

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



## Thèse de Doctorat LMD

Faculté des Sciences et de Technologies

Département de Génie Civil et d'Hydraulique

Spécialité : Structures et matériaux

Présenté par :

BENZAID MEHDI

---

---

# CONTRIBUTION A L'ETUDE DU COMPORTEMENT A HAUTE TEMPERATURE DES BETONS AUTOPLAÇANTS

---

---

Sous la direction de :

Pr. BENMARCE ABDELAZIZ

JURY :

<i>Pr. Guenfoud Mohammed</i>	<i>Université du 08 Mai 1945 / Guelma</i>	<i>Président</i>
<i>Pr Benmarce Abdelaziz</i>	<i>Université du 08 Mai 1945 / Guelma</i>	<i>Rapporteur</i>
<i>Pr Arabi Noureddine</i>	<i>Université de Badji Mokhtar / Annaba</i>	<i>Examineur</i>
<i>Pr Achoura Djamel</i>	<i>Université de Badji Mokhtar / Annaba</i>	<i>Examineur</i>
<i>Pr Nafa Zahreddine</i>	<i>Université du 08 Mai 1945 / Guelma</i>	<i>Examineur</i>
<i>Pr Benouis Halim</i>	<i>Université du 08 Mai 1945 / Guelma</i>	<i>Examineur</i>

2017

# Remerciements

Je ne savais pas que la thèse est une véritable expérience professionnelle qui demande des compétences nombreuses et de loin individuelle et qui dépasse aussi la tâche de rédiger le document jusqu'à ce que je l'ai vécue.

Je tiens, d'abord à remercier en premier lieu et avant tout, notre Dieu le tout puissant, qui nous a donné la force et la patience pour effectuer le présent travail et de m'avoir entouré de personnes formidables et dans chacune de mes étapes de mon parcours, contribués d'une manière ou d'une autre, chacune à sa façon, à la réalisation de cette thèse de doctorat.

Je veux d'abord exprimer ma gratitude à Monsieur **Abdelaziz BENMARCE**, Professeur à l'université de Guelma, pour la confiance qu'il m'a fait, pour son suivi et ses multiples conseils durant l'évolution de ce travail ainsi qu'à toutes les heures qu'il a consacré à diriger cette recherche en plus d'être mon enseignant durant la graduation. Sa large expérience dans ce domaine, ainsi que ses encouragements incessants, ses critiques pertinentes et ses qualités humaines m'ont servi à plusieurs égards, y compris, mener à termes ce travail de recherche.

Je remercie **Mohammed GUENFOUD**, d'avoir accepté la présidence du jury. Je tiens aussi à remercier les Professeurs **Noureddine ARABI**, **Djamel ACHOURA**, **NAFA Zahreddine** et **Halim BENOUIS**, pour avoir accepté d'être rapporteurs de cette thèse. Qu'ils trouvent tous ici l'expression de mes sincères gratitude.

Je tiens à remercier également le personnel du **LGCH, LHCE, Laboratoire de génie civil de l'université d'Annaba, La Grande Carrière de Khroub, l'usine El Hadjar, Granitex, et l'ETB Hamri Abdelbaki**

Je tiens aussi à remercier tous les enseignants et personnel administratif du département de Génie Civil et d'Hydraulique de l'université du 8 mai 1945 Guelma et à mes collègues mais aussi ceux d'Annaba et à leur tête Mme **Imene Saadi**, et tous ceux qui, de près ou de loin, d'une manière ou d'une autre, permis par leurs collaborations, leurs soutiens afin de mener à bien ce travail.

Je voudrais tout particulièrement exprimer ma reconnaissance à mes parents et mon frère, qui n'ont cessé de m'encourager et me soutenir durant tout mon parcours ainsi que ma femme.

Je tiens aussi à avoir une pensée à mon défunt Grand père Cherif Bourenane qui priait tout le temps pour que je puisse finir mes études mais qui malheureusement n'as pas pu assister à ce jour, que dieu ai pitié de son âme et qu'il repose en paix

**BENZAID MEHDI**

## ملخص

يعتبر تطور الخرسانة ذاتية التوضع مؤخرًا واحدة من أهم التطورات في مجال البناء. تقدم هذه الخرسانة مزايا عديدة من النواحي الفنية والاقتصادية والبيئية. تتطلب الخرسانة ذاتية التوضع كمية كبيرة من مسحوق بالمقارنة مع الخرسانة التقليدية لإنتاج خليط متجانسة ومتماسكة. وقد تم نشر عدد كبير من المقالات التي تتناول هذا الموضوع، ولكن قليل منها كان يخص دراسة هذه الخرسانة في درجات حرارة عالية. وتحقيقاً لهذه الغاية، تم تقسيم عملنا إلى شطرين أين تم اختبار ثلاث مجموعات من الخرسانة وتحليلها في كل شطر. في الشطر الأول كانت المجموعة الأولى عبارة عن مسحوق غير بوزولاني (مسحوق الحجر الجيري)، أما المجموعة الثانية فكانت بوزولانية (خبث حبيبي أرضي) ليتم مقارنتها مع المجموعة الثالثة من الخرسانة العادية في الشطر الثاني أردنا أن نعرف تأثير معدل إضافة على سلوك درجات الحرارة العالية من الخرسانة ذاتية التوضع. وتم اختيار وتحليل ثلاث مجموعات من الخرسانة. اخترنا الخبث الحبيبي كإضافة. وكانت المجموعة الأولى عبارة عن ملء بدون إضافة، في حين أن المجموعة الثانية تحتوي على 20٪ من حبيبات الخبث. المجموعة الثالثة تحتوي على 30٪ من الخبث المحبب.

تمت دراسة الخواص الميكانيكية والفيزيائية للخرسانة قبل وبعد تسخينها. قوة الانضغاط، وقوة الشد، ومعامل المرونة الديناميكي، وفقدان الكتلة، والمسامية، وتحليل الصور، ونفاذية الهواء، واختراق الماء قد درست. وقد تعرضت العينات لدرجات حرارة تسخين مختلفة (20 درجة مئوية و105 درجة مئوية و250 درجة مئوية و400 درجة مئوية و600 درجة مئوية و800 درجة مئوية) مع معدل تسخين قدره 1 درجة مئوية / دقيقة. تم تطبيق مرحلة من الاستقرار تتراوح من ساعة إلى ساعتين (600 درجة مئوية و800 درجة مئوية) لتمديد درجة الحرارة في جميع العينات، تليها مرحلة التبريد إلى درجة حرارة الغرفة. وأظهرت النتائج أن سلوك الخرسانة ذاتية التوضع كان مشابهاً لسلوك الخرسانة العادية عند درجة حرارة مرتفعة وأنه لم يكن هناك تشقق أو انفجار للخرسانة. كما أن زيادة نسبة الإضافات المعدنية يحسن من سلوك الخرسانة ذاتية التوضع

## **RESUME**

Le développement du béton autoplaçant (BAP) a récemment été un des développements les plus importants dans l'industrie du bâtiment. Le BAP offre plusieurs avantages en termes techniques, économiques et environnementaux. Le BAP exige une grande quantité de poudre comparé au béton vibré conventionnel (BV) pour produire un mélange homogène et cohésif. Un grand nombre d'articles traitant le sujet a été publié, mais très peu a été fait sur le BAP incorporant de mélanges minéraux et à des températures élevées. À cette fin, ce travail a été divisé en deux parties. Trois groupes de béton ont été choisis et analysés pour chaque partie. Dans la première partie, le premier groupe était un remplissage non-pouzzolanique (Filler calcaire) tandis que le deuxième groupe était pouzzolanique (Laitier granulé des hauts fourneaux) pour être comparé avec le troisième groupe de béton vibré. Dans la deuxième partie, il été question de l'influence du taux d'addition sur le comportement à haute température des BAP. Le premier groupe était un remplissage sans aucune addition, tandis que le deuxième groupe contenait 20% de laitier granulé. Le troisième groupe contenait 30% de laitier granulé.

Les propriétés mécaniques et physiques ont été étudiées à froid et après avoir été chauffé. La résistance à la compression, la résistance à la flexion, le module élastique dynamique, la perte de masse, la porosité, l'analyse d'image, la perméabilité à l'air et la pénétration de l'eau ont été étudié. Les spécimens ont été soumis aux températures de chauffage diverses (20°C, 105°C, 250 °C, 400°C, 600°C et 800 °C) avec une montée de température de 1°C/ minute. Une phase de stabilité variant d'une heure à deux heures (600°C et 800°C), a été appliquée pour étendre la température partout dans les spécimens, suivi d'une phase de refroidissement jusqu'à température ambiante. Les résultats ont indiqué que le comportement du BAP était semblable à celui des BV à la température élevée et qu'il n'y a pas eu d'écaillage du BAP. On a aussi conclu que l'augmentation du taux d'addition améliore le comportement à haute température des BAP

## **Mots-clés:**

Béton Autoplaçant - propriétés physiques - propriétés mécaniques - Haute température

## **ABSTRACT**

The development of self-compacting concrete (SCC) has recently been one of the most important developments in building industry. SCC offers several advantages in technical, economical and environmental terms. SCC demands a large amount of powder content compared to conventional vibrated concrete (VC) to produce a homogeneous and cohesive mix. A large number of papers dealing with the subject has been published but very little has been done on SCC incorporating mineral admixtures, at high temperature. To this end, our work has been divided into two parts. Three concrete groups were selected and analysed for each part. In the first part, the first group was a non-pozzolanic filler (Filler limestone) while the second group was pozzolanic (granulated blast furnace slag) to be compared with the third group of vibrated concrete. The second part, was about the influence of the addition rate on the high-temperature behaviour of SSCs. All three groups of concrete were selected and analysed as for the first part. For this purpose, we chose granulated slag as an addition. The first group was a fill without any addition, while the second group contained 20% granulated slag. The third group contained 30% granulated slag.

Mechanical and physical properties were studied before and after heating. Compressive strength, flexural tensile strength, dynamic elastic modulus, mass loss, porosity, Image analysis, air permeability and water penetration were studied. Specimens were subjected to various heating temperatures (20°C, 105°C, 250 °C, 400°C, 600°C and 800 °C) with a heating rate of 1°C/min. A stability phase varying from one hour to two hours (600°C and 800°C), was applied in order to spread the temperature all over the specimens, then a cooling phase until ambient temperature. The results indicated similar material behaviour of SCC and VC at high temperature when spalling did not occur. It was also concluded that the increase in the addition rate improves the high temperature behavior of the SCCs

## **KEYWORDS:**

Self-Compacting Concrete – physical properties - mechanical properties – high-temperature

## LISTE DES FIGURES

N°	Titre	Page
<b><u>Chapitre I</u></b>		
<b>Figure I.1</b>	Domaines de classification des bétons étendus au cas des BAP	9
<b>Figure I.2</b>	Notion d'excès de pâte	12
<b>Figure I.3</b>	Différence entre les composants d'un BAP et un BO	15
<b>Figure I.4</b>	Influence de la finesse d'un filler sur le comportement rhéologique d'un béton	16
<b>Figure I.5</b>	Photo de la cendre volante	17
<b>Figure I.6</b>	Action des superplastifiants - Défloculation des grains de ciment	18
<b>Figure I.7</b>	Influence de la quantité de superplastifiant sur l'étalement et la viscosité d'un béton	19
<b>Figure I.8</b>	Interaction entre l'eau et les polysaccharides	20
<b>Figure I.9</b>	Optimisation du dosage agent de viscosité – superplastifiant	20
<b>Figure I.10</b>	Phénomène de blocage des granulats au droit d'un obstacle	21
<b>Figure I.11</b>	Essai d'étalement au cône d'Abrams	23
<b>Figure I.12</b>	Dimensions du V-Funnel	24
<b>Figure I.13</b>	Essai d'étalement modifié (J-Ring)	24
<b>Figure I.14</b>	Risque de blocage au droit des armatures	25
<b>Figure I.15</b>	Schéma de principe de l'essai de la boîte en L.	25
<b>Figure I.16</b>	Essai de la boîte en U	26
<b>Figure I.17</b>	Essai de stabilité au tamis	27
<b>Figure I.18</b>	Essai de stabilité à la colonne	28
<b>Figure I.19</b>	Essai à la bille développé par Trudel	29
<b>Figure I.20</b>	Essai de ressuage	29
<b>Figure I.21</b>	Evolution de la résistance mécanique d'un BAP (SCC) et d'un BV (REF) correspondant	30
<b>Figure I.22</b>	Comparaison des modules élastiques théoriques de BAP et de bétons vibrés avec leurs valeurs expérimentales	31
<b>Figure I.23</b>	Evaluation du module du béton en fonction de sa résistance, d'après le modèle réglementaire et un modèle d'homogénéisation	32
<b><u>Chapitre II</u></b>		
<b>FigureII.1</b>	Photos des conséquences des incendies	35
<b>FigureII.2</b>	Le triangle de feu	35
<b>Figure II.3</b>	Phase de développement d'un incendie	37
<b>Figure II.4</b>	Courbes Température-Temps LOCA et SA	39
<b>Figure II.5</b>	Courbes Pression-Temps LOCA et SA	39
<b>Figure II.6</b>	Courbe ISO	40

<b>Figure II.7</b>	Résistance au feu	41
<b>Figure II.8</b>	La courbe température-temps CH	43
<b>Figure II.9</b>	La courbe température-temps « HCM »	43
<b>Figure II.10</b>	La courbe température-temps « RABT »	44
<b>Figure II.11</b>	La courbe température-temps « RWS »	44
<b>Figure II.12</b>	La résistance de compression à chaud	46
<b>Figure II.13</b>	Courbes effort déformation	47
<b>Figure II.14</b>	Les propriétés relatives de béton avant/après l'élévation de température excepté la propriété résiduelle avec la poudre de chaux à 800° C	48
<b>Figure II.15</b>	Variation de la résistance avec la température	49
<b>Figure II.16</b>	Variations de la masse volumique de différents types de bétons en fonction de la température	49
<b>Figure II.17</b>	Densité apparente des bétons en fonction du traitement thermique (Kalifa 98)	50
<b>Figure II.18</b>	Perte de masse durant l'échauffement et vitesse de perte de masse en fonction de la température	50
<b>Figure II.19</b>	Variation de poids en fonction de la température	51
<b>Figure II.20</b>	Perte en masse des éprouvettes par rapport à l'état initial, en fonction de la température de conditionnement	51
<b>Figure II.21</b>	Dilatation longitudinale de différents types de roches suivant la température	53
<b>Figure II.22</b>	Dilatation thermique de ciment, d'agrégat et de béton	57
<b>Figure II.23</b>	Porosité totale à l'eau en fonction de la température de conditionnement	58
<b>Figure II.24</b>	Distributions des pores d'un béton ordinaire obtenues à différentes températures	59
<b>Figure II.25</b>	Fissure dans le béton à différente température	60
<b>Figure II.26</b>	Gradient thermique dans une éprouvette cylindrique	61
<b>Figure II.27</b>	Variation de la résistance à la compression avec la température	62
<b>Figure II.28</b>	Perte de masse de deux types de granulats (calcaire et siliceux)	62
<b>Figure II.29</b>	Perte de masse des bétons de différents types granulats en fonction de la température	64

### **Chapitre III**

<b>Figure III.1</b>	Procédé utilisé pour la mesure de la masse apparente du gravier	68
<b>Figure III.2</b>	Détermination de la teneur en eau	70
<b>Figure III.3</b>	Mesure de la propreté des graviers	72
<b>Figure III.4</b>	Analyse granulométrique	73
<b>Figure III.5</b>	Allure de la courbe granulométrique du gravier	74
<b>Figure III.6</b>	Mesure de la masse volumique apparente du sable	77
<b>Figure III.7</b>	Mesure de la masse volumique absolue du sable	78
<b>Figure III.8</b>	Mesure de la compacité du sable	79
<b>Figure III.9</b>	Détermination de la teneur en eau	81

<b>Figure III.10</b>	Courbes granulométrique du sable	82
<b>Figure III.11</b>	Mesure de la propreté du sable	83
<b>Figure III.12</b>	Répartition granulométrique	85
<b>Figure III.13</b>	Influence des additions sur l'étalement	90
<b>Figure III.14</b>	Influence des additions sur la boîte en L	91
<b>Figure III.15</b>	Influence des additions sur la stabilité au tamis	91
<b>Figure III.16</b>	La résistance en compression à 3 jours	93
<b>Figure III.17</b>	La résistance en compression à 7 jours	93
<b>Figure III.18</b>	La résistance en compression à 14 jours	94
<b>Figure III.19</b>	La résistance en compression à 28 jours	94

#### Chapitre IV

<b>Figure IV.1</b>	Analyse granulométrique des granulats	98
<b>Figure IV.2</b>	Evolution de la température en fonction du temps	103
<b>Figure IV.3</b>	Photo du four utilisé	103
<b>Figure IV.4</b>	Presse de compression utilisée	104
<b>Figure IV.5</b>	Presse de flexion utilisée (3 points)	105
<b>Figure IV.6</b>	Appareillage d'ultrason Controls utilisé	106
<b>Figure IV.7</b>	Dispositif utilisée pour le calcul de la perméabilité à l'air (compte-bulles)	108
<b>Figure IV.8</b>	Dispositif utilisée pour le calcul de la pénétration de l'eau	111

#### Chapitre V

##### Partie I

<b>Figure V.1.a</b>	Résistance de compression résiduelle relative	116
<b>Figure V.1.b</b>	Résistance de compression résiduelle	117
<b>Figure V.2.a</b>	Résistance de Flexion résiduelle relative	119
<b>Figure V.2.b</b>	Résistance de Flexion résiduelle	119
<b>Figure V.3.a</b>	Le module d'élasticité dynamique relatif par rapport à la température de chauffage	121
<b>Figure V.3.b</b>	Le module d'élasticité dynamique par rapport à la température de chauffage	121
<b>Figure V.4</b>	La perte de masse en fonction de la température	123
<b>Figure V.5</b>	La porosité totale de chaque mélange par rapport à la température	125
<b>Figure V.6</b>	L'évolution de la densité apparente en fonction de la température	126
<b>Figure V.7</b>	L'évolution de la perméabilité résiduelle intrinsèque par rapport à la température	128
<b>Figure V.8</b>	La pénétration de l'eau en fonction de la température	130
<b>Figure V.9</b>	Evolution de la structure du béton en fonction de la température	131

##### Partie II

<b>Figure V.10.a</b>	Résistance de compression résiduelle relative	136
<b>Figure V.10.b</b>	Résistance de compression résiduelle	137

---

<b>Figure V.11.a</b>	Résistance de Flexion résiduelle relative	139
<b>Figure V.11.b</b>	Résistance de Flexion résiduelle	140
<b>Figure V.12.a</b>	La variation du module d'élasticité dynamique relatif par rapport à la température de chauffage	141
<b>Figure V.12.b</b>	La variation du module d'élasticité dynamique par rapport à la température de chauffage	142
<b>Figure V.13</b>	La perte de masse en fonction de la température	144
<b>Figure V.14</b>	La porosité totale de chaque mélange par rapport à la température	145
<b>Figure V.15</b>	L'évolution de la densité apparente en fonction de la température	147
<b>Figure V.16</b>	L'évolution de la perméabilité résiduelle intrinsèque par rapport à la température	148
<b>Figure V.17</b>	La pénétration de l'eau en fonction de la température	150
<b>Figure V.18</b>	Caractère de surface des échantillons avant et après haute température	152

---

## LISTE DES TABLEAU

N°	Titre	Page
<b>Tableau 1</b>	Classification des BAP selon leur application	9
<b>Tableau 2</b>	Classe d'étalement	22
<b>Tableau3</b>	Résistance au feu	41
<b>Tableau 4</b>	Coefficient de dilatation thermique des roches pour granulats	53
<b>Tableau 5</b>	Résultats des mesures de la masse apparente du gravier	67
<b>Tableau6</b>	Résultats des essais de mesure de la masse absolue du gravie	68
<b>Tableau 7</b>	Teneur en eau des graviers lors des essais	69
<b>Tableau 8</b>	Résultats des mesures de la propreté des graviers	71
<b>Tableau9</b>	Analyse granulométrique du gravier 5/15	72
<b>Tableau 10</b>	Valeurs de la dureté au Los Angeles du gravier utilisé	74
<b>Tableau 11</b>	Valeurs du coefficient d'absorption du gravier	75
<b>Tableau12</b>	Résultats des essais sur le gravier	75
<b>Tableau 13</b>	Résultats de la mesure apparente du sable	76
<b>Tableau 14</b>	Résultats de la masse absolue du sable	77
<b>Tableau15</b>	Résultats de la compacité du sable	79
<b>Tableau 16</b>	Valeurs de la porosité du sable	79
<b>Tableau17</b>	Teneur en eau des graviers lors des essais	80
<b>Tableau 18</b>	Analyse granulométrique du sable	81
<b>Tableau 19</b>	Résultat de l'équivalent de sable	83
<b>Tableau20</b>	Résultats des essais sur le sable	83
<b>Tableau 21</b>	Caractéristiques chimiques	84
<b>Tableau 22</b>	Caractéristiques physiques	84
<b>Tableau 23</b>	Composition chimique moyenne du laitier granulé utilisé	85
<b>Tableau 24</b>	Composition chimique moyenne du laitier granulé utilisé Caractéristiques physiques et chimiques du ciment utilisé	85
<b>Tableau 25</b>	Compositions et paramètres de formulation des bétons étudiés	88
<b>Tableau26</b>	Résultats des essais sur le gravier et le sable	96
<b>Tableau27</b>	Propriétés physique du ciment utilisé	97
<b>Tableau28</b>	Propriétés chimique du ciment, filler et laitier utilisés	98
<b>Tableau29</b>	Formulation des bétons retenus	99
<b>Tableau30</b>	Les propriétés des bétons	114
<b>Tableau31</b>	Résistance à la compression en fonction de la température	115
<b>Tableau32</b>	Résistance à la flexion en fonction de la température	118
<b>Tableau33</b>	Module d'élasticité dynamique en fonction de la température	120

---

<b>Tableau34</b>	Perte de masse en fonction de la température	122
<b>Tableau35</b>	La porosité des BAP en fonction de la température	124
<b>Tableau36</b>	La densité des BAP en fonction de la température	126
<b>Tableau37</b>	La perméabilité au gaz en fonction de la température	127
<b>Tableau38</b>	La pénétration de l'eau en fonction de la température	129
<b>Tableau39</b>	Les propriétés des bétons	135
<b>Tableau40</b>	Résistance à la compression en fonction de la température	135
<b>Tableau41</b>	Résistance à la flexion en fonction de la température	138
<b>Tableau42</b>	Module d'élasticité dynamique en fonction de la température	140
<b>Tableau43</b>	Perte de masse en fonction de la température	143
<b>Tableau44</b>	La porosité des BAP en fonction de la température	145
<b>Tableau45</b>	La densité des BAP en fonction de la température	146
<b>Tableau46</b>	La perméabilité au gaz en fonction de la température	147
<b>Tableau47</b>	La pénétration de l'eau en fonction de la température	149

---

# **SOMMAIRE**

	<b>Page</b>
<b>Remerciement</b>	
<b>ملخص</b>	
<b>Résumé</b>	
<b>Abstract</b>	
<b>Liste Des Figures</b>	
<b>Liste Des Tableaux</b>	
<b>INTRODUCTION GENERALE</b>	<b>1</b>
<b><u>CHAPITRE I : LES BETONS AUTOPLACANTS</u></b>	
I.1. Introduction	7
I.1.1. Définition	7
I.1.1.1. Type De Béton Autoplaçant	7
I.1.1.2. Avantages Du BAP	7
I.1.1.3. Inconvénients Du BAP	8
I.1.2. Utilisation	8
I.2. Modes Et Méthodes De Formulations Des BAP	10
I.2.1. L'aspect empirique de la formulation des BAP :	10
I.2.2. Les Approche De Formulation	11
I.2.2.1. Méthodes Basées Sur L'optimisation Des Mortiers	12
I.2.2.2. Méthodes Basées Sur L'optimisation Du Volume De Pâte	12
I.2.2.3. Méthodes Basées Sur L'optimisation Du Squelette Granulaire	13
I.2.2.4. Méthode Basée Sur Un Plan D'expérience	14
I.2.2.5. L'approche Basée Sur L'utilisation Du Mortier Du Béton Equivalent Mbe	14
I.3. Particularités De La Composition Des Bap	15
I.3.1. Un Volume De Pâte Elevé	15
I.3.2. Une Quantité De Fines ( $\emptyset < 80 \mu\text{m}$ ) Importante	15
I.3.3. L'emploi De Superplastifiants	18

I.3.4. L'utilisation Eventuelle D'un Agent De Viscosité (Rétenteur D'eau)	19
I.3.5 Un Faible Volume De Gravillon	21
I.4. Caractérisation Du Béton A L'état Frais	21
I.4.1. Mobilité En Milieu Non Confiné	22
I.4.1.1. Essai D'étalement (Slump Flow)	22
I.4.1.2. Essai D'entonnoir (V-Funnel)	23
I.4.2. Mobilité En Milieu Confiné	24
I.4.2.1. Essai D'étalement Modifié (J-Ring Test)	24
I.4.2.2. Essai A La Boite En L (L-Box)	25
I.4.2.3. Essai A La Boîte En U (U-Box)	26
I.4.3. Stabilité	26
I.4.3.1. Résistance A La Ségrégation	26
I.4.3.1.1. Essai De Stabilité Au Tamis	26
I.4.3.1.2. Essai A La Colonne	27
I.4.3.1.3. Essai A La Bille	28
I.4.3.2. Ressuage	29
I.5. Propriétés Du Béton Durci	29
I.5.1. Résistance A La Compression	30
I.5.2. Résistance A La Traction	31
I.5.3. Module D'élasticité	31
I.6. Conclusion	32
<b><u>CHAPITRE II : COMPORTEMENT DU BETON A HAUTE TEMPERATURE</u></b>	
II.1 Introduction	34
II.2. Les Risques De Feu	34
II.3 Actions Et Cycles Thermiques	35
II.3.1. Le Triangle Du Feu	35
II.3.2. Développement D'un Incendie	35
II.4. La Réaction Au Feu Des Produits De Construction - Leur Classification	37
II.5. Les Bétons En Situation Accidentelle - Hautes Températures	38

II.5.1. Courbes Températures-Temps Normalisées	39
II.5.1.1. Enceintes De Confinement Des Réacteurs Nucléaires	39
II.5.1.2. Cas Des Bâtiments	40
II.5.1.3. Cas Des Ouvrages De Pétrochimie	42
II.5.1.4. Cas Des Tunnels	43
II.5.2 Propriétés Mécaniques	45
II.5.2.1 Résistance A Chaud	46
II.5.2.1.1 Résistance En Compression A Chaud	46
II.5.2.1.2 Résistance En Traction	47
II.5.2.1.3 Module D'élasticité	47
II.5.2.1.4 Comportement Contrainte Déformation	48
II.5.2.2 Résistances Résiduelles	48
II.5.3 Propriétés Physiques	50
II.5.3.1. Densité Apparente	50
II.5.3.2. Perte De Masse	51
II.5.4. Evolution Des Propriétés Thermiques	53
II.5.4.1. Déformation Thermique	53
II.5.4.1.1. Déformation Thermique De La Pâte De Ciment	53
II.5.4.1.2. Déformation Thermique Des Granulats	53
II.5.4.1.3. Déformation Thermique Du Béton	54
II.5.4.1.4. Déformation Thermique Transitoire	55
II.5.5. Microstructure	55
II.5.5.1. Les Principales Modifications Physico-Chimiques Dans Le Béton A Haute Température	56
II.5.5.2 Transformation Des Liaisons Pâte Granulat	57
II.5.5.3 Porosité	58
II.5.5.4 Fissuration	60
II.5.5.5 L'éclatement	61
II.6. Paramètres Influent Le Comportement De Béton	61
	62

II.6.1 La Vitesse De Chauffage Et De Refroidissement	63
II.6.2 Nature Du Granulat	64
II.6.2.1 Granulats Calcaires	65
II.6.2.2 Granulats Siliceux	65
II.6.3 Nature De Ciment Et Des Ajouts	65
II.7. Conclusion	
<b><u>CHAPITRE III : MATERIAUX UTILISEES ET FORMULATION</u></b>	67
III.1. Caractérisation Des Constituants	67
III.1.1. Caractérisation Du Gravier	67
III.1.1.1. Mesure De La Masse Volumique Apparente Du Gravier	68
III.1.1.2. Mesure De La Masse Volumique Absolue	69
III.1.1.3. Mesure De La Teneur En Eau Des Graviers	71
III.1.1.4. Mesure De La Propreté	72
III.1.1.5. Analyse Granulométrique	74
III.1.1.6. Résistance Au Choc (Essai Los Angeles)	75
III.1.1.7. Absorption D'eau	77
III.1.2. Caractérisation Du Sable	77
III.1.2.1. Mesure De La Masse Volumique Apparente Du Sable	78
III.1.2.2. Masse Volumique Absolue	79
III.1.2.3. Mesure De La Compacité	80
III.1.2.4. Porosité	80
III.1.2.5. Teneur En Eau	82
III.1.2.6. Analyse Granulométrique	82
III.1.2.7. Equivalent De Sable	84
III.1.3. Les Additions	84
III.1.3.1. Les Fillers	85
III.1.3.2. Laitier Granulé	86
III.1.4. Eau De Gâchage	86
III.1.5. Ciment	87

III.1.5. Les Adjuvants	88
III.2. Formulation Des Bétons	89
III.2.1. Propriétés Des BAP A L'état Frais	89
III.2.1.1. Mobilité En Milieu Non Confiné	90
III.2.1.2. La Mobilité En Milieu Confiné	91
III.2.1.3. La Résistance A La Ségrégation	92
III.2.2. Conservation Des Eprouvettes	92
III.2.3. Propriétés Des Bétons A L'état Durcis	94
III.3. Conclusion	
<b><u>CHAPITRE IV : TENUE AU FEU DES BETON AUTOPLAÇANT : METHODOLOGIE D'ESSAIS</u></b>	97
IV.1. Introduction	97
IV.2. Rappel Sur Les Matériaux	97
IV.2.1. Les Granulats	98
IV.2.2. Le Ciment	98
IV.2.3. L'eau De Gâchage	98
IV.2.4. Les Addition	98
A) Filler Calcaire	99
B) Laitier Granulé	99
IV.2.5. Les Adjuvants	99
IV.2.6. Formulation Retenus	100
IV.2.7. Conditionnement Et Conservations Des Eprouvettes	100
IV.2.8. Taille Des Eprouvettes	101
IV.3. Méthodologie D'essais	102
IV.3.1. Spécifications Techniques Du Dispositif Expérimental	102
IV.3.2. Traitement Thermique	104
IV.3.3. Disposition Dans Le Four	104
IV.4. Essai Résiduels	104
IV.4.1. Essais Mécaniques	104

IV.4.1.1. Essai De Compression	105
IV.4.1.2. Essai De Flexion	105
IV.4.1.2. Module D'élasticité Dynamique	106
IV.4.2. Essais Physiques	106
IV.4.2.1. Mesure De La Perte De Masse	106
IV.4.2.2. Porosimétrie A L'eau	107
IV.4.2.3. Perméabilité	107
A) Perméabilité A L'air	110
B) Pénétration A L'eau	111
IV.4.3. Observation De La Structure	111
IV.4.3.1. Analyse Par Images	111
IV.5 Conclusion	
<b>CHAPITRE V : RESULTATS ET ANALYSES</b>	
<i>Partie I : Influence du type d'addition sur le comportement à haute température des bétons autoplaçants</i>	
V.I.1. Introduction	114
V.I.2. Résultats Et Analyses	114
V.I.2.1. Résultat Des Essais Mécaniques	114
V.I.2.1.1. Essai De Compression	115
V.I.2.1.2. Essai De Flexion	117
V.I.2.1.3. Module D'élasticité Dynamique	119
V.I.2.2. Résultat Des Essais Physiques	122
V.I.2.2.1. Essai De Perte De Masse	122
V.I.2.2.2. Essai De Porosité Et Densité	123
V.I.2.2.2.1. Essai De Porosité	123
V.I.2.2.2.2. Essai De Densité	125
V.I.2.3. Essai De Perméabilité	127
V.I.2.3.1. Perméabilité Au Gaz	127
V.I.2.3.2. Essais De Pénétration De L'eau	128

V.I.2.4. Observation De La Structure	130
V.I.2.4.1. Analyse des images	130
V.I.3. Conclusion	131
<b><i>Partie II : Influence du taux d'addition sur le comportement à haute température des bétons autoplaçants</i></b>	
V.II.1. Introduction	134
V.II.2. Résultats Et Analyses	134
V.II.2.1. Résultat Des Essais Mécaniques	134
V.II.2.1.1. Essai De Compression	135
V.II.2.1.2. Essai De Flexion	138
V.II.2.1.3. Module D'élasticité Dynamique	140
V.II.2.2. Résultat Des Essais Physiques	143
V.II.2.2.1. Essai De Perte De Masse	143
V.II.2.2.2. Essai De Porosité Et Densité	144
V.II.2.2.2.1. Essai De Porosité	144
V.II.2.2.2.2. Essai De Densité	146
V.II.2.3. Essai De Perméabilité	147
V.II.2.3.1. Perméabilité Au Gaz	147
V.II.2.3.2. Essais De Pénétration De L'eau	149
V.II.2.4. Observation De La Structure	150
V.II.2.4.1. Analyse Des Images De Surfaces	150
V.II.3. Conclusion	153
<b>CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES</b>	155
<b>REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES</b>	157
<b>ANNEXES</b>	164

## *Introduction générale*

## INTRODUCTION GENERALE

Bâtir a toujours été l'un des premiers soucis de l'homme et l'une de ses occupations majeurs. A ce jour, la construction connaît un grand essor dans la plus part des pays, et très nombreux sont les professionnelles qui se livrent à cette activité.

