fortiori maîtrisé. Nous entendons par : [38]

- « **écaillage** » : la rupture des couches ou des pièces proches de la surface d'un élément de structure en béton lorsqu'il est soumis à une haute et rapide augmentation de la température [38].
- « **éclatement** » : la soudaine désintégration de l'élément de structure en béton qui s'accompagne d'une libération d'une grande quantité d'énergie en projetant des morceaux de béton à grande vitesse dans toutes les directions [38].

D'après [73], et [40], le phénomène de l'éclatement peut être principalement attribué à deux processus : le processus thermomécanique et le processus thermo-hydrique.

– **Le processus thermomécanique** : il est lié à la température au sein du béton. Le gradient thermique crée une dilatation thermique, et lorsqu'elle est empêchée, elle génère des contraintes de compression parallèles à la face chauffée [74]. De plus, au cours du chauffage, les granulats se dilatent, tandis que la pâte de ciment se rétracte en raison de sa déshydratation. La pâte de ciment est ainsi soumise à des contraintes de traction et les granulats, à des contraintes de compression. Lorsque les contraintes thermiques sont importantes, le phénomène d'écaillage peut se produire [73], [75].

– **Le processus thermo-hydrique** : il est associé au transfert de masse qui engendre de fortes pressions de vapeur dans le réseau poreux. La (figure.III.18) montre le mécanisme d'éclatement, lié à la pression de vapeur. Lorsque le béton est exposé à une haute température, l'eau qui se trouve dans les pores sous forme libre ou liée commence à s'évaporer [76]. Une partie de cette eau vaporisée s'évacue vers la surface chauffée et une autre partie migre vers les zones froides à l'intérieur puis se condense. Une accumulation de l'eau liquide dans les pores aux zones froides crée un bouchon saturé qui gêne la migration de l'eau vaporisée. Le bouchon saturé provoque une élévation de la pression interne des pores du côté le plus chaud. Ces pressions de vapeur associées aux fortes contraintes thermiques aboutissent à l'apparition du phénomène d'instabilité thermique. Dans le cas de béton de forte densité et de faible perméabilité, l'augmentation de pression pourrait engendrer l'éclatement.

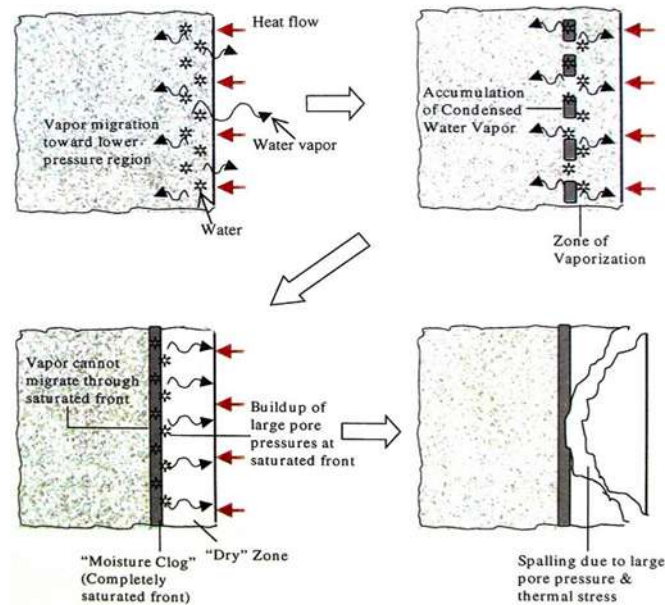


Figure .III.18: Illustration du mécanisme d'éclatement [76].

III.3.6. Evolution du comportement mécanique avec la température

En général, la résistance à la compression, la résistance à la traction et le module élastique en compression diminuent avec l'augmentation de la température. Des transformations chimiques se produisent au cours du chauffage induisant une dégradation de la structure du béton [38].

Les données expérimentales des propriétés thermomécaniques du béton à haute température que nous avons présentées, sont très influencées par des phénomènes physicochimiques supplémentaires et principalement : les réactions chimiques (changement de phase ; retrait de dessiccation par déshydratation des hydrates), l'augmentation de la microfissuration et de la porosité, l'influence de la nature de la pâte et des granulats, la diminution et l'augmentation de l'adhérence entre les différents composants du béton, la dilatation différentielle, la décohésion thermique due à l'augmentation ou à la diminution de l'adhérence.

Nous présentons ici dans un premier temps les lois de comportement du béton (traction et compression) à haute température qui tiennent en compte implicitement de ces paramètres.

III.3.6.1. Comportement du béton en compression à haute température

Pour obtenir les évolutions des propriétés mécaniques du béton à haute température, on se réfère essentiellement aux courbes contrainte/déformation ou charge/déformation. Ces courbes sont influencées par la température en compression aussi bien qu'en traction. Selon la [77] ont mesuré les déformations des éprouvettes en BHP au cours des essais de compression à hautes températures.

Chapitre III : Comportement des bétons à haute température

Les figures suivantes (Figure.III.19 & Figure.III.20) présentent les courbes contrainte-déformation obtenues en compression uniaxiale à différentes températures par [77]. On constate que la courbe contrainte -déformation en compression uniaxiale est affectée par la température. On observe :

- une baisse de rigidité du matériau quand la température augmente.
- une augmentation de la ductilité et de la déformabilité du béton

Il faut toutefois noter que la vitesse adoptée par [77] est relativement élevée ($23^{\circ}\text{C}/\text{min}$ comparée à une vitesse de $1^{\circ}\text{C}/\text{min}$ recommandée par la Rilem). Il faut noter également le changement important de la partie post-pic au-delà de $300\text{-}400^{\circ}\text{C}$

L'analyse de Castillo montre que la dissipation d'énergie dépend de la température et indique un maximum entre 300 et 600°C . La dissipation ultime varie entre 20 J/kg et 70 J/kg. Le type de granulats et la teneur en eau influencent à la fois la pente de la courbe contrainte-déformation et la ductilité du béton à haute température. La Figure 48 montre un changement léger de la pente jusqu'à 250°C et bien une grande ductilité du béton au-delà de 450°C Castillo. Ceci est confirmé par les courbes contrainte-déformation obtenus par Castillo et Durani [77], (Figure III.19).

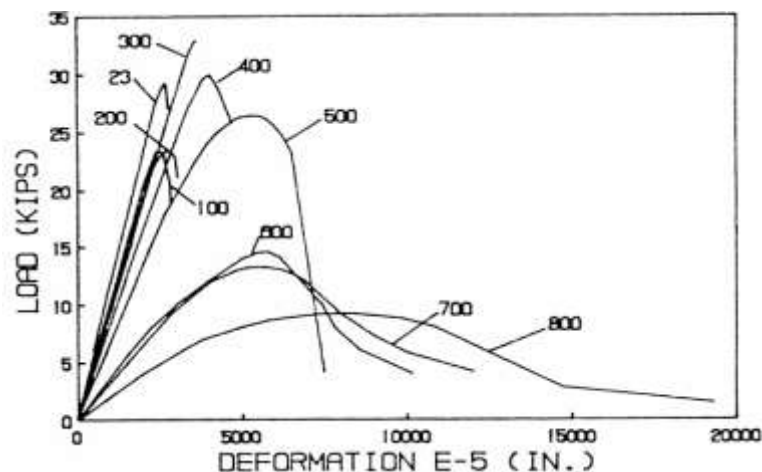


Figure .III.19 : Courbe charges-déformations déterminées à différentes températures sur un BHP d'après [77].

La variation du module d'élasticité et de la résistance en compression indique une légère diminution dans un essai avec chargement durant le chauffage que dans un essai non chargé durant le chauffage et sous les mêmes conditions [77]. En revanche, une évaluation des résultats d'essais à 450°C montre le même comportement du béton sous chargement et sans chargement pendant le chauffage, indépendamment du type de béton testé.

Chapitre III : Comportement des bétons à haute température

La (Figure.III.20) montre la diminution de la déformation ultime en compression uniaxiale en fonction de la température pour différents niveaux de charge appliquée durant le chauffage. Sur cette courbe le coefficient α représente le niveau de la charge par rapport à la résistance initiale en compression uni axiale.

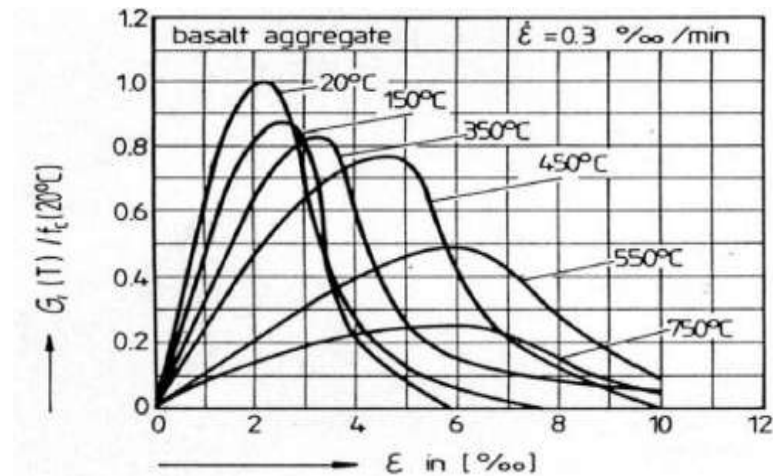


Figure .III.20 : Courbes contrainte-déformation en compression uniaxiale à différentes températures pour un béton ordinaire Schneider [77].

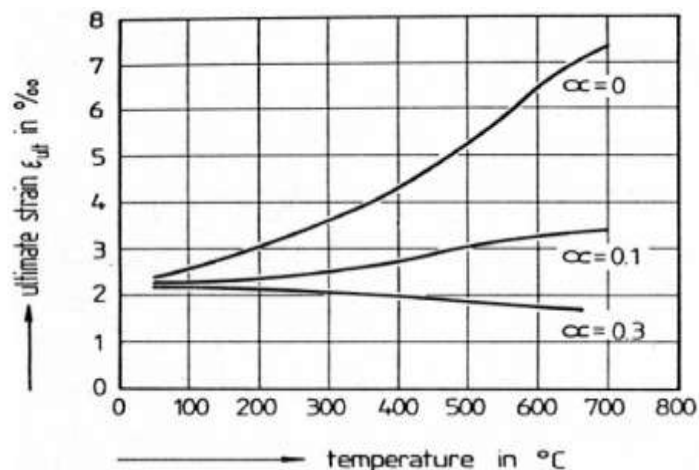


Figure .III.21 : La déformation ultime en compression uniaxiale en fonction de la température pour différents niveaux de charge appliquée durant le chauffage [77].

Pour le béton ordinaire, on observe l'évolution de sa résistance à chaud comme suit :

1. Entre 0 et 120°C, une baisse de résistance à chaud ;
2. Après 130°C, une légère augmentation de résistance. Cette augmentation de résistance est peut être due à la densification de la pâte de ciment évoquée ci-dessus ;
3. Après 300°C, une rapide dégradation des propriétés mécaniques du béton.

III.3.6.2. Comportement du béton en traction à haute température

Le béton résiste mieux à la compression qu'à la traction, son comportement en traction est très influencé par la température. La réalisation d'un essai en traction peut se faire selon plusieurs méthodes : flexion 3 ou 4 points, directe (uniaxiale), fendage.

Les essais par fendage sont les plus utilisées en pratique dans ce genre d'étude mais les résultats obtenus sont peu précis et surestiment les valeurs réelles. Les essais de traction sont très difficiles à mettre en œuvre mais donnent des résultats fiables. Ces essais permettent l'évaluation de l'énergie de fissuration à haute température qui est l'un des paramètres fondamentaux (avec le module élastique et la résistance en traction) requis pour la plupart des modèles de mécanique d'endommagement ou de mécanique de la rupture du béton.

L'essai de flexion 3 points est simple à mettre en œuvre et plus stable du point de vue mécanique. Peu de résultats sont aujourd'hui disponibles à haute température.

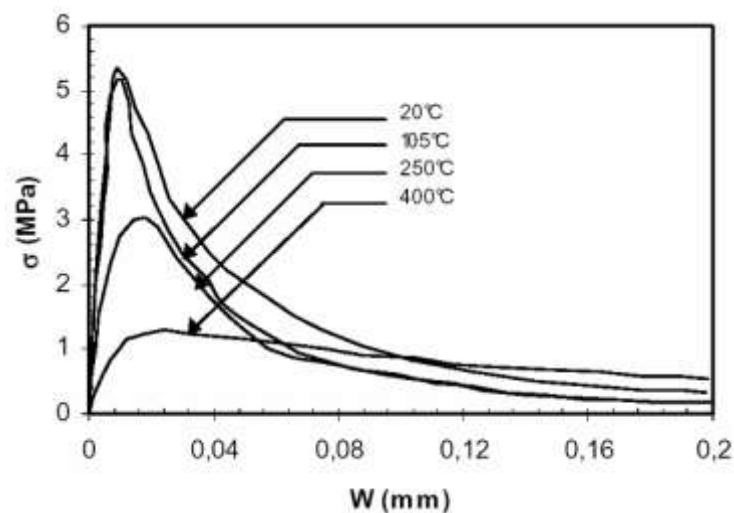


Figure .III.22. Comportement du béton en traction (contrainte-ouverture de fissure) à différentes températures [78].

Les essais de flexion 3 points sur des éprouvettes chauffées à 0,2°C/min sur des BHP ont été réalisés par Felicetti et al [78]. Ils montrent que les courbes contrainte-déformation sont plus influencées par la température que pour un essai de compression (Figure.III.22). Les résultats d'essais dépendent également de la vitesse du chauffage, la nature des granulats et la pâte de ciment, l'entaille, le rapport (Eau/Ciment)...

Il est à noter que ces courbes contrainte déformation montrent bien l'augmentation de l'aire sous la courbe au-delà de 250°C et la chute de la résistance en traction est fonction de la température.

III.3.6.3. Déformation thermique du béton.

Le processus de déformation dans le béton à haute température est un phénomène très compliqué. En général la dilatation est une fonction linéaire de la température.

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

- à l'expansion thermique des granulats,
- au retrait de dessiccation de la pâte de ciment,
- aux transformations chimiques au sein du béton,
- aux fissurations,
- à la détérioration physique des divers constituants.

En effet, en raison de l'hétérogénéité du béton et de la différence de caractéristiques entre les granulats (rigidité, résistance, coefficient de dilatation) et la pâte de ciment, le béton subit des déformations et des contraintes mécaniques importantes pouvant dépasser localement la limite d'élasticité. Dans ce chapitre nous discuterons séparément, la déformation thermique de la pâte de ciment et des granulats pour voir l'influence de chaque phase sur le processus de déformation thermique du béton à haute température

III.3.7. Module d'élasticité

Le module d'élasticité statique peut être effectué à chaud en fin de palier de stabilisation ou en résiduel après la période de refroidissement. Avec l'augmentation de la température, les variations du module d'élasticité dépendent principalement de la microstructure de la pâte de ciment (augmentation de l'endommagement du matériau par la déshydratation et la fissuration de la matrice) et traduit l'évolution de la rigidité du béton avec la température. Ainsi, avec l'élévation de la température, on assiste à la rupture de liaisons internes qui entraînent une diminution du module d'élasticité avec un matériau de plus en plus déformable [79].