Cependant, si le métier de construire peut être considéré parmi les plus anciens exercés par l'homme, il faut reconnaître qu'il leur a fallu au cours des dernières décades, s'adapter pour tenir compte de l'évolution des constructions.

Le béton est actuellement l'un des matériaux de construction les plus utilisés à travers le monde. La simplicité de sa fabrication et de sa mise en place, son faible prix de revient et les performances mécaniques et de durabilité qu'il assure ont légitimé son utilisation pour réaliser les ouvrages les plus divers, notamment des bâtiments, des immeubles d'habitation, des ponts, des routes, des barrages, des centrales thermiques et nucléaires, etc.

Depuis sa découverte et pendant de nombreuses décennies, ce matériau n'avait que peu évolué mais, à partir des années 1970-1980, d'importantes avancées, qui lui ont permis de diversifier les utilisations auxquelles il était jusque-là destiné, ont été réalisées. Ainsi, les études menées sur ses constituants granulaires ont conduit à améliorer ses propriétés existantes, en particulier avec les bétons à hautes performances (BHP). D'autres familles de béton, relatives à certaines applications, ont vu ensuite le jour comme les bétons à très hautes performances (BTHP), les bétons de fibres (BFM) et les bétons de poudre réactive (BPR).

Après la recherche du gain maximum de résistance et de durabilité, une étape supplémentaire a été franchie avec les bétons autoplaçants (BAP). Plus qu'une nouvelle famille de béton, les BAP constituent davantage une nouvelle technologie de construction. Celle-ci visait en effet au départ (fin des années 1980, au Japon) à optimiser la productivité des constructions en béton. Les différents avantages technico-économiques qu'elle présente ont suscité un intérêt grandissant des industriels à travers le monde, aussi bien dans les secteurs de la préfabrication que dans ceux des centrales de béton prêt à l'emploi. D'autre part, le champ d'utilisation des BAP est très varié du point de vue de la résistance mécanique (des bétons ordinaires aux bétons à hautes performances) comme du point de vue des applications visées (des bâtiments aux ouvrages d'art). Ceci confirme l'existence des BAP en tant que bétons de structure à part entière.

Les principaux avantages des BAP sont liés à leur mise en place qui ne nécessite pas l'apport de vibration, qu'elle soit interne ou externe. Ces avantages sont d'ordre technico-économique mais également social. Ainsi, l'absence de vibration des BAP engendre une diminution sensible des nuisances sonores ainsi que de la pénibilité du travail et une réduction des délais et des coûts globaux de production. Sa fluidité permet également de couler des milieux fortement ferraillés ou à géométrie complexe.

Cette mise en place, sous le seul effet de la gravité, nécessite une très 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 fines ou l'emploi d'un agent de viscosité.

Cependant, malgré les aspects intéressants qu'ils proposent, en particulier à l'état frais, et leur utilisation en constante augmentation, les BAP ne disposent pas encore du recul nécessaire et suffisant pour être acceptés par tous les maîtres d'ouvrage et maîtres d'œuvre ce qui limite encore leur diffusion [1].

La Durabilité d'un béton a été définie comme la capacité à résister au feu, aux intempéries, différentes actions climatiques, attaque chimique, à l'abrasion, ou tout autre processus de dégradation. Les dommages des structures en béton peuvent se produire en raison des incendies à l'égard de l'intégrité du bâtiment et de la sécurité humaine. Depuis les années 1920, de nombreux travaux ont été effectués sur les propriétés mécaniques résiduelles de béton soumises à des températures élevées. Le Feu est une réaction chimique entre le matériau inflammable et d'oxygène dans l'air. Les effets de la température élevée peuvent être vus visuellement sous la forme de la surface de décoloration, fissuration, l'écaillage et la désintégration qui rendent la structure en béton inutilisable.

Lorsque le béton est exposé à des températures élevées, tels que les incendies et les réactions chimiques des changements physiques qui affectent les propriétés mécaniques du béton surviennent comme : La réduction de résistance, le module d'élasticité, la perte de masse. [2]

Vu les différents incendies qui se sont produits dans les tunnels tel que : l'incendie du 18 novembre 1996 dans le tunnel sous la Manche, celui du 24 mars 1999 dans le tunnel du Mont Blanc et enfin le 30 mai 1999 dans le tunnel de Tauern en Autriche où un accident entre un camion et une voiture a provoqué un incendie.

En connaissant que les BAP sont des matériaux de construction privilégiés pour les tunnels à travers le monde, cela exige la maîtrise du comportement des BAP à haute température.

Cette thèse s'inscrit dans cette logique. Elle a été menée pour répondre à plusieurs questions dont certaines concernent l'évolution des propriétés mécaniques et physiques du matériau béton sous conditions extrêmes.

- Les évolutions de la résistance en compression, résistance en traction et module d'élasticité seront étudiés en fonction des différents paramètres influençant ces comportements.
- La perte de masse, porosité ainsi que la perméabilité à l'air et à l'eau seront aussi étudiés en fonction de la température.

La première partie comporte deux chapitres concernant l'état de connaissance.

Dans le premier chapitre nous avons répertorié et synthétisé les documents existants qui touchent de près ou de loin aux BAP ainsi qu'à leurs propriétés mécaniques et physico-chimiques.

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

La deuxième partie qui est la partie principale comprend trois chapitres :

Le chapitre III a été consacré à la caractérisation des matériaux utilisée dans notre recherche ainsi que les caractéristiques des bétons utilisé à l'état frais et durcis et leurs formulations.

Le chapitre IV parle essentiellement de la méthodologie de travail utilisé et des essais réalisés sur les bétons de notre recherche

Dans le dernier chapitre nous avons fait une synthèse de nos résultats mais aussi donné les analyses et commentaires nécessaires pour ces résultats. Les propriétés mécaniques et

physiques ont été étudiées avant et après le chauffage. Résistance à la compression, résistance à la traction en flexion, module d'élasticité dynamique, perte de masse, porosité, analyse d'image, perméabilité à l'air et pénétration d'eau ont été étudiés. Les échantillons ont été soumis à diverses températures de chauffage (20 ° C, 105 ° C, 250 ° C, 400 ° C, 600 ° C et 800 ° C) avec une vitesse de chauffage de 1 ° C / min. Une phase de stabilité variant d'une heure à deux heures (600 ° C et 800 ° C) a été appliquée afin de répandre la température dans les spécimens, puis une phase de refroidissement jusqu'à la température ambiante. Les résultats indiquent un comportement matériel similaire de BAP et de VC à haute température lorsque l'écaillage n'a pas eu lieu.

# ***CHAPITRE I : LES BETONS AUTOPLAÇANTS***

## **I.1. Introduction**

Les premiers Béton Autoplaçant (BAP) ont été développés en 1988 par Pr. Okamura de l'université de Kochi au Japon [3]. La première utilisation pratique intervient deux années plus tard pour la construction d'un pont. La fin des années 90 ont vu apparaître les premières applications en Suède, en France, aux pays bas et en Suisse. Depuis, son utilisation ne cesse de croître.

### **I.1.1. Définition**

Les BAP ou les bétons auto compactant sont des bétons très fluides, homogènes et stables qui se mettent en place sans vibrations mais sous l'effet de la gravité. Ils sont considérés comme des suspensions de particules solides. Ils ne doivent pas subir de ségrégation et présenter des qualités rhéologiques et mécaniques comparables à celles d'un béton vibré classique. L'Association Française de Génie-Civil [4] définit les BAP dans ses recommandations provisoires comme des bétons « très fluides, homogènes et stables ». Les termes qui définissent ces bétons sont :

- Béton Auto compactant
- Béton hyper fluide
- L'appellation la plus utilisée aujourd'hui est Béton Autoplaçant (BAP).

#### **I.1.1.1. Type de béton autoplaçant**

Il y a deux types de BAP selon leur mise en œuvre :

- Les BAP : ce type de béton est largement utilisé aux applications verticales (Murs, cheminées,...etc.).
- Les bétons autonivelants (BAN) : ce type de béton est largement utilisé aux applications horizontales (Planchers, couvertures,...etc.). [5]

#### **I.1.1.2. Avantages du BAP**

- Diminution du bruit (pour la mise en place traditionnelle par vibration, nous avons recours à des compresseurs qui fonctionnent avec des bruits sonores très élevés qui portent préjudice aux ouvriers et aux riverains).

- Rendement amélioré et exécution plus rapide.
- Liberté accrue des formes de coffrage.
- Facilité de bétonnage d'éléments exigus.
- Qualité accrue des surfaces de béton.
- Facilité de bétonnage d'élément avec une armature dense ou importante (gain de temps sur les bétonnages).
- Remplissage de parties difficilement accessibles.
- Diminution de la pénibilité du travail et suppression de l'apparition du syndrome de la vibration (une économie de main d'œuvre).

#### **I.1.1.3. Inconvénients du BAP**

- Coût élevé des matières premières (additions, adjuvants),
- Modifications des outils de fabrication (outils de mise en place). [6]

#### **I.1.2. Utilisation**

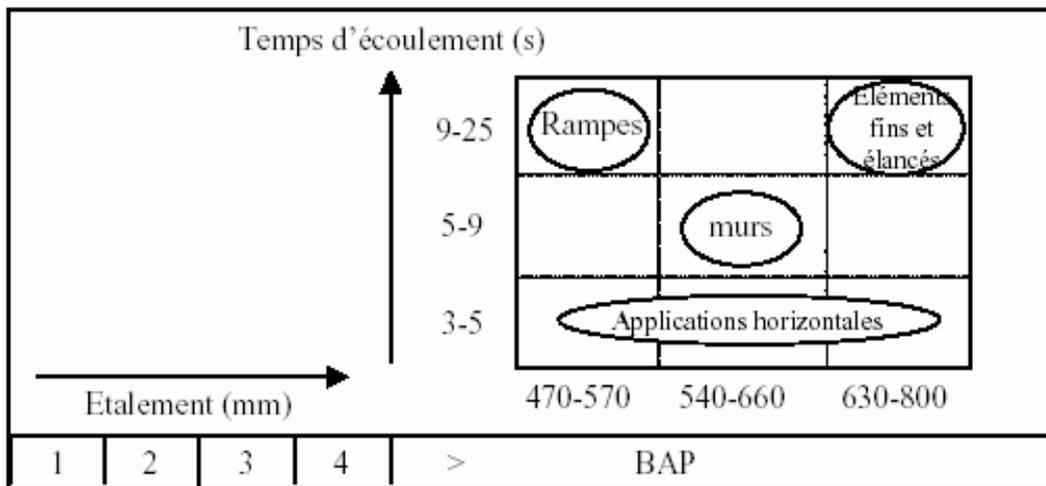
Les BAP sont utilisables aussi bien pour la réalisation d'ouvrages horizontaux que verticaux, sur tous les types de chantier, de bâtiments ou de génie civil et pour la réalisation de nombreux produits préfabriqués en béton. La plupart des ouvrages peuvent être réalisés en BAP (voiles, poteaux, piles, 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.
- Des formes et des géométries complexes : voiles courbes, etc.
- Des voiles minces et de grande hauteur : piles de ponts, etc.
- Des voiles complexes avec de nombreuses réservations ou de grandes ouvertures.
- Des exigences architecturales et de qualité des parements particulières.

- Des accès difficiles voire impossibles pour déverser le béton dans le coffrage et pour assurer la vibration. [7]

L'expérience acquise durant les dernières décennies a permis d'étendre la classification en fonction des différences existant entre les BAP et de déterminer différents domaines d'emploi, selon leurs propriétés, comme le montre la figure I.1 :



**Figure I.1.** Domaines de classification des bétons étendus au cas des BAP. [6]

Les mesures d'étalement et du temps d'écoulement sont respectivement réalisées au cône d'Abrams et au V-funnel. Le classement s'effectue selon leur intervalle d'écoulement "I" (tenant compte de la géométrie du coffrage et de la disposition des armatures), le type d'application, et l'épaisseur de la structure dans le cas d'une application horizontale.

**Tableau 1.** Classification des BAP selon leur application

		Application horizontale				Application verticale	
		Épaisseur ≤ 300mm		Épaisseur > 300mm			
		Longueur maximal de cheminement	< à 5m	5 - 10m	< à 5m	5 - 10m	
Intervalle d'écoulement (mm)	I ≥ 100	1	1	2a	2b	2a	2b
	80 ≤ I ≤ 100	2a	2b	2a	2b	2a	2b
	I < 80	3a	3b	3a	3b	3a	3b

Les motivations de ce choix les plus couramment rencontrées sont la facilité de mise en œuvre, la réduction des délais et la qualité des parements [8].

En termes de résistances mécaniques, les BAP «ordinaires» aussi bien que les BAP «Hautes Performances» peuvent être mis au point. [9]. Bien que leur formulation et leur contrôle, lors de la mise en œuvre, nécessitent une attention particulière, différents exemples ont mis en évidence les possibilités techniques qu'ils offrent.

## **I.2. Modes et méthodes de formulations des BAP**

Par définition, un BAP est un béton très fluide homogène et stable, qui se met en place par gravitation et sans vibration. Il ne doit pas subir de ségrégation et doit présenter des qualités comparables à celles d'un béton vibré classique. Le terme béton autonivelant peut aussi être utilisé mais il concerne plutôt des applications horizontales. [10]

La mise au point d'une formule de BAP est beaucoup plus complexe, parce que, d'abord, les constituants sont au nombre de six, contre quatre dans le cas des bétons ordinaires. Ensuite, le cahier des charges d'un BAP comporte plus de clauses, en particulier à l'état frais ; il faut réaliser, en plus de l'essai au cône, l'essai à la boîte en L et l'essai de stabilité au tamis. Enfin, et surtout, les propriétés des BAP sont contradictoires ; un béton riche d'une pâte fluide est très sensible à la ségrégation. [11]

### **I.2.1. L'aspect empirique de la formulation des BAP :**

La plupart des formules de BAP sont conçues actuellement de manière empirique. La méthode de Dreux-Gorisse n'est en effet pas adaptée, car elle ne prend en compte ni les adjuvants ni les additions. La formulation se fait donc sur la base de l'expérience acquise ces dernières années.

Mais, le cahier des charges des BAP est très souvent réduit à sa plus simple expression, puisqu'il ne concerne que les propriétés à l'état frais. En fait, le client majoritaire des fabricants de BPE est l'industrie du bâtiment, qui utilise principalement des bétons de 25 à 35MPa. Or, par expérience, on sait que ces résistances "ordinaires" sont facilement atteintes par les BAP (d'autant plus que leurs rapports E/C sont proches de ceux des BO qu'ils doivent remplacer)

En outre, l'aspect économique n'est pas encore le critère prédominant de la formulation ; les dosages en superplastifiant et en fines ne sont donc pas bornés. Il est vrai que

l'utilisation des agents de viscosité n'est pas très diffusée, justement à cause de leur coût. Avec le temps, et le retour d'expérience, certaines plages se sont dessinées pour chaque constituant, facilitant un peu le travail du formulateur.

- Le volume de gravillons est limité en prenant un rapport G/S (masse de gravillons sur masse de sable) proche de 1.
- Le volume de pâte varie entre 330 et 400 l/m<sup>3</sup>.
- La masse de ciment est supérieure ou égale au minimum requis par la norme du BPE (P18-305), soit en général de 300 à 350 kg/m<sup>3</sup>. En complément, la masse d'addition se situe entre 120 et 200 kg/m<sup>3</sup>.
- Le dosage en superplastifiant est proche de son dosage à saturation.

La formulation se fait par tâtonnement sur la base de ces plages. Certains formulateurs ont certes développés leur propre outil. Ce sont le plus souvent des méthodes dérivées de la méthode Dreux-Gorisse, avec une courbe granulométrique de référence englobant les éléments fins. Ces approches sont intéressantes dans le sens où elles permettent de détecter les classes granulaires manquantes. On ne peut toutefois pas les considérer comme des techniques à proprement parler de composition, car il n'existe pas de courbe de référence universelle ; la granulométrie n'est pas suffisante pour décrire un empilement, puisque la forme des grains est un facteur tout aussi essentiel. Ce sont plus des supports qui facilitent la formulation.

Après la conception sur le papier, la formule est vérifiée et optimisée par des essais effectués la plupart du temps directement en centrale à béton. Le nombre d'essais à réaliser dépend de la justesse de la composition initiale. Par ailleurs, le diagnostic d'une mauvaise formule est rendu difficile, en centrale à béton, par les erreurs inhérentes au dispositif de fabrication ; par exemple, la teneur en eau exacte du sable fait parfois défaut. On comprend dès lors le caractère fastidieux que peut prendre la formulation d'un BAP. [12].

### **I.2.2. Les approche de formulation :**

Il existe dans la littérature des techniques de formulation moins empiriques. Ces méthodes sont basées sur des concepts plus ou moins différents et peuvent être présentées en cinq grandes familles d'approches. Toutes les méthodes de formulation des BAP recueillies dans la littérature sont issues d'une ou plusieurs des approches suivantes [11] :

### I.2.2.1. Méthodes basées sur l'optimisation des mortiers

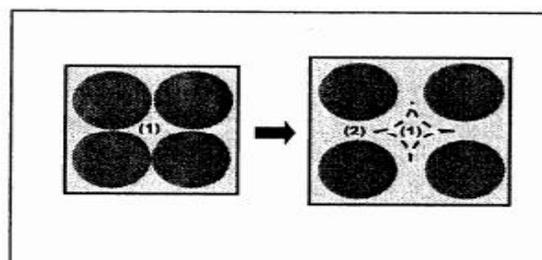
Okamura [13] [3], le concepteur des BAP propose de les formuler en composant en premier lieu le mortier du béton. Dans le mortier, la proportion de sable est posée arbitrairement. Il reste ensuite à trouver expérimentalement les dosages en eau et en superplastifiant, pour un liant donné (rapport massique ciment sur addition fixé), et suivant certains critères de rhéologie. La formule finale est obtenue en ajoutant au mortier un volume de gravillons limité, de manière sécuritaire, à la moitié de leur compacité.

A la suite d'une optimisation identique du mortier, Ouchi et al [13] proposent de doser les gravillons en cherchant expérimentalement leur volume limite menant à un blocage. Ce volume est évalué en comparant l'écoulement du mortier dans un entonnoir avec et sans gravillons.

La formulation d'un BAP par le biais de son mortier trouve sa justification dans quelques publications. Billberg et al. [14] montrent à cet effet que la rhéologie d'un béton se corrèle bien avec celle de son mortier. L'optimisation du mortier vise à réduire le seuil de cisaillement tout en ayant une viscosité suffisante en jouant sur la nature des liants, le dosage en eau et en superplastifiant [15]

### I.2.2.2. Méthodes basées sur l'optimisation du volume de pâte

Le béton est considéré comme un mélange biphasique, avec une phase solide, les granulats, et une phase liquide, la pâte. Dans le cas d'un BAP, la pâte joue un rôle prédominant. Oh et al [16]. Introduisent la notion d'excès de pâte schématisée sur la figure I.2. La formulation consiste à déterminer la quantité de pâte en excès optimale pour fluidifier le BAP et limiter les problèmes de blocage



**Figure I.2.** Notion d'excès de pâte :La pâte remplit la porosité (1) et écarte les granulats (2).[11]

Oh et al [16] ont obtenu par l'expérience des équations reliant l'épaisseur de la pâte autour des granulats et les constantes du modèle de Bingham (seuil de cisaillement et viscosité) du béton, exprimées par rapport à celles de la pâte. Lors de la formulation, il faut d'abord optimiser et caractériser la rhéologie de la pâte, puis déterminer à l'aide de ces équations la proportion minimale de pâte nécessaire pour fluidifier le béton. Les auteurs ne proposent pas de méthode pour doser la pâte par rapport au blocage. [11]

Il existe une approche similaire du dosage de la pâte mise au point par Bui et Pettersson [17-18]. Cette fois, deux critères, calés aussi expérimentalement, sont proposés ; un volume de pâte minimal vis à vis de la fluidité, et un volume de pâte minimal vis à vis du blocage. La notion d'excès de pâte a également été proposée par Chanvillard et al [19] dans une méthode de formulation des bétons de sable.

### **I.2.2.3. Méthodes basées sur l'optimisation du squelette granulaire**

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

Reprenons la figure I.2 en considérant maintenant que la phase interstitielle est l'eau de gâchage, et non plus la pâte. Plus la quantité d'eau qui écarte les grains (2) est importante, plus la suspension est fluide. A quantité d'eau constante, si on minimise la porosité (1) de l'empilement de grains, on maximise en conséquence le volume d'eau disponible pour fluidifier le mélange. Cet exemple simple nous montre donc le lien entre compacité et rhéologie. [12]

Sedran et De Larrard [20] [21] ont développé un modèle décrivant mathématiquement un empilement, à partir des caractéristiques des grains qui le composent (forme, granulométrie). Le modèle permet le calcul de la compacité du béton et d'un indice représentatif de son degré de serrage. A l'aide de ces variables sont modélisées la viscosité et le seuil de cisaillement du béton.

Le modèle est implanté dans un logiciel (Bétonlab Pro2), qui permet aussi de simuler les autres propriétés du béton (résistance, déformations différées, etc...). Ses auteurs proposent un cahier des charges spécifique pour les BAP, avec des indices pour estimer la capacité de remplissage et la stabilité du béton. [22]

#### **I.2.2.4. Méthode basée sur un plan d'expérience**

Le nombre de constituants d'un BAP est tel que l'utilisation d'un plan d'expérience est intéressante pour connaître l'effet des paramètres de composition. Khayat et al [23] ont réalisé une telle étude avec les facteurs suivants : le volume de gravillons, la masse de fines (C+A), le rapport massique eau sur fines  $E/(C+A)$ , la masse de superplastifiant et la masse d'agent de viscosité. Chaque facteur a été varié sur une plage comportant cinq points, ce qui élève le nombre de compositions testées à 25. Au final, les auteurs fournissent les modèles obtenus, notamment l'étalement et le taux de remplissage, en fonction des différents facteurs.

Ces modèles ne sont exploitables que pour les constituants utilisés dans l'étude. Plus qu'une méthode de formulation, cette approche fournit surtout un support pour corriger une formule ne répondant pas, par exemple, aux critères de l'AFGC. [20]

#### **I.2.2.5. L'approche basée sur l'utilisation du mortier du béton équivalent MBE :**

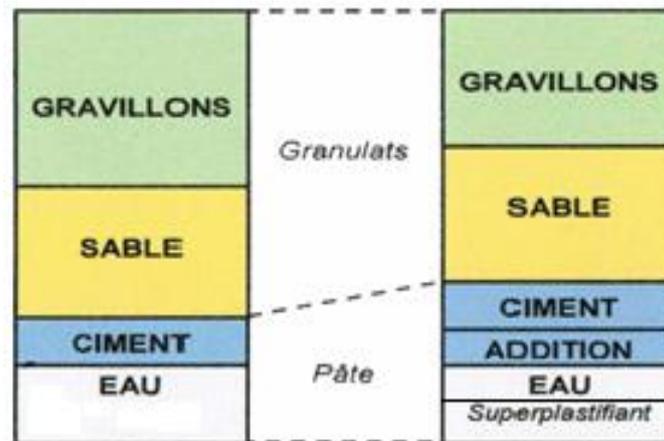
L'approche du Mortier de Béton Equivalent (MBE) a été initialement développée au CTG (Guerville, France) [20] pour faciliter la sélection des adjuvants lors de la formulation d'un béton, en utilisant des tests sur mortier au lieu de tests sur béton. En fonction des essais préalables réalisés, les résultats obtenus peuvent être utilisés de façon qualitative ou quantitative. L'expérience accumulée au cours des dernières années dans de nombreuses applications industrielles a confirmé la validité de cette méthode [24]. Cependant, l'ensemble de ces exemples concernait des bétons d'ouvrabilité classique.

O. Haddad, S. Aggoun et al [24], ont mené un travail qui consistait à l'extension de la méthode MBE aux BAP, en étudiant les compositions de 5 bétons et leurs MBE. Les auteurs ont pu confirmer qu'il est possible d'étendre la méthode MBE aux BAP et la composition particulière des BAP ne change pas les principes de calcul des MBE.

L. Nachbaur et al. [12] ont aussi étudié la faisabilité de l'extension de la méthode MBE au BAP. Ils ont pu montrer que la méthode MBE qui était initialement développé pour des bétons d'affaissement inférieur à 21 cm peut être adaptée aux BAP et aussi que les principes de base de la méthode peuvent être gardés.

### I.3. Particularités de la composition des BAP

Selon les constituants on trouve une différence entre le béton ordinaire (BO) et le béton autoplaçant (BAP). Le béton auto-plaçant contient 6 ou 7 composants dont le ciment, l'eau, le sable, les gravillons, une addition (filler calcaire), un superplastifiant et/ou un agent de viscosité et cela afin d'avoir les caractéristiques requises à l'état frais comme le montre la figure suivante :



**Figure I.3.** Différence entre les composants d'un BAP et un BO [20]

#### I.3.1. Un volume de pâte élevé

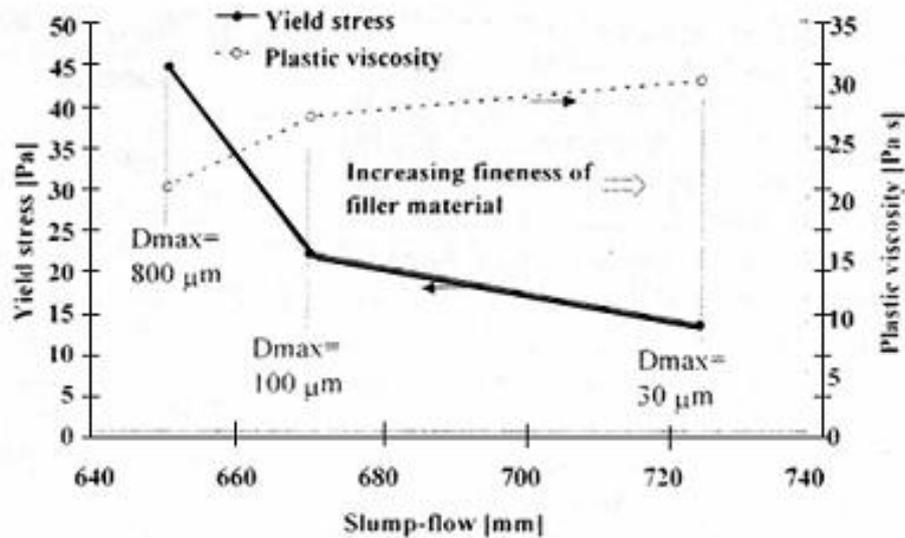
Les frottements entre granulats sont source de limitations vis-à-vis de l'étalement et de la capacité au remplissage des bétons. Le rôle de la pâte (ciment + additions + eau efficace + air) étant précisément d'écarter les granulats, son volume dans les BAP est donc élevé (330 à 400 l/m<sup>3</sup>) [20].

#### I.3.2. Une quantité de fines ( $\varnothing < 80 \mu\text{m}$ ) importante

Les compositions de BAP comportent une grande quantité de fines (environ 500kg/m<sup>3</sup>) pour limiter les risques de ressuage et de ségrégation. Toutefois, le liant est fréquemment un mélange de deux, voire trois constituants, pour éviter des chaleurs d'hydratation trop grandes.

Ce sont les exigences de résistance à la compression, les critères de durabilité et les paramètres d'ouvrabilité qui déterminent le choix de ces additions (cendre volante, laitier de haut fourneau, filler calcaire, etc...), et leur proportion respective. L'introduction d'additions

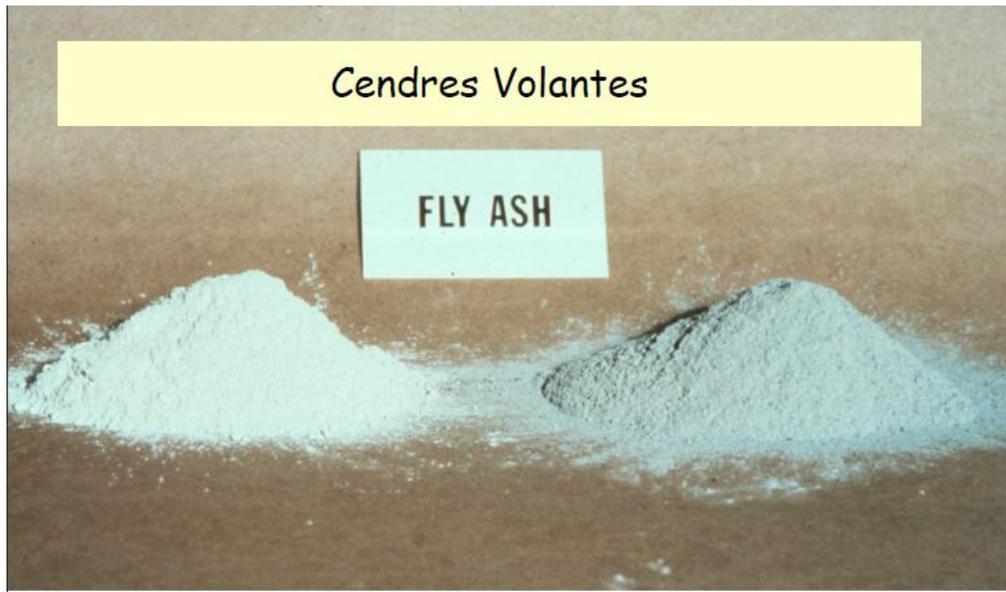
minérales entraîne une modification de la porosité de la matrice cimentaire et influence les caractéristiques mécaniques et autoplaçantes du béton (figure I.4.) [25].



**Figure I.4.** Influence de la finesse d'un filler sur le comportement rhéologique d'un béton [26]

#### a) Les cendres volantes

Le remplacement d'une partie du ciment par des cendres volantes a une influence faible sur le seuil d'écoulement et la viscosité des pâtes de ciment [27]. Ferraris et Al [28] montrent par ailleurs que le diamètre moyen des cendres volantes a une légère influence sur la valeur du seuil d'écoulement. Les mélanges les plus fluides étant obtenus avec les particules les plus fines (diamètre moyen 3,1 µm). Associées à un superplastifiant, les cendres volantes permettent de réduire le dosage en adjuvant nécessaire à l'obtention d'une certaine fluidité (seuil de l'ordre de 20 Pa), mais le rapport E/C doit être suffisamment important (équivalent au rapport utilisé pour l'échantillon témoin) sinon la demande en adjuvant augmente fortement. [6]



**Figure I.5.**Photo de la Cendre volante

#### **b) Fumées de silice**

L'influence des fumées de silice doit être clarifiée. Elles augmentent les valeurs de seuil d'écoulement et de viscosité en augmentant la compacité des mélanges, alors que pour Carlsward [29], par exemple, les fumées de silices ne modifient pas la viscosité. Par rapport à la rhéologie d'un mélange de référence, Ferraris et al. [28] montre que l'utilisation de fumée de silice augmente la demande en eau et en superplastifiant que ce soit pour des pâtes de ciment ou pour des bétons.