Contrairement aux mesures de résistances à la compression et à la traction, il existe très peu de données dans la littérature sur l'évolution du module d'élasticité du béton porté à une température élevée.

Le module d'élasticité traduit la rigidité du béton. Celle-ci est sévèrement modifiée par l'élévation de température. La perte de l'eau évaporable au-dessous de 100°C du béton a tendance à faire augmenter la résistance en compression et diminuer le module d'élasticité. La chaleur affecte similairement le module d'élasticité et la résistance du béton au-dessus de 100°C [79]. De nombreuses études expérimentales ont montré une diminution graduelle du module d'élasticité en compression avec la température [45].

Selon Hager [79] a montré qu'à 300°C le module d'élasticité résiduel d'un béton ordinaire de granulats siliceux présente une plus faible perte de module qu'un béton de granulats calcaires de même formulation. A 750°C, il n'y a plus de différence entre les deux bétons.

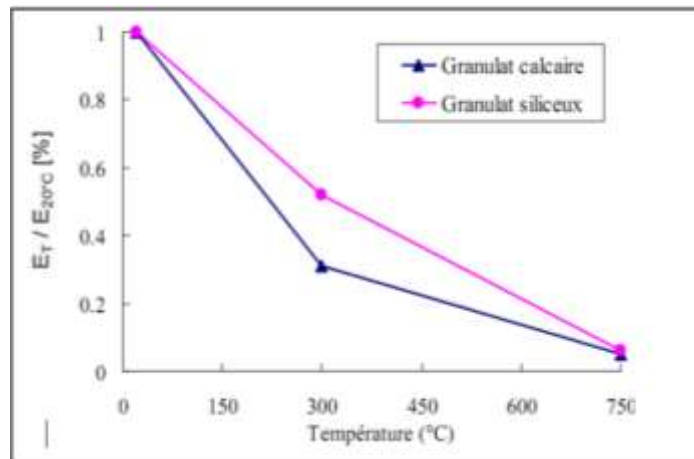


Figure .III.23. Evolution relative du module d'élasticité résiduel de bétons de granulats siliceux et calcaires en fonction de la température [79].

III.3.8. Conclusion sur le BO soumis à haute température

Dans cette partie nous avons présenté le point sur l'état des connaissances relatives au comportement des bétons influencés par la température dans différents stades de sa vie. Mais pour bien comprendre ce comportement, une synthèse sur l'hydratation des ciments, la structure poreuse, les différents états de l'eau dans la matrice de ciment, ainsi que les mécanismes de séchage et l'influence de la température au cours de la maturation était nécessaire.

La synthèse, tirée de la bibliographie, des observations concernant l'effet de la température sur le béton, a démontré que l'évolution des propriétés mécaniques est fortement conditionnée par l'évolution de la microstructure, au départ de l'eau et aux changements physico-chimiques.

Ceci se traduit par l'évolution de la porosité, la taille caractéristique des pores et par conséquent la perméabilité. La présence de l'eau dans le béton est l'un des paramètres les plus significativement influençant le comportement du matériau béton à haute température.

III.4. Cas des BAP soumise à haute température

III.4.1 Résistance à la compression

Depuis l'apparition des BAP, plusieurs études ont été menées sur la durabilité de ces bétons, mais les études sur le comportement à haute température des BAP. Le tableau suivant résume les principaux résultats obtenus.

Tableau .III.2 : les principaux résultats obtenus des BAP.

source	Propriété	Comportement a HT
Stegmaier et al. 2004 [49]	Fire ISO 4102 T.2 Cubes de 300 mm Résistance initiale : 25 à 75 MPa	Résistance résiduelle comprise entre 47 et 67 %. Corrélation entre l'augmentation de E/C et diminution de la résistance
Persson 2004 [50]	Chauffage à 4°C/min Température palier : 20, 200, 400, 600 et 800°C Résistance initiale : 40 _a 88 MPa E/L : 0.28 à 0.70 Étude de l'effet de filler calcaire, filler de verre et des fibres polypropylènes	Baisse continue de la résistance (à 800°C, 15%) Écaillage important
Annerel et al. 2007 [51]	Chauffage à 3.5°C/min Température palier : 105, 250, 350 et 550°C Éprouvettes cubiques de résistance initiale de 65.9 MPa	Diminution de la résistance résiduelle relative pour atteindre 50% à 550°C Observation de fissures dans les zones de transition
Noumowe et al. 2006 [52]	Montée en température de 0.5°C/min jusqu'à 400°C Essai sur des BAP avec et sans fibres de polypropylène Résistance de 81.3 MPa pour les BAP ss FPP et 75 MPa pour les BAP av FPP	BAP ss FPP : Éclatement (pour tous les bétons) Résistance résiduelle avec FPP : 41 MPa à 400°C
Tao et al. 2007 [53]	Chauffage à 5°C/min avec un pré charge de 20°C Température palier : 20, 200, 400, 600 et 800°C Étude de BAP avec et sans FPP Essais sur des cubes de résistance initiale de 70 MPa	A 800°C, résistance résiduelle relative : 48% obtenue sur BAP avec FPP Éclatement entre 300 et 450°C sur BAP ss FPP (pour tous les bétons)
Suite page suivante		

Chapitre III : Comportement des bétons à haute température

Source	Propriétés	Comportement à HT
Suite...		
Sideris 2007 [54]	Chauffage à 5°C/min Température palier : 100, 300, 500 et 700°C Essais sur éprouvettes cubiques de résistance : 34, 43, 54, 73 MPa 4 classes de résistance : C20/25, C25/30, C30/37 et C50/60	Éclatement observé pour C30/37 et C50/60 compris entre 380 et 458°C (pour tous les bétons) A 700°C, Résistance résiduelle relative : 75% pour tous les BAP testées
Pineaud 2007 [55]	Essais à chaud avec une montée en température de 1°C/min Température de palier : 1200, 250, 400 et 600°C Éprouvettes cylindriques 10:4 x 30 cm Résistance initiale : 40 à 110 MPa	Résistance résiduelle comprise entre 35 et 60 % Résistance à 120°C inférieure à celles des BV avec gain de résistance à 250°C L'augmentation du volume de pâte diminue la résistance en compression entre 120 et 250°C E/L a une faible influence sur l'évolution de la résistance en compression résiduelle relative

Finalement, ces essais ne permettent pas de montrer clairement une différence entre BO et BAP. Néanmoins, à 800°C, la résistance à la compression des BAP est quasiment nulle. Cela s'explique par la décarbonatation du calcaire contenu dans les fillers calcaires qui a lieu vers 750°C. Mais, les paramètres de formulation comme le volume de pâte [55] conduisent à une modification de la résistance.

III.4.2. Stabilité thermique

A 150°C, la surface des bétons observés ne présente aucune détérioration ni fissure visible. A partir de 300°C, quelques fissures apparaissent notamment dans la zone de transition pâte granulat.

L'aspect des fissures a été plus prononcé pour les échantillons chauffés à 450 °C, et surtout à 600 °C. À ces températures, de nombreuses fissures ont pu être observé dans les interfaces de la zone de transition, mais aussi dans la pâte et les granulats, notamment à 600°C. Ces fissures observées à travers les granulats à cette température certainement due à la présence de quartz (SiO₂) dans les agrégats. En effet, vers 570 °C, la transformation allotropique du quartz - α en quartz - β se produit. La transformation réversible a eu des effets importants sur les propriétés physiques de quartz et induit en particulier une expansion de 0,8% en volume. Ces observations pourraient être faites sur chaque béton. Des fissures similaires sont apparues à la même température pour tous les bétons.

Chapitre III : Comportement des bétons à haute température

Selon Noumowée et al, [52] a étudié la stabilité thermique des BAP HP (BAP à haute performance) avec et sans fibres de polypropylène lors d'un chauffage lent ($0.5^{\circ}\text{C}/\text{min}$ jusqu'à 400°C) et lors d'un chauffage rapide (Feu ISO 834 jusqu'à 600°C). Les résultats sont regroupés dans le (tableau .III.3.)

Tableau .III.3 : Stabilité thermique des BAP étudiées [52]

Éprouve. cylindriques (16 x 32cm)	Chauffage lent ($0.5^{\circ}\text{C}/\text{min}$)	Feu ISO 834
BAP HP ss FPP	Éclatement	Éclatement
BAP HP av. FPP	Aucun désordre	Aucun désordre

Selon Noumowée Les auteurs [52] ont remarqué que durant un chauffage lent, seuls les BAP à haute performance ont présente une instabilité, comme observé sur la (figure III.24). Tandis que ces mêmes bétons auxquels ils ont incorporé des fibres de polypropylène ne présentent aucun désordre ou instabilité.



Figure .III.24 : Éclatement explosif des BAP durant un feu ISO 834 [52]

Selon G. Ye [67] a étudié deux bétons autoplaçants avec un rapport $E/L = 0.52$ Les deux BAP ayant subi des éclatements possèdent un rapport E/L de 0.52 et des résistances en compression de 37 et 54 MPa. Comparativement, les éprouvettes restées intactes après chauffage (BO 40) ont un rapport E/L respectifs de 0.54 avec une résistance en compression de 41 MPa. Ce résultat montre que les BAP semblent plus instables que les BO.

Les éclatements sont en effet survenus pour des bétons de résistances en compression modérées, contrairement aux observations citées par [67] qui n'ont observé des éclatements que pour des bétons de faible E/C et de résistance en compression supérieures à 60 MPa.

Selon et al, [62] Etudie différents rapports Eau/Liant (variant de 0.40 à 0.70) ainsi que l'influence des additions minérales (Filler calcaire et filler de verre) et le dosage en fibres de polypropylène. Les BAP et les BV étudiés ont le même comportement hormis à 800°C car les BAP contiennent des fillers calcaires. [62] observe d'importants éclatements et écaillages qui sont fonction du rapport E/L. Pour une conservation dans l'eau, l'éclatement apparaît pour des E/L inférieurs à 0.40 et dans l'air pour des E/L inférieurs à 0.35. Mais, en confectionnant des BO dans les mêmes conditions de conservation et ayant la même humidité relative, ces BO résistent mieux à l'éclatement que les BAP.

On peut observer un effet de fillers calcaires sur la stabilité des BAP. Il a été montré dans différentes études [62-64] que les BAP éclatent significativement plus que les BO ayant le même rapport E/C et les mêmes conditions de conservation. Les éclatements concernent majoritairement des BAP comportant des fillers calcaires et conservés dans l'eau.

Donc, finalement, on observe deux points de vue différents :

1. Les BAP présentent une baisse de résistance à la suite d'un traitement thermique et le risque d'éclatement est plus important que les BO.
2. Les BAP et les BO présentent des risques d'instabilité thermique similaires.

III.4.2. Propriétés physico-chimiques

ATD-ATG :

Des analyses thermogravimétriques et thermo différentielles ont été réalisées par [66, 57] sur différents types de pâtes de ciment (pâtes de BHP, BO et de BAP) (Voir figure .III.25).

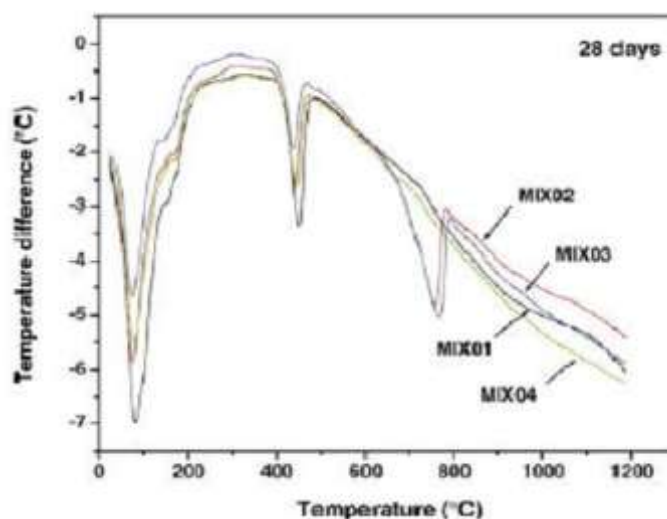


Figure .III.25 : décomposition thermique avec l'analyse thermogravimétrique (TGA) et l'analyse différentielle ATD [58].

Liu et al, [58] a étudié les changements de la microstructure pour des pâtes autoplaçantes et des pâtes ordinaires. Les résultats sont regroupés dans la (Figure .III.25) Entre 30 et 150°C, une perte d'eau rapide apparait pour tous les échantillons testés. Cette perte est due à l'évaporation de l'eau libre et une partie de l'eau adsorbée. Un petit pic est observé autour de 400°C, [58] attribut ce pic à la déshydrations d'une solution solide de Fe₂O₃. Entre 110 et 700°C, la perte de l'eau inclut l'eau chimiquement liée due à la décomposition du (CSH). Ainsi, entre après 700°C, la perte de masse des BAP présente une diminution plus importante. Cette baisse est le résultat de la décarbonatation des fillers calcaires : $\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$.

On compare des pâtes de ciment de BAP et de BHP. Dans cette étude [66, 57], les BAP testées sont constitués de fillers calcaires. Ainsi, entre 600 et 800°C, la perte de masse des BAP présente une diminution plus importante. Cette baisse est le résultat de la décarbonatation des fillers calcaires : $\text{CaCO}_3 \longrightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$.

III.4.3. Perte de masse

A 800°C, la perte de masse totale est d'environ 30% pour les BAP. Par contre, pour les BHP qui ne contiennent pas de fillers calcaires, la perte de masse totale est de 23%. Ce phénomène est observable par un pic à 700°C sur les ATD, il s'agit essentiellement d'un processus endothermique.

D'après Hanaa [67], La (figure.III.26) présente les variations de perte de masse sur des éprouvettes (16x32) cm à l'issue des cycles de chauffage refroidissement des bétons étudiés. On observe que les pertes de masse en fonction de la température sont très proches pour les trois bétons étudiés. Entre la température ambiante et 150°C, la variation de masse est assez faible.

La perte de masse dans ce domaine correspond à un départ de l'eau libre contenue dans les pores. Entre 150 et 300°C, on observe pour tous les bétons une forte perte de masse correspondant environ à 6.5% de la masse initiale. Sachant que la quantité d'eau totale dans les bétons est de 8.7 à 9.6% de la masse de béton, on peut constater que l'essentiel de l'eau contenue dans chaque béton s'échappe au cours du chauffage entre 150 et 300°C.

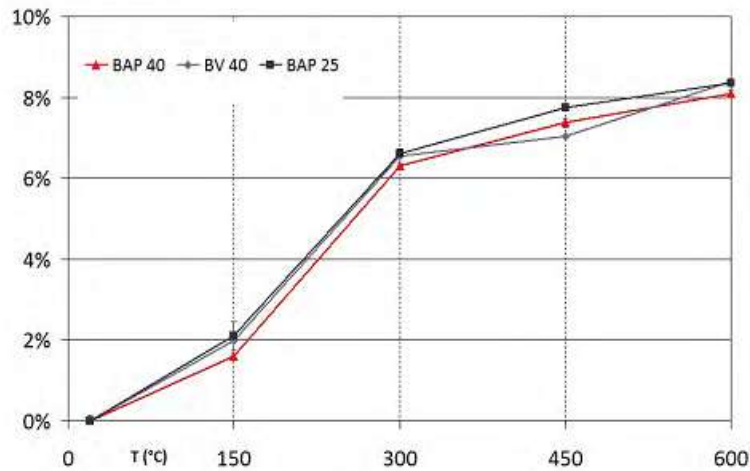


Figure .III.26 : Variation de la perte de masse en fonction de la température [67].

III.4.4.Porosité

D'après Hanaa [67] a étudié la modification de la porosité dans des BAP soumis aux températures suivantes : 105, 300, 450 et 600°C. Après le chauffage, le béton est refroidi dans un dessiccateur afin d'éviter toute réhumidification des échantillons par l'humidité ambiante.

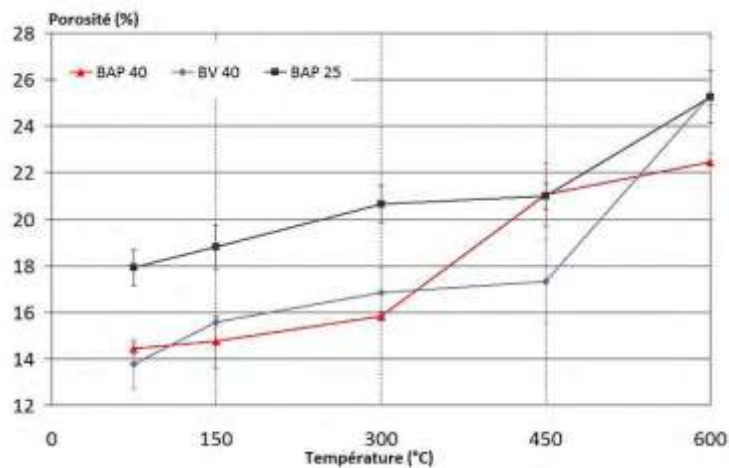


Figure .III.27 : porosité à l'eau des bétons en fonction de la température [67].

La (figure .III.27) présente la porosité totale pour les mélanges étudiés par [67] en fonction de la température. Tous les mélanges présentent, une augmentation assez uniforme de la porosité avec la température. Entre 300 et 450°C, la porosité augmente fortement pour le BAP40 (soit une augmentation de 4% en moyenne) tandis que l'augmentation a été beaucoup plus modérée pour les deux autres bétons (environ 1%). Pour les valeurs au-delà 450°C, les écarts-types sont importants parce que les spécimens sont très faibles et friables.

III.4.5 Propriétés mécaniques

III.4.5.1 La résistance en compression

D'après Bakhtiyari [80] a étudié l'influence de l'ajout de Quartz comme filler sur les propriétés des BAP. Les résultats indiquent, si la poudre en Quartz est utilisée comme fillers dans le BAP, il se produit une accélération de développement de la résistance à 500°C cause de son activité pouzzolanique partielle qui augmente à cette température. Un tel effet peut causer une augmentation de la pression dans les pores qui produit l'éclatement.

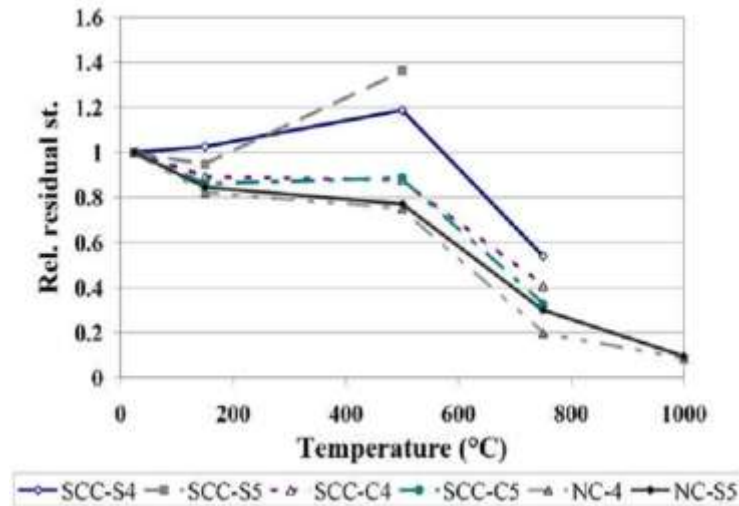


Figure. III.28 : la résistance à la compression résiduelle des BAP et BO [80].

D'après Hanaa [67] a réalisé une étude sur des BAP avec un rapport E/L varie entre 0.28 et 0.7. L'influence de deux ajouts (fillers calcaires, fillers de verre) et les fibres de polypropylène a été étudié. Person a remarqué une baisse continue de la résistance aboutit 15% à 800°C. D'un autre part, [67] a mentionné dans son étude une augmentation de température entre 150 et 300°C, (FigureIII.29).

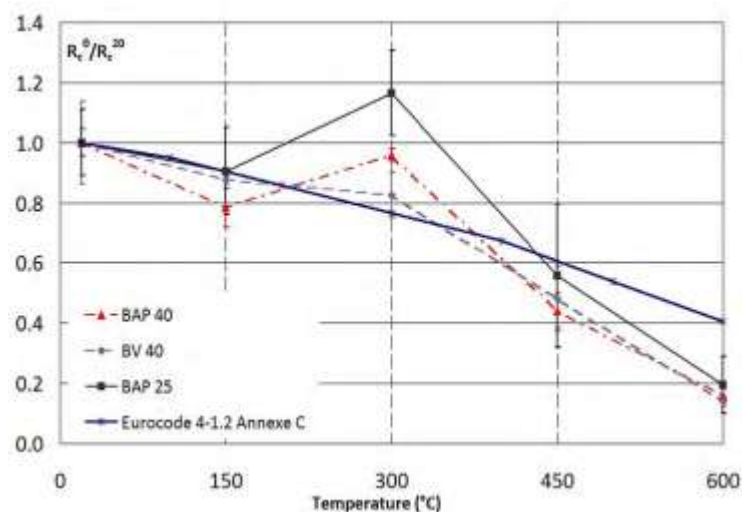


Figure .III.29: l'évolution de la résistance en compression [67].

III.4.5.2 Résistance à la traction

Il est apparu que la résistance à la traction résiduelle a un rôle significatif dans l'éclatement du béton [80]. Il a été révélé que la résistance à la traction résiduelle est très important dans cet égard et devraient être considérées lors des recherches. Les BAP préparés avec des fillers calcaires semblent généralement avoir des meilleures performances par rapport à des BAP avec d'autre ajout. Ils conservent une grande proportion des propriétés résiduelles à haute température. Le degré de fissuration a une influence plus importante sur la résistance en traction qu'en compression. Les fissures générées par un chauffage à 300°C, ne causent pas de pertes immédiates de capacité en compression, mais font baisser la résistance à la traction, et donc la résistance en flexion [67].

La (figure .III.30) présente la variation de la résistance résiduelle relative à la traction par flexion en fonction de la température. Les résistances résiduelles en flexion des bétons testés diminuent de manière continue avec l'élévation de la température. En particulier, on observe une stabilisation entre 150 et 300°C. Après 300°C, la résistance décroît plus rapidement. Cependant, étant donné la dispersion des résultats, nous pouvons conclure que l'évolution de la résistance à la flexion avec la température est la même pour tous les bétons étudiés.

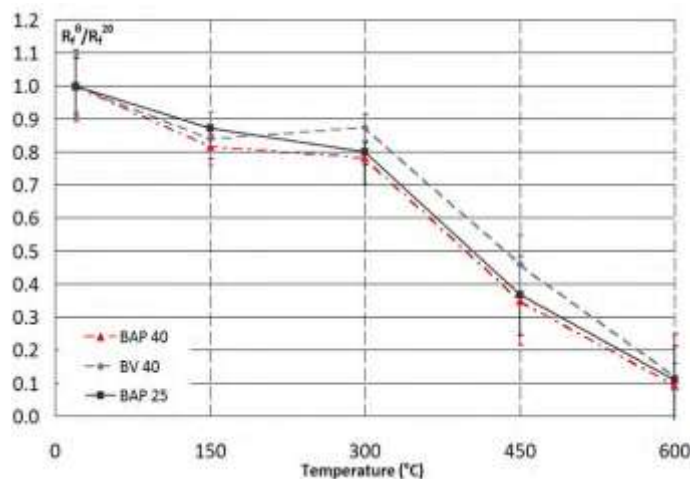


Figure .III.30 : Variation de la résistance résiduelle à la traction par flexion en fonction de la Température [67].

III.4.6. Conclusions sur les BAP soumis à de hautes températures

Finalement, à travers ces études, on constate que la conductivité thermique des BAP à hautes performances sont similaires à celles des BHP. Les propriétés de transfert (porosité et la perte de masse) sont aussi dégradées avec l'élévation de la température. Concernant la résistance des BAP, la différence avec les BO n'est pas mise en avant, mais certaines études ont montré qu'au-delà de 700°C, la résistance en compression des BAP est très faible à cause de l'utilisation de fillers calcaires, qui subissent une décarbonatation à 750°C.

Cependant, les BAP semblent présenter un comportement instable plus important que les BO. La probabilité d'éclatement se retrouve réduite si la teneur en eau est faible. Cet état est toutefois difficile à atteindre, car la perméabilité des BAP est très faible, le séchage est extrêmement long. Donc, pour l'utilisation de BAP, il est recommandé de prendre des précautions. Ces précautions sont de différentes natures :

- L'utilisation de barrière thermique entre le feu et le béton. Ces barrières ont pour rôle de limiter la température et les gradients thermiques au sein du béton.
- L'utilisation de fibres de type polypropylène dans le béton (de diamètre inférieur à 100 µm et un dosage compris entre 0.5 et 1.5 kg/m³. Car, la fusion de ces fibres avec l'élévation de température conduit à des modifications des propriétés de transfert.

Conclusion de la partie bibliographique

Cette synthèse bibliographique a été menée pour faire le point sur l'état des connaissances relatives au comportement des bétons influencés par la température dans différents stades de sa vie. Mais pour bien comprendre ce comportement, une synthèse sur l'hydratation des ciments, la structure poreuse, les différents états de l'eau dans la matrice de ciment, ainsi que les mécanismes de séchage et l'influence de la température au cours de la maturation était nécessaire.

Nous nous sommes intéressés aux caractéristiques de conception et de réalisation des BAP, ainsi que le comportement mécanique à température ambiante de ces derniers. A cela, il faut ajouter l'étude du matériau béton après un chauffage à haute température et plus particulièrement à celui des BAP.

Le BAP est un béton très fluide, dont la spécificité est de se mettre en place sans vibration, sous le seul effet de son poids propre. Son utilisation contribue à améliorer les conditions de travail sur chantier. Les BAP se composent d'un grand volume de pâte riche en fines associé à une faible proportion de granulats dont la fluidité est améliorée par l'utilisation de superplastifiants et éventuellement d'agent de viscosité. A l'état durci, les propriétés mécaniques et physico-chimiques sont influencées par la composition. La microstructure des BAP diffère de celle des BO. L'ajout des additions minérales améliore la distribution des tailles de pores ce qui conduit à une densification de la microstructure. Du point de vue mécanique, l'emploi d'additions minérales multiplie le site de nucléation améliorant la résistance au jeune âge. A long terme, le comportement mécanique peut être comparé aux BO. Mais, dans certains cas, le volume de pâte élevé peut avoir un effet réel mais limité sur le comportement mécanique entraînant soit une augmentation, soit une diminution de ces propriétés.

Concernant les BAP soumis à de hautes températures, l'étude bibliographique ne permet pas de montrer clairement une différence des propriétés mécaniques entre BO et BAP. Néanmoins, les propriétés mécaniques et physico-chimiques sont influencées par la composition, et notamment la nature de l'addition minérale. Certaines études ont montré un risque d'éclatement des BAP plus élevé que pour les BO. Or, d'autres études observent un risque d'instabilité thermique similaire entre les BAP et les BO. Mais, l'ajout de fibres de polypropylène réduit le risque d'instabilité. Concernant les propriétés thermiques et physico-chimiques, les BAP et BHP possèdent des comportements analogues, hormis à 800°C (phénomène de décarbonatation des fillers calcaires). Les propriétés de transfert (porosité et perméabilité) comportent peu de résultats, néanmoins, la bibliographie souligne la dégradation de ces propriétés avec l'élévation de la température.

Chapitre III : Comportement des bétons à haute température

L'étude du comportement à haute température des bétons présente une évolution des propriétés mécaniques très variable et très complexe. Que ce soit pour les BAP ou les BO, la bibliographie ne permet pas de définir une évolution précise. Notre objectif est donc d'établir une comparaison des propriétés mécaniques entre les BAP et les BO, mais également d'en définir leur évolution avec l'élévation de la température.

Nous proposons dans la suite du document d'étudier le comportement à haute température de BAP. Nous nous intéressons aux bétons du BAP car ces bétons ont fait l'objet d'une étude poussée tant à l'état frais qu'à l'état durci. Du point de vue du matériau, nous allons étudier le comportement mécanique (Résistance à la compression, à la flexion et module perte de masse) des BAP soumis à de hautes températures après refroidissement des éprouvettes à la suite d'un chauffage lent. Parallèlement à l'étude des propriétés mécanique, nous allons nous intéresser à la microstructure des BAP. Ces résultats seront étudiés en parallèle des propriétés mécaniques et physiques.

Chapitre IV :
Caractérisation et méthodologie d'essais
expérimentale

IV .1. Introduction

Ce chapitre a pour objectif de présenter les différentes formulations des bétons autoplaçants. Les matériaux utilisés (ciments, granulats, fillers calcaires) sont identiques dans les formulations de BAP. La fabrication des BAP a pu être réalisée sans problème avec des moyens conventionnels. Tous les essais menés au cours de cette étude ont été effectués sur béton. Les premiers concernent non seulement l'identification et la caractérisation des composants anhydres, mais aussi l'étude des propriétés des mélanges à l'état frais afin d'estimer leur fluidité et leur ségrégation dynamique et statique (essais d'étalement au cône, de la boîte en L, V-funnel et de stabilité au tamis). Ensuite, divers essais relatifs aux domaines mécaniques ont été réalisés sur les mêmes mélanges à des échéances précises (performances mécaniques, module d'élasticité).

IV.2. Caractérisation des constituants

Cette partie expérimentale a été consacrée à la caractérisation physique et mécanique de la phase inerte (Sable +Gravier) et de l'efficacité des adjuvants. Les essais ont été effectués au Laboratoire de génie civil et d'hydraulique (LGCH) de l'Université 8 Mai 45 Guelma. Les protocoles pour la conduite des essais sont conformes aux normes en vigueur en Algérie (Normes NA).