#### **c) Laitiers de hauts fourneaux**

Le remplacement d'une partie du ciment par des laitiers de hauts fourneaux permet globalement de réduire le seuil d'écoulement et la viscosité des pâtes de ciment. Shi [30], montre par exemple que les laitiers de hauts fourneaux absorbent le superplastifiant. Il est donc possible que la demande en superplastifiant soit plus importante pour obtenir une même fluidité ou valeur de seuil. [6]

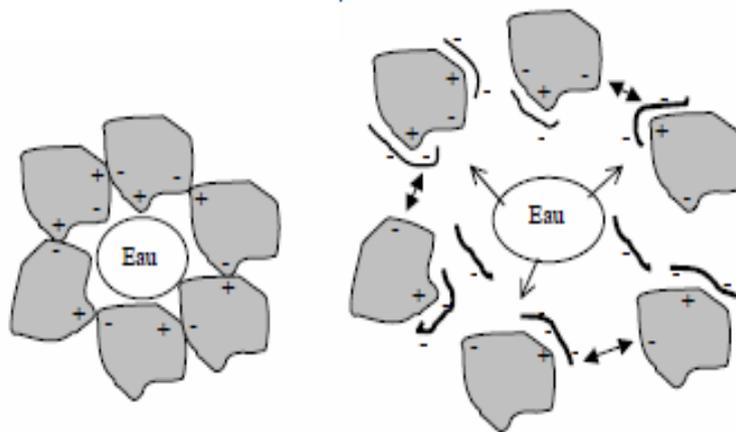
#### **d) Filler calcaire**

Zhu et Gibbs cité par [31] ont étudié l'influence de différents types de filler calcaire. Dans le cas des pâtes de ciment, le type de filler utilisé ne semble pas avoir d'influence sur l'étalement. Par contre, si on s'intéresse au béton, ils montrent que le type de filler a une forte incidence sur la quantité de superplastifiant pour un étalement donné. En effet, le filler à base

de craie demande plus d'adjuvantation que le filler calcaire. La différence intervient dans la présence d'impuretés, la compacité et le processus d'absorption. Malgré cela, quel que soit le type de filler utilisé, leurs résultats montrent que plus il y a de filler en remplacement du ciment, moins il faut de superplastifiants pour atteindre un étalement donné.

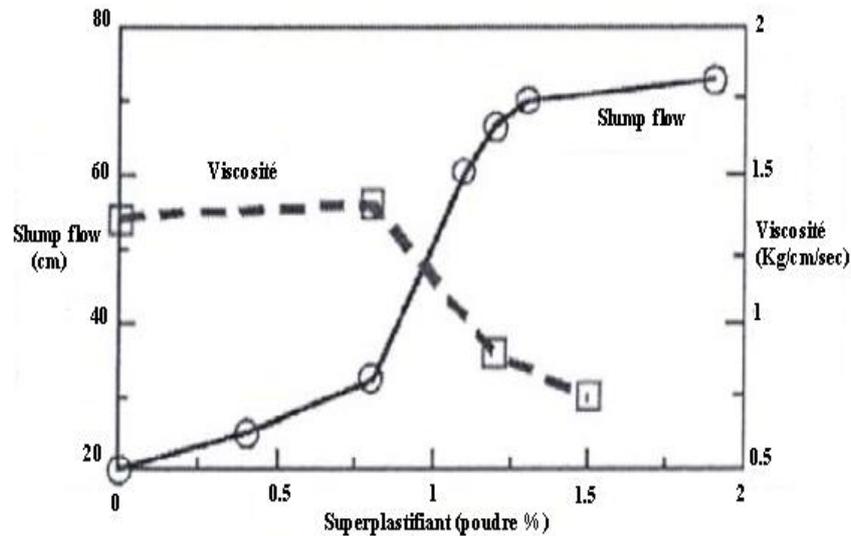
### I.3.3. L'emploi de superplastifiants

L'apparition des bétons autoplaçants est fortement liée aux progrès réalisés dans le domaine des adjuvants et plus particulièrement celui des superplastifiants (SP) [6,32]. Les superplastifiants permettent en effet de défloculer les grains de ciment. Ils agissent par répulsion électrostatique en neutralisant les charges électriques présentes à la surface des grains et/ou par répulsion stérique en écartant les grains les uns des autres, grâce à des chaînes moléculaires très longues. L'eau initialement piégée entre les floes est de nouveau disponible pour l'hydratation ou pour fluidifier le mélange. Il devient donc possible de fabriquer des bétons très fluides, même avec moins d'eau qu'il n'en faut pour hydrater le ciment, donc de fabriquer des bétons à faible rapport E/C, faciles à mettre en place.



**Figure I.6.** Action des superplastifiants - Défloculation des grains de ciment [6]

L'ajout d'un superplastifiant permet ainsi d'augmenter significativement la fluidité des BAP que ce soit du point de vue de leur étalement ou du point de vue de leur seuil d'écoulement. La figure suivante montre par exemple que l'étalement augmente très fortement à partir d'un certain dosage en superplastifiant. [33]



**Figure I.7.** Influence de la quantité de superplastifiant sur l'étalement et la viscosité d'un béton [33]

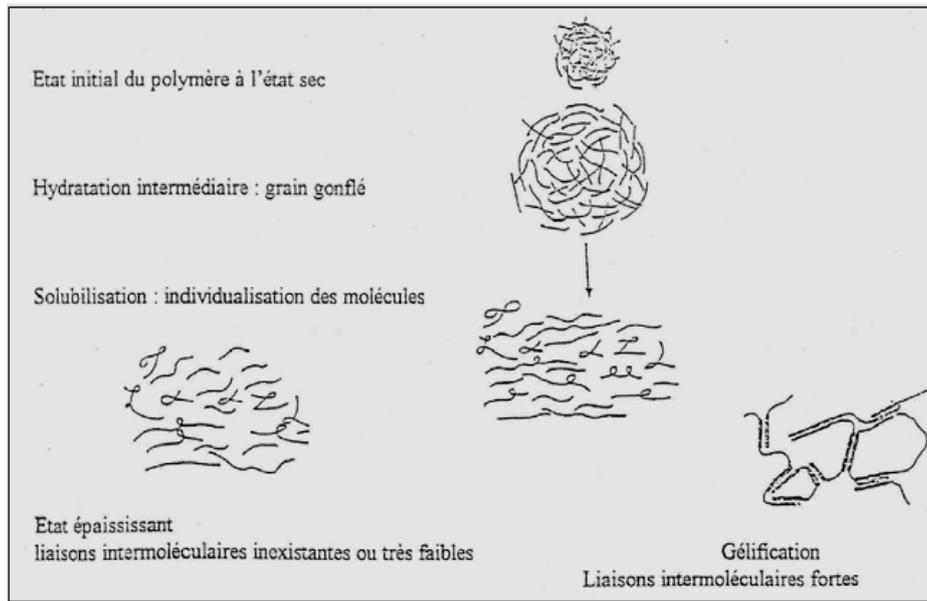
La fluidité des BAP est obtenue en ajoutant des superplastifiants. Ces fluidifiants sont identiques à ceux employés pour les autres types de béton. Cette adjuvantation ne doit pas être trop élevée (proche du dosage de saturation) sous peine d'augmenter la sensibilité du béton à des variations de teneur 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 [17].

#### **I.3.4. L'utilisation éventuelle d'un agent de viscosité (rétenteur d'eau)**

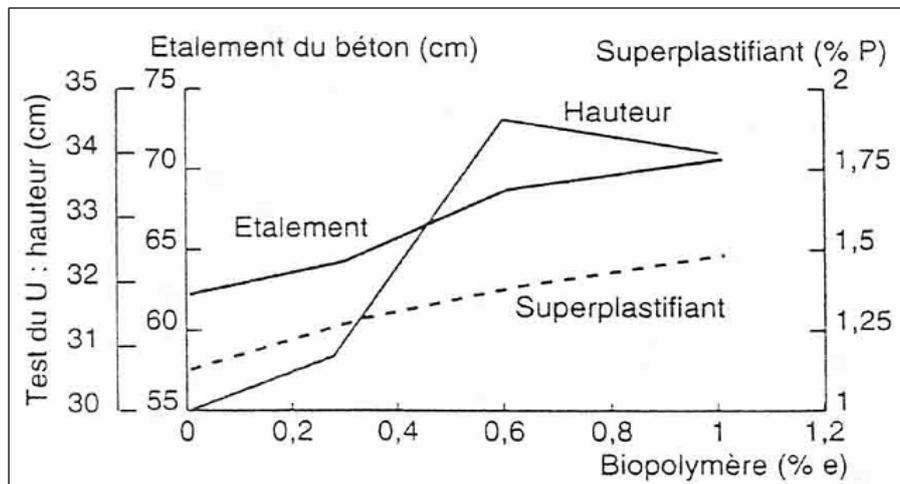
L'ajout d'un superplastifiant ayant pour effet d'augmenter l'ouvrabilité du béton mais également de réduire sa viscosité, afin de minimiser ce dernier point, les BAP contiennent souvent un agent de viscosité. Ce sont généralement des dérivés cellulosiques, des polysaccharides, des colloïdes naturels ou des suspensions de particules siliceuses, qui interagissent avec l'eau et augmentent la viscosité de celle-ci (figure I.8).

Ils ont pour but d'empêcher le ressuage et les risques de ségrégation en rendant la pâte plus épaisse et en conservant une répartition homogène des différents constituants.



**Figure I.8.** Interaction entre l'eau et les polysaccharides [34]

Cependant, l'action de ces produits est, d'une certaine façon, opposée à celle des superplastifiants. La formulation d'un BAP requiert donc la sélection d'un couple agent de viscosité-superplastifiant compatible et l'optimisation de leur dosage (figure I.9.).



**Figure I.9.** Optimisation du dosage agent de viscosité – superplastifiant d'après [10]

Ces produits semblent utiles pour des bétons ayant des rapports eau/liant (E/L) élevés, les fines n'étant alors pas suffisantes pour fixer l'eau dans le béton. En revanche, leur utilisation ne se justifie pas pour des BAP ayant des rapports E/L faibles ( $E/fines < 0,3$ ). Pour les bétons intermédiaires, leur utilisation doit être étudiée au cas par cas.

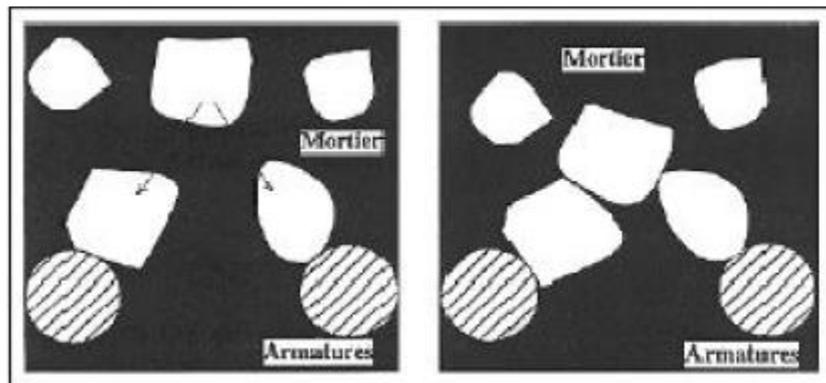
Les agents de viscosité ont aussi la réputation de rendre les BAP moins sensibles à des variations de la teneur en eau à l'égard des problèmes de ressuage et de ségrégation, mais ils peuvent conduire à des entraînements d'air excessifs et à une diminution de la fluidité [35].

### I.3.5 Un faible volume de gravillon

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

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

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



**Figure I.10.** Phénomène de blocage des granulats au droit d'un obstacle [15].

## I.4. Caractérisation du béton à l'état frais

Il n'existe pas d'essai standard, ni de critère bien défini pour s'assurer qu'un béton est effectivement autoplaçant. En effet, le comportement spécifique des BAP à l'état frais rend quasi inadaptes la plupart des essais classiques sur les bétons traditionnels : les essais au maniabilimètre ne sont pas possibles en l'absence de vibration et l'essai classique d'affaissement au cône d'Abrams est inopérant, l'affaissement étant ici « total ». C'est pourquoi les chercheurs et les industriels ont développé toute une série d'essais plus ou moins complémentaires, mais dont l'interprétation reste bien souvent subjective et dépendante

de l'opérateur. La figure 1.1 illustre la diversité des dispositifs expérimentaux proposés par [35]

L'ouvrabilité des BAP se décompose en trois caractéristiques principales :

- Mobilité en milieu non confiné (décrit par l'essai d'étalement au cône d'Abrams).
- Mobilité en milieu confiné (décrit par l'essai d'écoulement à la boîte en L).
- Stabilité (résistance à la ségrégation décrite par l'essai de stabilité au tamis) [36].

#### **I.4.1. Mobilité en milieu non confiné**

##### **I.4.1.1. Essai d'étalement (Slump flow)**

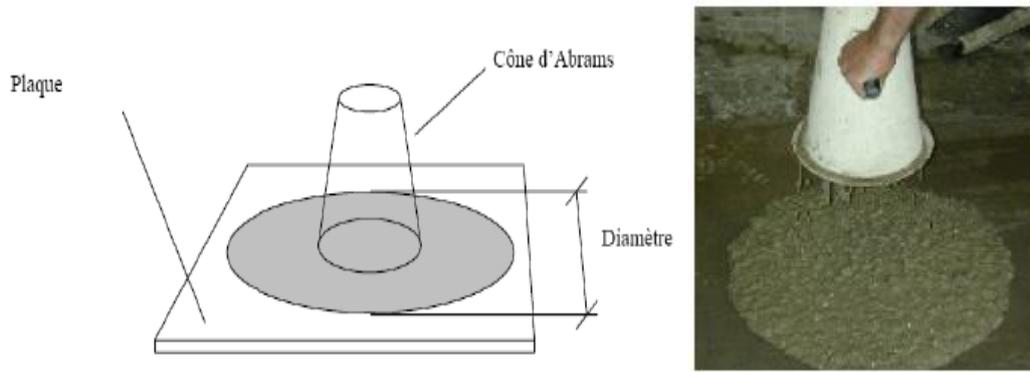
L'essai d'étalement est utilisé pour caractériser la fluidité du béton. C'est une variante de l'essai d'affaissement sur cône d'Abrams qui consiste à mesurer (en utilisant le même matériel) le diamètre d'étalement de la galette de béton sur deux côtés perpendiculaires. Les valeurs sont relevées en millimètres. [4]

Il y a différentes classes d'étalement :

**Tableau 2.** Classe d'étalement [4]

<b>Classe</b>	<b>Etalement (mm)</b>
SF1 (Slump Flow)	550 à 650
SF2	660 à 750
SF3	760 à 850

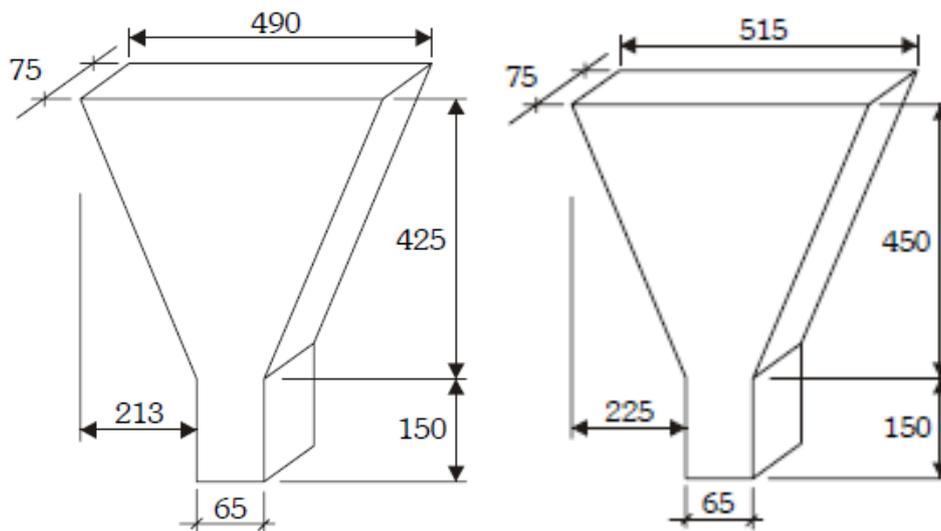
Les valeurs d'étalement au cône d'Abrams acceptables pour un BAP sont généralement fixées dans la fourchette de 600 à 750 mm (pas de ségrégation visible en fin d'essai c'est-à-dire pas d'amoncellement de gros granulats ni d'auréole de laitance). [4]



**Figure I.11.** Essai d'étalement au cône d'Abrams. [6]

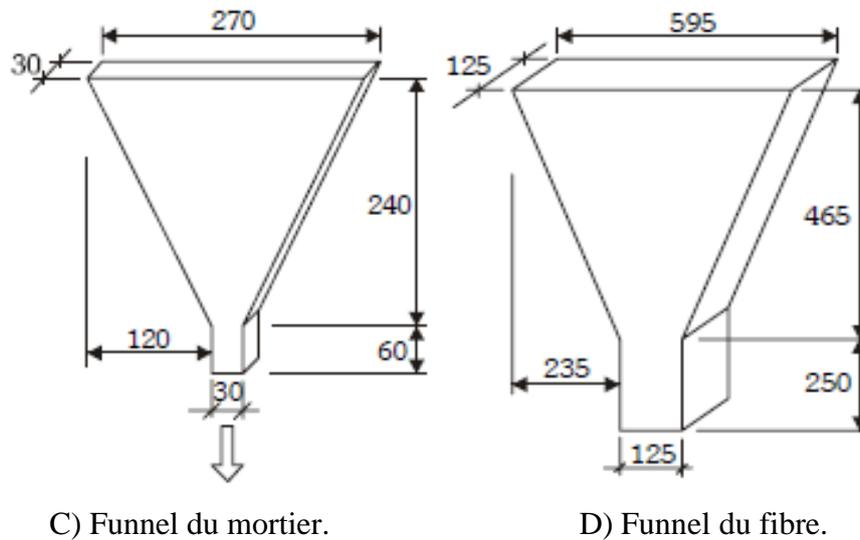
#### I.4.1.2. Essai d'entonnoir (V-Funnel)

La procédure d'essai avec l'entonnoir est la suivante, l'entonnoir dont les dimensions sont définies sur la figure suivante est remplie de béton jusqu'en haut. Le clapet de fermeture situé à sa base est ensuite ouvert, ce qui provoque l'écoulement du béton, dont on mesure le temps nécessaire jusqu'à ce que l'entonnoir se soit entièrement vidé. Ce temps d'écoulement est souvent le critère utilisé pour définir la viscosité du béton autoplaçant. Plus le béton s'écoule rapidement hors de l'entonnoir, plus sa viscosité est faible. Un temps d'écoulement compris entre 8 et 14 secondes est recommandé pour le BAP. [3]



A) V-Funnel (2001).

B) V-Funnel (2002).



**Figure I.12.**Dimensions du V-Funnel [5]

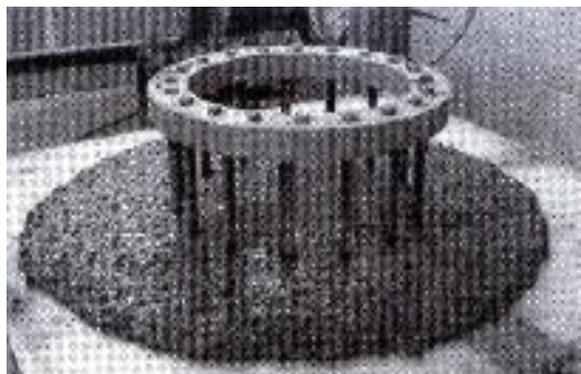
Le temps d'écoulement au V-Funnel dépend également du type d'application, mais n'est groupé que selon 2 classes :

- ✓ Classe VF1 : temps d'écoulement inférieur à 10s.
- ✓ Classe VF2 : temps d'écoulement compris entre 7 et 27s.

## I.4.2. Mobilité en milieu confiné

### I.4.2.1. Essai d'étalement modifié (J-Ring test)

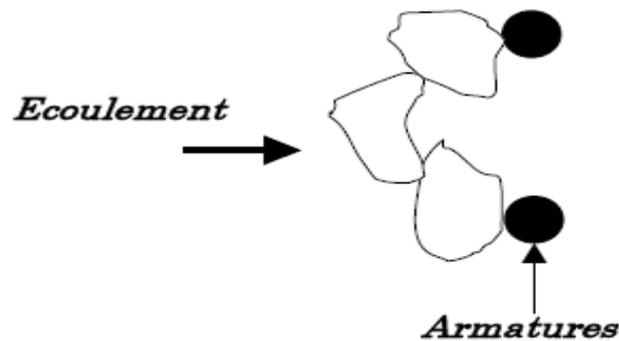
L'essai d'étalement modifié (J-Ring) fut développé au Japon et consiste à faire écouler le béton au travers de barres d'armatures afin de pouvoir évaluer sa tendance au phénomène de blocage. A cet effet, le béton s'écoule à partir du cône disposé au centre d'un anneau métallique. Sur le diamètre (300mm) de cet anneau sont soudées des barres d'armatures ( $\Phi = 16$  à 18mm), espacées régulièrement d'environ deux fois et demi leur diamètre.



**Figure I.13.**Essai d'étalement modifié (J-Ring). [6]

#### I.4.2.2. Essai à la boîte en L (L-Box)

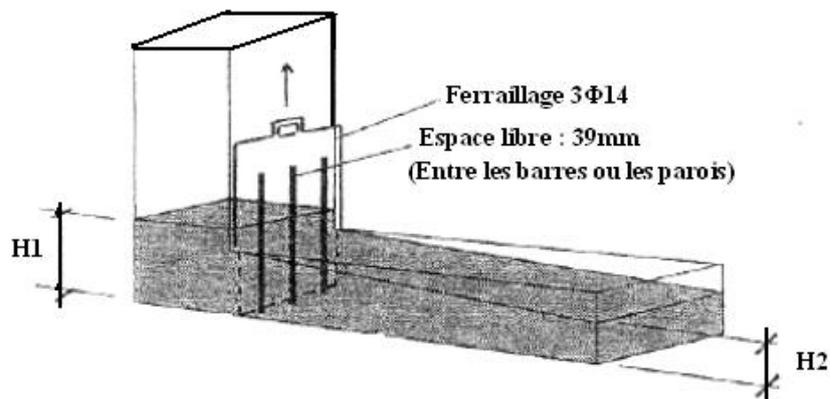
Cet essai permet de tester la mobilité du béton en milieu confiné et de vérifier que la mise en place du béton ne sera pas contrariée par des phénomènes de blocage au droit des armatures.



**Figure I.14.** Risque de blocage au droit des armatures. [6]

La boîte composée de deux parties, une partie verticale et une partie horizontale séparée par une trappe. Des armatures peuvent être intercalées avant la trappe. [4]

Le schéma de la boîte ainsi que le principe de l'essai sont décrits sur la figure suivante :



**Figure I.15.** Schéma de principe de l'essai de la boîte en L. [36]

- La partie verticale de la boîte est remplie de béton qu'on laisse reposer une minute.
- On lève la trappe et on laisse le béton s'écouler à travers le ferrailage.
- Une fois l'écoulement terminé, on mesure les deux hauteurs  $H_1$  et  $H_2$  et on exprime le résultat en terme de taux de remplissage  $H_2/H_1$ .

Le taux de remplissage pour un BAP doit être supérieur à 0.8. Lorsque le béton s'écoule mal à travers le ferrailage où qu'il y a blocage des granulats, c'est le signe de l'apparition de la ségrégation.

#### I.4.2.3. Essai à la boîte en U (U-Box)

Il est utilisé au Japon et en Angleterre. Le principe est sensiblement le même que pour la boîte en L. Le béton doit s'écouler à travers des armatures et remonter dans la deuxième partie du U de la boîte. Une hauteur de remplissage supérieure à 300 mm est requise.

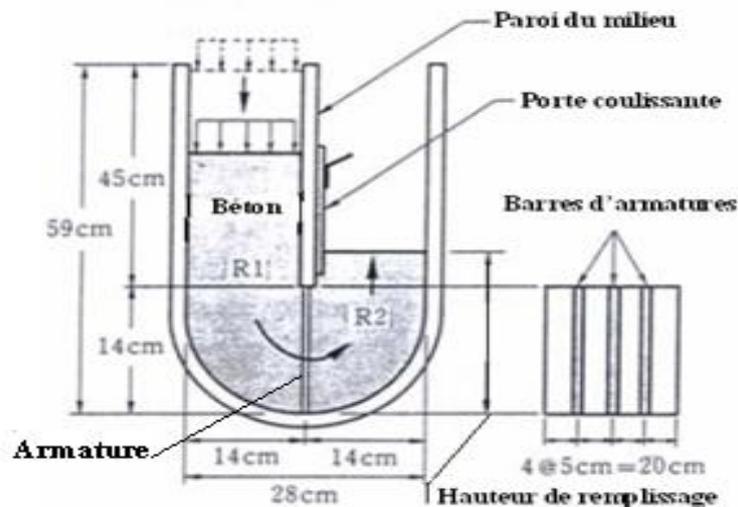


Figure I.16. Essai de la boîte en U. [6]

### I.4.3. Stabilité

#### I.4.3.1. Résistance à la ségrégation

##### I.4.3.1.1. Essai de stabilité au tamis

Cet essai vise à quantifier le risque de ségrégation des BAP. Il permet de compléter l'essai de la boîte en L. On prélève un échantillon de 10 litres de béton, après 15 minutes d'attente, on verse sur un tamis d'ouverture 5 mm, une masse de 4.8 kg de béton et on relève la masse de l'échantillon ainsi que celle du fond avec la laitance. [36]



**Figure I.17.**Essai de stabilité au tamis. [6]

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

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

La mesure de ce pourcentage permet de classer les formules de BAP :

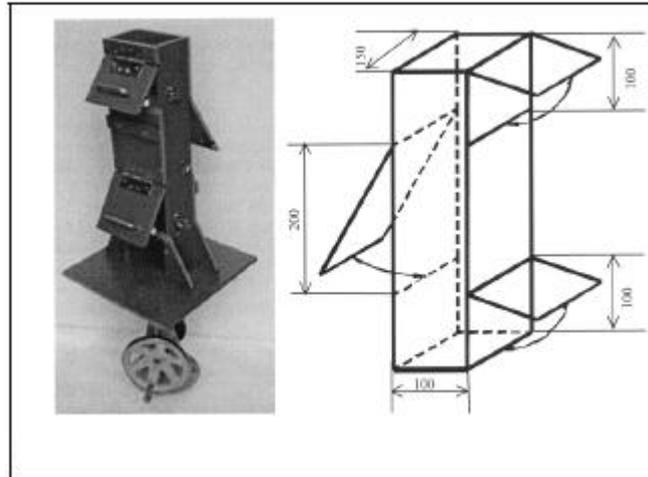
- $0\% < P_{\text{Laitance}} < 15\%$  : Stabilité satisfaisante
- $15\% < P_{\text{Laitance}} < 30\%$  : Stabilité critique
- $P_{\text{Laitance}} > 30\%$  : Stabilité très mauvaise

Ces essais permettent d'avoir une vision qualitative des BAP. [36]

#### **I.4.3.1.2. Essai à la colonne**

Cet essai a été développé indépendamment par le centre ACM de l'Université de Paisley (en 2002) et par l'Université de Ghent (en 2001).

Il s'agit de remplir une colonne et de laisser le matériau au repos pendant 1min. Après cette phase de repos, la colonne est vibrée à l'aide d'une table à secousses. Les échantillons des différentes parties de la colonne (haut, milieu, fond) sont prélevés. Chaque prélèvement est lessivé et tamisé afin de ne récupérer que les gros granulats qui sont ensuite pesés. [6]



**Figure I.18.**Essai de stabilité à la colonne. [37]

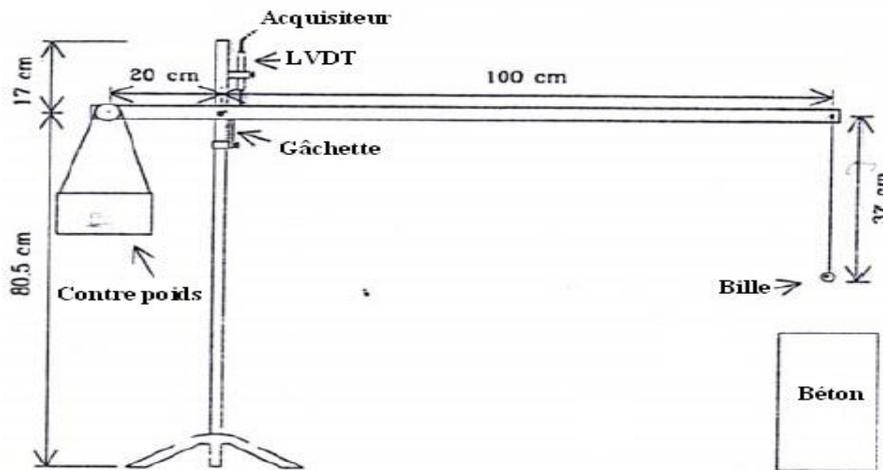
Le critère de stabilité de cet essai est le suivant :

- Si le rapport entre la masse de l'échantillon supérieur/ masse de l'échantillon inférieur est supérieur à 0,95 alors le béton a une bonne résistance à la ségrégation
- Si ce rapport est inférieur à 0,9 il y a un risque de ségrégation du béton.

Cet essai permet d'obtenir une certaine appréciation de la ségrégation (gradation de la ségrégation). Le principe est simple et les résultats sont obtenus directement. Cependant, la réalisation d'un essai nécessite un appareillage spécifique (colonne et balances pour les pesées) et prend du temps. [6]

#### **I.4.3.1.3. Essai à la bille**

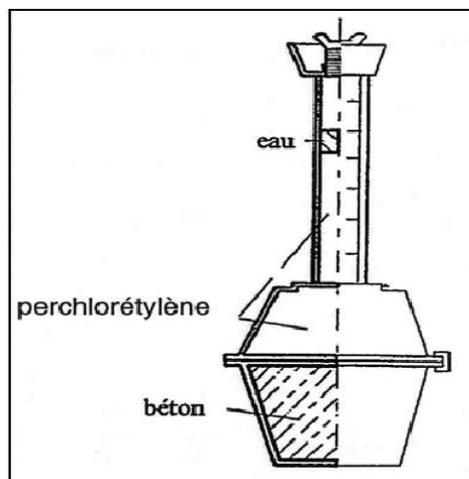
L'essai a été développé au LCPC en collaboration avec l'Université de Sherbrooke par Trudel et repris par Sedran [38]. Il s'agit de mesurer l'enfoncement d'une bille de même dimension que les gros granulats, immergée dans un échantillon de béton (figure I.19). La densité apparente de la bille peut être ajustée grâce à un contrepois et le déplacement de la bille est mesuré par un capteur LVDT relié à un ordinateur. Les résultats sont donc obtenus directement. [6]



**Figure I.19.** Essai à la bille développé par Trudel. [38]

#### I.4.3.2. Ressuage

La capacité de ressuage peut être mesurée par l'essai à l'aéromètre modifié (développé par le LCPC, figure I.12) : le volume d'eau libéré par l'échantillon de béton remonte au-dessus du perchloroéthylène (dont la densité est supérieure à celle de l'eau : 1,59) dans une colonne graduée où il est facile de l'estimer [4]. Ce test semble cependant peu pratique à utiliser étant donné la nocivité du produit employé.



**Figure I.20.** Essai de ressuage[39]

### I.5. Propriétés du béton durci

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

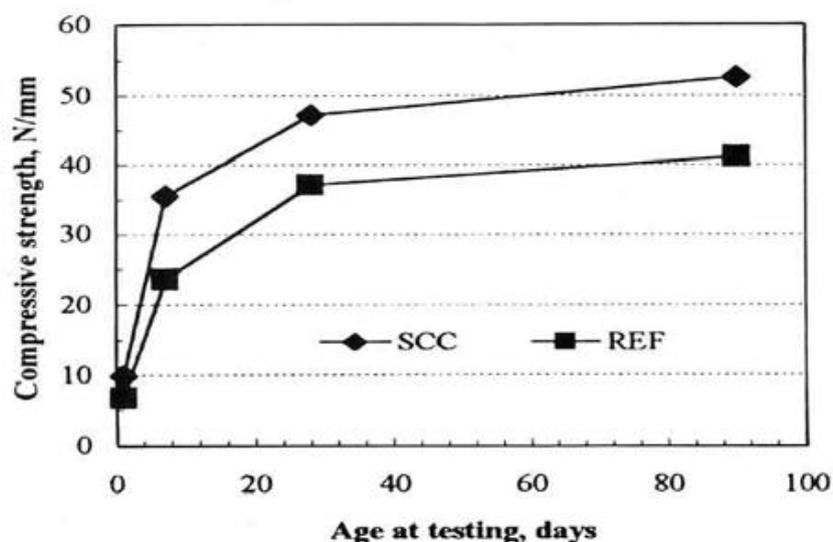
### I.5.1. Résistance à la compression

Les BAP se caractérisent de rapport E/C bas, ce qui amène à des bonnes résistances mécaniques. La résistance tend à être régie par le type et la proportion d'addition de poudre que par le rapport de E/P [40].