IV.2. 1. Caractérisation du gravier

Pour l'élaboration des bétons, nous avons utilisé un gravier provenant de la carrière de Maouna implanté dans la région de Guelma. Il s'agit d'un gravier concassé d'étendue granulaire 5/15.

IV. 2.1.1. Mesure de la masse volumique apparente du gravier selon la norme NA 255

La masse volumique apparente est la masse du matériau par unité de volume en vrac, c'est-à-dire «vides» compris.

Principe de mesure :

La mesure consiste à verser le granulat sec dans un récipient de volume connu en le disposant, sans tasser, par couches horizontales successives, d'araser la dernière couche par un, mouvement de va et vient à l'aide d'une règle. La masse volumique apparente, notée γ est donnée par l'expression :

$$\gamma = M/V \quad (\text{Eq : IV.1})$$

Avec :

M : masse des granulats contenus dans le récipient ;

V : volume du récipient.



Figure .IV.1 : Procédé utilisé pour la mesure de la masse apparente du gravier

Tableau IV.1 : Résultats des mesures de la masse apparente du gravier

Echantillon 1	Volume d'un récipient connu (ml)	V	500
	poids de gravier contenu dans le récipient (gr)	M	720
	Masse volumique absolue (gr/ml) M/V	γ_{abs1}	1.44
Echantillon 2	Volume d'un récipient connu (ml)	V	500
	poids de gravier contenu dans le récipient (gr)	M	715
	Masse volumique absolue (gr/ml) M/V	γ_{abs2}	1.43
Echantillon 3	Volume d'un récipient connu (ml)	V	500
	poids de gravier contenu dans le récipient (gr)	M	725
	Masse volumique absolue (gr/ml) M/V	γ_{abs3}	1.45
<i>Masse volumique apparente moyenne</i>	$\gamma = 1440 \text{ Kg/m}^3$		

La masse volumique apparente moyenne obtenue est de 1440 Kg/m^3 , ce qui correspond à une valeur acceptable, en effet les granulats pour bétons doivent présenter une masse volumique absolue variant dans les limites de 1400 à 1600 Kg/m^3 .

IV .2.1.2 - Mesure de la masse volumique absolue selon la norme NA 255

La masse volumique absolue (γ_{abs}) est la masse par unité de volume de la matière qui constitue le granulat, sans tenir compte des vides pouvant exister dans ou entre les grains.

Principe de mesure (Méthode de l'éprouvette graduée):

Remplir une éprouvette graduée avec un volume V_1 d'eau. Peser un échantillon sec M de granulats et l'introduire dans l'éprouvette en prenant soin d'éliminer toutes les bulles d'air. Le liquide monte dans l'éprouvette, lire le nouveau volume V_2 .

La masse volumique absolue est alors :

$$\gamma_{abs} = \frac{M}{V_2 - V_1} \quad (\text{Eq IV.2})$$

Les résultats des mesures, effectuées sur trois échantillons, sont reportés dans le tableau suivant :

Tableau .IV.2 : Résultats des essais de mesure de la masse absolue du gravie

Echantillon 1	Lire dans l'éprouvette graduée le volume (ml)	V_1	80
	Masse de l'échantillon (gr)	M	80
	Lire le nouveau volume (ml)	V_2	110
	Masse volumique absolue $M / (V_2 - V_1)$	γ_{abs1}	2.66
Echantillon 2	Lire dans l'éprouvette graduée le volume (ml)	V_1	100
	Masse de l'échantillon (gr)	M	100
	Lire le nouveau volume (ml)	V_2	138
	Masse volumique absolue $M / (V_2 - V_1)$	γ_{abs2}	2.63
Echantillon 3	Lire dans l'éprouvette graduée le volume (ml)	V_1	150
	Masse de l'échantillon (1000gr)	M	150
	Lire le nouveau volume (ml)	V_2	197
	Masse volumique absolue $M / (V_2 - V_1)$	γ_{abs3}	3.19
<i>Masse volumique absolue moyenne</i>	$\gamma = 2826 \text{ kg /m}^3$		



Figure IV.2 : Mesure de la masse absolue

Le gravier testé présente une masse volumique de 2826 Kg/m^3 , se classant ainsi (en termes de densité) comme un granulat «courant».

IV.2.1.3. — Mesure de la teneur en eau des graviers (NA 255)

Il est important de déterminer la teneur en eau des granulats afin de faire une correction de la quantité d'eau à incorporer dans le béton. La méthode de mesure consiste à prélever une quantité donnée de granulats mouillés, de faire évaporer cette eau et de peser la quantité de granulat sec. La différence de ces deux pesées définit la quantité d'eau évaporée, d'où la teneur en eau.

La teneur en eau, notée ω est donnée par :

$$\omega = \left(\frac{M_h - M_s}{M_s} \right) 100 \quad (\text{Eq : IV.3})$$

Avec :

M_h : poids de granulat humide (mouillé).

M_s : poids de granulat sec.



Figure .IV.3 : Détermination de la teneur en eau

Tableau .IV.3 : Teneur en eau des graviers lors des essais

Echantillon 1	Poids de l'échantillon (gr)	P_h	5000
	Poids de l'échantillon après séchage (gr)	P_s	4870
	Teneur en eau (%) $[(P_h - P_s) / P_s] \times 100$	W_1	2.66
Echantillon 2	Poids de l'échantillon (gr)	P_h	5000
	Poids de l'échantillon après séchage (gr)	P_s	4880
	Teneur en eau (%) $[(P_h - P_s) / P_s] \times 100$	W_2	2.45
Echantillon 3	Poids de l'échantillon (gr)	P_h	5000
	Poids de l'échantillon après séchage (gr)	P_s	4870
	Teneur en eau (%) $[(P_h - P_s) / P_s] \times 100$	W_3	2.66
<i>Teneur en eau moyenne</i>	$W = 2.59\%$		

2.1.4. Mesure de la propreté

La propreté désigne, d'une part, la teneur en fines argileuses ou autres particules adhérentes à la surface des grains (ce qui se vérifie sur le chantier par les traces qu'elles laissent lorsqu'on frotte les granulats entre les mains), et d'autre part, les impuretés susceptibles de nuire à la qualité du béton, parmi lesquelles on peut citer les scories, le charbon, les particules de bois, les feuilles mortes, les fragments de racine.

Principe :

Les graviers présentant des classes granulaires relativement grossières. La séparation des agrégats des éléments fins se fera par un simple lavage à l'eau.

Mode opératoire :

- Peser une masse M (environ 1000gr) de gravier et la placer dans le tamis (maille de 0,5mm),
- Laver l'échantillon jusqu'à ce que l'eau qui traverse le tamis devienne claire,
- Essuyer l'excès en eau à l'aide d'un chiffon et peser la nouvelle masse, soit M' ,

La propreté se déduit alors à partir de l'expression suivante :

$$P(\%) = \left(\frac{M - M'}{M} \right) 100 \quad (\text{Eq IV.4})$$



Figure .IV.4 : Mesure de la propreté des graviers

Tableau .IV.4 : Résultats des mesures de la propreté des graviers

Echantillon 1	Poids de l'échantillon (gr)	M	1000
	Poids de l'échantillon après lavage (gr)	M'	993
	Essai de propreté (%) $[(M - M') / M] \times 100$	P ₁	0.7
Echantillon 2	Poids de l'échantillon (gr)	M	1000
	Poids de l'échantillon après lavage (gr)	M'	995
	Essai de propreté (%) $[(M - M') / M] \times 100$	P ₂	0.5
Echantillon 3	Poids de l'échantillon (gr)	M	1000
	Poids de l'échantillon après lavage (gr)	M'	994
	Essai de propreté (%) $[(M - M') / M] \times 100$	P ₃	0.6
<i>% des fines</i>	P = 0.6%		

Le pourcentage obtenu (0.6%) d'éléments fins ne dépasse pas la limite autorisée qui est souvent fixée à 2%.

IV.2.1.5- Analyse granulométrique (NA 2607)

L'analyse granulométrique permet de déterminer la grosseur et les pourcentages pondéraux respectifs des différentes familles de grains constituant les échantillons, en utilisant une série de tamis, emboîtés les uns sur les autres, dont les dimensions des ouvertures sont décroissantes du haut vers le bas. Le matériau étudié est placé en partie supérieure des tamis et les classements des grains s'obtiennent par vibration de la colonne de tamis.

La procédure utilisée est schématisée à travers la série des photos suivantes :



Figure .IV.5 : Analyse granulométrique.

Tableau .IV.5 : Analyse granulométrique du gravier 5/15

Tamis en mm	Refus partiels en g	Refus cumulés en g	Refus cumulés en %	Tamisât cumulés en %
14	335.07	335.07	16.75	83.25
10	897.36	1232.43	61.62	38.38
8	411.78	1644.21	82.21	17.79
6.3	156.6	1800.81	90.04	9.96
5	116.6	1917.66	95.88	4.12
4	34.92	1952.58	97.63	2.37
2	16.6	1969.18	98.46	1.54
1	2.3	1971.48	98.57	1.43
0.063	11.9	1983.38	99.17	0.83
Fines	16.6	1999.98	99.99	0.01

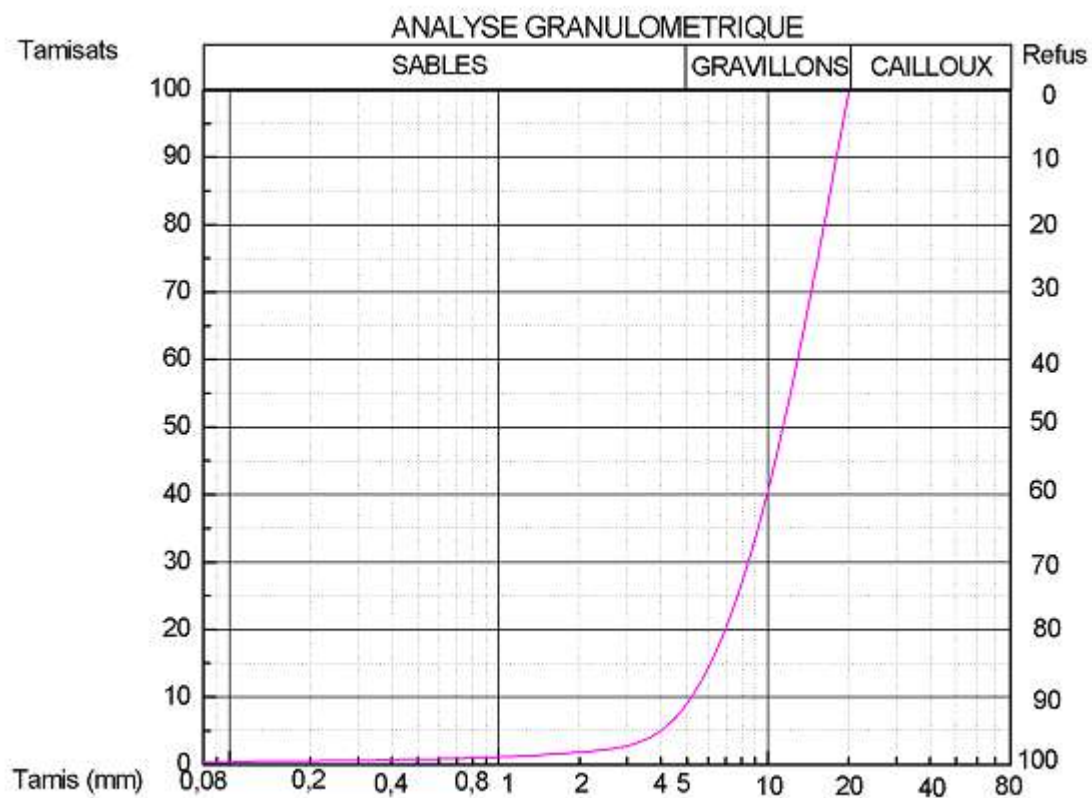


Figure .IV.6 : Allure de la courbe granulométrique du gravier

IV.2. 2. Caractérisation du sable

Le sable utilisé est un sable naturel issu de la région de la Wilaya de Tebessa.

IV.2.2.1 —Mesure de la masse volumique apparente du sable (NA 451)

La procédure utilisée pour la détermination de cette grandeur est présentée à travers la figure suivante :



Figure .IV.7 : Mesure de la masse volumique apparente du sable

Tableau .IV.6 : Résultats de la mesure apparente du sable

Echantillon 1	Volume d'un récipient connu (ml)	V	600
	poids de sable contenu dans le récipient (gr)	M	962.85
	Masse volumique absolue (gr/ml) M/V	M_{V1}	1.605
Echantillon 2	Volume d'un récipient connu (ml)	V	700
	poids de sable contenu dans le récipient (gr)	M	1102.96
	Masse volumique absolue (gr/ml) M/V	M_{V2}	1.575
Echantillon 3	Volume d'un récipient connu	V	800
	poids de sable contenu dans le récipient	M	1257.71
	Masse volumique absolue (gr/ml) M/V	M_{V3}	1.572
<i>Masse volumique apparente</i>	$M_v=1584\text{kg/m}^3$		

La même remarque faite pour le gravier s'applique également pour le cas du sable.

IV.2.2.2 - Masse volumique absolue (NA 451)



Figure .IV.7 : Mesure de la masse volumique absolue du sable

Tableau.IV.7 : Résultats de la mesure absolue du sable

Echantillon 1	Lire dans l'éprouvette graduée le volume (ml)	VI	80
	Masse de l'échantillon (gr)	M	80
	Lire le nouveau volume (ml)	V2	112
	Masse volumique absolue $M / (V2-V1)$	γ_{abs1}	2.5
Echantillon 2	Lire dans l'éprouvette graduée le volume (ml)	VI	100
	Masse de l'échantillon (gr)	M	100
	Lire le nouveau volume (ml)	V2	140
Echantillon 2	Masse volumique absolue $M / (V2-V1)$	γ_{abs2}	2.5
Echantillon 3	Lire dans l'éprouvette graduée le volume (ml)	VI	150
	Masse de l'échantillon (gr)	M	150
	Lire le nouveau volume (ml)	V2	210
Echantillon 3	Masse volumique absolue $M / (V2-V1)$	γ_{abs3}	2.5
<i>Masse volumique absolue moyenne</i>	$\gamma = 2500\text{kg/m}^3$		

Le sable utilisé présente une densité de 2.50, valeur courante pour les sables régionaux.

IV.2.2.3 - Teneur en eau (NA 451)

La méthode de mesure consiste à prélever une quantité donnée de granulats mouillés, de faire évaporer cette eau et de peser la quantité de granulat sec. La différence de ces deux pesées définit la quantité d'eau évaporée, d'où la teneur en eau.

La teneur en eau, notée ω est donnée par :

$$\omega = \left(\frac{M_h - M_s}{M_s} \right) 100 \quad (\text{Eq IV.3})$$

Avec :

M_h : poids de granulat humide (mouillé).

M_s : poids de granulat sec.



Figure .IV.8 : Détermination de la teneur en eau

Tableau .IV.8 : Teneur en eau des graviers lors des essais

Echantillon 1	Poids de l'échantillon (gr)	P_h	5000
	Poids de l'échantillon après séchage (gr)	P_s	4255
	Teneur en eau (%) $[(P_h - P_s) / P_s] \times 100$	W_1	17.5
Echantillon 2	Poids de l'échantillon (gr)	P_h	5000
	Poids de l'échantillon après séchage (gr)	P_s	4310
	Teneur en eau (%) $[(P_h - P_s) / P_s] \times 100$	W_2	16
Echantillon 3	Poids de l'échantillon (gr)	P_h	5000
	Poids de l'échantillon après séchage (gr)	P_s	4350
	Teneur en eau (%) $[(P_h - P_s) / P_s] \times 100$	W_3	14.9
<i>Teneur en eau moyenne</i>	$W = 16.13\%$		

IV.2.2.4. Analyse granulométrique (NA 2607)

Tableau .IV.9 : Analyse granulométrique du sable

Tamis en mm	Refus partiels en g	Refus cumulés en g	Refus cumulés en %	Tamisât cumulés en %
5	47.94	47.49	2.37	97.63
4	16.97	64.91	3.24	96.76
2	93.55	158.46	7.92	92.08
1	199.45	357.91	17.89	82.11
0.5	670.75	1028.66	51.43	48.57
0.250	711.02	1739.68	86.98	13.02
0.125	154.09	1893.77	94.69	5.31
0.063	57.32	1951.09	97.55	2.45
fines	44.63	1995.72	99.87	0.13

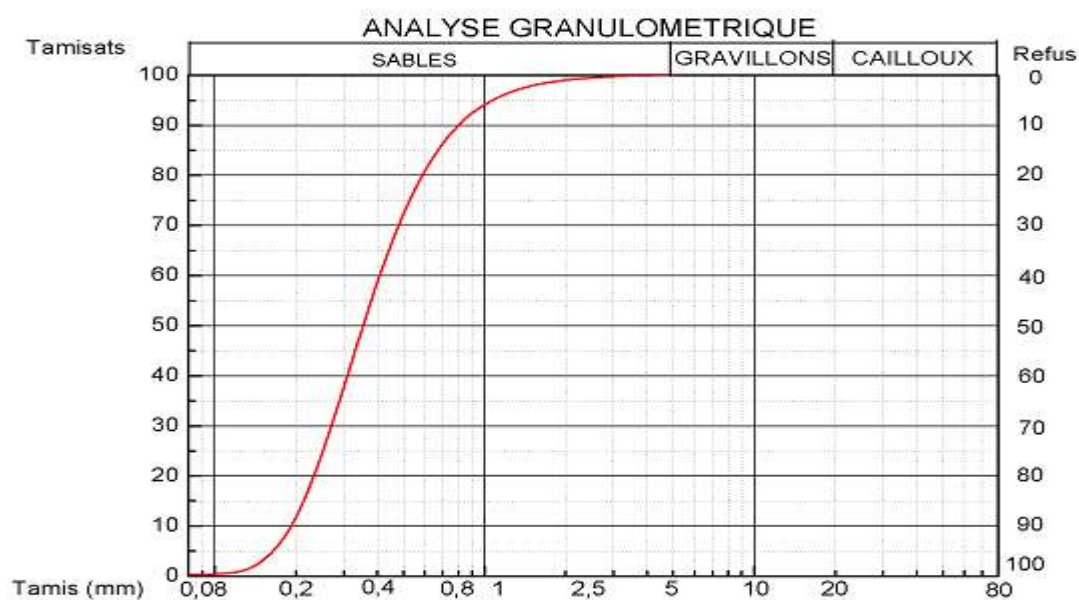


Figure .IV.9 : Courbes granulométrique du sable

On peut remarquer à la lecture de la courbe granulométrique, que le sable utilisé est un sable fin.

Récapitulatif des résultats

L'ensemble des résultats des essais entrepris sur le sable est résumé dans le tableau suivant :

Tableau .IV.10 : Résultats des essais sur le sable.

Essais	Résultats des mesures
Masse volumique apparente	$M_v = 1590 \text{ kg/m}^3$
Masse volumique absolue	$\gamma = 2500 \text{ kg /m}^3$
Teneur en eau	$W = 16.13\%$
Analyse granulométrique	figure IV.6

L'ensemble des résultats, à l'exception de l'étendue granulaire, montre que le sable utilisé répond aux différentes normes utilisées.

IV.2. 3. Ciment

Le ciment de base utilisé dans notre travail, est un ciment portland composé CPJ de classe 42.5, qui provient de la cimenterie de H'djar Essoud –Skikda-

IV.2.3. 1.Caractéristiques physiques

Les différentes caractéristiques sont regroupées dans le tableau suivant.

Tableau .IV.11 : Caractéristiques physiques du ciment utilisé

Caractéristiques	Ciment (CPJ, classe 42.5)
Masse volumique absolue (g/cm^3)	3.1
Masse volumique apparente (g/cm^3)	1.12
Surface spécifique (cm^2/g)	3702

IV.2. 4. Les additions

Les fillers

Des fillers calcaire, de provenance ENG d'El Khroub, dont les principales caractéristiques

Tableau IV.12 : Caractéristiques physique et chimique des fillers

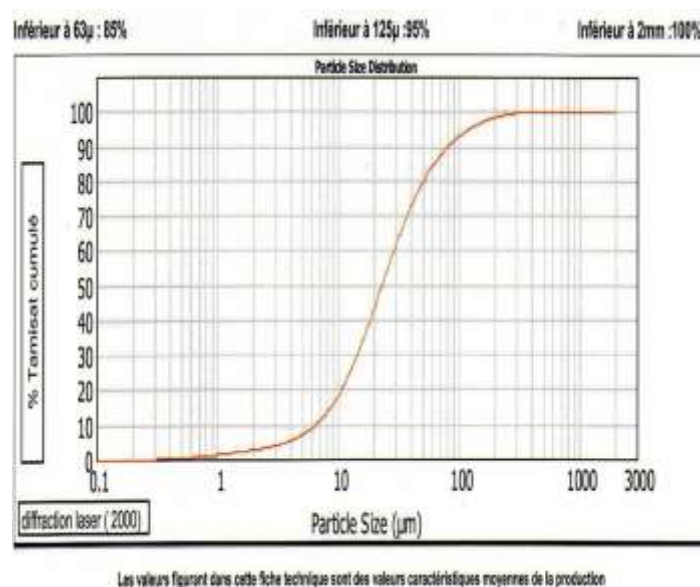
Caractéristiques chimique

CaCO ₃	98%
CaO	56.03%
SiO ₂	0.04%
Na ₂ O	0.05%
MgO	0.17%
Al ₂ O ₃	0.03%
Fe ₂ O ₃	0.02%
K ₂ O	0.02%
P ₂ O ₅	0.008%
TiO ₂	0.009%
chlorure	0.0033%
SO ₃ (soluble dans l'eau)	0.0021%
SO ₃ (soluble dans l'acide)	0.19%
soufre totale	0.0137%
residu insoluble	1.15%
solubilité dans l'eau (Ws)	0.24%
perte au feu	43%
Ph	9

Caractéristiques physique

Masse volumique réelle	2700 Kg/M ³
Masse volumique en vrac	1100 Kg/M ³
Valeur de bleu de méthylène MB _f	1.67 gr/Kg

Répartition granulométrique



IV.2. 5. Eau de gâchage

L'eau de gâchage utilisé est celle du LGCH de l'université de Guelma.

IV.2. 6. Adjuvant (Superplastifiant)

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..... $1,20 \pm 0,01$
- 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

IV.3. Formulation des bétons autoplaçants

Cette composition de départ se présente comme suit (pour 1 m³) :

- ciment = 400kg,
- fines calcaire = 80kg,
- sable = 765kg,
- gravier = 865kg,
- adjuvant = 1 ; 1.5, 2% de la masse des liants),
- eau de gâchage 200kg,

IV.3. 1. Formulations retenues

Tableau .IV.13 : Compositions et paramètres de formulation des bétons d'étude

Composition (kg/m ³) et paramètres de formulation	Désignation des bétons			
	BAP ₁	BAP ₂	BAP ₃	BAP ₄
Ciment	4	6	4	6
Fillers calcaires	0.8	1.2	0.8	1.2
Superplastifiant	0.4	0.6	0.8	1.2
Sable	7.65	11.475	7.65	11.475
Gravillons 4/8	8.65	12.975	8.65	12.975
Eau efficace	1.96	2.94	1.96	2.94

IV.3. 2. Fabrication et cure

Fabrication

Les bétons autoplaçants sont très sensibles à la teneur en eau. Les matériaux de base sont à la même température que le local de fabrication. La teneur en eau des gravillons et du sable est mesurée afin d'ajuster la quantité d'eau à introduire dans le malaxeur. Les formulations sont réalisées dans un malaxeur à axe vertical et mouvement planétaire dont la contenance est de 180 litres, suivant la norme NFP18-404

La fabrication se déroule comme suit :

- Pré mouillage du malaxeur pour limiter une absorption supplémentaire de l'eau de gâchage par les parois du malaxeur,
- Introduction des constituants solides en commençant par les graviers, le sable, puis les fillers calcaires et pour finir le ciment.
- Malaxage puis introduction de l'eau et des adjuvants conformément à la procédure indiquée à la (Figure IV.10).

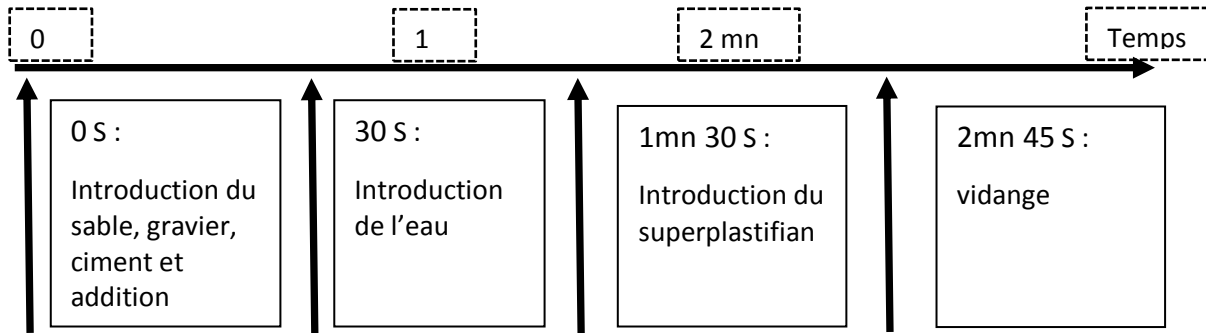


Figure .IV.10 : Les phases de malaxage.

IV.3. 3.Essais de caractérisation des BAP

a. Essai d'étalement

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 .IV.11). 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. Les valeurs d'étalement sont habituellement fixées entre 60 et 75 cm.

Un exemple de mesure de l'étalement au cône d'Abram's est illustré à travers la série de photos suivantes :



Figure .IV.11 : Mesure de l'étalement du BAP

Les résultats obtenus pour les quatre BAP utilisés sont présentés dans le tableau IV.14

Tableau .IV.14 : L'étalement des BAP.

Désignation du béton	BAP 1	BAP 2	BAP 3	BAP 4	Valeurs cibles
Etalement (cm)	/	38	54.5	64.5	entre 60 et 75cm

L'étalement spécifié était respectivement compris entre 60 et 75cm. Le tableau IV.14 montre que cette exigence du cahier des charges a été convenablement remplie par les différents bétons.

b. Essai de la boîte en L

La boîte en L permet de tester la mobilité du béton en milieu confiné et de vérifier que la mise en place du béton ne sera pas contrariée par des phénomènes de blocage.

Principe : 13 litres de béton sont mis dans la partie verticale puis on laisse le béton se reposer pendant 1 minute. La trappe est ensuite levée et on laisse le béton s'écouler dans la partie horizontale de la boîte à travers le ferrailage. A la fin de l'écoulement, on mesure H_1 et H_2 et le résultat est exprimé en termes de taux de remplissage (H_2/H_1). Cet essai permet d'évaluer ainsi l'écoulement en milieu confiné, le risque de blocage et la ségrégation dynamique.

Les figures suivantes montrent la procédure entreprise pour la mesure des hauteurs H_1 et H_2 de la boîte en L pour le BAP₄.



Figure .IV.12 : Mesure de la fluidité à la boîte en L pour le BAP.

Tableau .IV.15 : Récapitulatif des résultats des essais à la boîte en L.

Désignation du béton	H2 (cm)	H1 (cm)	(H2/H1)	Valeurs cibles
BAP 4	7	8.5	0.82	Sup à 0,8

c. Essai de stabilité au tamis

Cet essai vise à apprécier le risque de ségrégation des BAP. Il complète les essais permettant d'apprécier la mobilité, en milieu confiné ou non, en caractérisant la stabilité.

Principe : On dresse la courbe des valeurs d'étalement obtenues en fonction de différents dosages en eau et on détermine une plage pour laquelle la formule est satisfaisante vis-à-vis de la ségrégation et du ressuage.

- peser le fond avec la laitance. Nous avons $P_{laitance} = P_{fond+laitance} - P_{fond}$
- calculer le pourcentage en poids de laitance par rapport au poids de l'échantillon selon l'expression suivante :

$$\pi = \left(\frac{P_{laitance}}{P_{échantillon}} \right) 100\% \quad (\text{Eq IV.5})$$

En fonction du % de laitance, on pourra déduire la nature de la stabilité conformément au tableau suivant :

Tableau .IV.16 : Critères d'acceptabilité pour l'essai de stabilité au tamis.

% de laitance	Nature de la stabilité
$0\% \leq \% P_{laitance} \leq 15\%$	stabilité satisfaisante
$15\% < \% P_{laitance} \leq 30\%$	stabilité critique (essai de ségrégation à réaliser in situ)
$\% P_{laitance} > 30\%$	stabilité très mauvaise (ségrégation systématique- béton inutilisable)

La démarche adoptée pour mesurer la stabilité est représentée à travers les photos suivantes :



Figure .IV.13 : Photos illustrant l'essai de stabilité au tamis.

Les résultats sont reproduits dans le tableau suivant :

Tableau .IV.17 : Récapitulatif des résultats des essais de tamis

Désignation du béton	BAP ₁	BAP ₂	BAP ₃	BAP ₄	Valeur cible
Stabilité au tamis (%)	0.2	57	16.6	15	$\pi \leq 15\%$

Le tableau suivant récapitule les propriétés des compositions retenues et qui font faire l'objet d'une caractérisation mécanique.

Tableau .IV.18 : Formulations retenues de BAP.