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. Ces effets ont une influence sensible sur la résistance mécanique jusqu'à 28 jours puis deviennent moins significatifs par la suite.

Les travaux de [41] ont montré que la résistance à 7j est plus élevée pour les BAP que celle de BV référence, en raison de la présence de poudre de calcaire qui accélère l'hydratation et la résistance à la compression au jeune âge.

Zhu et al. [31] ont montré que la résistance de BAP utilisant la poudre de pierre à chaux augmente de 50 à 80% de celle de référence à 7j et de 20 à 40% à 28j, ils ont expliqués cette augmentation par la poudre à pierre à chaux accélère l'hydratation de ciment et augmente la résistance au jeune âge.



**Figure I.21.** Evolution de la résistance mécanique d'un BAP (SCC) et d'un BV (REF) correspondant [41]

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

Ainsi, l'introduction d'un agent de viscosité peut diminuer sensiblement la résistance mécanique d'un BAP aux jeunes âges [42].

### I.5.2. Résistance à la traction

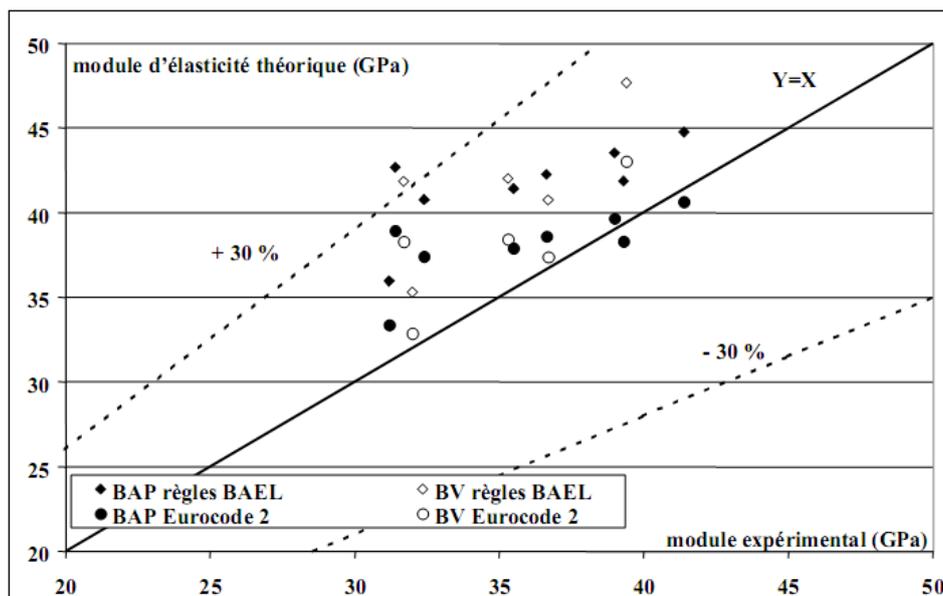
Il n'y a aucune différence entre la résistance à la traction des BAP et celle des bétons référence. Par contre, [41] ont montrés que la résistance à la traction est plus grande que la résistance des bétons références.

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

### I.5.3. Module d'élasticité

Les différents matériaux de BAP peuvent montrer un différent comportement de relation contrainte-déformation si les BAP contiennent une baisse quantité de gros granulats [43]

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

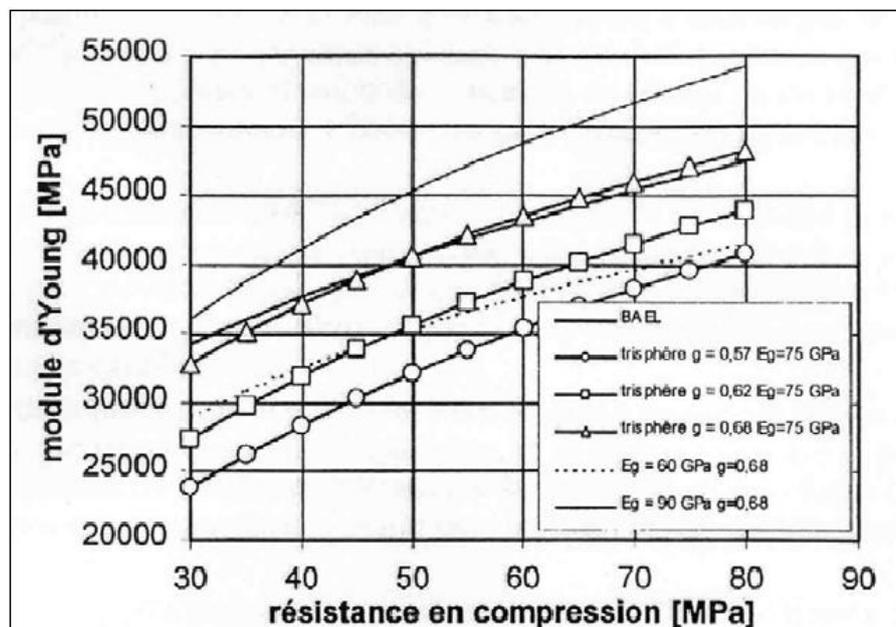


**Figure I.22.** Comparaison des modules élastiques théoriques de BAP et de bétons vibrés avec leurs valeurs expérimentales [36]

Certains auteurs ont trouvé que le module élastique de BAP coïncide bien avec celui de BV avec des propriétés similaires quand la résistance est constante [44].

D'autres recherches ont trouvés que le module élastique de BAP est inférieur à celui de BV donc le BAP est plus rigide.

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



**Figure I.23.** Evaluation du module du béton en fonction de sa résistance, d'après le modèle réglementaire et un modèle d'homogénéisation [39]

## I.6. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons apporté quelques éclaircissements sur les BAP et ses différents ingrédients nécessaires à sa fabrication, leur principe de formulation ainsi que leur caractérisation à l'état frais mais aussi durci pour mieux comprendre ce type de béton.

***CHAPITRE II : COMPORTEMENT DU BETON A  
HAUTE TEMPERATURE***

## **II.1 Introduction**

Chaque année des incendies surviennent dans des tunnels et des installations industriels. Les dommages causés montrent qu'une évaluation précise de la protection contre l'incendie des ouvrages doit être réalisée.

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

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

- Propriétés mécaniques ;
- Propriétés thermiques ;
- Microstructure.

Dans ce chapitre, nous présentons une étude sur l'influence de la température sur les propriétés mécaniques, physiques, thermiques et microstructure du béton, mais avant cela nous allons considérer les risques du feu et nous parlerons aussi de quelques propriétés générales du béton et des tests et courbes utilisés lors des simulations.

## **II.2. Les risques du feu**

Même si le béton reste « le » matériau par excellence qui fait preuve de la meilleure résistance au feu, il nous est apparu indispensable au préalable de visiter ou de revisiter les fondements de la physique de l'incendie. Ceci devrait apporter des éléments d'appréciation et améliorer la compréhension du comportement des structures soumises au feu.

Il est vital de concevoir et de construire des bâtiments et des structures qui protègent effectivement et efficacement tant bien les personnes que les biens. Les statistiques annuelles des décès causés par les incendies dans les habitations et partout ailleurs nous renvoient à la dure et triste réalité. Simultanément ces événements nous permettent de tirer des enseignements relatifs à la sécurité incendie pour la conception des constructions. [46]

Les incendies concernant des ouvrages en béton depuis les vingt dernières années sont en nette augmentation. Parmi ces feux, les plus connus sont ceux du Tunnel sous la Manche (1996, 2006, 2008), du tunnel du Mont Blanc (1999) ainsi que la Tour Windsor à Madrid (2005). Lors de ces incendies, les structures ont subi d'importants dégâts. Tout cela implique des coûts de réparations importants ainsi qu'une immobilisation de la structure [47].



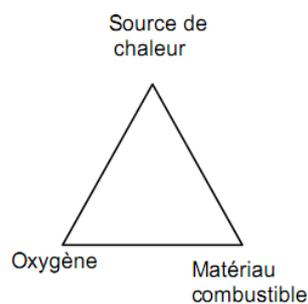
**Figure II.1** Photos des conséquences des incendies [36].

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.

### II.3 Actions et cycles thermiques

#### II.3.1. Le triangle du feu

Pour qu'un incendie puisse prendre naissance, il faut la présence conjuguée de trois éléments : l'oxygène (21% en volume d'air), des matériaux combustibles et une source de chaleur. Ils constituent ce qu'il est convenu d'appeler le triangle du feu, représenté à la figure ci-dessous. Les deux premiers éléments entrent en combustion lorsque la température est atteinte. La combustion du carbone produit du gaz carbonique et, si l'oxygène vient à manquer, elle produit le gaz bien connu, très dangereux pour l'être humain, le  $\text{CO}_2$



**Figure II.2.** Le triangle de feu [46]

#### II.3.2. Développement d'un incendie

Au cours d'un incendie, on peut distinguer trois phases :

- Première phase dite de « développement » : le combustible commence à brûler. On

appelle cela un "feu localisé".

- Deuxième phase dite « incendie généralisé » : Tout le combustible présent dans la zone du sinistre participe au feu. On parle aussi d'embrasement généralisé.
- Troisième phase dite de « refroidissement » : Le combustible diminue et donc la température des gaz baisse également. [36]

Une source de flamme provoque le début d'incendie d'une quantité de matériaux. Les premiers gaz et la fumée apparaissent. En milieu fermé, sous l'action de la chaleur croissante, la fumée s'élève en panache jusqu'à heurter le plafond. A ce moment, elle s'étale radialement le long du plafond jusqu'à heurter une paroi et continue son chemin vers le bas ou elle stagne dans une couche supérieure sous le plafond.

En général, le local contient une couche inférieure froide se composant de l'air ambiant, de gaz et une couche supérieure chaude (modèle à deux zones). Une température de l'ordre de 200°C provoque l'éclatement des vitres des fenêtres, créant un apport subit d'oxygène frais qui redonne de la vigueur à l'incendie. La couche supérieure se rapproche du plancher, car elle croît en volume de par son alimentation en panaches de fumée.

Au cours du développement de l'incendie, il peut exister un moment où la température du mélange gazeux de la couche supérieure est tellement élevée qu'elle provoque l'ignition de tout élément combustible dans le compartiment. Ce phénomène s'appelle le flash-over ou l'embrasement généralisé. Il correspond généralement à une température de 500 à 600°C. La montée très rapide des températures dans le compartiment et l'accroissement du dégagement de chaleur provoquent un brassage des fumées où les couches se mélangent (modèle à une zone). L'incendie est alors dit : complètement développé.

Ces différentes phases de développement d'un incendie sont schématisées dans le graphique ci-après, montrant l'évolution de la température dans le compartiment en fonction du temps.

Le feu sera contrôlé par le combustible s'il y a suffisamment d'oxygène disponible pour la combustion. Il sera contrôlé par la ventilation s'il n'y a pas suffisamment d'oxygène.

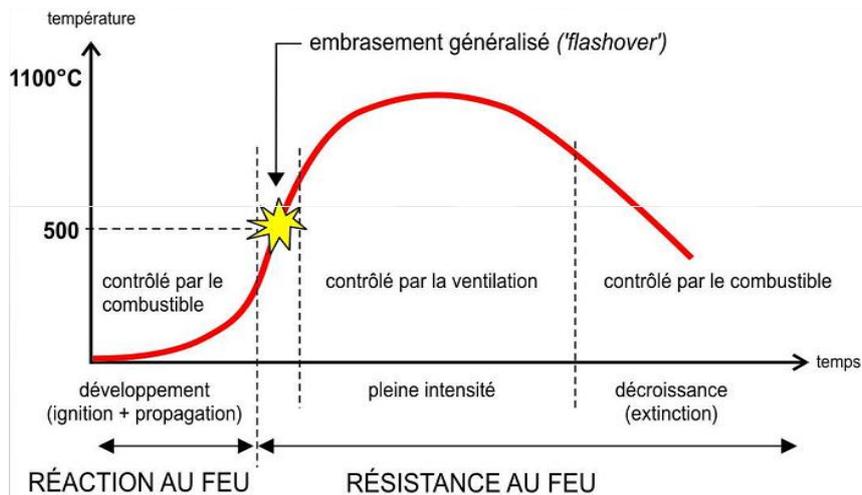


Figure III.3.Phase de développement d'un incendie [46]

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

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

#### II.4. La réaction au feu des produits de construction - leur classification

Ce système de classement a fait l'objet de décisions de la commission européenne le 08/02/2000 [48] 2000 et 26-08-2003. Au fur et à mesure de la parution des arrêtés de mise en application de ce marquage, les industriels doivent vérifier que leurs produits répondent aux nouvelles exigences européennes et, si nécessaire, modifier ses produits.

Les produits de construction sont séparés en deux grandes familles [49] : celle des revêtements de sol et celle des autres produits.

Dans chacun de ces groupes (Les Euroclasses), au nombre de sept, se déclinent comme suite :

$A1_{FL}$ ,  $A2_{FL}$ ,  $B_{FL}$ ,  $C_{FL}$ ,  $D_{FL}$ ,  $E_{FL}$ , et  $F_{FL}$  pour les revêtements de sol ( FL pour « floor »).

A1, A2, B, C, D, E, et F pour les autres produits de construction.

Les classes A1 et A2 (respectivement  $A1_{FL}$ ,  $A2_{FL}$ ) sont attribuées au produit à faible ou très faible fraction organique qui sont, de ce fait, très peu ou peu combustibles.

Les classes B à E (respectivement  $B_{FI}, E_{FI}$ ) sont attribuées aux produits combustibles qui contribuent de manière importante à l'embrassement, tant pour les revêtements de sol que pour les autres produits.

La classe E s'applique à des produits répondant au critère minimal de lise sur le marché allemand et la classe F s'applique à des produits non classés ou ayant échoué au test moins sévère.

A côté de la réaction proprement dite, certains produits de construction reçoivent deux qualifications supplémentaires :

s1, s2 ou s3 pour la production de fumée (s = 'smoke' = fumée : Plus le chiffre est élevé, plus l'émission de fumée est importante) :

- s3 : aucune limitation pour l'émission de fumées ;
- s2 : l'émission totale de fumée et la vitesse d'émission de la fumée sont limitées ;
- s1 : exigences plus sévères que pour s2.

d0, d1 ou d2 pour le comportement face aux retombées de gouttelettes et particules enflammées : (d = 'drop' = goutte) :

- d2 : pas de limitation ;
- d1 : production de gouttelettes / particules incandescentes pendant un temps déterminé
- d0 : pas de production de gouttelettes/ particules incandescentes [46]

Le béton est un matériau de construction minéral :

- Il est ininflammable (ne brûle pas)
- Il est incombustible (ne se consume pas)
- Aucun élément en feu ne se détache
- Aucun élément en feu ne coule du béton
- Aucune fumée ne s'en dégage

Il satisfait donc aux exigences de la classe A1. [50]

## **II.5. Les bétons en situation accidentelle - autres températures**

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 [51].

### II.5.1. Courbes températures-temps normalisées

Au cours des dernières années, de nombreuses recherches [52] ont été effectuées à travers le monde pour définir les différents types d'incendie pouvant se déclarer dans les tunnels et dans les ouvrages. Elles ont été réalisées dans des tunnels existants, désaffectés et en laboratoire. Il y a quatre catégories principales de courbes de feu : enceintes de confinement des réacteurs nucléaires, bâtiment, offshore/pétrochimiques et de tunnel.

#### II.5.1.1. Enceintes de confinement des réacteurs nucléaires

Dans une enceinte de confinement d'un réacteur nucléaire, deux scénarios d'accident (Figure III.4 et III.5) sont envisageables [53] [54] :

1. Scénario accidentel de Dimensionnement «D» appelé aussi «LOCA Loss of coolant accident», correspondant à l'Accident de Perte de Refroidissement du circuit Primaire «APRP».
2. Scénario accidentel de Hors Dimensionnement « HD » appelé aussi « SA: Sever Accident», correspondant à un accident au-delà de la situation accidentelle conventionnelle de dimensionnement.

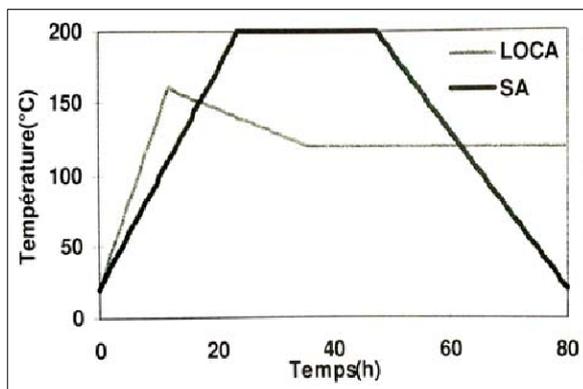


Figure III.4. Courbes Température-Temps  
LOCA et SA [53,54]

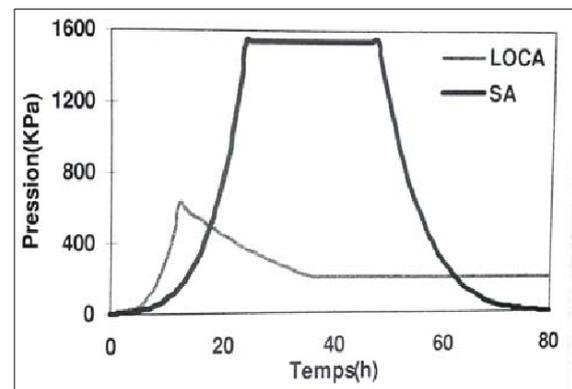


Figure III.5. Courbes Pression-Temps  
LOCA et SA [53,54]

Ces scénarios d'accident consistent en une montée en température et pression atteignant 160°C et 6.5 bars en environ 20 secondes. Ce niveau est maintenu durant une trentaine de minutes. Ensuite deux cas sont envisageables :

1. Pour le premier, représentatif du scénario LOCA, ce palier à 6.5 bars est suivi d'un refroidissement permettant d'atteindre environ 120 °C et 2 bars en 12 à 24 heures. Ces

conditions peuvent être maintenues plusieurs jours avant le refroidissement.

2. Le deuxième, représentatif du scénario SA, correspond à une deuxième montée en température et pression qui peut aller jusqu'à 200 °C et 10 bars.

### II.5.1.2. Cas des bâtiments

Il existe différents types de feu. Le feu le plus connu est le feu (Voir figure III.6) appelé « ISO » qui répond à la courbe normalisée ISO 834. Ce feu a pour but d'approcher les conditions d'un incendie dans une construction et il est défini par l'équation (II.1) :

$$T_{ISO}(t) = 345 \cdot \log(8t + 1) + T_0 \quad (II.1)$$

$T_{ISO}(t)$  est la température des gaz dans le four en °C,  $T_0$  la température initiale dans le four en °C et  $t$  le temps en minutes. Bien entendu, il existe d'autres types de feu plus ou moins sévère, représentant différents cas de feux dans les situations les plus extrêmes comme les feux d'hydrocarbures.

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

Il est aussi intéressant d'étudier le cas des chauffages lents. Ces chauffages permettent de caractériser mécaniquement les bétons après traitement thermique, alors que les chauffages de type feu sont surtout employés pour étudier les risques d'instabilité thermique et d'écaillage des bétons. [36].

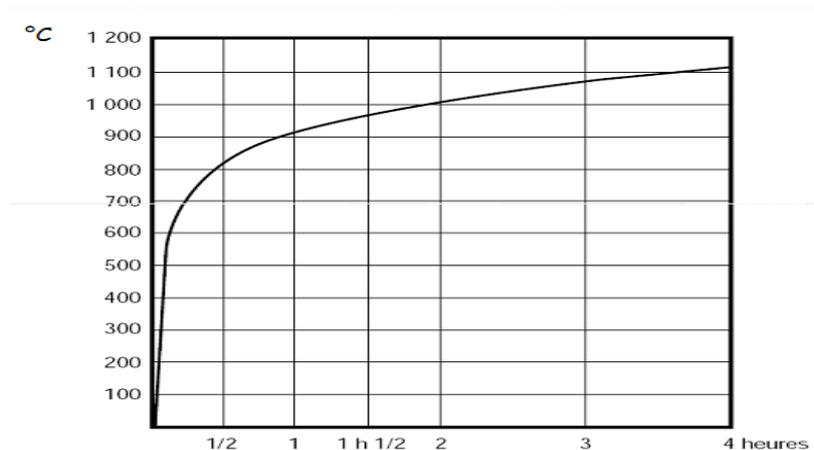


Figure III.6. Courbe ISO [50]

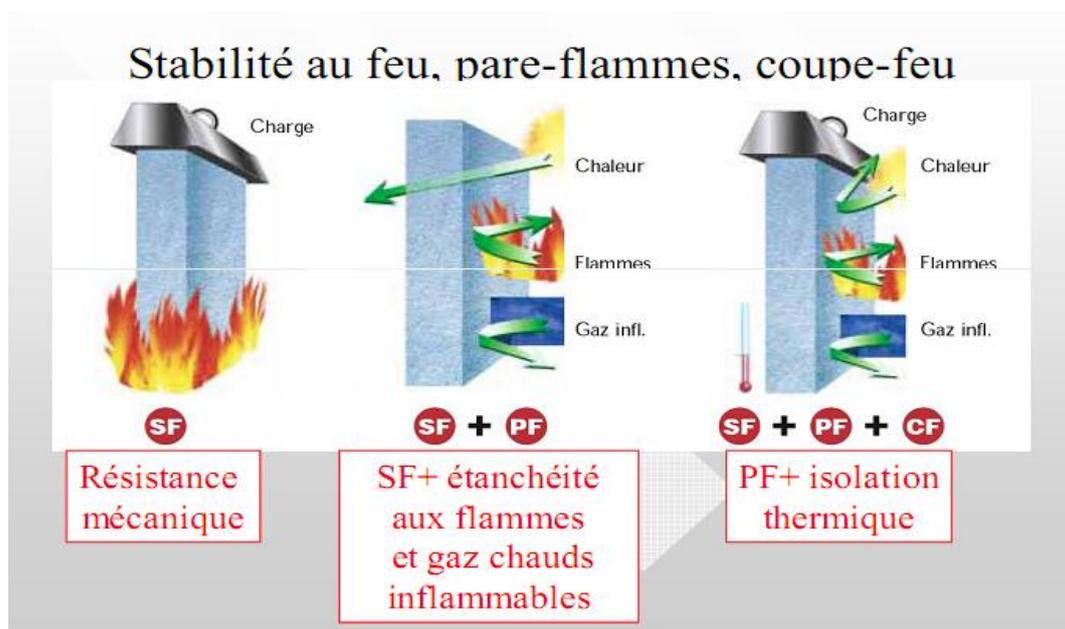
Cet essai, bien que conventionnel, permet de classer les éléments de construction suivant le temps pendant lequel ils satisfont un ou plusieurs des critères suivants :

- Stabilité au feu (SF) : conservation des caractéristiques mécaniques,
- Etanchéité aux flammes et aux gaz : non transmission des fumées et des gaz,
- Isolation thermique : température de la face non exposée < 140°C (en moyenne).

Pour certains éléments de structure (poteaux, poutres), on considère généralement le classement de stabilité au feu. Pour les murs et les planchers, on considère le plus souvent le classement coupe-feu.

**Tableau 3.** Résistance au feu [51]

Classement	Critères à satisfaire		
	Stabilité mécanique	Etanchéité aux flammes et aux gaz	Isolation thermique
Stable au feu (SF)	✓		
Pare-flammes (PF)	✓	✓	
Coupe-feu (CF)	✓	✓	✓
Degré de résistance au feu : 1/4h, 1/2h, 1h, 1h1/2, 2h, 3h, 4h, 6h.			



**Figure III.7.** Résistance au feu [50]

Les températures mesurées dans le béton montrent leur rapide décroissance en fonction de l'éloignement de la surface exposée au feu après une heure d'exposition :

- 500°C à 1,5cm ;
- 350°C à 3cm ;
- 100°C à 7.5cm de profondeur.

Lorsque l'on sait que le béton dispose encore de 50 à 60% de sa capacité de résistance à 600°C ce qui constitue un avantage par rapport à l'acier qui, à cette température, présente un affaiblissement de ses caractéristiques mécaniques de 75 à 80% on peut en conclure que la stabilité d'une structure est, dans la plupart des cas, assurée pendant une durée largement suffisante à une intervention et à l'évacuation des occupants. [51]

De façon simplifiée, il peut être retenu que cette courbe atteint environ 500 °C après seulement 3 minutes, 800 °C après 30 minutes et plus de 1000 °C après 90 minutes. La courbe ISO, dont l'avantage pratique est certain, présente des écarts par rapport à un incendie naturel dans des bâtiments. En effet, les éléments suivants peuvent être notés [55] :

- La courbe ISO est une courbe théorique, qui peut être dépassée durant un temps limité dans un incendie réel ;
- La courbe ISO doit être prise en considération pour tout le compartiment, même si celui-ci est très grand. En réalité, lors d'un incendie, la température varie sensiblement selon l'endroit.
- La courbe ISO implique une température toujours croissante. Dans la pratique, il est prouvé que la température commence à diminuer après que la plus grande partie des combustibles ait brûlé.
- Il n'existe qu'une seule courbe ISO pour tous les types de bâtiments, quelles que soient les conditions de charge calorifique et de ventilation.

### **II.5.1.3. Cas des ouvrages de pétrochimie**

Bien que la courbe ISO ait été utilisée pendant de nombreuses années, il est vite devenu évident que les taux de combustion de certains matériaux, tels que l'essence, les produits chimiques etc., étaient bien supérieurs à ceux du bois de construction par exemple. C'est pourquoi la courbe Hydrocarbure « CH » a été mise au point.

La courbe Hydrocarbure (figure III.8) est applicable dans le cas de petits incendies liés aux produits pétroliers tels que les incendies de réservoirs de voitures, camion-citerne

transportant du fuel, de l'essence ou certains produits chimiques. En fait, quoique la courbe Hydrocarbure soit basé sur un incendie standard, il existe de nombreux types d'incendies associés aux produits pétrochimiques.

Majorée « HCM », la température maximale de la courbe HCM (figure III.9) est de 1300°C au lieu des 1100°C de la courbe Hydrocarbure standard.

Cependant, le gradient de température obtenu au cours des premières minutes d'un incendie sous courbe HCM est aussi important lors d'incendies sous courbe Hydrocarbure (CH), il peut provoquer un choc thermique au niveau de la structure environnante et entraîner un problème d'écaillage du béton.

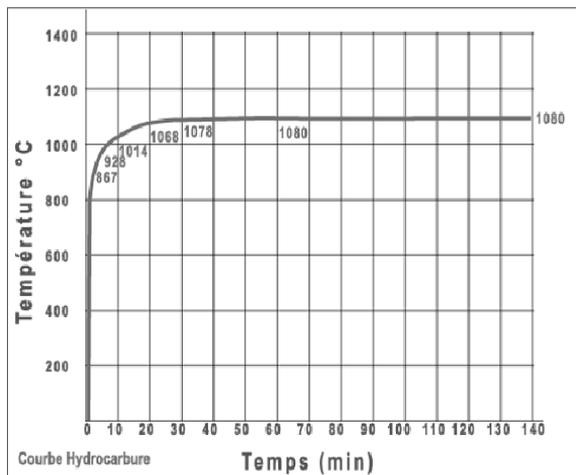


Figure III.8. La courbe température-temps «CH» [54]

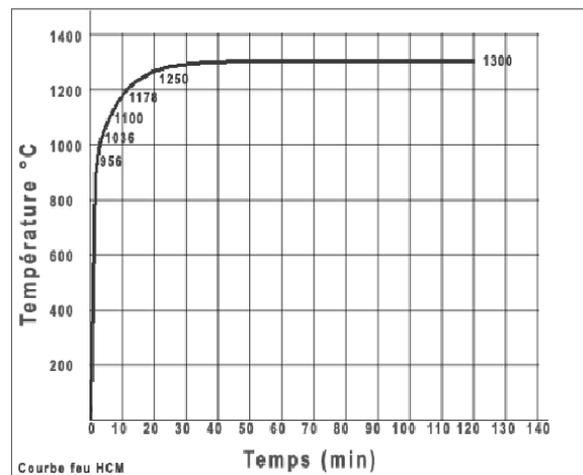
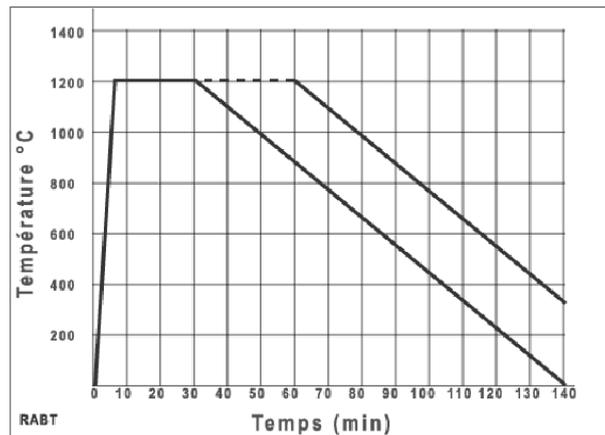


Figure III.9. La courbe température-temps «HCM» [54]

#### II.5.1.4. Cas des tunnels

L'Allemagne a mis au point la courbe «RABT» qui résulte d'une série de programmes d'essais tels que le projet Euréka. Sur la courbe RABT (Figure.III.10), l'augmentation de température est très rapide atteignant 1200 °C en 5 minutes, plus vite donc que la courbe Hydrocarbure qui atteint seulement 1150 °C en 60 minutes. La durée de l'exposition à 1200°C est plus courte que dans les autres courbes et la baisse de température ne commençant qu'après 30 minutes.



**Figure III.10.** La courbe température-temps « RABT »[54]

En 1979 aux Pays-Bas, le « Rijkswaterstaat », Ministère des Travaux Publics et le TNO (Centre de recherche au feu) ont établi une nouvelle courbe température-temps « RWS » (Figure III.11). Cette courbe est basée sur l'hypothèse selon laquelle, dans un scénario extrême, un incendie d'un camion-citerne contenant du fuel ou de l'essence peut atteindre une charge calorifique de 300MW pendant une durée allant jusqu'à 120 minutes

La différence entre la courbe RWS et la courbe Hydrocarbure se situe au niveau des températures. Pour cette dernière, on part d'un feu se déclarant dans un espace relativement dégagé, où la chaleur peut se dissiper, tandis que la courbe RWS se base sur des températures obtenues en milieu confiné comme un tunnel, où il y a peu de chance que la chaleur puisse se dissiper dans l'atmosphère environnante.

Le critère de défaillance pour un spécimen exposé à la courbe température-temps RWS est que la température à l'interface béton-revêtement de protection ne doit pas excéder 380°C et que la température de l'armature ne doit pas dépasser 250°C.

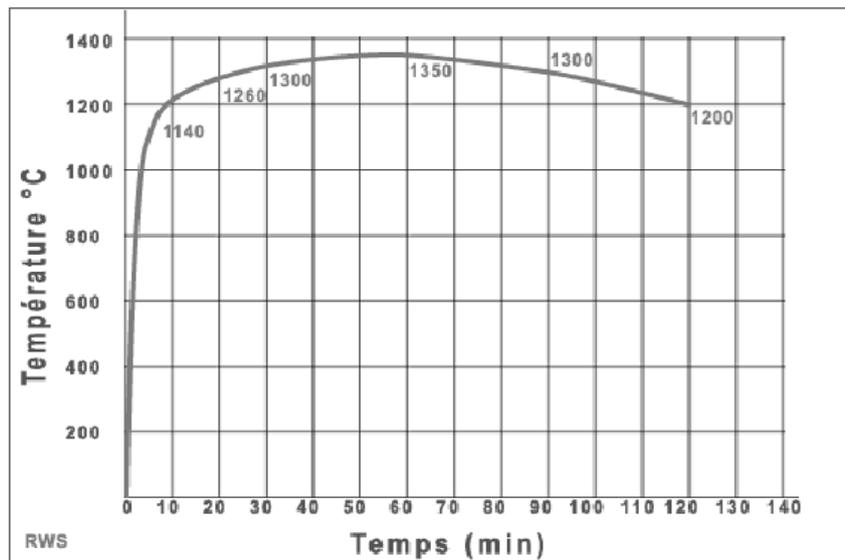


Figure III.11. La courbe température-temps « RWS » [54]

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 vu 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. [54]

### II.5.2 Propriétés mécaniques :

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.

### **II.5.2.1 Résistance à chaud :**

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

#### **II.5.2.1.1 Résistance en compression à chaud :**

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

De manière globale, la résistance en compression du béton baisse légèrement de 15-20% de la résistance à la température ambiante

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

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

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

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

Entre 600°C et 700°C, la vitesse de perte de résistance diminue. [56] attribuent cela à la calcination des granulats calcaires utilisés qui peut intervenir à partir de 600°C.

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

La principale raison de la diminution de la résistance est tout d'abord l'évolution de la microstructure à cause de la déshydratation (retrait de la matrice provoqué par la phase de séchage et de déshydratation) [57]. A cela il faut ajouter l'augmentation de la microfissuration

et de la porosité, l'influence de la nature de la pâte et des granulats et les déformations différentielles entre la pâte et les granulats [58]

La figure III.12 montre l'évolution de la résistance à la compression à chaud d'un BAP on le comparant avec les différents codes [44].

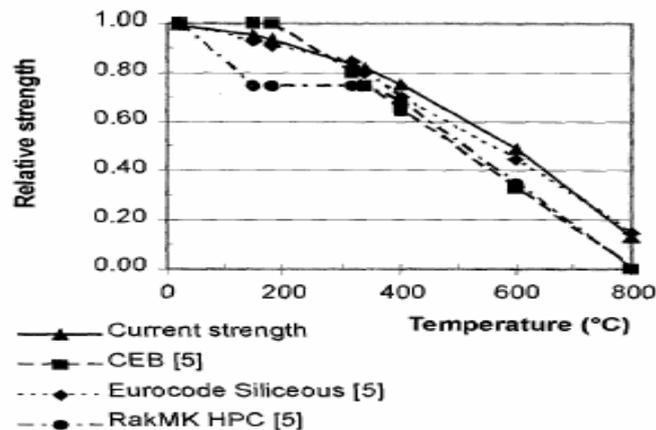


Figure III.12. La résistance de compression à chaud [44].

#### II.5.2.1.2 Résistance en traction :

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

Peu de chercheurs se sont intéressés à la résistance en traction de béton à haute température. Des études sont menées par Noumowe [59], montrent une sensibilité de la résistance en traction à la température.

#### II.5.2.1.3 Module d'élasticité :

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

#### II.5.2.1.4 Comportement contrainte déformation :

L'augmentation de température affecte le comportement contrainte déformation, on peut noter une augmentation de la ductilité du béton, la rupture est précédée de plus significatif pour les BHP, la figure III.13 présente la variation de comportement d'un béton ordinaire de 32.9 MPA .On note que la ductilité croit avec la température. La résistance en compression passe par un maximum après 150 °C avant de chuter brusquement après 350°C.

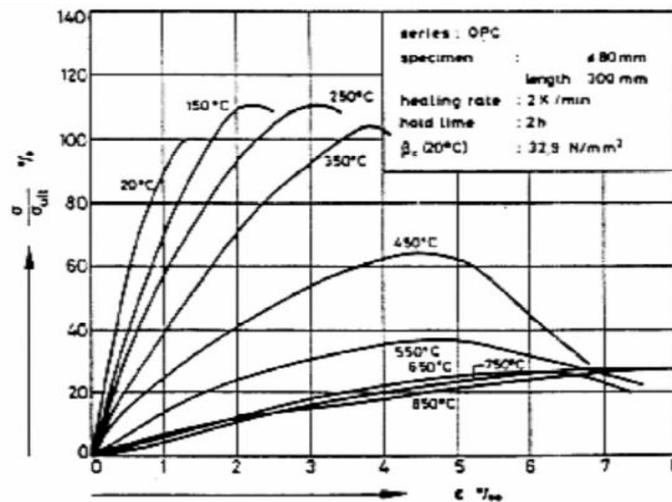
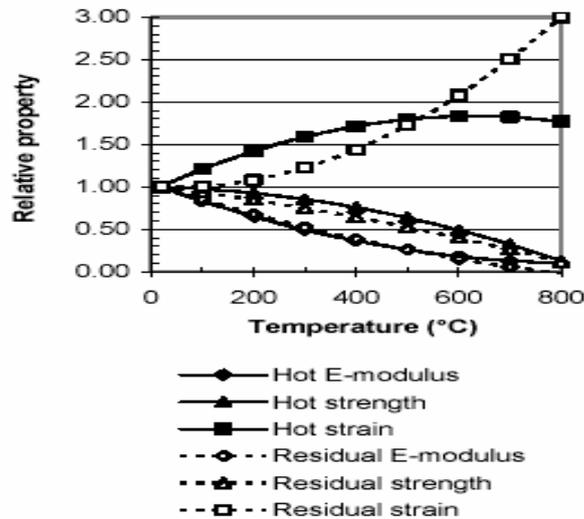


Figure III.13. Courbes effort déformation [39]

#### II.5.2.2 Résistances résiduelles :

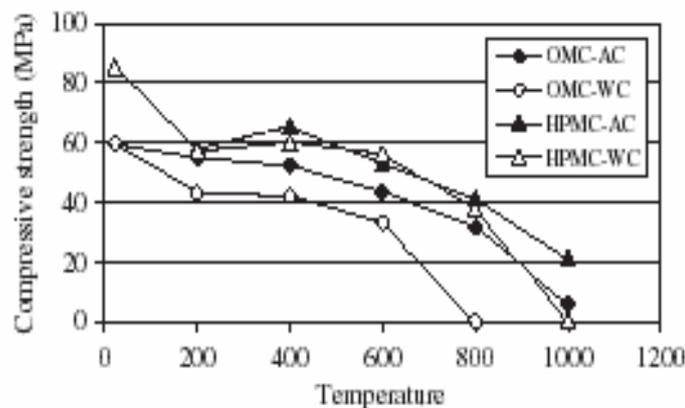
Des études ont montrées que les éprouvettes subissant un refroidissement présentent des résistances différentes que celles mesurées à chaud. Ce qui est montré dans la figure III.14

Le fait de refroidir le matériau, peut entraîner l'apparition d'une fissuration supplémentaire et une ré-humidification provoquant la réhydratation du gel CSH mais aussi la réaction de la CaO avec l'eau présente dans l'environnement endommageant d'avantage la structure du béton. Après un temps défini qui suit le cycle de chauffe. Il a été rapporté [60] que le béton est capable de récupérer une partie de sa résistance. Ce phénomène d'autoréparation des bétons peut s'expliquer par la réhydratation des grains de ciment non hydratés présent dans les bétons caractérisés par un rapport E/C très faible. [61].



**Figure III.14.** Les propriétés relatives de béton avant/après l'élévation de température excepté la propriété résiduelle avec la poudre de chaux à 800°C [62].

Des essais ont été fait sur des pâtes de ciment portlandien remplacée par de cendre volante (10, 25, 40%), des ADT ont montrés que la cendre volante réduit la quantité de Ca (OH) 2 dans la pâte suite à des réactions pouzzolaniques. Ces essais ont montrés que même 10% de cendre élimine la fissuration visible à la surface de béton après refroidissement à l'air pour des éprouvettes chauffées jusqu'à 600°C, ce qui confirme que la fissuration est liée à la présence de chaux dans le béton au refroidissement. Une étude faite par Gaweska [57] ; sur les micros bétons ordinaire et les micros bétons haute performance, refroidis a l'air et avec l'eau a montré que à 200°C, la perte de résistance des micros bétons refroidis à l'air libre est de 7%, tandis que ceux refroidis à l'eau est de 27%.



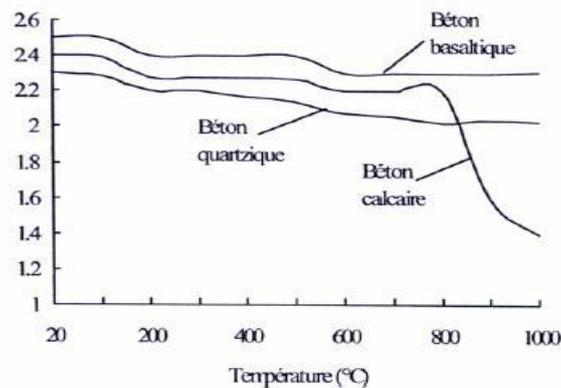
**Figure III.15.** Variation de la résistance avec la température. [57].

## II.5.3 Propriétés physiques :

### II.5.3.1. Densité apparente

A haute température, ce paramètre dépend fortement de la nature des granulats dans le béton.

La Figure III.16 montre les variations de la masse volumique de différents types de bétons en fonction de la température. On observe une diminution quasi-linéaire jusqu'à 800°C, or le béton à granulats calcaires présente une forte diminution de la densité au-delà de 800°C. Cette baisse de la masse volumique est liée à deux phénomènes à savoir l'hydratation complémentaire des anhydres et la carbonatation de la portlandite.



**Figure III.16.** Variations de la masse volumique de différents types de bétons en fonction de la température. [39]

Les mesures de la densité apparente pour trois bétons BHP et du BO sont représentés sur la Figure III.17. Elle montre une légère diminution de la densité dans l'étendue des températures entre 100°C et 400°C. Nous remarquons la différence des densités entre BO et BHP à 100°C respectivement 2.28 et 2.43 [g/cm<sup>3</sup>]. Ces résultats obtenus par Kalifa et al. [63] sont issus du Projet National BHP 2000. [57]

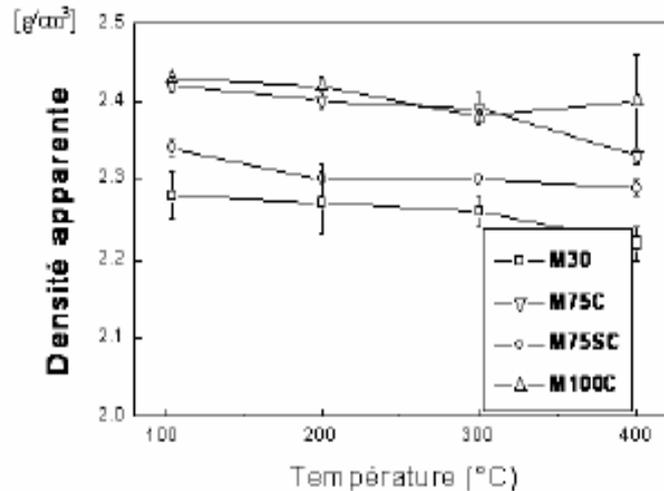


Figure III.17. Densité apparente des bétons en fonction de la température [63]

### II.5.3.2. Perte de masse

Durant l'échauffement du béton, sa masse est soumise à une variation due à l'évaporation de l'eau et la déshydratation progressive du gel CSH. Sur la Figure III.18 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.

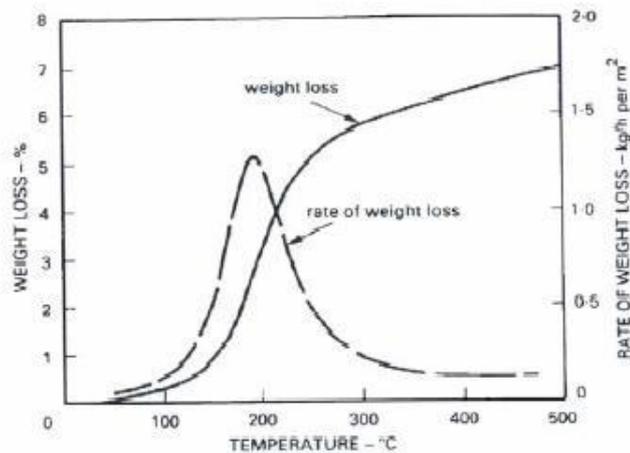


Figure III.18. Perte de masse durant l'échauffement et vitesse de perte de masse en fonction de la température [64]

La Figure III.19 montre la courbe expérimentale mesurée par Noumowe [59] de la variation de poids en pourcentage du poids initial des BO et BHP en fonction de la température en surface

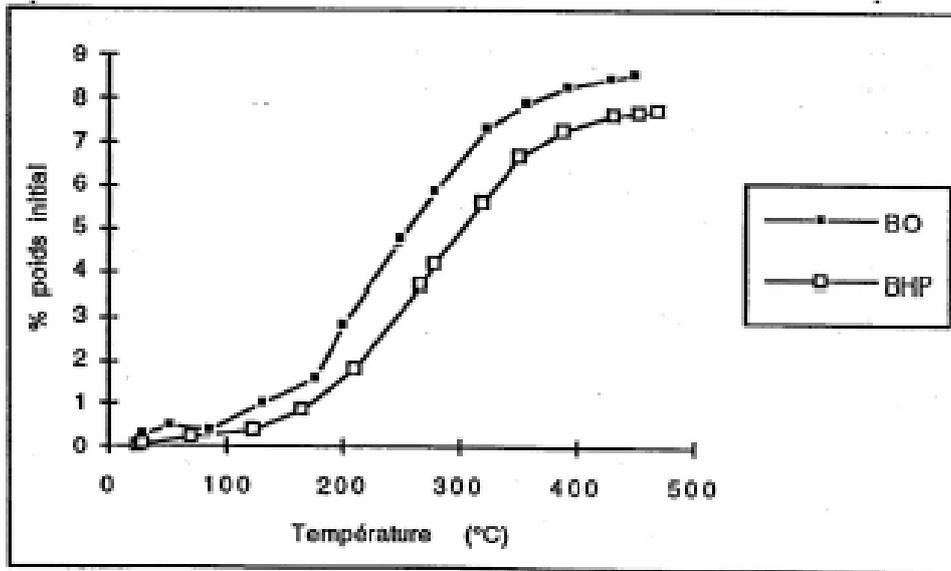


Figure III.19. Variation de poids en fonction de la température [59]

Menou et al. [65] ont remarqué que la variation de poids est très légèrement supérieure à la quantité d'eau initiale dans le béton. Ce qui laisse penser qu'en plus de l'eau, il y a d'autres constituants qui se sont échappés des deux bétons.

De même, la Figure III.20 montre l'évolution de la perte de masse par rapport à la température mesurée par Kalifa 1998. Les courbes obtenues montrent que la perte de masse du BO est plus faible que la perte de masse d'un BHP. [59]

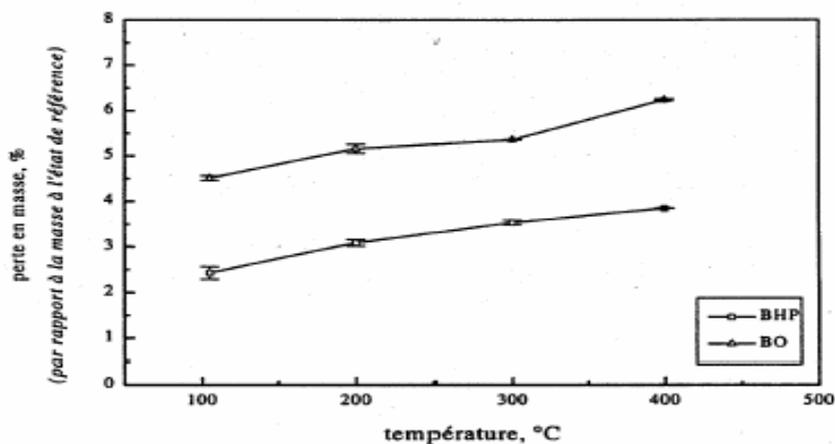


Figure III.20. Perte en masse, en fonction de la température de conditionnement [39]

## **II.5.4. Evolution des propriétés thermiques**

### **II.5.4.1. Déformation thermique**

Comme la plupart des matériaux, le béton subit une déformation thermique lorsqu'il est soumis à un changement de température. La déformation thermique du béton est la superposition des déformations de la matrice et des granulats au cours de l'échauffement. Dans les composites tels que le béton, elle dépend fortement des propriétés de ces constituants notamment de leur nature et de leur quantité [66].

#### **II.5.4.1.1. Déformation thermique de la pâte de ciment**

La pâte de ciment durcie se dilate seulement dans la plage de températures allant jusqu'à 150°C [67]. A partir de 150°C, elle subit un retrait important. Ce mouvement provient de la diminution de la tension capillaire de l'eau absorbée dans la pâte au cours de l'échauffement.

La température à laquelle on observe le changement de signe du coefficient de dilatation thermique dépend de la vitesse d'échauffement. Lorsque la vitesse de montée en température est inférieure à 10°C/min, cette température se situe autour de 150-200°C. En augmentant la vitesse d'échauffement, la température de changement augmente également. Pour une pâte de ciment chauffée à 35°C/min, elle se situe à environ de 300°C.

Les déformations thermiques des pâtes de ciments chauffées avec une vitesse de montée en température de 2°C/min, ont été déterminées aussi par Diederichs [67]. Dans les travaux de Sliwinski et al. [57], il a été montré que l'ajout de fumée de silice en quantité de 10% dans la pâte de ciment, augmente au cours de l'échauffement le retrait de celle-ci. Dans ces travaux, les auteurs ont également observé deux phases dans la déformation thermique des pâtes. Dans la première, les pâtes se dilatent jusqu'à environ 250°C – 300°C pour atteindre une déformation de 3%. Ensuite les déformations changent de direction, le matériau commence à se rétracter. Le retrait peut atteindre à 700°C environ 35% pour la pâte avec 10% de la fumée de silice et 27% pour la pâte sans fumée de silice.

#### **II.5.4.1.2. Déformation thermique des granulats**

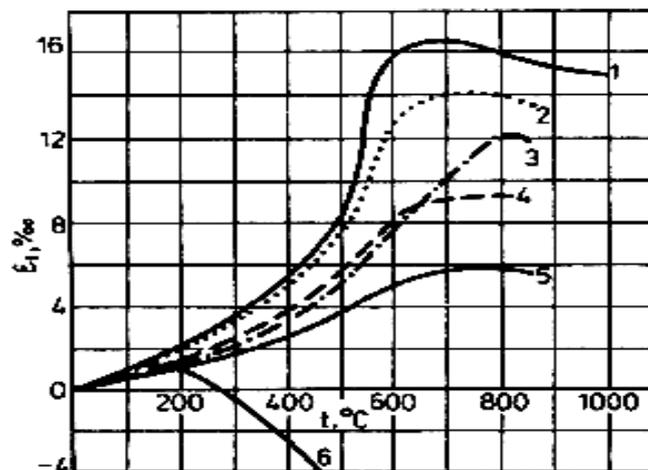
La dilatation thermique des bétons est principalement liée à la dilatation des granulats. On peut limiter la déformation du béton aux hautes températures en jouant sur la nature des

granulats. Le tableau 4 regroupe les valeurs du coefficient de dilatation thermique ( $\alpha_T$ ) des roches fréquemment utilisées comme granulats dans le béton.

**Tableau 4.** Coefficient de dilatation thermique des roches pour granulats

Température	Coefficient de dilatation thermique $\alpha_T$ [ $10^{-6} / ^\circ\text{C}$ ]		
	Grès	Calcaire	Granit
20-100°C	10.0	3.0	4.0
100-300°C	15.0	9.0	13.5
300-500°C	21.5	17.0	26.0
500-700°C	25.0	33.0	47.5

La Figure III.21 regroupe les courbes d'évolution de la déformation thermique de différentes roches. Il est à noter que le coefficient de dilatation thermique est plus faible pour les granulats calcaires que pour ceux de nature siliceuse.



**Figure III.21.** Dilatation longitudinale de différents types de roches suivant la température.[57]

1. Siliceux, 2. Grès, 3. Calcaire, 4. Basaltes, 5. Argiles expansées, 6. Pâte du ciment

#### I.5.4.1.3. Déformation thermique du béton

La dilatation thermique des bétons dépend fortement de la nature de leurs granulats. Sur la Figure III.22, on peut constater que :

- Les déformations thermiques du béton sont non linéairement dépendantes de la température,

- Le facteur prépondérant de la dilatation thermique est la nature des granulats,
- La pâte de ciment se rétracte aux températures supérieures à 150°C,
- Aux températures dépassant 600-800°C, on observe la réduction ou l'arrêt de la dilatation thermique.

#### **II.5.4.1.4. Mécanismes de déformation thermique transitoire**

Différentes hypothèses ont été avancées afin d'expliquer l'influence des changements de température sur les essais de fluage. Parrot [68] suggère que l'origine des déformations supplémentaires est liée aux réactions de polymérisation du CSH. En effet, cette réaction est accélérée par la mise en compression du matériau et l'augmentation de la température. Il est montré que les mono molécules du  $\text{SiO}^4$  initialement présentes dans le gel de CSH, se transforment progressivement en  $\text{Si}_2\text{O}_7$ , puis en polymères.

Bazant [66] et Mounajed [69] ont proposé d'expliquer le phénomène de la déformation thermique du matériau sous charge par un mécanisme présent dans les pores des hydrates du béton. Les hydrates CSH sont indépendants de la formulation du matériau qui n'influence que le volume de CSH. Mais à l'échelle microscopique, la structure des hydrates est commune pour tous les types du béton.

La déformation résulte essentiellement du glissement entre les feuillets de CSH. Les feuillets de CSH sont liés par les liaisons atomiques directes. La charge appliquée ou la température peuvent provoquer dans ces liaisons, instables et désordonnées, un déplacement des molécules comparable aux dislocations dans les matériaux cristallins.

Ce mouvement relatif des feuillets de CSH, animé par l'expulsion de l'eau cause une redistribution et une relaxation des contraintes internes. En présence de contraintes internes engendrées par une différence entre la dilatation thermique de la pâte de ciment durcie et celle des granulats, cette relaxation permettrait d'éviter la rupture du matériau.

La méthode pratique pour obtenir la valeur des déformations thermiques transitoires est la soustraction de déformations thermiques sous la sollicitation mécanique des valeurs de la déformation purement thermique. [54]

#### **II.5.5. Microstructure**

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

modifications entraînent une évolution des propriétés thermiques et mécaniques. Elles induisent aussi la création d'eau libre à l'intérieur de béton qui augmente la pression interstitielle. [39].

### **II.5.5.1. Les principales modifications physico-chimiques dans le béton à haute température**

Lorsque le béton est soumis à des températures en augmentation, différents phénomènes consécutifs dû à des transformations chimiques, physiques et minéralogiques se produisent [67]. Ces différents phénomènes, qui peuvent concerner aussi bien la pâte de ciment durcie que les granulats, sont les suivants [66] :

#### ***Entre 30 et 105 °C :***

- L'eau libre et une partie de l'eau adsorbée s'échappent du béton. Elle est complètement éliminée à 105°C.
- Simple dilatation (coefficient de dilatation du béton :  $1.10^{-5}$ ).

#### ***Entre 130 et 170 °C :***

- L'eau d'hydratation de l'hydroxyde de calcium est libérée.
- La pâte de ciment durcie se contracte.
- Les granulats se dilatent.

#### ***Autour de 180 °C et jusqu'à environ 300 °C :***

- On a la première étape de la déshydratation. La chaleur brise le gel de ciment et arrache des molécules d'eau aux silicates hydratés. L'eau liée chimiquement commence à s'échapper du béton.

#### ***A environ 250 et 370 °C :***

- On peut avoir de petits pics endothermiques indiquant des effets de décomposition et d'oxydation d'éléments métalliques (ferriques).

#### ***Entre 450 et 550 °C :***

- L'hydroxyde de calcium se décompose selon la réaction :  $\text{Ca(OH)}_2 \rightarrow \text{CaO} + \text{H}_2\text{O}$ .
- La vapeur d'eau peut engendrer un phénomène d'écaillage local.

***Autour de 570 °C :***

- Changement de phase spontanée du quartz, accompagnée d'un gonflement pour les granulats quartziques et basaltiques.

***Entre 600 et 700 °C :***

- Il y a décomposition des phases de C-S-H et formation de  $\beta$ -C2S. C'est la seconde étape de la déshydratation des silicates de calcium hydratés qui produit une nouvelle forme de silicates bi-calciques.

***Entre 700 et 900 °C :***

- Il y a décomposition du carbonate de calcium  $\text{CaCO}_3$ . Le calcaire se décompose autour de 800 °C en  $\text{CaO} + \text{CO}_2$ , réaction fortement endothermique qui libère du gaz carbonique.

***A dessus de 1300-1400 °C :***

- Début de la fusion de la pâte et de ciment des agrégats. Le béton se présente sous forme de masse fondue. [54]

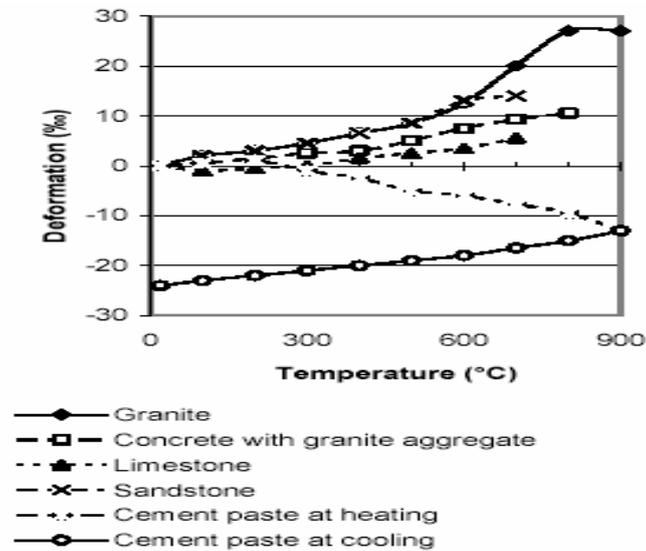
**II.5.5.2 Transformation des liaisons pâte-granulat :**

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

Les hautes températures causent une déshydratation de cette zone (L'interface ciment granulat) qui engendre une détérioration rapide de la liaison entre le mortier et le granulat. Les phénomènes de déshydratation engendrent une détérioration rapide au niveau de cette zone à cause de la dilatation différentielle entre la pâte de ciment (retrait) et les granulats (expansion). Plus le matériau est hétérogène plus la différence entre les coefficients de dilatation thermiques des constituants est importante. Ces coefficients varient en fonction de la température, et dépendent du type granulat et de ciment utilisés. [65].

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

(Riley). La figure III.22 représente la dilatation thermique du ciment, des agrégats ainsi que celle du béton selon les recherches faites par Gaweska [57]



**Figure III.22.** Dilatation thermique du ciment, des agrégats et du béton [57]

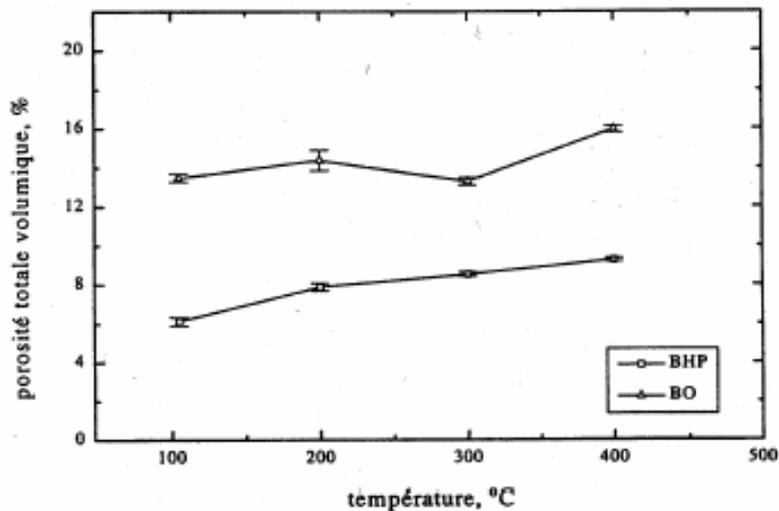
### II.5.5.3 Porosité

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

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

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

La Figure III.23 montre la variation de la porosité totale en fonction de la température d'un béton ordinaire et d'un BHP mesurée par Tsimborovska et al. [71] par la méthode de saturation d'eau.



**Figure III.23.** Porosité totale à l'eau en fonction de la température de conditionnement [71]

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

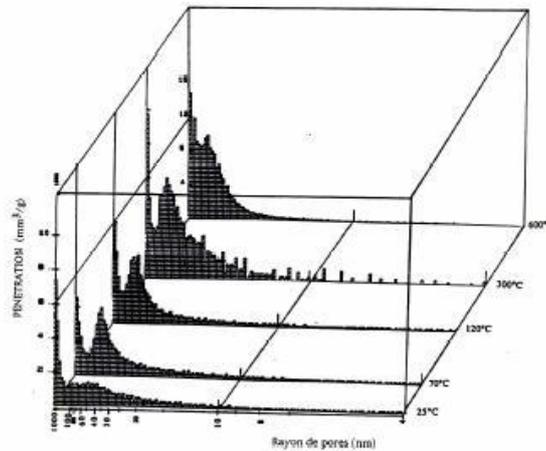
Entre 105°C et 400°C, la porosité augmente de 3%. Cette croissance est associée au départ d'eau, qu'elle soit présente dans le réseau ou chimiquement liée.

Kalifa [71] explique que la diminution de porosité du BO entre 200°C et 300°C est associée à la densification due à l'hydratation complémentaire et à une carbonatation de la portlandite en condition d'autoclavage interne, c'est-à-dire sous une pression supérieure à la pression atmosphérique. Par contre, cette densification n'est pas observable dans le BHP qui contient très peu de portlandite, grâce à la présence de fumée de silice.

A haute température, des recherches prouvent qu'il y a changement de volume de pores et de structure. La figure III.24 présente la distribution des pores obtenue à différentes températures jusqu'à 600°C

La température engendre une augmentation du volume total ainsi que de la dimension des pores. Elles peuvent être dues à la rupture des cloisons capillaires sous l'effet de la vaporisation de l'eau durant le chauffage ainsi qu'à la microfissuration engendrée par les dilatations différentielles de la matrice cimentaire et des granulats [59].

En travaillant sur la perméabilité, [72], ont trouvé que la perméabilité augmente quand la température dépasse 150 °c, due à la densification du réseau poreux et à un accroissement du diamètre moyen.



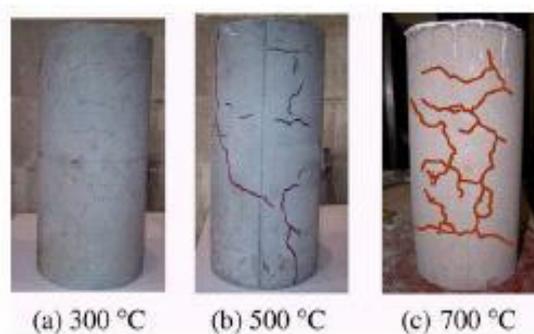
**Figure III.24.** Distributions des pores d'un béton ordinaire obtenues à différentes températures [73].

#### II.5.5.4 Fissuration :

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

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

Doughil [74] a indiqué que la différence de déformation entre l'agrégat et la pâte de ciment peut initialement induire des petites contraintes de compression dans la pâte de ciment ; quand la température augmente, les contraintes de compression diminuent et se changent à des grandes contraintes de traction



**Figure III.25.** Fissure dans le béton à différentes températures [39]

#### **II.5.5.5 L'éclatement :**

Lors d'un incendie, l'éclatement provoque la désintégration des couches superficielles du béton, exposant ainsi le noyau du béton aux températures élevées. Augmentant la vitesse de transmission de la chaleur au noyau. L'éclatement explosif peut réduire sensiblement la capacité portante de la structure et doit être considéré en conservant les structures en béton au feu [48].

La connaissance actuelle du sujet de l'éclatement est discutée par Hertz [48] dans lequel il conclut que l'éclatement n'est pas un problème pour les bétons non dense ; les bétons avec 3% de poids d'humidité. Khoury [64] a annoncé que le degré d'humidité critique est autour de 2.5% pour le BHP et de 3.5% pour le BO pour donner l'éclatement.

L'éclatement est attribué à la montée de la pression interstitielle lors de l'échauffement [75]. On croit que le BHP est plus sensible à la montée de la pression en raison de sa faible perméabilité, par rapport au BO. La très forte pression de vapeur d'eau produite lors de l'exposition au feu, ne peut s'échapper à cause de la grande masse volumique et de la faible perméabilité du BHP. Elle atteint la vapeur saturante qui est d'environ 8Mpa à 300°C. Cette pression interne est souvent trop forte pour le BHP.