Composition kg /m ³ et paramètres de formulation	Désignation de béton
Sable	7.65
Gravillons	8.65
Ciment CPJ-CEM IIA 42,5	4
Fillers calcaires	0.8
Eau efficace	1.96
superplastifiant	0.8

IV.4.Essais sur béton durci

IV.4.1. Essai de compression

Les échantillons utilisés pour déterminer la résistance mécanique en compression des différents bétons étudiés sont des éprouvettes cubiques de dimension 10x10x10cm qui ont été conservées après démoulage dans un milieu à 20°C et 95 ± 5% d'humidité relative jusqu'à l'échéance déterminée (14 et 28 jours). La presse utilisée est d'une capacité maximale de 2000 kN, asservie en force (figure IV.14). La résistance en compression a été évaluée suivant la norme NF P 18-406 : les essais ont été réalisés sur l'échelle de force la mieux appropriée (600 ou 1500 kN), avec une vitesse de chargement de 0,5 MPa/s.



Figure .IV.14 : Essai de compression

Les valeurs des résistances à la compression sont données dans le tableau IV.19. Les valeurs correspondent à ce qui était attendu à 28j. On remarque que la résistance augmente avec la diminution du rapport addition/ciment.

Tableau .IV.19 : Résistance à la compression à 7j, 14j et 28j des BAP (MPa).

	7J	14J	28J
BAP 1	15.92	19,54	23.77
BAP 2	15.41	18,78	24,44
BAP 3	16,24	20,54	25,76

On remarque, dans le tableau IV.19, que les trois éprouvettes atteignent à 7 jours entre 46 et 47% pour le BAP1, BAP2, et plus de 75% pour le BAP3 de leur résistance à 28 jours. L'utilisation de fillers dans une formulation de béton génère une accélération de sa résistance mécanique aux jeunes âges.

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.

IV.4.2 Essai de traction par flexion

Pour l'étude de la résistance de traction par flexion, on a utilisé des éprouvettes prismatiques de dimension (7x7x28) cm qui ont subies le même mode de conservation que les éprouvettes cylindriques.



Figure .IV.15 : Dispositif de l'essai de traction par flexion

Les résultats sont regroupés dans le tableau 28 suivant

Tableau .IV.20 : Résistance à la traction par flexion (Mpa) des BAP à 7 et 28j.

	7J	28J
BAP 1	3,6	4.7

Le béton étudié atteint plus de 80% de la résistance à la traction à l'âge de 7 jours. Les résistances augmentent proportionnellement avec le rapport C/L. La diminution du rapport addition / ciment (a/c) n'a pas un grand effet sur la variation de la résistance en traction.

IV.4.Conclusion

Ce chapitre a pour objectif de caractériser les bétons autobloquants à l'état frais et durci, après avoir identifié et caractérisé tous les matériaux de base utilisés.

Les compositions de BAP remplissent correctement les spécifications requises à l'état frais pour de tels bétons (étalement, ségrégation dynamique et statique, stabilité).

Une caractérisation à l'état durci est réalisée en effectuant des essais en compression, traction par flexion, l'essentiel constat est l'aboutissement aux résistances à la compression ; à l'âge de 28 jours ; visées au début de la formulation.

Chapitre V :

COMPORTEMENT

THERMOMECHANIQUE DES

BAP

V.1. Introduction

Dans la présente recherche on s'intéresse à l'influence de la température sur le comportement des BAP. Le programme s'articule en trois parties qui suivent la "vie" du béton. La première est consacrée au jeune âge à l'influence d'une cure à des températures élevées sur les propriétés mécaniques des BAP, la deuxième traite l'évolution des variations dimensionnelles et pondérales et l'effet d'un choc thermique à 28 jours sur ces variations.

Dans notre étude, tous les paramètres ont été mesurés sur des séries de trois éprouvettes, pour analyser de manière statistique les évolutions. Nous présenterons dans la suite principalement des tendances moyennes.

V.2. Rappel des matériaux élaborés

Dans ce travail trois formulations de BAP sont étudiées. On désigne par BAP₄ un béton autoplaçant avec un rapport C/L égale à 0.83. Tous les bétons autoplaçants contiennent de fillers calcaires de dosage différent. Les fillers calcaires jouent dans le béton un double rôle. A l'état frais, limiter les risques de ressuage et de ségrégation. Au cours de durcissement, éviter des chaleurs d'hydratation trop grandes. Pour assurer une bonne 'défloculation' des grains de ciment et fillers, les substances fluidifiantes ont été utilisées. Ceci a permis notamment une réduction de la quantité de l'eau dans la formulation en maintenant la maniabilité du béton. Ainsi le rapport eau/liant équivalent noté (E/L) a été maintenu le plus proche pour les trois formulations de béton. Les matériaux utilisés sont identiques pour les trois compositions étudiées, ainsi que le dosage des différents granulats.

Tableau .V.1 : Formulations retenues avec leur caractérisation.

Composition kg /m ³ et paramètres de formulation	Désignation de béton
Sable	765
Gravillons	865
Ciment CPJ-CEM IIA 42,5	400
Fillers calcaires	80
Eau efficace	196
superplastifiant	80
C/L	0.83
E/L	0.41
E/C	0.49
Etalement	64.5
R _c (MPa)	32.2

V.3.Présentation des programmes expérimentaux

V.3.1. Traitement thermique

Du fait d'une forte demande de production, l'industrie de construction a souvent recours à l'utilisation de la température (traitement). Il est bien reconnu que la cure adéquate de béton est très importante non seulement d'aboutir à la résistance de compression désirée, mais aussi d'obtenir un béton durable.

Le traitement thermique permet une accélération des réactions d'hydratation du béton par la chaleur, appelée aussi thermo-maturation, qui constitue la plupart du temps, le moyen le plus efficace pour obtenir la résistance nécessaire au démoulage en quelques heures. Depuis la découverte des BAP, de nombreuses recherches ont été réalisées, notamment sur sa formulation ainsi que ses propriétés mécaniques à température ambiante, et il a bénéficié d'une large utilisation dans l'industrie de construction. Cependant, peu de travaux sont effectués sur l'influence d'un traitement thermique sur son comportement mécanique. Des conditions météorologiques sèches chaudes causent normalement des problèmes de mélanger, de placer et de cure de béton telles que ses propriétés et de maintenance peuvent être altérées.

V.3.1.1 Préparation des éprouvettes

La mise en place a été effectuée dans les différents moules destinés aux échantillons correspondants aux essais programmés. Donc les diverses formes d'échantillons coulées selon les essais envisagés étaient les suivantes : Des éprouvettes cubiques de dimension 10x10 x 10cm pour la détermination des valeurs de résistance en compression. Et des éprouvettes prismatiques (7x7x28) cm pour des essais de la traction par flexion.

V.3.1.2 Conditions d'étude

Notre étude présente trois paramètres variables : la température et le paramètre de composition le rapport C/L. La température est fixée à trois valeurs cibles : 20°C, 100°C et 200°C. Ce choix permet de mesurer l'influence de la température sur le comportement des bétons, tout en respectant les ordres de grandeur des températures de fonctionnement pour les bétons dans le contexte de cette étude. Les éprouvettes ont subi un traitement thermique dans une étuve de capacité 150 litre et une température maximale de 200°C. L'étuve présente une valeur d'humidité relative inférieure à 10% et autorise à considérer l'échantillon obtenu comme étant à l'état sec.

V.3.1.3 Disposition dans le four

Les éprouvettes sont mises dans l'étuve d'une manière à assurer une homogénéité de chauffage. Dès le démoulage, les éprouvettes sont placées dans l'étuve pendant une période de cure accélérée de 3h.



Figure .V.1 : La disposition des éprouvettes dans l'étuve.

V.3.1.4 Vitesse en montée en température

L'éprouvette est chauffée à une vitesse de montée en température constante. Selon les recommandations de la Rilem 2000 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 expérience.

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 $1^{\circ}\text{C}/\text{min}$ pour les phases de chauffage et refroidissement afin d'éviter les risques d'éclatement des bétons chauffés. La vitesse de chauffage est de $1^{\circ}\text{C}/\text{mn}$, le chauffage à vitesse lente permet de mieux caractériser le matériau (Recommandation Rilem).

Les éprouvettes sont chauffées suivant la courbe V.2.

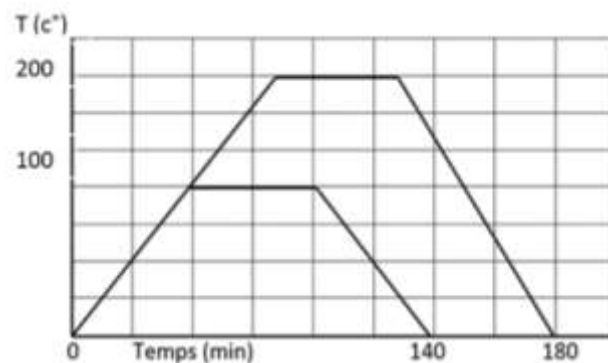


Figure .V.2 : Courbe de chauffage (vitesse de chauffage $1^{\circ}\text{C}/\text{mn}$)

V.3.2 Variation dimensionnelle et pondérale

Les BAP sont formulés différemment des bétons ordinaires : ils contiennent moins de gravillons, plus d'éléments fins et de fluidifiants. C'est bien sûr ce qui leur donne un caractère autoplaçant. Mais il est probable aussi que cela entraîne un comportement mécanique différent par rapport aux bétons ordinaires. Même en l'absence de chargement extérieur, un élément en béton voit son volume diminuer au cours du temps. Cette contraction, plus connue sous le nom de retrait, a notamment pour causes le séchage et l'hydratation du ciment. La prise constitue la transition entre le moment où le béton ne présente pas de cohésion et celui où il commence à devenir résistant. Avant la prise, les déformations libres du béton sont dues à la gravité, aux réactions d'hydratation et aux échanges thermiques avec le milieu extérieur.

A partir du début de prise, le développement de la formation des hydrates constitue un squelette devenant de plus en plus dense et résistant. La contraction, due à la différence de volumes entre produits et réactifs, va donc être progressivement restreinte.

Cependant, l'eau ne peut compenser entièrement cette diminution de volume et se transforme alors en vapeur à l'intérieur des pores. Ces pores jouent le rôle d'interface liquide/vapeur et les tensions capillaires engendrées par ce changement de phase provoquent une compression du squelette rigide : ceci constitue une réduction de volume supplémentaire. Il s'agit du retrait d'auto dessiccation.

Après la prise, les déformations du béton sont également d'origine hydrique (retrait endogène dû à l'auto-dessiccation) ou d'origine thermique (production de chaleur due à l'hydratation et échange thermique avec l'extérieur). Le retrait que subit alors le béton durci, ou retrait total, concerne la masse entière des éprouvettes et des ouvrages.

Le retrait hydrique est susceptible de différencier au mieux les BAP des bétons vibrés étant donné les compositions spécifiques avec lesquelles ils sont formulés. En effet, la quantité de pâte élevée des BAP les rend susceptibles d'être plus déformables (rétractables, dans le cas présent). Cependant, les données de la littérature dans ce domaine ont tendance à se contredire principalement parce que les formulations comparées sont bien différentes, que ce soit en termes de rapport eau/ciment (E/C), ou de squelette granulaire, volume de pâte, etc.

V.3.2.1 Moules et éprouvettes utilisés

La mesure du retrait s'effectue sur éprouvette prismatique, de dimensions 10x10x10 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 10x10x10cm sont donc munies à leurs deux extrémités de plots. Tous les moules étaient induits d'huile à l'avance.

V.3.2.2 Essais de Retrait et de perte en poids

Il s'agit de suivre l'évolution des variations dimensionnelles et pondérales des éprouvettes avant et après un choc thermique (de 100 et 200°C) et d'évaluer l'endurance à la chaleur des bétons autoplaçants. 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'épreuve à des élévations de température). 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 30 jours après le démoulage.

V.3.3 Propriétés mécaniques résiduelles à haute température

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. Les résultats issus de différentes investigations sur le comportement du béton exposé à des hautes températures, interprètent différemment les évolutions de ces paramètres.

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

Cette partie de l'étude expérimentale présente l'évolution des propriétés mécaniques du béton avec l'augmentation de la température. Il existe différentes méthodes pour étudier le comportement à haute température des bétons. Ces méthodes sont généralement au nombre de 4. On peut réaliser des essais à chaud en charge, à chaud non chargé, pendant ou après refroidissement (essais résiduels). C'est pour cela qu'il est nécessaire de prendre en compte le régime d'échauffement et de refroidissement, la présence de la charge et son application ainsi que l'état des éprouvettes au moment de la réalisation des essais.

Les deux premières méthodes sont utilisées pour caractériser le matériau à chaud (pendant le traitement thermique), tandis que la troisième sert à déterminer les propriétés mécaniques après refroidissement. Dans le cas d'un essai chargé, la charge représente 20 à 40% de la charge ultime en compression du matériau. Cette charge est appliquée pendant le chauffage.

Le traitement thermique est continu jusqu'à atteindre la température cible. Puis, on augmente la charge jusqu'à la rupture du béton. Par contre, les essais réalisés après refroidissement indiquent les valeurs « post incendie », importantes du point de vue d'étude des propriétés résiduelles du matériau testé. Les essais après refroidissement sont aussi nommés « essais résiduels » (résistance résiduelle).

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. Mais, il existe une variante des essais après refroidissement : il s'agit des essais réalisés après un certain temps après le refroidissement. Ces essais sont menés après un temps défini qui suit le cycle de chauffe.

Ce phénomène d'autoréparation des bétons peut s'expliquer par la réhydratation des grains de ciment non hydratés présents dans les bétons caractérisés par un rapport E/C très faible.

Dans notre étude on va s'intéresser à l'étude de la capacité de ce matériau à résister lors de haute température, donc aux essais résiduels. Ils sont effectués après le cycle d'échauffement jusqu'à la température d'essais et refroidissement jusqu'à la température ambiante.

V.3.3.1 Cure

Pour l'étude des propriétés mécaniques des bétons, des éprouvettes cubiques de dimension 10x10x10cm sont utilisées pour étudier le BAP à haute température.

1. Toutes les éprouvettes sont laissées dans leur moule, pendant 24 heures (± 4 heures), après réalisation, à une température de $20 \pm 2^\circ\text{C}$:
2. Puis, conservation dans des sacs plastiques
3. Les éprouvettes sont âgées 30 jours au moment des essais mécaniques,

V.3.3.2 Cycle de chauffage

Nous appliquons deux cycles de chauffage-refroidissement de 20°C à différentes températures de palier : 100 et 200°C . La première phase du cycle se compose d'une rampe de montée en température de vitesse égale à $1^\circ\text{C}/\text{min}$. La seconde est un palier de température dans le four durant trois heures. La dernière phase est une rampe de refroidissement jusqu'à la température ambiante.

V.3.3.3 Mesure de la perte de masse

La perte de masse est un indicateur important des dégradations au sein du matériau, et notamment de la perte en eau. La masse des éprouvettes est mesurée avant et après chaque cycle de chauffage-refroidissement. Cette partie d'étude a eu pour but d'évaluer la quantité de l'eau libre présente dans les matériaux testés. Elle permet également d'observer la cinétique du processus de séchage et de déshydratation des BAP.