Khoury [64] a annoncé que l'éclatement est influencé par la perméabilité, le degré de saturation, dimension et type d'agrégat, la forme et la taille de l'éprouvette. Quelques facteurs sont critiques pour que l'éclatement se produit comme le taux de chauffage et le degré de charge. Ce qui été confirmé par d'autres chercheurs [75], [61].

L'éclatement de béton peut être fortement réduit par l'ajout de petites quantités (de l'ordre de 0.1% en volume) de fibres de polypropylène à température de fusion [76], les fibres de polypropylène créent des canaux permettant à la pression de vapeur de s'échapper du béton empêchant ainsi les petites explosions qui provoquent l'éclatement.

#### **II.6.Paramètres influant le comportement de béton :**

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

### II.6.1 La vitesse de chauffage et de refroidissement :

Si la vitesse de chauffage est suffisamment lente, l'eau non liée est complètement éliminée à 120°C, si non le processus d'évaporation peut se prolonger au de la de 200 °c ce qui peut causer une augmentation de pression de vapeur au sein de béton, en plus d'un fort gradient thermique peut provoquer l'éclatement du béton, où Khoury [64] a annoncé que la vitesse de chauffage doit dépasser 180°C/h pour avoir l'éclatement.

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

Une étude faite par [62] sur des micros béton ordinaire de 34Mpa et des micros bétons à haute performance de 71Mpa refroidis à l'air et avec l'eau.

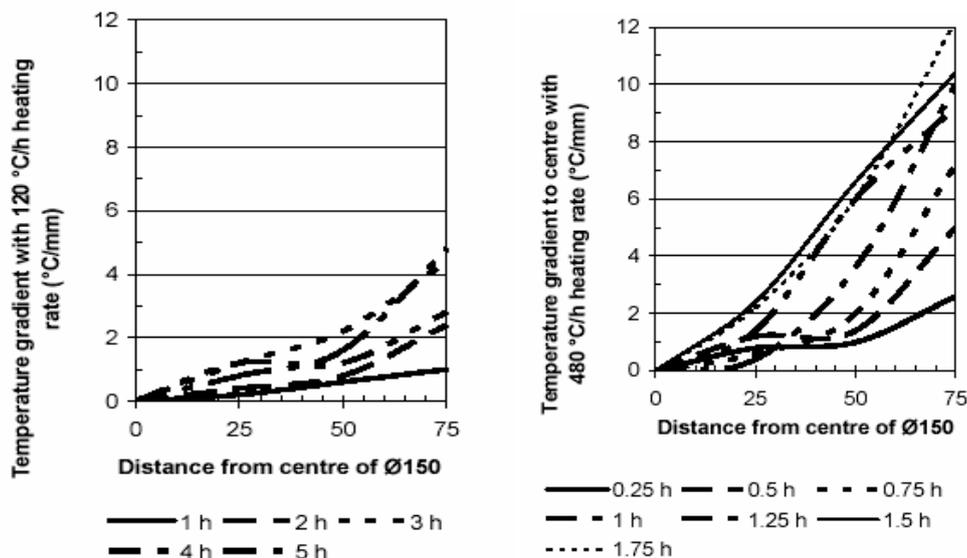


Figure III.26. Gradient thermique dans une éprouvette cylindrique [61]

Les résultats sont présentés sur la figure 50 où on constate que la perte de résistance dans les spécimens refroidis à l'air est moins que les pertes de résistance des spécimens refroidie avec l'eau. Le gain de résistance est de 13% pour les spécimens refroidis à l'air et de 5% pour les spécimens refroidis avec l'eau.

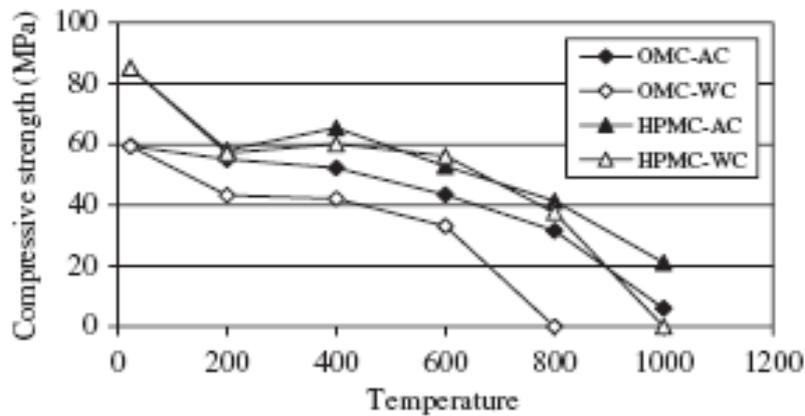


Figure III.27. Variation de la résistance à la compression avec la température [62]

### II.6.2 Nature du granulat :

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

Une analyse thermique différentielle (ATD) permet de déterminer, par des pics endothermiques et exothermiques, les températures auxquelles une instabilité peut survenir dans les granulats. Les analyses thermo gravimétriques (ATG), donnent des indicateurs de la progression des réactions de décomposition en mesurant les variations de masse des granulats au cours du chauffage. [65]. La Figure III.28 montre les résultats de perte de masse de deux types de granulats (calcaire et siliceux). Les résultats d'analyses montrent que les granulats calcaires et siliceux sont relativement stables jusqu'à 500°C.

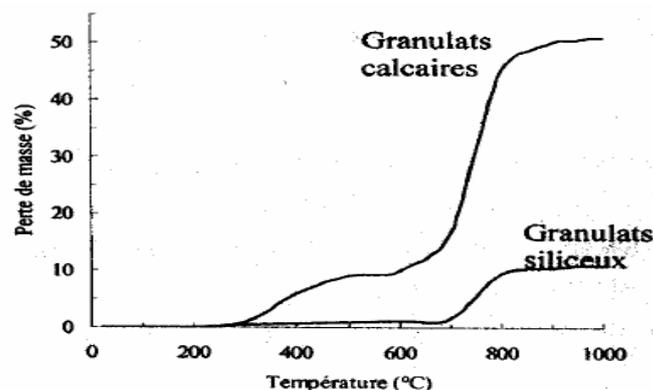
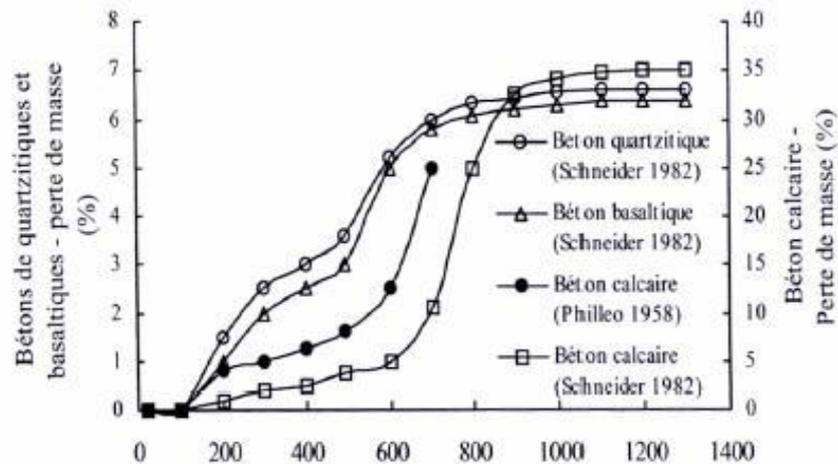


Figure III.28. Perte de masse de deux types de granulats (calcaire et siliceux) [73], [65].

Et en terme de perte de poids pour les bétons contenant différent type de granulats, La Figure III.29 montre les résultats d'analyse thermo gravimétriques (ATG) menées par différents auteurs sur des bétons comprenant différents granulats. Ils permettent globalement de suivre l'évolution de la perte de masse au cours du chauffage, on observe ainsi une perte de l'eau libre entre 20°C et 200°C, une perte de l'eau liée chimiquement entre 200 et 500°C et une perte liée aux dégradations chimiques des différents types de granulats au-delà de 500°C.



**Figure III.29.** Perte de masse des bétons de différents types granulats en fonction de la température [65]

### II.6.2.1 Granulats calcaires :

Ce type de granulats assure la meilleure tenue au feu et la plus grande résistance à l'éclatement selon [77]

La propagation de température y est retardée par la calcination du calcaire qui transforme le carbonate de calcium ou de magnésium en oxyde de calcium ou de magnésium les risques de fusion n'existent pas car la température de fusion de l'oxyde est considérablement élevée par rapport aux températures pouvant être atteintes lors des incendies de bâtiment même avec les impuretés qui sont ordinairement présentées dans ces matériaux

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

### **II.6.2.2 Granulats siliceux :**

La fissuration et la rupture d'un béton fait avec ces granulats sont causées par le changement brusque de volume. Le quartz et d'autres formes de silice changent de structure et de volume autour de 573°C. Ce changement peut se poursuivre à des températures plus élevées si le chauffage est rapide. Le ralentissement des effets de la chaleur peut être dû aux inclusions de liquide et d'eau dans la forme hydratée de la silice. La température de la fusion est dessus des températures considérées pour des incendies de bâtiment.

Pour les granulats légers des études faites ont trouvées que le remplacement de granulat ordinaire par de granulat léger indique que les propriétés mécaniques du béton de granulats légers sont moins affectées par l'exposition à la haute température que celle de béton ordinaire [73].

### **II.6.3 Nature de ciment et des ajouts :**

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

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

Le comportement des cendres volantes contenant beaucoup de chaux est sensible à la température [78].

## **II.7. Conclusion**

Pour procéder aux essais à haute température il faut d'abord bien comprendre le phénomène d'incendie et les dégâts qu'il peut occasionner au béton et c'est exactement ce dont ce chapitre parle, il présente plusieurs approches et résultats issus de la littérature du comportement du béton à haute température.

***CHAPITRE III : MATERIAUX UTILISES ET  
FORMULATION***

### III.1. Caractérisation des constituants

Cette partie expérimentale a été consacrée à la caractérisation physique et mécanique des constituants des bétons testés. 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). [78]

#### III 1.1. Caractérisation du gravier

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

##### III 1.1.1. Masse volumique apparente du gravier

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'asurer la dernière couche par un mouvement de va et vient à l'aide d'une réglette. La masse volumique apparente, notée  $M_v$  est donnée par l'expression :

$$M_v = \frac{M}{V} \quad \text{Eq. (III.1)}$$

Avec

$M$  : masse des granulats contenus dans le récipient ;

$V$  : volume du récipient.



**Figure III.1.** Procédé utilisé pour la mesure de la masse apparente du gravier

**Tableau 5.** Résultats des mesures de la masse apparente du gravier

<i>Echantillon</i> <i>Essai</i>	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>Moyenne</i>
<i>M (gr)</i>	720	715	725	720
<i>V (ml)</i>	500	500	500	500
<i>Mv (gr/ml)</i>	1.44	1.43	1.45	1.44
<i>Masse volumique apparente moyenne</i>				<i>1440 Kg/m<sup>3</sup></i>

La masse volumique apparente moyenne obtenue est de 1440 Kg/m<sup>3</sup>, 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<sup>3</sup>.

### III 1.1.2. Masse volumique absolue

La masse volumique absolue ( $\rho$ ) 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 :

$$\rho = \frac{M}{V_1 - V_2} \quad \text{Eq. (III.2)}$$

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

**Tableau 6.** Résultats des essais de mesure de la masse absolue du gravier

<i>Echantillon</i> <i>Essai</i>	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>Moyenne</i>
<i>M (gr)</i>	80	100	150	110
<i>V<sub>1</sub> (ml)</i>	80	100	150	110
<i>V<sub>2</sub> (ml)</i>	110	138	197	149
<i>ρ (gr/ml)</i>	2.66	2.63	3.19	2.82
<i>Masse volumique absolue moyenne</i>				<i>2826 Kg/m<sup>3</sup></i>

**III 1.1.3. Mesure de la teneur en eau des graviers**

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  $\omega$  est donnée par :

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

Avec :  $M_h$ : poids de granulat humide (mouillé).

$M_s$ : poids de granulat sec.



**Figure III.2.** Détermination de la teneur en eau

**Tableau 7.** Teneur en eau des graviers lors des essais

<i>Echantillon</i> <i>Essai</i>	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>Moyenne</i>
$M_h$ (gr)	5000	5000	5000	5000
$M_s$ (gr)	4870	4880	4870	4876
$\omega$ (%)	2.66	2.45	2.66	2.59
<b><i>Teneur en eau moyenne</i></b>				<b>2.59 %</b>

#### III.1.1.4. 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 un 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 :

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





Figure III.3. Mesure de la propreté des graviers

Tableau 8. Résultats des mesures de la propreté des graviers

<i>Echantillon</i> <i>Essai</i>	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>Moyenne</i>
<i>M (gr)</i>	1000	1000	1000	1000
<i>M' (gr)</i>	993	995	994	994
<i>Impureté (%)</i>	0.7	0.5	0.6	0.6
	<i>Impureté moyenne</i>			<i>0.6 %</i>

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

### III 1.1.5. Analyse granulométrique

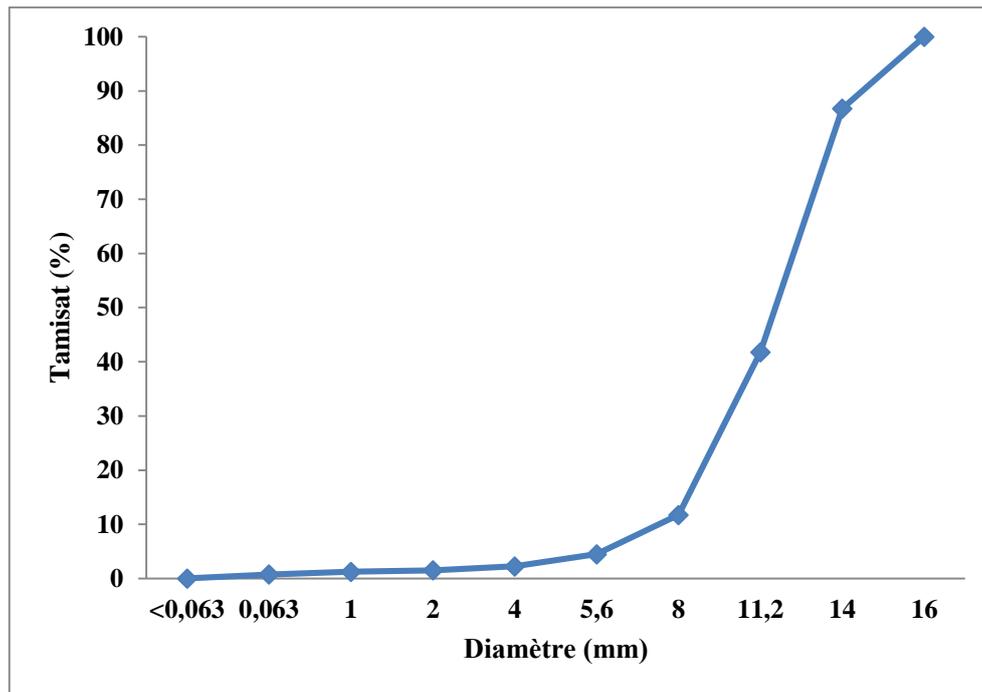
L'analyse granulométrique permet de déterminer la grosseur et les pourcentages pondéraux respectifs des différentes familles de grains constituant les échantillons, en utilisant une série de tamis, emboîtés les uns sur les autres, dont les dimensions des ouvertures sont décroissantes du haut vers le 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.



**Figure III.4.** Analyse granulométrique

**Tableau 9.** Analyse granulométrique du gravier 5/15

Tamis en mm	Refus partiels en g	Refus cumulés en g	Refus cumulés en %	Tamisât cumulés en %
16	0	0	0	100
14	335.07	335.07	16.75	83.25
11.2	835	1165	58.25	41.75
8	411.78	1644.21	82.21	17.79
5.6	89.88	1910.12	95.50	4.50
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 III.5.** Allure de la courbe granulométrique du gravier

### III 1.1.6. Résistance au choc (Essai Los Angeles)

L'essai consiste à mesurer la masse d'éléments inférieurs à 1.6mm, produits par la fragmentation du matériau testé et que l'on soumet aux chocs de boulets normalisés ; dans le cylindre de la machine Los Angeles pendant 500 rotations. Le coefficient de Los Angeles, noté  $L_A$ , est donné par l'expression suivante :

$$L_A = (M_f/M_g) 100 \quad \text{Eq. (III.5)}$$

Avec :

$M_f$ : la masse du matériau soumis à l'essai ;

$M_g$ : la masse des éléments inférieurs à 1.6mm.

**Tableau 10.** Valeurs de la dureté au Los Angeles du gravier utilisé

<i>Echantillon</i> <i>Essai</i>	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>Moyenne</i>
<i>M<sub>g</sub> (gr)</i>	<i>10000</i>	<i>10000</i>	<i>10000</i>	<i>10000</i>
<i>M<sub>f</sub> (gr)</i>	<i>2040</i>	<i>2035</i>	<i>2015</i>	<i>2030</i>
<i>L<sub>A</sub> (%)</i>	<i>20.40</i>	<i>20.35</i>	<i>20.15</i>	<i>20.30</i>
<i>Coefficient de Los Angeles</i> <i>moyen</i>				<i>20.30 %</i>

On peut voir à travers la valeur moyenne de la dureté trouvée (20.3%), que notre gravier répond à la norme qui limite le L<sub>A</sub> à 40%.

### **III 1.1.7. Absorption d'eau**

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

#### **Principe de la mesure :**

On détermine un coefficient d'absorption, qui est défini comme le rapport de l'augmentation de la masse de l'échantillon après imbibition par l'eau, à la masse sèche de l'échantillon dans l'eau pendant 24 heures à 20°C.

Le coefficient d'absorption ( $A_b$ ) est défini par la relation :

$$A_b = \frac{M - M'}{M'} \quad \text{Eq. (III.6)}$$

Avec :  $M$  : masse de l'échantillon sec.

$M'$  : masse de l'échantillon imbibé.

**Tableau 11.** Valeurs du coefficient d'absorption du gravier

<i>Echantillon</i> <i>Essai</i>	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>Moyenne</i>
<i>M (gr)</i>	10000	10000	10000	10000
<i>M' (gr)</i>	2040	2035	2015	2030
<i>A<sub>b</sub> (%)</i>	2.66	2.45	2.66	20.30
<i>Coefficient de Los Angeles moyen</i>				<b>20.30 %</b>

### Récapitulatif des résultats

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

**Tableau 12.** Résultats des essais sur le gravier

<b>Essais</b>	<b>Résultats de mesures</b>
Masse volumique apparente	$M_v = 1440 \text{ Kg/m}^3$
Masse volumique absolue	$\rho = 2826 \text{ kg /m}^3$
Propreté	Impureté = 0.6%
Teneur en eau	W = 2.59%
Dureté (Los Angeles)	$L_A = 20.3\%$
Analyse granulométrique	Figure III.5
Absorption d'eau	Ab=2.59%

## II.1.2. Caractérisation du sable

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

### II. 1.2.1.Masse volumique apparente du sable

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



Figure III.6. Mesure de la masse volumique apparente du sable

Tableau 13. Résultats de la mesure apparente du sable

<i>Echantillon</i> <i>Essai</i>	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>Moyenne</i>
<i>M (gr)</i>	1620	1600	1575	1598
<i>V (ml)</i>	1000	1000	1000	1000
<i>Mv (gr/ml)</i>	1.62	1.60	1.57	1.59
<i>Masse volumique apparente moyenne</i>				<i>1598 Kg/m<sup>3</sup></i>

### III 1.2.2. Masse volumique absolue



Figure III.7. Mesure de la masse volumique absolue du sable

Tableau 14. Résultats de la masse absolue du sable

<i>Echantillon</i> <i>Essai</i>	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>Moyenne</i>
<i>M (gr)</i>	80	100	150	110
<i>V<sub>1</sub> (ml)</i>	80	100	150	110
<i>V<sub>2</sub> (ml)</i>	112	140	210	154
<i>ρ (gr/ml)</i>	2.50	2.50	2.50	2.50
<i>Masse volumique absolue moyenne</i>				<i>2500 Kg/m<sup>3</sup></i>

### III.1.2.3. Mesure de la compacité

Pour effectuer cette mesure il suffit de déterminer le volume des vides présenté par une quantité donnée de granulats, remplissant un bocal de volume  $V$ .

- Peser une quantité de matériau sec et la verser (sans tasser) dans une éprouvette graduée.
- Noter le niveau atteint représentant le volume apparent du matériau, soit  $V$ .
- Dans une deuxième éprouvette contenant un volume  $V'$  d'eau, reverser le sable de la première éprouvette.
- Noter le volume atteint par l'eau  $V_1$

Le volume des vides est égal à :

$$(V + V') - V_1$$

La compacité sera déduite à partir de l'expression suivante :

$$C = \frac{(V_1 - V')}{V} \quad \text{Eq. (III.7)}$$



**Figure III.8.** Mesure de la compacité du sable

**Tableau 15.** Résultats de la compacité du sable

<i>Echantillon</i> <i>Essai</i>	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>Moyenne</i>
<i>V (ml)</i>	53	65	99	73
<i>V' (ml)</i>	80	100	150	110
<i>V<sub>1</sub> (ml)</i>	112	140	210	154
<i>C</i>	0.603	0.615	0.606	0.608
<b><i>Compacité moyenne</i></b>				<b>0.608</b>

#### III. 1.2.4. Porosité

La porosité est par définition le complément à l'unité de la compacité. Soit en désignant celle-ci par  $E$  :

$$P = 1 - C \quad \text{Eq. (III.8)}$$

**Tableau 16.** Valeurs de la porosité du sable

<i>Echantillon</i> <i>Essai</i>	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>Moyenne</i>
<i>C</i>	0.603	0.615	0.606	0.608
<i>P</i>	0.397	0.385	0.394	0.392
<b><i>Compacité moyenne</i></b>				<b>0.392</b>

#### III 1.2.5. Teneur en eau

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  $\omega$  est donnée par :

$$\omega = \left( \frac{M_h - M_s}{M_s} \right) 100 \quad \text{Eq. (III.9)}$$

Avec :

$M_h$ : poids de granulat humide (mouillé).

$M_s$ : poids de granulat sec.



**Figure III.9.** Détermination de la teneur en eau

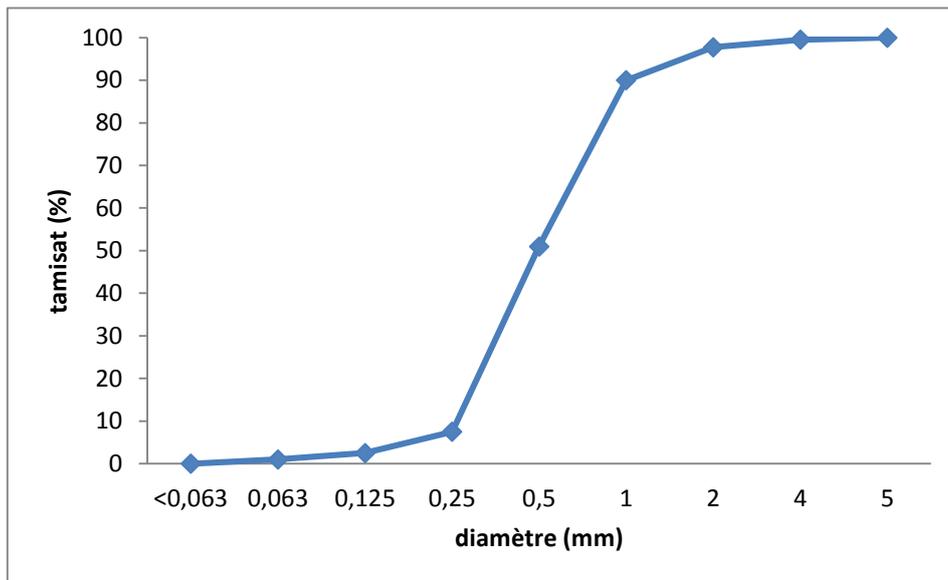
**Tableau 17.** Teneur en eau des graviers lors des essais

<i>Echantillon</i> <i>Essai</i>	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>Moyenne</i>
$M_h$ (gr)	5000	5000	5000	5000
$M_s$ (gr)	4255	4310	4350	4305
$\omega$ (%)	17.5	16	14.9	16.13
<b><i>Teneur en eau moyenne</i></b>				<b>16.13 %</b>

### III 1.2.6. Analyse granulométrique

**Tableau 18.** 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 III.10.** Courbes granulométrique du sable

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

### III 1.2.7- Equivalent de sable

Cet essai a pour but de mesurer la propreté d'un sable. L'essai est effectué sur la fraction 0/5mm du matériau à étudier. Le tamisage se fait par voie humide afin de ne pas perdre d'éléments fins. On lave l'échantillon, selon un processus normalisé. Pour cela on utilise une solution lavante, elle permet de séparer les éléments fins argileux et provoque la

floculation. Après décantation, on mesure la hauteur des fines floculées, (sable propre + éléments fins =  $h_1$ ) et la hauteur de sable propre ( $h_2$  si c'est au piston ou  $h'_2$  si c'est au réglet).

**Mode opératoire :**

- Remplissage de la solution lavante jusqu'au premier trait.
- Masse de sable 120g (sec) est introduite dans l'éprouvette.
- Imbibition du sable pendant 10 min dans la solution lavante.
- Eprouvette secouée (60 cycles en 30 secondes), lavage du sable avec la solution lavante et remplissage jusqu'au deuxième trait.
- Début de la décantation, durée 20 min.
- Mesure de la hauteur de sable  $h_1$  de l'ensemble sable plus floculat.
- Mesure à vue la hauteur
- Mesure de la hauteur du sable  $h_2$  au piston

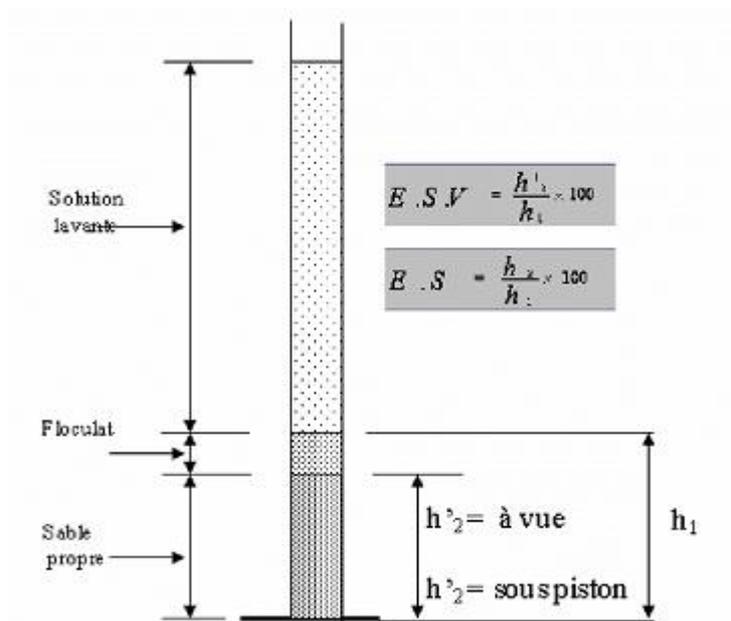


Figure III.11. Mesure de la propreté du sable

**Tableau 19.** Résultat de l'équivalent de sable

Lectures	Prise n° 1	Prise n° 2	Prise n° 3
$h_1$	5	4.7	4.7
$h'_2$	3.8	3.9	3.9
Sur chaque prise : E.S.V	76	82.97	82.97
Sur l'échantillon : E.S.V	<b>80.41%</b>		
Température :	<b>20°C</b>		

L'ESV de notre sable est de 80%, ce qui montre qu'il est propre.

### **Récapitulatif des résultats**

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

**Tableau 20.** Résultats des essais sur le sable.

Essais	Résultats des mesures
Masse volumique apparente	$M_v = 1590 \text{ kg/m}^3$
Masse volumique absolue	$\rho = 2500 \text{ kg /m}^3$
Compacité	$C = 0.608$
Porosité	$P = 0.392$
Teneur en eau	$W = 16.13\%$
Analyse granulométrique	figure III.10
Equivalent de sable	E.S.V = 80.41%

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

### III.1.3. Les additions

#### III.1.3.1. Les fillers

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

- Caractéristiques chimique

**Tableau 21.** Caractéristiques chimiques

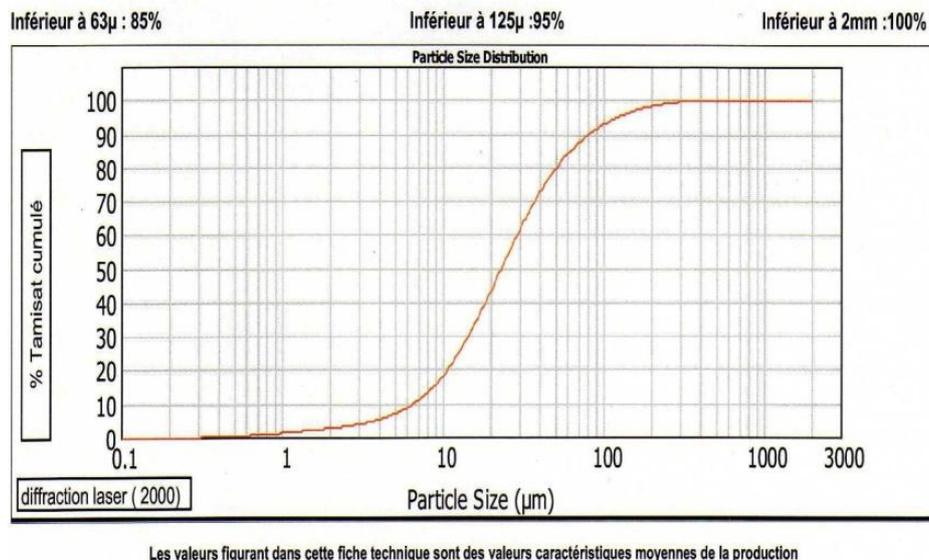
		$SO_3$ (soluble dans l'eau)	0.0021%
$CaO$	56.03%	$SO_3$ (soluble dans l'acide)	0.19%
$SiO_2$	0.04%	soufre totale	0.0137%
$Na_2O$	0.05%	Résidu insoluble	1.15%
$MgO$	0.17%	solubilité dans l'eau (Ws)	0.24%
$Al_2O_3$	0.03%	perte au feu	43%
$Fe_2O_3$	0.02%	Ph	9
$K_2O$	0.02%	$TiO_2$	0.009%
$P_2O_5$	0.008%	chlorure	0.0033%

- Caractéristiques physique

**Tableau 22.** Caractéristiques physiques

Masse volumique réelle	2700 Kg/M <sup>3</sup>
Masse volumique en vrac	1100 Kg/M <sup>3</sup>
Valeur de bleu de méthylène $MB_f$	1.67 gr/Kg

- Répartition granulométrique



**Figure III.12.** Répartition granulométrique

### III.1.3.2. Laitier granulé

Le laitier provient des hauts fourneaux du complexe sidérurgique d'El Hadjar. C'est un laitier granulé obtenu par broyage à sec en laboratoire des matériaux au département de génie civil, université Badji Mokhtar-Annaba et dont les principales caractéristiques sont consignées dans le tableau 4.

**Tableau 23.** Composition chimique moyenne du laitier granulé utilisé

<i>CaO</i>	36-46%	<i>K<sub>2</sub>O</i>	0.5%
<i>SiO<sub>2</sub></i>	35-45%	<i>Na<sub>2</sub>O</i>	0.3%
<i>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></i>	4-12%	<i>MnO</i>	1.3-2.5%
<i>Fe<sub>2</sub></i>	0.5-19%	<i>S</i>	0.5-0.75%
<i>P<sub>2</sub>O<sub>5</sub></i>	0.1%	<i>Indice de basicité</i>	0.98-1.2
<i>MgO</i>	3-8%		

### III.1.4. Eau de gâchage :

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

### III.1.5.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-

- **Caractéristiques physiques et chimiques**

Les différentes caractéristiques sont regroupées dans le tableau suivant.

**Tableau 24.** Composition chimique moyenne du ciment utilisé Caractéristiques physiques et chimiques du ciment utilisé

<i>Caractéristiques physiques</i>	<i>Valeur</i>	<i>Caractéristiques chimiques</i>	<i>Valeur</i>
<i>Masse volumique absolue (g/cm<sup>3</sup>)</i>	3.1	<i>CaO</i>	55-65%
<i>Masse volumique apparente (g/cm<sup>3</sup>)</i>	1.12	<i>SiO<sub>2</sub></i>	22-28%
<i>Surface spécifique (m<sup>2</sup>/kg)</i>	370	<i>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></i>	5-6%
		<i>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></i>	3-3.6%

### III.1.5. Les adjuvants :

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 du ciment permet d'améliorer certaines de ces propriétés.

Dans notre étude on a utilisé le Superplastifiant MEDAPLASTS P40 :(Haut réducteur d'eau /Conforme à la norme EN934-2), permettant d'obtenir des bétons et mortiers de très haute qualité. En plus de sa fonction principale de superplastifiant, il permet de diminuer considérablement la teneur en eau du béton.

Le MEDAPLAST SP40 est introduit dans l'eau de gâchage, Il est recommandé d'ajouter l'adjuvant dans le béton après que 50 à 70% de l'eau de gâchage ait été introduite.

Il se caractérise par :

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

Grâce à ses propriétés le MEDAPLAST SP40 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 et le retrait
- D'augmenter la durabilité

### III.2. formulation des bétons :

Comme nous l'avons déjà signalé précédemment, la composition des BAP est différente complètement de celle des bétons ordinaires et ce fait d'une manière empirique [3] et se caractérise par : un volume élevé de pâte, une grande quantité de fines ( $\phi \leq 80\mu m$ ), l'emploi d'un superfluidifiant, un faible volume de gravillon et enfin l'utilisation éventuelle d'un agent de viscosité rétenteur d'eau.

Bénéficiant des résultats de travaux cités précédemment dans la littérature ainsi que des recommandations de l'AFGC, nous avons adapté une formulation d'un BAP aux conditions locales au niveau du laboratoire de Génie Civil et d'Hydraulique. Par ailleurs, et vue le nombre important de paramètres, il était impératif de fixer quelques-uns notamment :

- le dosage en liant, constitué de ciment CPJ 42.5 est maintenu fixe à  $400 \text{ Kg/m}^3$ ,
- Le rapport  $E/C = 0,5$  et le rapport  $G/S \approx 1$
- l'ajout d'ultrafines d'origine calcaire dont le dosage est fixé de manière telle que la masse de la phase fine (mélange de ciment + ultrafines) soit de l'ordre de 400 litres.

Plusieurs formulations et plusieurs superplastifiants ont été testés avant de pouvoir arriver à notre formulation finale pour les bétons autoplaçants. Nous avons d'abord formulé un BAP sans aucune addition s'appuyant uniquement sur les critères recommandés par [4].

A partir de la composition du **BAP<sub>SA</sub>**, nous avons introduit les différentes additions avec des dosages de 10, 20 et 30% par rapport à la masse du ciment : **BAP<sub>F</sub>** (BAP avec filler calcaire), **BAP<sub>L</sub>** (BAP avec laitier granulé). Les différentes compositions des BAP sont données dans le tableau21 ainsi que la formulation du béton vibré adaptée à partir la méthode de Dreux-Gorisse qui consiste à étudier le meilleur arrangement des granulats de manière à obtenir la meilleure compacité. Le rapport Eau/Ciment a été pris égal à 0,5 et la résistance en compression visée était de 30 MPa. Après des gâchées d'essais, les dosages des constituants ont été corrigés et sont portés sur les tableaux25 :

**Tableau 25.** Compositions et paramètres de formulation des bétons étudiés

Composition (kg/m <sup>3</sup> ) et paramètres de formulation	Désignation des bétons							
	BAP <sub>F10</sub>	BAP <sub>F20</sub>	BAP <sub>F30</sub>	BAP <sub>L10</sub>	BAP <sub>L20</sub>	BAP <sub>L30</sub>	BAP <sub>SA</sub>	BV
Ciment	400	400	400	400	400	400	400	400
Fillers calcaires	40	80	120	-	-	-	-	-
Laitier Granulé	-	-	-	40	80	120	-	-
Medaplast SP 40	6.8	6.8	6.8	6.8	6.8	6.8	6.8	-
Sable	765	765	765	765	765	765	765	650
Gravier 5/15	865	865	865	865	865	865	865	1100
Eau de gachage	200	200	200	200	200	200	200	200
Rapport massique G/S	1,13	1,13	1,13	1,13	1,13	1,13	1,13	1,70
Rapport E/C	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50
Rapport ADD/ L	0,10	0,20	0,30	0,10	0,20	0,30	0	0
Essais au cône d'Abrams (cm)	68	70	73	69	72	71	72	13,80
Essai boîte en L	0,85	0,89	0,93	0,82	0,84	0,83	0,82	-
Essai au tamis %	11,87	8,33	7,82	10,20	9,27	7,91	13,81	-
Résistance à la compression à 28jours(MPa)	22,93	30,5	24,11	24,75	34,57	37,03	27,66	28,18

### III.2.1. Propriétés des BAP à l'état frais

Selon AFGC [4], un béton autoplaçant doit satisfaire principalement ces trois tests :

#### III.2.1.1. Mobilité en milieu non confiné,

L'essai est réalisé par la mesure de l'étalement au cône d'Abrams (SF), dont les valeurs acceptables varient entre 600 à 750mm

Les résultats obtenus, montrés sur la 'Figure III.13' confirment que tous les bétons ont des valeurs d'étalement comprises dans le domaine des BAP et que l'influence des additions minérales sur l'écoulement des bétons est fonction de leur dosage et de leur nature [79]. Les additions finement broyées occupent et remplissent les vides disponibles entre les particules

du mortier, augmentant ainsi, la compacité du mélange en améliorant l'arrangement total des particules dans la matrice [80], ce qui se traduit par une meilleure fluidité. Le laitier n'améliore pas la fluidité du mélange parce qu'on remarque une diminution de l'étalement pour le **BAP<sub>L30</sub>**. Alors que le filler calcaire améliore l'étalement. En effet, le laitier a une demande en eau importante par rapport au filler calcaire, ce qui peut réduire les propriétés d'ouvrabilité du béton. D'après [81] et [82] le laitier adsorbe le superplastifiant pour plusieurs raisons :

- Demande eu eau du FC < LG en raison de leurs natures chimiques mais aussi au caractère inerte et réactif latent du LG
- La morphologie des grains de FC arrondies et sans lacunes (fissures), alors que les grains de LG ne sont pas arrondies et présentent beaucoup de lacunes. Selon plusieurs auteurs, l'accroissement de la surface spécifique des additions minérales, entraîne une augmentation des besoins en eau et une diminution de la compacité des pâtes ou suspensions, indépendamment de la nature minéralogique de l'addition.

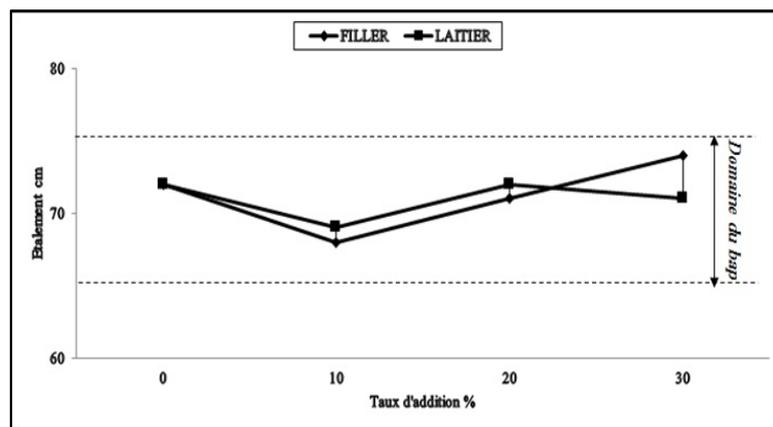


Figure III.13. Influence des additions sur l'étalement

### III.2.1.2. La mobilité en milieu confiné

Elle est réalisée par l'essai du taux de remplissage dans la boîte en L, désigné par PL.  
 $PL = H2/H1 \geq 0,8$

Tous les résultats obtenus sur l'essai de la boîte en L sont présentés sur la 'Figure III.14'. Le **BAP<sub>SA</sub>** donne la plus petite valeur (0.81). D'ailleurs, lors des essais, on a remarqué un petit blocage du **BAP<sub>SA</sub>** par rapport aux BAP dont le volume de pâte qui est faible et ne peut pas entraîner les gros granulats. Cependant, tous les mélanges avec des additions donnent de bons taux de remplissage. Par contre, on remarque pour le **BAP<sub>L30</sub>** une diminution de ce taux

confirmant ainsi les résultats obtenus avec l'étalement. Pour les fillers calcaires, tous les dosages améliorent l'écoulement du béton, même le pour **BAP<sub>F30</sub>** qui donne un rapport  $H_2/H_1 = 0.93$

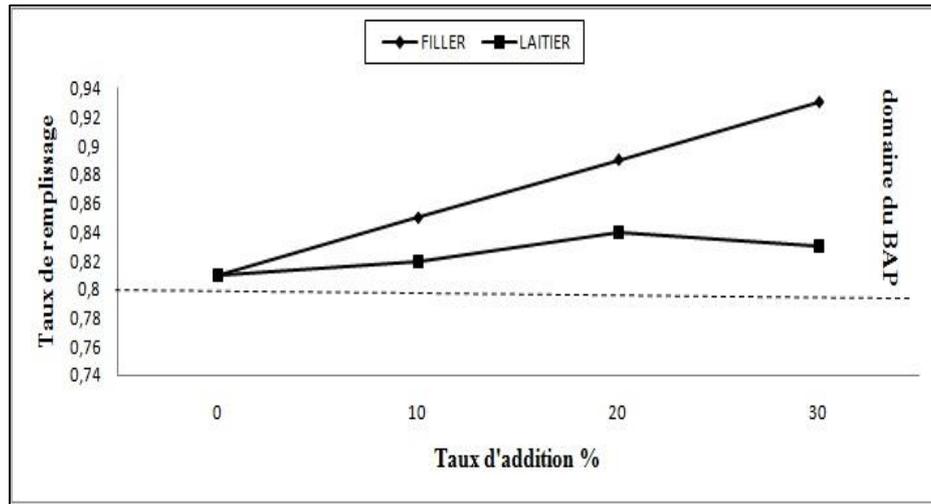


Figure III.14. Influence des additions sur la boîte en L

### III.2.1.3. La résistance à la ségrégation

Exprimée par l'essai de stabilité au tamis. Elle se calcule comme le poids de la laitance par rapport au poids de l'échantillon (SR), dont  $0\% < SR < 15\%$  correspond à une stabilité satisfaisante,  $5\% < SR < 30\%$  une stabilité critique et  $SR > 30\%$  une très mauvaise stabilité.

A partir des résultats obtenus, on note que si le volume de pâte augmente, la quantité de laitance diminue d'où le rôle très important des additions pour limiter les risques de ségrégation et de ressuage [22].

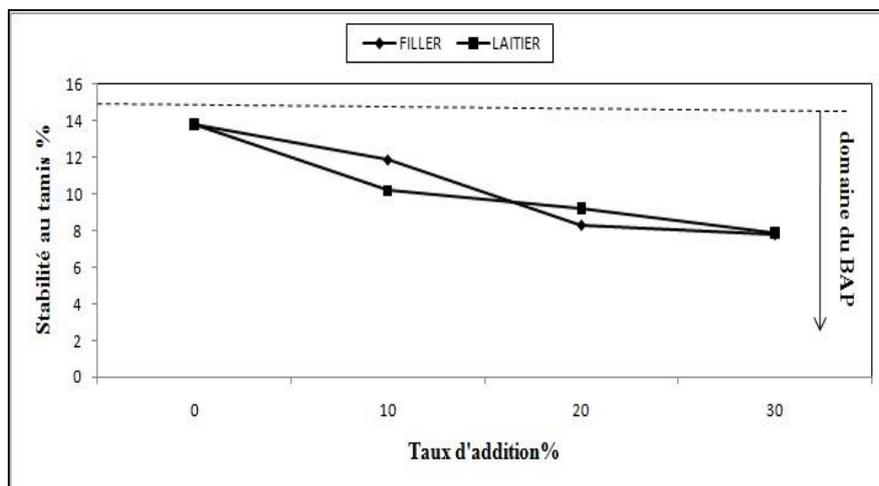


Figure III.15. Influence des additions sur la stabilité au tamis

### **III.2.2. Conservation des éprouvettes**

Des éprouvettes cubiques (10x10x10) cm<sup>3</sup> à 3, 7, 14 et 28 jours ont été utilisées pour les essais de compression. Les éprouvettes ont été démoulées 24 heures après le coulage et conservées dans l'eau, à température ambiante

Après avoir fait les essais de résistance à l'état durci nous avons gardé seulement celles qui dépassent les 25 MPa pour les essais notre l'étude à haute température

Après 28 jours de cure dans l'eau, les éprouvettes sont retirées et stockées à l'air libre afin qu'elles subissent un séchage naturel. Après la période de durcissement désigné de 90 jours, recommandés par RILEM [83] les échantillons étaient prêts à être utilisés pour les essais.

### **III.2.3. Propriétés des bétons à l'état durcis**

Généralement le béton autoplaçant donne une résistance mécanique plus grande qu'un béton ordinaire. L'ajout d'additions minérales provoque une diminution de la porosité de la matrice cimentaire en améliorant la résistance mécanique du béton au jeune âge par effet physique (effet de remplissage) et par effet pouzzolanique (chimique) lorsqu'elles sont réactives, à plus longues échéances [41]. Alors l'amélioration des résistances dépend de la nature, du dosage et de la finesse de l'addition. Les **BAP<sub>F</sub>** donnent de meilleures résistances que le **BAP<sub>SA</sub>** à tous les âges, parce que les fillers calcaires ont un effet de remplissage, le développement des résistances se fait remarquer surtout à court terme. On remarque aussi, qu'à 2 et 7 jours les **BAP<sub>L</sub>** présentent des résistances mécaniques faibles par rapport à celles des **BAP<sub>F</sub>**, ce qui peut s'expliquer par la différence de la finesse entre les deux additions, les fillers calcaire sont plus fines. Cependant, à long terme le **BAP<sub>L</sub>** présente des meilleures résistances que le **BAP<sub>F</sub>**, ainsi l'amélioration des propriétés mécaniques en compression pour le **BAP<sub>L</sub>** est due à la présence d'une faible réactivité du laitier granulé, qui peut se traduire par un effet pouzzolanique qui s'inscrit dans le temps. Les résultats de la résistance mécanique en compression sont présentés dans les 'Figures III.16, III.17, III.18 et III.19'.

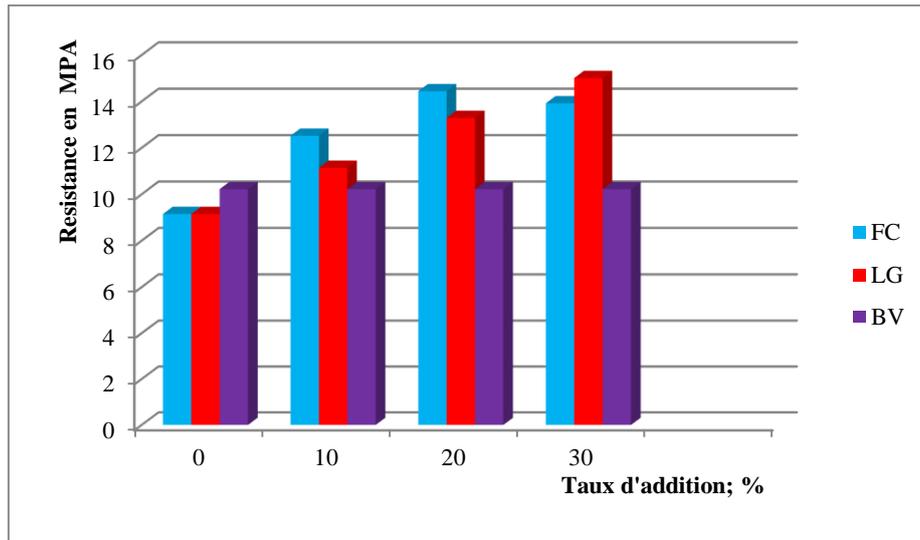


Figure III.16. La résistance en compression à 3 jours

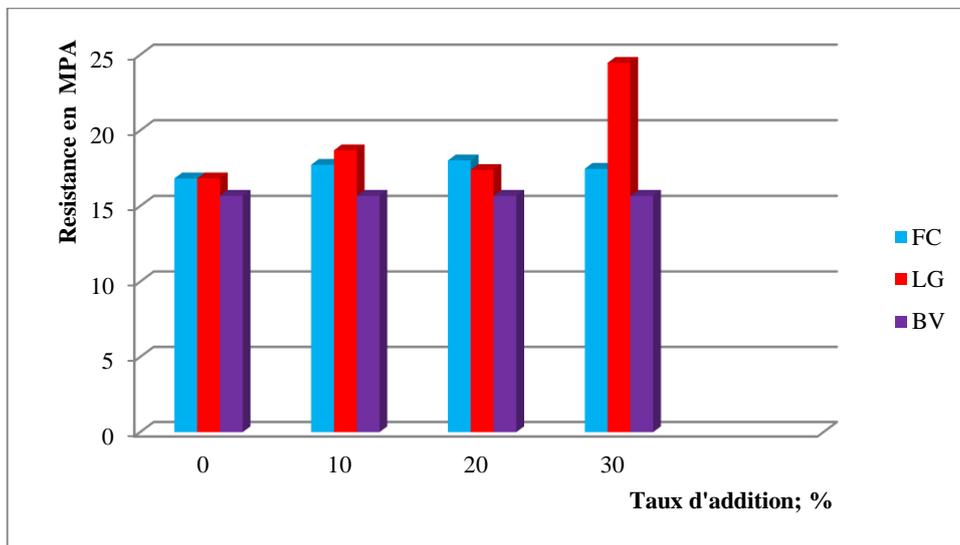


Figure III.17. La résistance en compression à 7 jours

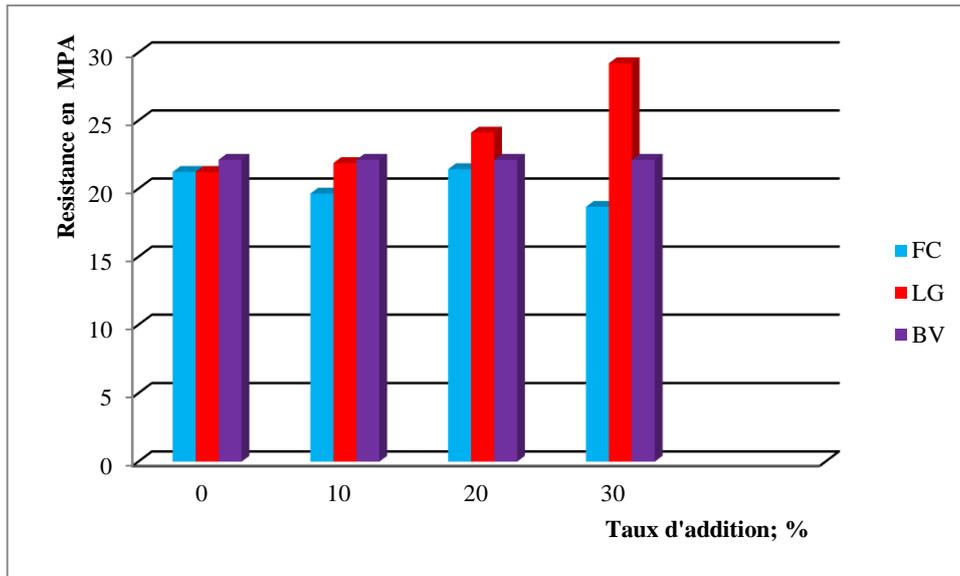


Figure III.18. La résistance en compression à 14 jours

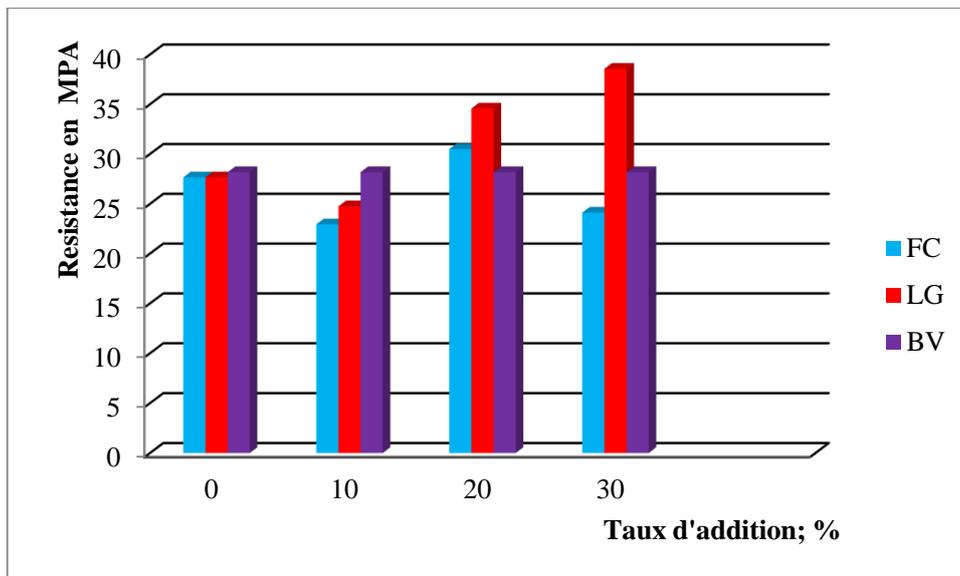


Figure III.19. La résistance en compression à 28 jours

### III.3. Conclusion

Au vu des exigences requises pour l'élaboration des BAP ; il est visible que l'on obtient de bons bétons en terme de performances à l'état frais et durci à base de matériaux locaux. L'emploi des superplastifiants permet de formuler un béton fluide comme le BAPR. Pour lui communiquer le caractère autoplaçant en termes de stabilité et de remplissage des coffrages, l'emploi des additions fines est tout à fait justifié. La nature de l'addition (inerte ou

réactive), son dosage et sa finesse peuvent avoir des effets sur le béton frais par l'amélioration de la viscosité, de l'homogénéité et l'élimination des risques de ségrégation, les additions peuvent aussi être influentes sur le béton durci par l'accroissement des résistances mécanique et de la compacité du mélange. En effet, les résultats obtenus montrent que les fillers calcaire permettent d'obtenir les BAP les plus fluides et que le laitier granulé garantit les meilleures résistances mécaniques à long terme.

## ***CHAPITRE IV : METHODOLOGIE D'ESSAIS***

## IV.1. Introduction

Dans ce chapitre nous allons faire un rappel sur les caractéristiques des matériaux utilisés ainsi que la méthode de conditionnement et les type d'éprouvettes utilisées. Nous traiterons aussi les différents essais réalisés sur les BAP ainsi que le béton ordinaire témoin avant et après traitement thermique.

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

## IV.2. Rappel sur les matériaux

### IV.2.1. Les granulats

Les résultats des essais entrepris sur le gravier 5/15, provenant de la carrière de Maouna (Guelma) et sur le sable fin 0/5 de la région de Tébessa est résumé dans le tableau suivant ainsi que la figure qui suit :

**Tableau 26.** Résultats des essais sur le gravier et le sable

<i>Essais</i>	<i>Gravier</i>	<i>Sable</i>
Masse volumique apparente (kg/m <sup>3</sup> )	1440	1590
Masse volumique absolue (kg/m <sup>3</sup> )	2826	2500
Porosité	-	0.392
Propreté (%)	0.6	-
Teneur en eau (%)	2.59	16.13
Dureté (Los Angeles)	20.3	-
Absorption d'eau (%)	2.59	-
Compacité	-	0.608
Équivalent de sable (%)	-	80.41

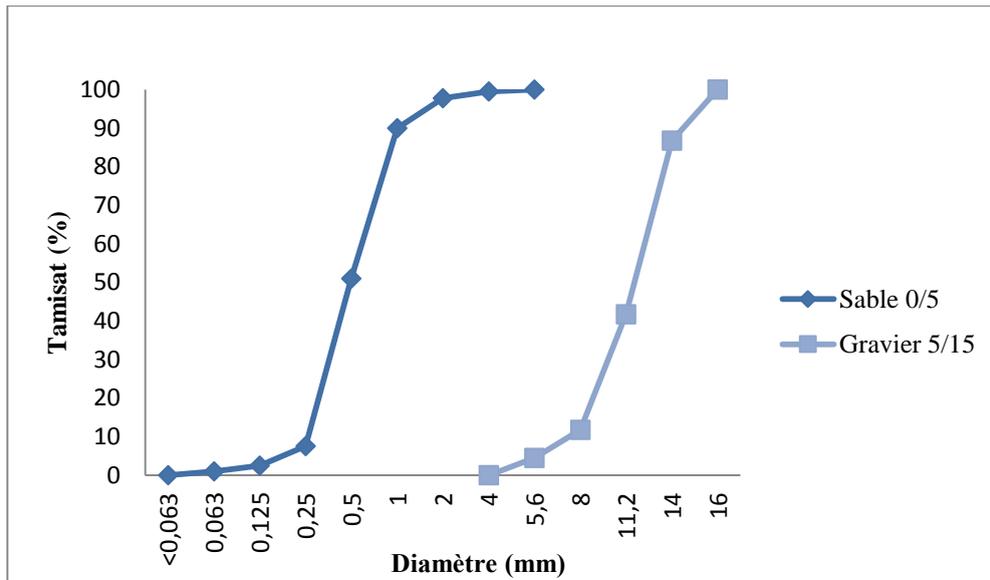


Figure IV.1. Analyse granulométrique des granulats

#### IV.2.2. Le 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- Les principales caractéristique sont représentées dans les tableaux 27 et 28.

Tableau 27. Propriétés physique du ciment utilisé

Propriétés Physiques	Surface spécifique de Blaine ( $m^2/kg$ )	Densité absolue $\rho_{abs}$ ( $g/cm^3$ )	Densité apparente $\rho_{app}$ ( $g/cm^3$ )	Résistance à la compression à 28 jours (Mortier Standard) (MPa)
CPJ CEM II/A 42.5 R	370	3.1	1.12	42.5

#### IV.2.3. L'eau de gâchage

L'eau de gâchage utilisé est celle du robinet de la région de Guelma.

#### IV.2.4. Les addition

##### a) Filler Calcaire

Les fillers calcaires utilisés étaient de la carrière ENG d'El Khroub (Constantine). La perte au feu est de 43% et ses principales caractéristiques sont données dans le tableau 28.

## b) Laitier granulé

Le laitier provient des hauts fourneaux du complexe sidérurgique d'El Hadjar. C'est un laitier granulé obtenus par broyage à sec en laboratoire des matériaux au département de génie civil, université Badji Mokhtar-Annaba et dont les principales caractéristiques sont consignées dans le tableau 28.

**Tableau 28.** Propriétés chimique du ciment, filler et laitier utilisés

	CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O
CPJ CEM II/A 42.5 R	58.6%	24.92%	6.58%	3.65%	1.21%	0.85%	0.08%
Filler Calcaire	56.03%	0.04%	0.03%	0.02%	0.17%	0.02%	0.05%
Laitier Granulé	36-46%	35-45%	4-12%	0.5-19%	3-8%	0.5%	0.3%

### IV.2.5. Les adjuvants :

Un superplastifiant Type Granitex medaplast SP40 a été utilisé comme adjuvant, conformément à EN934-2 FN [84]. C'est un superplastifiant hautement réducteur d'eau, contenant un polycarboxylate modifié. Sa densité est de 1,2 g / cm<sup>3</sup> et l'extrait sec est de 40%.

Il est également caractérisé par :

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

### IV.2.6. Formulation retenus

Les formulations retenues dans notre étude sont exprimés dans le tableau qui suit :

**Tableau 29.** Formulation des bétons retenus

Composition (kg/m <sup>3</sup> ) et paramètres de formulation	Désignation des bétons				
	BAP <sub>F20</sub>	BAP <sub>L20</sub>	BAP <sub>L30</sub>	BAP <sub>SA</sub>	BV
Ciment	400	400	400	400	400
Fillers calcaires	80	-	-	-	-
Laitier Granulé	-	80	120	-	-
Medaplast SP 40	6.8	6.8	6.8	6.8	-
Sable	765	765	765	765	650
Gravier 5/15	865	865	865	865	1100
Eau	200	200	200	200	200
Rapport G/S	1,13	1,13	1,13	1,13	1,70
Rapport E/C	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50
Rapport ADD/ L	0,20	0,20	0,30	0	0
Essais au cône d'Abrams (cm)	70	72	71	72	13,80
Essai boîte en L	0,89	0,84	0,83	0,82	-
Essai au tamis %	8,33	9,27	7,91	13,81	-
Résistance à la compression à 28jours(MPa)	30,5	34,57	37,03	27,66	28,18

#### IV.2.7. Conditionnement et conservations des éprouvettes

Les échantillons ont été coulés et laissés dans le moule 24h. Passés les 24h les éprouvettes ont été mises dans l'eau pour une cure jusqu'au 28<sup>ème</sup> jour à température ambiante puis laissées à l'air libre jusqu'à 90 jours pour avoir des conditions identiques à celles des chantiers. Après la période de durcissement désignée de 90 jours, recommandée par RILEM [83] les échantillons étaient prêts à être utilisés pour les essais.

#### IV.2.8. Taille des éprouvettes

Pour notre étude 4 types d'éprouvettes ont été utilisés à savoir :

- **Des éprouvettes cubiques 10x10x10 cm** : pour les essais de compression.
- **Des éprouvettes cubiques 15x15x15 cm** : pour les essais de pénétration d'eau ainsi que l'analyse par image mais aussi la perte de masse et les essais de l'ultrason.

- **Des éprouvettes prismatiques 7x7x28 cm** : pour les essais de flexion, porosité et densité.
- **Des éprouvettes cylindriques Ø15x5 cm** : pour les essais de perméabilité à l'air.

### IV.3. Méthodologie d'essais

Notre étude est divisée en deux parties :

La première partie représente une étude comparative entre les propriétés du béton autoplaçant avant et après traitement thermique et selon le type d'addition, en l'occurrence les BAP<sub>F20</sub>, BAP<sub>L20</sub> et le béton vibré BV.

La deuxième partie représente une étude comparative entre les propriétés du béton autoplaçant avant et après traitement thermique et selon le taux d'addition, en l'occurrence les BAP<sub>L20</sub>, BAP<sub>L30</sub> et le BAP<sub>SA</sub>. Pour cela plusieurs groupes d'essais étaient nécessaires.

#### **Le premier groupe d'essais correspond aux essais mécaniques.**

La première série de mesures a été réalisée pour l'étude de l'influence de la température de traitement sur les propriétés mécaniques des bétons chauffés à 105 °C, 250 °C, 400 °C, 600 °C et 800 °C.

#### **Le deuxième groupe d'essais correspond aux essais non destructifs**

La deuxième série de mesures a été réalisée pour mesurer les valeurs de la vitesse de propagation des imputions ultrasonores dans les bétons et déduire ensuite le module d'élasticité dynamique

#### **Le troisième groupe d'essais correspond aux mesures des propriétés physiques,**

La troisième série de mesures a été réalisée pour évaluer la perte de masse

La quatrième série de mesures a été réalisée pour évaluer la porosité totale et en déduire la densité.

La cinquième série de mesures a été réalisée pour mesurer la perméabilité à l'air

La sixième série de mesures a été réalisée pour mesurer le taux de pénétration de l'eau.

#### **Le quatrième groupe d'essais correspond aux observations de la microstructure des bétons.**

La septième série de mesures a été réalisée pour l'analyse des images de la microstructure des BAP<sub>F20</sub> et BAP<sub>L20</sub> ainsi que la caractérisation des surfaces des BAP<sub>SA</sub>, BAP<sub>L20</sub> et BAP<sub>L30</sub>.