De la fabrication au traitement thermique, les éprouvettes subissent diverses manipulations et divers phénomènes qui se produisent lors de la prise et durant le gain de résistance. Pour rendre compte de ces différents phénomènes, les éprouvettes sont pesées à différents temps : à l'issue du coulage pour calculer la masse volumique réelle, puis au démoulage des éprouvettes, avant de réaliser le traitement thermique et pour finir après 24 heures l'extraction de à la sortie du four. Les mesures permettent de renseigner, en complément de l'observation des éprouvettes, sur la perte d'eau du béton testé. Cela est également mis en corrélation avec les éventuels écaillages et éclatements constatés lors des cycles de chauffage-refroidissement

V.3.3.4 Essais mécaniques

a- Essai de compression

La résistance à la compression est la propriété la plus utilisée dans le dimensionnement et la conception des ouvrages en béton. C'est pour cette raison que l'essai de compression uniaxial est le plus étudié.

Après le traitement thermique, les éprouvettes sont conditionnées pour réaliser les essais mécaniques. Pour les essais de résistance à la compression, les éprouvettes sont surfacées avec du soufre qui est préalablement chauffé jusqu'à sa température de liquéfaction. Puis, une fois les éprouvettes surfacées, il faut attendre au moins 2 heures pour réaliser l'essai mécanique. Ce délai sert au durcissement du soufre. Or, la recommandation émise par la Rilem stipule que les essais doivent être réalisés dans les deux heures suivant la sortie des éprouvettes du four. Pour cela, les éprouvettes sont réemballées dans des sacs plastiques étanches pour limiter au maximum les échanges hydriques entre l'éprouvette et l'air ambiant. Au bout de ces 24 heures, nous pouvons procéder aux essais proprement dits.



Figure .V.3 : Presse hydraulique utilisée pour essai de compression

b- Essai de flexion :

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.

Cet essai est réalisé sur 1 éprouvette prismatique 10x10x40 cm après chauffé. Cet essai est assez simple à réaliser et permet de déterminer la résistance en traction par flexion 4 points. Les conditions de conservation des éprouvettes à la sortie du four sont les mêmes que celles citées précédemment.

V.4 Résultats et discussions

Cette étude s'inscrit dans le cadre de l'étude de la durabilité des ouvrages en béton. Les études expérimentales montrent l'influence importante de la température sur le comportement de béton et notamment le BAP. Les objectifs de la présente recherche concernent l'étude des propriétés mécaniques des bétons sous l'effet à haute température.

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.

V.4.1 Résistance à la compression

Tableau .V.2 : Résistance en compression initiale et résiduelle des bétons étudiés

	BAP 1	BAP 2	BAP 3
Résistance en compression initiale à 20°C (Mpa)	19,54 100%	18.78 100%	20.53 100%
Résistance en compression résiduelle à 100°C (Mpa)	16.4 83%	15.88 84%	17.94 87%
Résistance en compression résiduelle à 200°C (Mpa)	13.52 68%	12.35 65%	14.65 70%

Le tableau : V.2 présente les résistances en compression obtenues à 20°C et après les différents traitements thermiques pour l'ensemble des bétons testés.

Le cycle de chauffage-refroidissement retenu a une influence sur les propriétés mécaniques des bétons : une baisse de résistance allant 17 à 21% pour la température de 100°C, et une perte de performances d'environ 30 à 35,6% pour la température de 200°C.

Les valeurs de la résistance résiduelle en compression sont regroupées sur la (Figure V.4). On peut distinguer deux phases successives dans l'évolution de la résistance en compression.

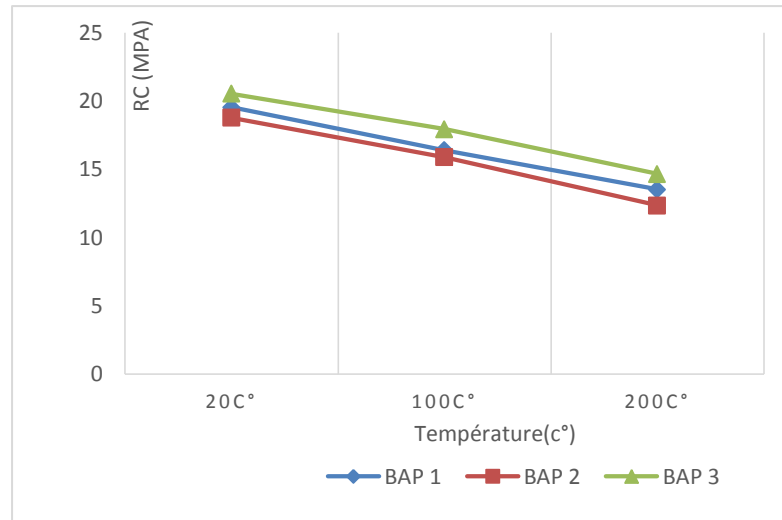


Figure V.4 : Evolution de la résistance de compression en fonction de la température.

La première phase, entre 20 °C et 100 °C nous notons une diminution des résistances d'environ 13 à 17%. Cet affaiblissement peut s'expliquer par la dilatation thermique de l'eau.

Puis, en deuxième phase entre 100°C et 200°C, nous observons une diminution des valeurs de la résistance par rapport à la valeur plus faible à 100°C. Ceci peut être expliqué par l'augmentation du processus de séchage.

V.4.2 Résistance résiduelle en traction par flexion

Les résultats sont présentés dans le tableau suivant V.3 :

Tableau .V.3 : Résistance initiale et résiduelle en traction par flexion des bétons étudiés.

$R_t / ^\circ\text{C}$	BAP
Résistance en traction par flexion initiale (Mpa)	4.70 100%
Résistance en traction par flexion résiduelle à 100°C (Mpa)	3.38 71,93%
Résistance en traction par flexion résiduelle à 200°C (Mpa)	3.24 68,87%

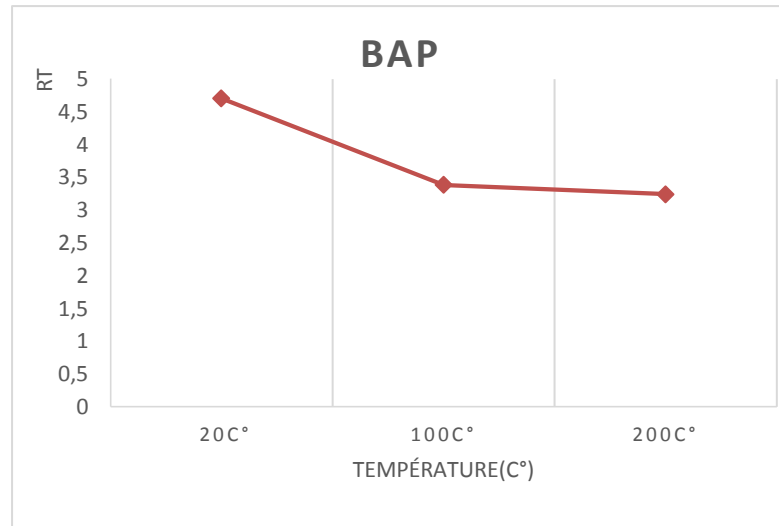


Figure .V.5 : Résistance de traction par flexion en fonction de la température

Contrairement aux résistances à la compression, on observe une diminution des résistances à la flexion des BAP testés. Ceci est en accord avec les résultats de [78], qui montre par des essais de micro-dureté sur des bétons ordinaires que l'auréole de transition est affectée par le chauffage : elle est fragilisée par l'apparition de fissures. De plus, l'auréole est affectée par l'incompatibilité pâte-granulat. Le degré de fissuration a une influence plus importante sur la résistance en traction qu'en compression.

V.4.3 Perte de masse

Cet essai permet de quantifier l'eau libre et liée présentes avant et après chauffage dans une éprouvette de béton.

Tableau .V.4 : Perte de masse

Température (C°)	Masse de BAP 1	Masse de BAP 2
20°	2.370kg 100%	2.350 kg 100%
100°	2.340 kg 98.73%	2.315 kg 98.51%
200°	2.270 kg 95.78%	2.250 kg 95.74%

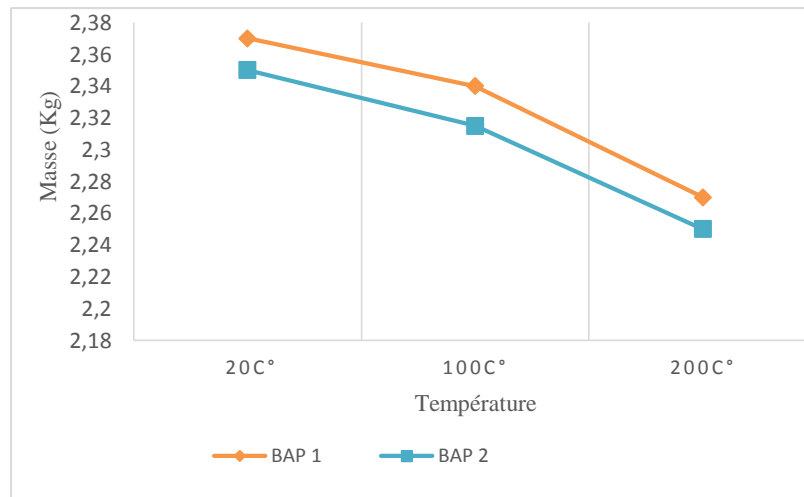


Figure .V.6 : Evolutions de poids en fonction de la température

On remarque sur la figure V.6, que la perte de masse nécessaire augmente avec l'élévation de la température.

Or, dans le cas de petites éprouvettes, un traitement thermique à 150°C permet d'avoir accès plus rapidement à toute l'eau libre présente dans l'éprouvette, ainsi qu'à une partie de l'eau liée.

La figure V.7, présente les variations de perte de masse sur des éprouvettes 10x10x10 cm³ à l'issue des cycles de chauffage refroidissement des bétons étudiés. On observe que les pertes de masse en fonction de la température sont très proches pour les deux bétons étudiés. Entre la température ambiante et 100°C, la variation de masse est assez faible.

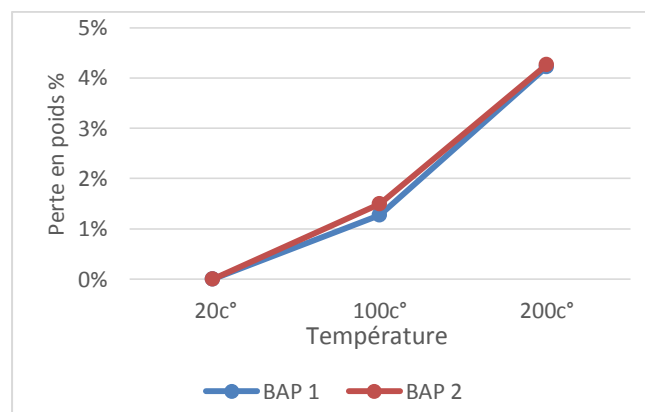


Figure .V.7 : Variation de la perte de masse en fonction de la température

La perte de masse dans ce domaine correspond à un départ de l'eau libre contenue dans les pores. Entre 100 et 200°C, on observe pour tous les bétons une forte perte de masse correspondant environ à 4.26% de la masse initiale. Sachant que la quantité d'eau totale dans les bétons est de 8.7 à 9.6% de la masse de béton, on peut constater que l'essentiel de l'eau contenue dans chaque béton s'échappe au cours du chauffage au-dessus 100 °C.

V.5. Conclusion

Ce chapitre avait pour objectif de présenter les trois programmes expérimentaux à effectuer lors de cette recherche. Un rappel des bétons avec leurs caractéristiques à l'état frais qu'à l'état durci est montré. Pour chaque programme on a exposé les différentes éprouvettes utilisées, le mode de conservation, le mode de traitement thermique, une description des essais à réaliser. Dans ce chapitre, on est intéressés à l'étude des performances mécaniques des BAP soumis à un comportement au feu.

L'objectif de ce chapitre est de présenter les résultats obtenus. En premier lieu, l'influence du traitement thermique au jeune âge des bétons est exposée. On a présenté des paramètres de composition sur les propriétés mécaniques (la résistance en traction, en compression). Les résultats des variations dimensionnelles et pondérales avant et après choc thermique ainsi que la relation retrait/perte en poids sont analysés. Les principaux résultats sont : Le béton autoplaçant contenant le dosage le plus élevé de fillers calcaires présente un retrait plus faible que les deux autres bétons. Quel que soit le mode de conservation, les pertes en poids des bétons sujettes au choc thermique sont plus grandes que celles des bétons témoins. La relation retrait/perte en poids suit deux phases avant choc et deux phases après choc thermique. Et finalement, les propriétés mécaniques des bétons en fonction des températures allant jusqu'à 200°C font l'objet de la dernière partie. On a distingué deux phases consécutives dans l'évolution de la résistance en compression, une diminution jusqu'à 100°C puis une augmentation apparaît de 200°C. Une diminution continue est observée pour la résistance en traction avec l'élévation de la température.

Conclusions générales et perspectives

Les bétons autobloquants représentent une nouvelle avancée pour la construction en béton car ils offrent de nombreux avantages aussi bien du point de vue économique, technique que social. L'absence de vibration aide à la réduction des coûts de production, permet d'avoir des éléments de géométries complexes et fortement ferrailés. Les BAP constituent une véritable alternative au béton traditionnel, comme l'ont montré un certain nombre d'exemples. Leur utilisation est permet de réaliser des ouvrages d'une grande qualité esthétique.

L'objectif de ce travail était d'apporter de manière expérimentale un nouveau point de vue sur le comportement thermomécanique des bétons autoplacants. Notre but était d'apporter une contribution à l'étude du comportement des bétons sous l'évolution de la température, et, en particulier, d'établir quels sont les paramètres qui jouent un rôle majeur sur l'évolution des propriétés mécaniques sous différents traitements thermiques.

Les formulations de BAP se distinguent par un volume de pâte plus important (lié à la méthodologie utilisée), l'emploi de superplastifiant 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.

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.

Nos premiers résultats expérimentaux ont montré que les propriétés mécaniques à température ambiante sont similaires à celles obtenues. Nous avons réalisé des traitements thermiques sur les bétons : il s'agissait d'un chauffage lent avec une montée en température d' $1^{\circ}\text{C}/\text{min}$ jusqu'à 2 températures paliers (100, 200°C). Après le traitement thermique, les bétons ont subi des essais de compression, de traction par flexion 3 points, des mesures de perte de masse, de prosimètre l'eau afin d'observer l'effet de la température sur le comportement macrostructural des BAP. Parallèlement à ces essais macrostructuraux, une étude physico-chimique.

Conclusions générales et perspectives

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 ordinaire et le béton autoplaçant présentent le même comportement mécanique. La résistance augmente partiellement durant la phase 2 qui se situe dans la gamme des températures 100-200°C, pour le BO 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 BO, 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 BO. 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).

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 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 20 et 100°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.

Conclusions générales et perspectives

Lors du traitement thermique, la mesure de la masse a permis de connaître la quantité d'eau perdue par les échantillons de béton testés. Ces observations sont couplées aux analyses thermiques réalisées par ATD-ATG.

L'observation des courbes a permis de distinguer trois phases concernant la perte de masse, identique pour le BAP. La première phase, commençant à 20°C jusqu'à 100°C, est liée essentiellement au départ de l'eau libre. Entre 100 et 200°C, nous observons une accélération de la perte de masse qui se caractérise par la déshydratation des hydrates comme les C-S-H, le monocarboaluminate de calcium hydraté. Les modifications physico-chimiques conduisent à l'augmentation de la porosité et de la perméabilité.

Perspectives

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.

Bibliographies

- [1]: Gunning .J.G," concrete technology: level 4 ", Longman technician series, Const & civil engineering, England, 1983.
- [2] : A.Brahma : « Le béton », Office des publications universitaires, Alger, 1996.
- [3] : Georges Dreux et Jean Festa : « Nouveau guide du béton et de ses constituants », Huitième édition, Eyrolles, France, 1998.
- [4] : Rissel Khelifa.M , " Effet de l'attaque sulfatique externe sur la durabilité des bétons autoplaçants", thèse de doctorat, 2009.
- [5] : Georges Dreux et Jean Festa : « Nouveau guide du béton et de ses constituants », Huitième édition, Eyrolles, France, 1998.
- [6] : VENANT.M : « Ciment et bétons. » 2ème édition. 1973.
- [7] : Thibault. B, Bouffard.m, Horlait.c, Lacroix.r : Projet IFIPS(2008)
- [8] : R.Dupain, R.Lanchon, J.C saint-Arroman : « Granulats, sols, ciments et bétons », 2eme édition conforme aux normes européennes, France, 2000.
- [9] : Mémoire : "Caractérisation expérimentale des bétons autoplaçant obtenus par ajout des déchets de construction" Thèse d'Ingéniorat en génie civil, université mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou.
- [10] : Association française de Génie Civil (AFGC), Bétons Auto-Plaçant Recommandations provisoires, juillet 2002, 63 pages.
- [11] : Béton – Définition – Encyclopédie scientifique en ligne : www.techno-science.net, 2008.
- [12] : Collection Technique CIM béton, Fiches techniques, Tome 2 ", Les bétons : formulation, fabrication et mise en œuvre ", Édition octobre 2006.
- [13] : Abib.Z, "formulation et caractérisation des bétons autoplaçants", thèse de magister USTHB, 2004.
- [14] : Boukni.B, "tenue au feu des bétons autoplaçants", thèse de magister UMC, 2007.
- [15] : Khelifa R., «L'impact des cimenteries sur l'environnement Cas de la cimenterie de Ain-Touta», Mémoire de DEA en Aménagement, Développement et Environnement, Université d'Orléans, le 18 Septembre 2002.
- [16] : Produits de ciment Couillard, « Les superplastifiants », [http : //www.betoncouillard.com](http://www.betoncouillard.com), Internet, 2008.

- [17] : Rapport d'essais préliminaires, «Étude de ciments aux ajouts», Entreprise Régionale des Cimenteries de l'Est ERCE, Cimenterie de Ain-Touta, 2005.
- [18] : NF P 15-010, Octobre 1997.
- [19] : Belhadj.N, " Caractérisation expérimentale des Bétons Autoplaçants en traction directe. Influence des ajouts de déchets de brique, de poudre de marbre et de tuf", mémoire de master en structure, génie civil, 2012.
- [20] : Dreux G. et Festa J., « Nouveau guide du béton et de ses constituants », 8ème édition, Eyrolles, 1998.
- [21] : Journée d'Information sur les Ciments, les Bétons et les Adjuvants, «Les adjuvants, définitions et opportunités d'utilisation», ERCE - CTC Est - GRANITEX, Alger, 2004.
- [22] : Comparet C., Thèse de Doctorat en Chimie - Physique, «Étude des interactions entre les phases modèles représentatives d'un ciment Portland et des superplastifiants du béton», Université de Bourgogne – UFR des Sciences et Techniques, Ecole doctorale Carnot, le 8 Octobre 2004.
- [23] : Brunetaud X. et Jausserand L., «Travaux pratiques ; Ciment et bétons», École Polytechnique de L'Université d'Orléans, 2005.
- [24] : Chopin D., « Malaxage des bétons à hautes performances et des bétons autoplaçants Optimisation du temps de fabrication », Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Juin 2003.
- [25] : Abib Z., Thèse de Magistère en Génie Civil, « Formulation et caractérisation des bétons autoplaçants », Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene, Alger, le Juillet 2006.
- [26] : Groupe Holcim Bétons, «Le béton autocompactant», Recommandations éditées par Holcim (Suisse) SA, novembre 2004.
- [27] : Sedran T., «Les Bétons Autoplaçants», bulletin LCPC 196, réf, 3889, pp, 53-60, mars-avril 1995.
- [28] : Turcry P., Thèse de doctorat en Génie Civil, « Retrait et fissuration des bétons autoplaçants – Influence de la formulation », Ecole Centrale de Nantes, Université de Nantes, le 3 février 2004,
- [29] : Association Française de Génie Civil, "Bétons autoplaçants Recommandations provisoires", documents scientifiques et techniques, AFGC, juillet 2000
- [30] : Jossierand L, Thèse de doctorat en Structures et Matériau, «Ressuage des bétons hydrauliques », École Nationale des Ponts et Chaussées, le 11 octobre 2002.

- [31] : NF P 18-353, Norme Française P 18-353 ; Mesure du pourcentage d'air occlus dans un béton frais à l'aide de l'aéromètre à béton.
- [32] : Ecoles Française du Béton (EFB), mis en ligne par le lycée du Bâtiment Saint- Lambert, Internet, 2004.
- [33] : NF P 18-406 relative aux essais de compression des bétons.
- [34]: L. SCHOONBAERT. Fire safety engineering une solution pour le future.
- [36] : Mémoire magister 'Analyse du comportement des structures sous influence du feu' Université de Mentouri Constantine. par : Boursas Farid, 2010
- [35]: FJ. Ulm, O. Coussy, and ZP. Bazant. The "Chunnel" Fire I: Chemo plastic softening in rapidly heated concrete. Journal of engineering mechanism, Vol.125, N°3:272{282, 1999.
- [37]: Sobane. Fiche 1 d'observation le triangle du feu et les principes d'extinction 2004.
- [38] : Thèse de doctorat Comportement des bétons ordinaire et à hautes performances soumis à haute température. Application à des éprouvettes de grandes dimensions. Université de Cergy-Pontoise. Par Van Thai Nguyen, Juillet 2013
- [39] : Eurocode 2. Calcul des structures en béton et Document d'Application Nationale Partie.
- [40] : G. R. Consolazio, M. C. Mcvay et J. W. Rish. "Measurement and prediction of pore pressure in cement mortar subjected to elevated temperature", International Workshop of Fire Performance of High Strength Concrete, Gaithersburg, Maryland, p. 125-148, 1997.
- [41] : thèse Contribution à l'étude des bétons portés en température/ Evolution des propriétés de transfert, Etude de l'éclatement. L'Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, Par Rachid Haniche, Soutenue le 20 Décembre 2011.
- [42]: M. Castellote, C. Alonso, C. Andrade, X. Turrilas, and J. Campo. Composition and microstructural changes of cement pastes upon heating, as stu by neutron diraction. Cement and Concrete Research, Vol. 34:1633-1644, 2004.
- [43]: Schneider, U. 'Behaviour of concrete under thermal steady state and non-stead state conditions Fire and Materials 1976. 1, pp. 103-115
- [44] : loi constitutive chimio plastique pour le béton exposé aux hautes températures. Thèse de doctorat d'université de Montréal .Rabah Hammoud, 2013.
- [45] : Noumowé, N.A. Effet des hautes températures (20°C-600°C) sur le béton. Cas particulier du BO et BHP. Thèse de Doctorat de l'INSA de Lyon, 1995.
- [46] : T. Sedran. Rhéologie et rhéomètre des bétons. Application aux bétons autoplaçant. Thèse de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 1999.
- [47] : Kalifa, P. & Tsimbrovska, M. Comportement des BO et BHP à hautes températures, État de la question et résultats expérimentaux. Cahier de CSTB n° 3078

- [48] : Mémoire 'Comportement à haute température des bétons à haute performance - évolution des principales propriétés mécaniques' l'Ecole Polytechnique de Cracovie, présentée par Izabela Gawęska Hager, Soutenue le 5 novembre 2004.
- [49]: M. Stegmaier and HW. Reinhardt. Fire behaviour of plain self-compacting concrete. *Otto Graf-Journal*, Vol. 15:33-42, 2004.
- [50]: B. Persson. Fire resistance of self-compacting concrete. *Materials and Structures*, Vol. 37:575-584, 2004. KK. Sideris. Mechanical characteristics of self-consolidating concretes exposed to elevated.
- [51]: E. Annerel, P. Taerwe, and P. Vandeveld. Assessment of temperature increase and residual strength of scc after re exposure. *Proceeding of 5 International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete*, Ghent, Belgium: 71 5-720, 2007.
- [52] : A. Noumowé, H. Carré, A. Daud, and H. Toutanji. High strength self-compacting concrete exposed to fire test. *Journal of Materials in Civil Engineering, ASCE*, Vol. 18 Issue N°6 :754-758, 2006.
- [53]: J. Tao, X. Liu, and Y. Yuan. High strength self-compacting concrete at elevated temperature. *5th International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete SCC 2007, Proceedings Pro 54:1135-1144*, 2007.
- [54]: KK. Sideris. Mechanical characteristics of self-consolidating concretes exposed to elevated temperatures. *Journal of Materials in Civil Engineering, ASCE*, Vol. 19 Issue N-8:648-654, 2007.
- [55]A. Pineaud. Contribution à l'étude des caractéristiques mécaniques des bétons autobloquants et application à l'industrie de la préfabrication. In *Thèse de doctorat, Université de Cergy-Pontoise*, page 271. 2007.
- [57] : G. Ye, G. De Schutter, and L. Taerwe. Spalling behaviour of small self-compacting concrete slabs under standard fire conditions. *5 International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete SCC 2007, Proceedings Pro 54: 799-804*, 2007.
- [58]: X. Liu, G. Ye, G. De Schutter, Y. Yuan, and L. Taerwe. On the mechanism of polypropylene fibres in preventing spalling in self-compacting and high-performance, cement paste. *Cement and Concrete Research*, Vol. 38:487-499, 2008.
- [59]: RILEM. Durability of self-compacting concrete. RILEM, Report 38 :185 pages, 2007.
- [60] : Feu Béton. Cerib, atilh et organisations professionnelles de la construction française (FIB, FFB, FNTP, SNBPE, SYNAD, UNPG), réalisée au CERIB. Rapport final du projet de recherche sur le comportement au feu des bétons, 2006.

- [61]: L. Bostrom. Self-compacting concrete exposed to fire. International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete, Proceedings PRO 33:863-869, 2003.
- [62]: L. Bostrom and R. Jansson. Spalling of self-compacting concrete. Proceedings of 4Th International Workshop Structures in Fire, Vol. II, Aveiro, Portugal, 2006.
- [63]: L. Bostrom. Innovative self-compacting concrete - development of test methodology for determination of fire spalling. SP Report, N°6, 2004.
- [64] L. Bostrom. The performance of some self-compacting concrete when exposed to fire. SP Report, N°23, 2002.
- [65]: R. Jansson. Measurement of thermal properties at elevated temperatures – brandforsk project 328-031. SP Report, N°46:90 pages, 2004.
- [66]: X. Liu. Microstructural investigation of self-compacting concrete and high-performance concrete during hydration and after exposure to high temperature. In These de doctorate, University de Ghent, Belgique. 2006.
- [67] : Hanaa Fares « Propriétés mécaniques et physico-chimiques de bétons autoplaçants exposés à une température élevée » thèse de doctorat, Ecole Doctorale Sciences et Ingénierie Université de Cergy-Pontoise 2010.
- [68]: B. Persson. Fire resistance of self-compacting concrete. Materials and Structures, Vol. 37 :575-584, 2004.
- [69] : Gaweska I., comportement à haute température des bétons à hautes performances - évolution des principales propriétés mécaniques. Thèse de l'école nation des ponts et chaussées et de l'école polytechnique de Cracovie, 2004.
- [70]: Khoury G.A, compressive strength of concrete at high temperatures: a reassessment. Compressive strength of concrete research, Vol. 44, 1992, p.291-309.
- [71] : Malier Y., Action de la température sur les propriétés du béton durci. In : Baron J., Sauterey R., Le béton hydraulique. Paris presses de l'ENPC, 1982, p.409-422.
- [72] : J-C. Mindeguia, Contribution expérimentale a la compréhension des risques d'instabilité thermique des bétons, Thèse de doctorat de l'Université de Pau et des Pays de l'Adour, 2009.
- [73] : P. Kalifa, F.-D. Menneteau et D. Quenard. "Spalling and pore pressure in HPC at high temperatures", Cement and Concrete Research, vol. 30, n°12, 2000.
- [74] : Z. P. Bazant et M. F. Kaplan. "Concrete at high temperatures: material properties and mathematical models", Harlow, Ed. Longman, 1996.
- [75]: U. Diederichs, U. M. Jumpanen et .V. Penttala. "Behaviour of high strength concrete at high temperatures", Report n°92, Helsinki, University of Technology, Department of structural engineering, 1989.

- [76]: Zeiml M., Leitherner D., Lackner R., Mang H.A., how do polypropylene fibres improve the spalling behaviour of in-situ concrete? *Cement and concrete research*, Vol. 36, 2006, p. 929-942.
- [77]: Cast-1990: Castillo, C. & Durrani, A. J. Effect of transient high temperature on high strength concrete. *ACI Materials Journal*, pp 47-53. 1990.
- [78]: Fele-1999: Felecitti, R. & Gambarova, And P.G. On the residual proprieties of high-performance siliceous concrete exposed to high temperatures. *Mechanics of Quasi-Brittle materials and structures*, edited by G. Pijaudier-Cabot, Zdenek Bittnar & Bruno Gérard. Paris : Hermes, 1999, p 167- 186.
- [79] : I. Hager, Comportement à haute température des bétons à haute performance, évolution des principales propriétés mécaniques, Thèse de doctorat, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées et Ecole Polytechnique de Cracovie, 2004.
- [80] : S. Bakhtiyari, A. Allahverdi, M. Rais-Ghasemi, B.A. Zarrabi, T. Parhizkar“Self-compacting concrete containing different powders at elevated temperatures Mechanical properties and changes in the phase composition of the paste», *thermochemical Acta* 514 (2011) 74–81.
- [81]: B. Persson, “Fire resistance of self-compacting concrete”, *SCC Materials and structures*, Vol. 37:575-584, 2004.