#### IV.3.1. Spécifications techniques du dispositif expérimental

Le dispositif expérimental répond à des critères bien précis dont les principales spécifications sont :

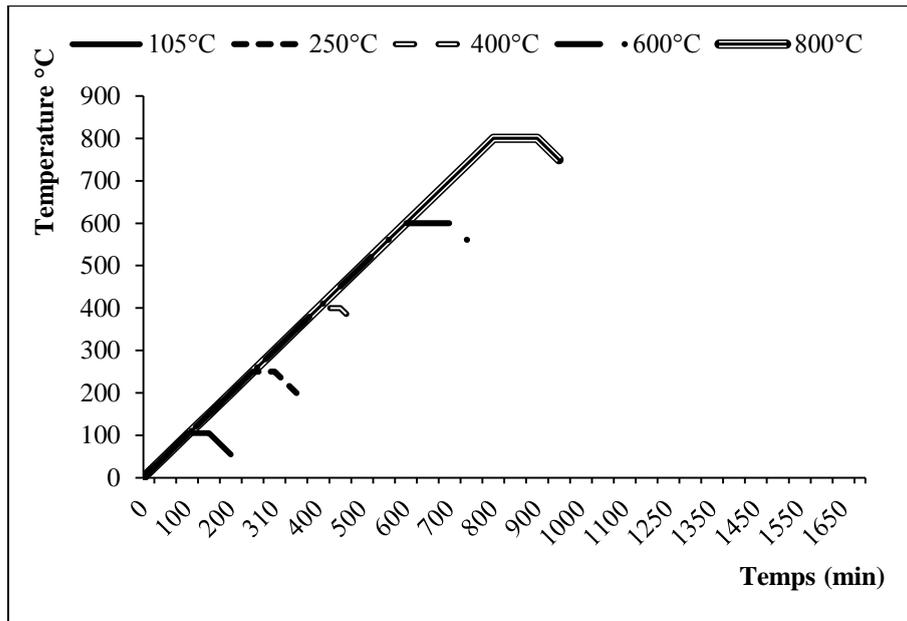
- La vitesse de montée en température de valeur constante 1°C/min : Il apparaît que c'est la durée d'exposition à la température, qui est un paramètre majeur, pour la détermination des propriétés à la haute température. En appliquant une vitesse plus lente on permet aux transformations chimiques (notamment la déshydratation) de se poursuivre. Cependant, les vitesses beaucoup plus élevées figurent parmi les facteurs qui peuvent favoriser l'éclatement
- Le champ de température doit respecter une homogénéité suffisante.
- Le four et ses éléments chauffants doivent être protégés des éventuels éclatements des échantillons soumis aux hautes températures. [10]

#### IV.3.2. Traitement thermique

Dans les essais qui étudient l'influence de la température sur les propriétés d'un matériau, les échantillons subissent un échauffement préalable aux essais.

Comme il a été mentionné préalablement les essais peuvent être réalisés « à chaud », après refroidissement ou après un certain temps suivant le refroidissement.

Pour notre étude à haute température des bétons autoplacant, nous pratiquons des vitesses de chauffage faibles (1°C/min), qui correspondent aux vitesses recommandées par RILEM [83]. La figure 73 représente l'évolution de la température en fonction du temps on observe 3 phases pour chacun des 5 cycles étudiés, (105°C, 250°C, 400°C, 600°C et 800°C), à savoir, une phase de montée de température le palier de stabilisation ainsi qu'une phase de refroidissement où les éprouvettes sont laissées à l'air libre pour refroidir et être prêtes pour les essais résiduels



**Figure IV.2.** Evolution de la température en fonction du temps

Afin de réaliser ces cycles de chauffage, nous utilisons un four NABERTHERME (Figure VI.3). Il est piloté par un régulateur connecté à un thermocouple placé dans le four. Une ventilation est associée au chauffage pour brasser l'air et ainsi avoir une température uniforme dans le four.



**Figure IV.3.** Photo du four utilisé

### IV.3.3. Disposition dans le four

Douze échantillons ont été stockés dans le four pour chaque mélange et chaque cycle de température. La taille du four étant trop petite il a été donc décidé de diviser les spécimens en quatre lots. Trois échantillons sur chaque lot. Le premier lot était pour les 3 éprouvettes cylindriques  $\text{Ø}15 \times 5\text{cm}$ . Le deuxième lot était pour les 3 échantillons prismatiques ( $7 \times 7 \times 28$ ) cm, le troisième lot était les 3 échantillons en cube ( $10 \times 10 \times 10$ ) cm et le quatrième lot était pour les 3 spécimens ( $15 \times 15 \times 15$ ) cm.

### IV.4. Essais de résistances résiduels :

Les essais sont effectués sur les éprouvettes après un refroidissement de 24h à l'air libre sur un minimum de trois éprouvettes pour chaque cycle.

#### IV.4.1. Essais mécaniques :

##### IV.4.1.1. Essai de compression

Cet essai a été réalisé au Laboratoire National de l'Habitat et de Construction (LNHC-Guelma) grâce à une presse mécanique CONTROLAB de 1500 KN sur trois échantillons cubiques ( $100 \times 100 \times 100$ ) mm conformément à NF EN 206-1 [85] pour chaque cycle de chauffage. La vitesse de montée de charge était de 0,5 MPa/s, l'éprouvette est soumise au chargement jusqu'à la ruine.



Figure IV.4. Presse de compression utilisée

#### IV.4.1.2. Essai de flexion

Cet essai a été réalisé Au laboratoire de Génie Civil (Univ. Annaba) grâce à une presse mécanique BERATEST : Machine de flexion, motorisée, avec affichage DIGITEC, 150 KN, sur trois échantillons prismatiques (70x70x280) mm pour chaque cycle de chauffage, conformément à la norme NF EN 12390-5 [86]. Le chargement a été effectué jusqu'à la rupture. Cet essai permet de déterminer la résistance en traction par flexion 3 points.

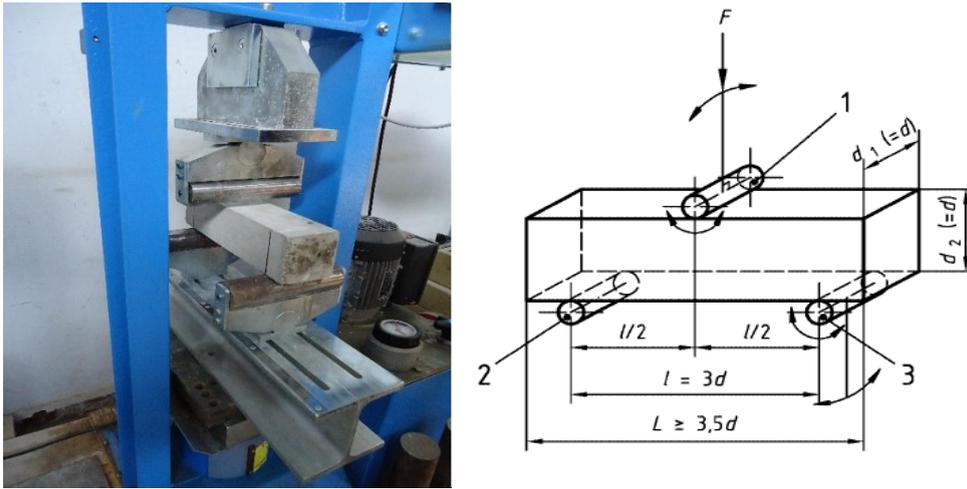


Figure IV.5. Presse de flexion utilisée (3 points)

#### IV.4.1.2. Module d'élasticité dynamique :

Il faut d'abord calculer la vitesse de propagation des ondes sonores à travers les éprouvettes de béton pour pouvoir déduire le module d'élasticité dynamique. Nous avons pour cela utilisé un appareillage d'ultrason CONTROLS (Figure 77).

Après le calcul de la vitesse de propagation le module d'élasticité dynamique a été déduit suivant la norme NF P 18-418 [87] avec l'équation (IV.1)

$$E = \frac{\rho_{app} \cdot V^2 (1 + \nu)(1 - \nu)}{(1 - \nu)} \quad \text{Eq. (IV.1)}$$

Avec :

E : Module d'élasticité dynamique (MPa) ;

$\rho_{App}$  : Masse volumique du béton (Kg/m<sup>3</sup>) ;

V : Vitesse de propagation de l'onde (m/s) ;

$\nu$  : Coefficient de Poisson and  $\nu = 0.2$



**Figure IV.6.** Appareillage d'ultrason utilisé (CONTROLS)

#### **IV.4.2. Essais physiques :**

##### **IV.4.2.1. Mesure de la perte de Masse**

Exposées au cycle chauffage-refroidissement, les éprouvettes subissent des dégradations dus à plusieurs facteurs dont la perte d'eau ce qui engendre aussi une perte de masse. Cette dernière est considérée comme un des indicateurs principaux de ces dégradations. C'est pour cela que la masse des éprouvettes a été mesurée avant et après chaque cycle de chauffage-refroidissement sur les trois éprouvettes cubique (15 x 15 x 15)cm<sup>3</sup>

##### **IV.4.2.2. Porosimétrie à l'eau**

Nous avons pris les éprouvettes utilisée pour l'essai de flexion pour cette essai afin de limité le risque de détérioration des échantillons Compte tenu de leurs fragilité et de la friabilité à la température de 600°C et 800°C.

La densité et la porosité totale des différents bétons ont été étudiées avant et après traitement thermique. La technique utilisée est une variante de la porosité à l'eau par pesée hydrostatique recommandée par l'AFREM [88], cette variante a été utilisée par [36]. Elle donne la valeur globale de la porosité totale mais ne permet pas de déterminer la distribution des pores. Ils sont mis dans une étuve à une température de 70°C jusqu'à masse constante.

Lorsque les échantillons sont entièrement secs, ils sont immergés dans l'eau. Des mesures de masse sont effectuées au fil du temps jusqu'à saturation complète. Une fois que l'échantillon est saturé, une pesée en état saturé immergé est réalisée sur une balance hydrostatique puis elle est suivie du pesage en état saturé après avoir essuyé l'échantillon avec un linge pour enlever les surplus d'eau de la surface. Les échantillons testés sont ceux issus des chauffages à 105°C, 250°C, 400°C, 600°C et 800°C, en plus des échantillons non chauffés. Concernant la pesée, il est nécessaire d'avoir une balance très précise pour réduire les erreurs de mesures, ainsi, nous avons utilisé une balance de 3 kg avec une précision de 0.01 g disposant d'un crochet pour réaliser les pesées hydrostatiques.

La porosité est déterminée selon l'équation (IV.2) :

$$P = \frac{M_{Sat} - M_{Sec}}{V} = \frac{M_{Sat} - M_{Sat}^{imm}}{M_{Sat} - M_{Sat}^{imm}} \quad (IV.2)$$

Où,  $M_{Sat}$  et  $M_{Sat}^{imm}$  sont la masse saturée d'un échantillon mesurée dans l'air et dans l'eau respectivement.  $M_{Sec}$  est la masse sèche obtenue après séchage à l'étuve.

A partir des mêmes éléments, il est possible de calculer la densité apparente  $\rho_d$  des échantillons avec l'équation (IV.3) :

$$\rho_d = \frac{M_{Sec}}{V} = \frac{M_{Sec}}{M_{Sat} - M_{Sat}^{imm}} \quad (IV.3)$$

### IV.4.2.3. Perméabilité

#### a) Perméabilité à l'air

La perméabilité à l'air des bétons joue un rôle important dans la fabrication des réservoirs en béton pour le stockage de gaz, ou de stockage de déchets radioactifs. Elle est ; en général, supérieure à la perméabilité à l'eau [36]. Elle peut être utilisée pour évaluer la durabilité de bétons. Ainsi, la perméabilité sert pour le contrôle de la qualité des ouvrages en béton.

La perméabilité mesurée est la perméabilité apparente. Elle résulte de la loi de «Hagen-Poiseuille» :

$$K = \eta \frac{2.Q.P_0.l}{A.(P^2 - P_d^2)} \quad (IV.4)$$

Avec :

$K$  : Perméabilité apparente [ $m^2$ ]

$A$  : section de l'éprouvette [ $m^2$ ]

$Q$  : Débit de gaz [ $m^3.s^{-1}$ ]

$l$  : Epaisseur de l'éprouvettes dans la direction de l'écoulement

$\eta$  : Viscosité dynamique du gaz d'essai [Pa.s] (Air à 20°C,  $\eta : 1.82 \times 10^{-5} Pa.s$ )

$P$  : Pression absolue à l'entrée [Pa]

$P_a$  : Pression absolue à la sortie [Pa]

$P_0$  : Pression à laquelle le débit est mesuré [Pa.s] (habituellement,  $p = p_0$ )

Pour déterminer la perméabilité apparente des bétons, nous utilisons un perméamètre Controlab compte-bulles. Il s'agit d'un perméamètre à charge constante. Dans des cellules d'essai qui permettent une étanchéité complète des surfaces de l'enveloppe. Le volume d'air s'écoulant est mesuré sur le côté opposé [89].



**Figure IV.7.** Dispositif utilisée pour le calcul de la perméabilité à l'air (compte-bulles)

Pour mesurer la perméabilité des bétons, on confectionne des éprouvettes cylindriques  $\phi 15 \times 5cm$  en utilisant des moule en PVC confectionnés spécialement pour cette essai. Avant de réaliser le traitement thermique, les éprouvettes sont pesées, référencées et mises dans le four en même temps que les autres éprouvettes servant à réaliser les essais mécaniques.

Les essais doivent être réalisés  $24h \pm 4h$  après leur sortie du four. Cela permet de conserver les mêmes conditions hydriques pour toutes les éprouvettes.

Le perméamètre CEMBUREAU fournit la perméabilité apparente  $K_a$  du matériau calculée en utilisant l'équation IV.4. Pour déterminer la perméabilité intrinsèque  $K_v$ , on utilise la correction proposée par Klinkenberg [90], définie par l'équation (IV.5).

$$K_a = K_v \left[ 1 + \frac{b^*}{P} \right] \quad (IV.5)$$

Avec :

$K_a$  : Perméabilité apparente ( $m^2$ ),

$K_v$  : Perméabilité intrinsèque ( $m^2$ ),

$b^*$  : Coefficient de Klinkenberg (bars)

$$b^* = -0.032 (S_r) + 3.119 \quad [91]$$

$S_r$  : degré de saturation = 0 vu que toutes les éprouvettes sont sèches

$P$  : Pression moyenne (bars) =  $\frac{P_0 + P_{Adm}}{2}$  ou  $P_0$  Etant la pression atmosphérique

Pour mesurer la perméabilité, nous avons suivi les recommandations fournies par l'AFREM [88]. On dispose l'éprouvette dans la cellule d'essai, puis procéder à sa fermeture en pensant à mettre tous les éléments indispensables comme la chambre à air latérale et les deux disques striés de part et d'autre de l'éprouvette. Une fois fermée, il faut gonfler la chambre à air à une pression d'au moins 8 bars (soit 0.8 MPa) à l'aide du manomètre à main. Cette pression doit être au moins égale à trois fois la pression d'injection maximale exercée.

Cette étape termine la mise en place de la cellule d'essai. Ensuite, le gaz est injecté dans la cellule et la perméabilité peut être mesurée une fois que le régime est devenu stationnaire.

D'après l'AFREM, il faut utiliser trois pressions différentes au minimum pour déterminer la perméabilité apparente des matériaux. Cette pression d'injection est ajustée afin de pouvoir mesurer une pression en sortie et ainsi relever le débit correspondant. Le temps d'écoulement du gaz dans le débitmètre doit être compris entre 20 et 60 secondes. A partir de

la valeur relevée, plusieurs autres mesures sont effectuées à intervalles réguliers de 10 minutes.

Pour les échantillons témoins ainsi que celle exposé à 105, 250 et 400°C, la perméabilité apparente se fait en fonction de trois pressions d'injection de 1.5, 2 et 2.5 bars et cela quelle que soit la formulation testée.

Vu l'état de fissuration des éprouvettes exposé à 600 et de 800°C, l'écoulement des gaz a été souvent turbulent. Pour obtenir un débit mesurable, il a fallu donc baisser la pression d'injection du gaz à travers l'échantillon de manière à avoir un temps d'écoulement mesurable.

### **b) Pénétration à l'eau**

Nous avons fait cet essai conformément à la norme (NF EN 12390-8) [92]. Il permet de déterminer l'absorption d'eau de prismes 200 x 200 x 120 mm ou cubes de 15 cm. L'éprouvette est maintenue entre 2 flasques équipées de joints. L'eau sous pression est appliquée sur la surface de l'éprouvette à l'aide d'un compresseur.

La pénétration de l'eau est évaluée à la fin de l'essai de 2 façons :

- Rupture de l'éprouvette.
- Lecture sur burettes graduées.

Dans notre, nous avons utilisée des éprouvettes cubique  $15^3 \text{ cm}^3$  après refroidissement de  $24\text{h} \pm 4\text{h}$ . Les éprouvettes ont été placées dans la machine (Figure IV.8) et laissé sous pression d'eau de  $5 \pm 0.5$  bars durant 72h, après nous avons coupé les éprouvettes en deux et calculé la monté d'eau.



**Figure IV.8.** Dispositif utilisée pour le calcul de la pénétration de l'eau

### **IV.4.3. Observation de la structure**

#### **IV.4.3.1. Analyse par images**

Pour cette expérience nous avons fait des prises d'images de l'intérieur des éprouvettes cubiques coupé en deux, nous avons ensuite zoomé ces prises et les avons sketché à l'aide de photoshop pour effacés le ciment et avoir une meilleur vision sur l'évolution des pores et la liaison entre le gravier et la pâte cimentaire.

Pour cet essai nous avons fait la comparaison seulement entre les BAP<sub>F20</sub> et BAP<sub>L20</sub>.

Pour la 2<sup>ème</sup> partie, une analyse sur les surfaces des éprouvettes a été faite pour voir l'évolution de la dégradation de la surface des BAP.

D'après plusieurs auteurs [39, 10] les changements sur la microstructure interviennent à partir de 250°C, c'est pour cela qu'on a procédé à des prises d'images à partir de cette températures.

### **IV.5 Conclusion**

Dans ce chapitre nous avons essentiellement expliqué les méthodes utilisées dans notre recherche pour l'élaboration de notre thèse. Nous avons cité aussi les différentes machines utilisées, les formulations retenus ainsi que le mode de chauffage utilisé

## ***CHAPITRE V : RESULTATS ET ANALYSES***

***Partie I : Influence du type d'addition sur le  
comportement physico-mécanique à haute température  
des bétons autoplaçants***

### V.I.1. Introduction

Dans cette première partie de ce chapitre nous présenterons les résultats des essais effectués sur les BAP<sub>F20</sub>, BAP<sub>L20</sub> et le béton ordinaire (vibré) témoin avant et après traitement thermique, ainsi que l'analyse de ces résultats.

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.I.2. Résultats et Analyses

#### V.I.2.1. Résultat des essais mécaniques

La résistance à la compression, la résistance à la flexion, le module d'élasticité dynamique et la perte de masse ont été étudiées en fonction de la température de surface des éprouvettes chauffées et présentées dans les figures : *V.1, V.2, V3 et V4* respectivement. Le tableau 30 montre les propriétés des bétons à l'état frais ainsi que certaines propriétés mécaniques initiales obtenues sur des échantillons non chauffés. Pour tous les groupes de bétons, aucun éclatement n'a été observé. Le seul phénomène d'écaillage observé après les différents cycles de chauffage et de refroidissement était le fractionnement des agrégats et la séparation des coins sur un échantillon prismatique. Les propriétés résiduelles, mesurées après les cycles de chauffage et de refroidissement, ont été comparées aux propriétés initiales

**Tableau 30.** Les propriétés des bétons

Ingrédients	Quantité (kg/m <sup>3</sup> )		
	BV	BAP <sub>F20</sub>	BAP <sub>L20</sub>
Eau	200	200	200
Ciment	400	400	400
Laitier Granulé	-	-	80
Filler Calcaire	-	80	
Gravier 5/15	1100	865	865
Sable	640	765	765
Superplastifiant	-	6.8	6.8
E/C	0.50	0.50	0.50
Cône d'Abrams	13.83	68	70

Boîte en L	-	0.89	0.84	
Essai de tamis (%)	-	12.69	9.27	
Résistance à la	7jours	17.79	18.02	19.39
Compression (MPa) à	28jours	28.18	30.5	34.57
température ambiante	90jours	34.81	35.40	41.73

**V.I.2.1.1. Essai de compression**

La variation de la résistance résiduelle à la compression par rapport à la température est représentée dans les figures (V.I.a) et (V.I.b). Nous avons aussi comparé nos résultats avec les résultats de l'Eurocode 4.1.2 Annexe C [93] représentant l'évolution relative de la résistance à la compression résiduelle avec la température sur les bétons vibrés. On peut remarquer à partir de cette figure que le BAP<sub>F20</sub> présente une résistance similaire à celle du béton vibré BV à différentes températures autres que la température de 400°C, où il y a une baisse de résistance par rapport au BV. Le BAP<sub>L20</sub> présente un comportement différent avec des chutes de résistance plus élevées que dans le BV à 250°C et un comportement similaire au-delà de cette température. En comparant les résultats avec ceux de [93] on remarque que toutes les résistances résiduelles relatives en compression mesurées sont assez proches aux valeurs de l'Eurocode 4.1.2, hormis à 400°C pour le BV et le BAP<sub>L20</sub>.

**Tableau 31.** Résistance à la compression en fonction de la température

Composition	Eprouvettes	Température					
		20°C	105°C	250°C	400°C	600°C	800°C
<b>BV</b>	N° 1 (MPa)	37,53	38,10	30,36	37,72	21,86	11,78
	N° 2 (MPa)	30,28	31,38	31,71	35,45	19,62	11,61
	N° 3 (MPa)	36,63	30,61	28,04	36,80	22,53	12,48
	<b>Moyenne (MPa)</b>	<b>34,81</b>	<b>33,36</b>	<b>30,03</b>	<b>36,66</b>	<b>21,34</b>	<b>11,96</b>
	<b>Fct/ Fc20°C</b>	<b>1</b>	<b>0,96</b>	<b>0,89</b>	<b>1,05</b>	<b>0,61</b>	<b>0,34</b>
	<b>BAP<sub>F20</sub></b>	N° 1 (MPa)	37,70	29,88	37,90	25,24	20,92
	N° 2 (MPa)	31,78	35,75	25,46	23,85	18,13	14,33
	N° 3 (MPa)	36,74	32,25	35,77	34,46	20,17	13,14

	<b>Moyenne (MPa)</b>	<b>35,40</b>	<b>32,62</b>	<b>33,04</b>	<b>27,85</b>	<b>19,74</b>	<b>13,02</b>
	<b>Fct/ Fc20°C</b>	<b>1</b>	<b>0,92</b>	<b>0,94</b>	<b>0,78</b>	<b>0,55</b>	<b>0,37</b>
<b>BAP<sub>L20</sub></b>	N° 1 (MPa)	43,04	41,59	32,17	40,07	27,32	16,87
	N° 2 (MPa)	43,00	33,15	26,98	43,95	26,45	15,48
	N° 3 (MPa)	39,24	33,41	31,31	46,29	19,27	14,90
	<b>Moyenne (MPa)</b>	<b>41,73</b>	<b>36,05</b>	<b>30,15</b>	<b>43,43</b>	<b>24,35</b>	<b>15,75</b>
	<b>Fct/ Fc20°C</b>	<b>1</b>	<b>0,86</b>	<b>0,72</b>	<b>1,04</b>	<b>0,59</b>	<b>0,38</b>

La résistance à la compression est différente entre les trois bétons et elle dépend du type de béton ainsi que des additions utilisées ou on remarque qu'après une légère diminution pour le BAP<sub>F20</sub> entre 20°C et 105°C et une forte baisse pour le BAP<sub>L20</sub> entre 20°C et 250°C. Une augmentation de résistance modérée (Environ 30%) a été observée pour BAP<sub>L20</sub> entre 250°C et 400°C, alors que moins de 6% pour BAP<sub>F20</sub>, entre 105°C et 250°C. D'après Khoury [60], cette baisse correspond à une réduction des forces de cohésion de type Van der Waals entre les couches de C-S-H. Cela réduit l'énergie de surface des gels et conduit à la formation possible de groupes silanols (Si-OH : OH-Si) qui ont la particularité de présenter des forces de liaison plus faibles

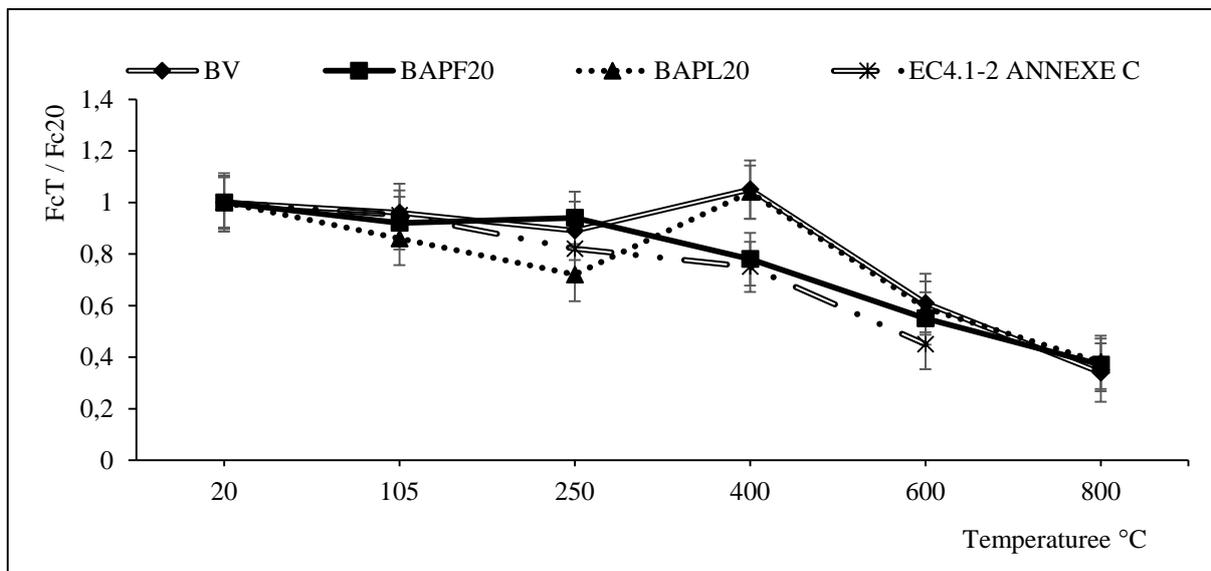
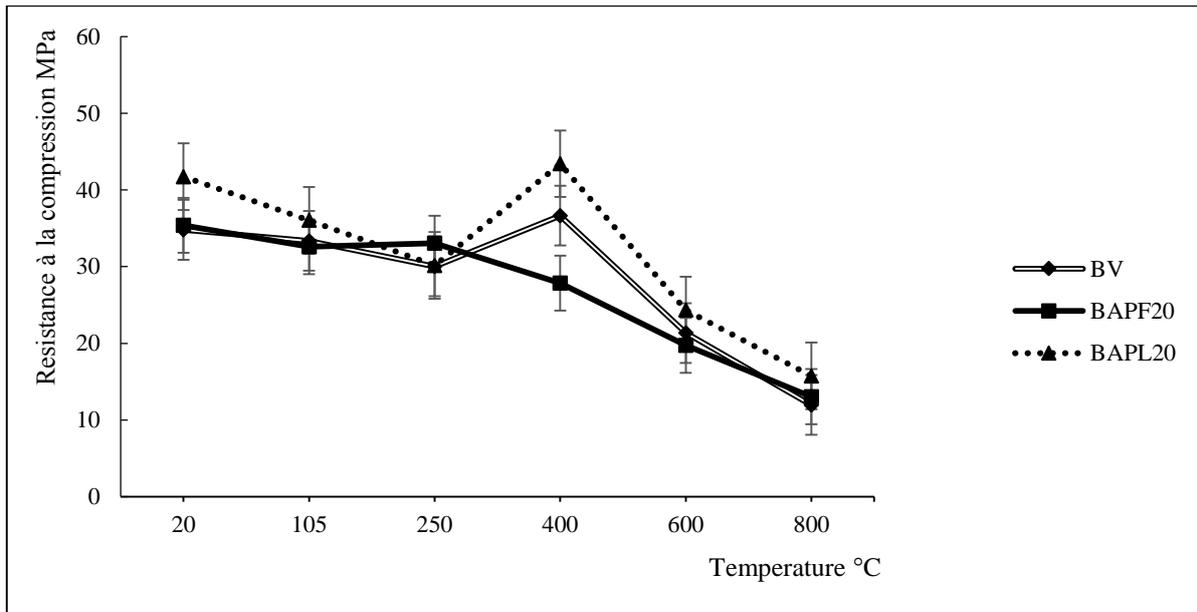


Figure V.1.a. Résistance de compression résiduelle relative



**Figure V.1.b.** Résistance de compression résiduelle

Selon plusieurs auteurs, y compris [94-96,60], l'augmentation de la résistance à la compression du BAP est due à une modification des propriétés de liaison des hydrates de la pâte de ciment. Selon Khoury [60], cette augmentation est due aux groupes silanol qui perdent une partie de leurs liaisons avec l'eau, ce qui induit la création d'éléments de siloxane plus courts et plus forts (Si-O-Si) avec des énergies de surface probablement plus grandes qui contribuent à l'augmentation de la force. Une étude plus approfondie de l'évolution de la microstructure du béton avec la température est en cours afin de mieux comprendre cette augmentation de la force. La diminution de la résistance a déjà été observée dans la littérature [94-96,60]. Au-delà de 400°C, une diminution continue de la résistance à la compression a été observée pour tous les mélanges. A 600°C, la baisse de résistance est due à une dégradation couplée de la matrice cimentaire et à un début de désagrégation des granulats causant une fissuration importante [36].

#### V.I.2.1.2. Essai de Flexion

La variation de la résistance résiduelle à la flexion par rapport à la température est montrée dans les figures (V.2.a) et (V.2.b). La résistance à la flexion diminue progressivement avec l'élévation de température pour tous les groupes de béton. La tendance générale de la résistance résiduelle à la flexion est une diminution de la force résiduelle de flexion pour tous les bétons. Cependant, on ne peut pas conclure que l'évolution de la résistance résiduelle à la flexion avec la température est la même pour tous les bétons étudiés. Ces résultats concordent

avec ceux montrés par [36, 97] sur du béton ordinaire avec un test de micro dureté. En raison des nombreuses fissures (micro et macro fissures) produites dans les éprouvettes en raison de l'incompatibilité thermique entre les agrégats et la pâte de ciment, la perte de résistance à la traction pour les BAP soumis à des températures élevées était clairement différente par rapport à celle de la perte de résistance à la compression, et ceci a été observés dans plusieurs études dont [36, 60&98]. Néanmoins, bien que les écarts enregistrés soient inférieurs à 10% dans tous les cas, le rendement en flexion diffère entre les trois bétons en fonction des additions utilisées dans le mélange. En fait, l'addition du filler calcaire et le laitier granulé a réduit la résistance à la flexion.

**Tableau 32.** Résistance à la flexion en fonction de la température

Composition	Eprouvettes	Température					
		20°C	105°C	250°C	400°C	600°C	800°C
<b>BV</b>	N° 1 (MPa)	6,49	4,85	3,97	2,70	1,20	0,47
	N° 2 (MPa)	6,92	4,58	4,69	2,21	1,18	0,48
	N° 3 (MPa)	5,79	5,16	4,12	erreur	1,10	0,44
	<b>Moyenne (MP)</b>	<b>6,4</b>	<b>4,87</b>	<b>4,26</b>	<b>2,45</b>	<b>1,16</b>	<b>0,46</b>
	<b>Ft/ Ft<sub>20°C</sub></b>	<b>1</b>	<b>0,76</b>	<b>0,66</b>	<b>0,38</b>	<b>0,18</b>	<b>0,07</b>
<b>BAP<sub>F20</sub></b>	N° 1 (MPa)	6,31	4,73	3,64	2,26	1,05	0,50
	N° 2 (MPa)	5,61	5,17	3,69	2,13	0,78	0,46
	N° 3 (MPa)	6,85	4,98	3,72	2,23	0,95	0,51
	<b>Moyenne (MPa)</b>	<b>6,26</b>	<b>4,96</b>	<b>3,68</b>	<b>2,20</b>	<b>0,92</b>	<b>0,49</b>
	<b>Ft/ Ft<sub>20°C</sub></b>	<b>1</b>	<b>0,79</b>	<b>0,59</b>	<b>0,35</b>	<b>0,15</b>	<b>0,08</b>
<b>BAP<sub>L20</sub></b>	N° 1 (MPa)	6,52	4,36	3,31	2,75	0,92	0,42
	N° 2 (MPa)	6,66	4,28	3,15	1,93	1,2	0,36
	N° 3 (MPa)	5,78	4,35	3,17	2,37	1,09	0,42
	<b>Moyenne (MPa)</b>	<b>6,32</b>	<b>4,33</b>	<b>3,21</b>	<b>2,35</b>	<b>1,06</b>	<b>0,40</b>
	<b>Ft/ Ft<sub>20°C</sub></b>	<b>1</b>	<b>0,68</b>	<b>0,51</b>	<b>0,37</b>	<b>0,17</b>	<b>0,06</b>

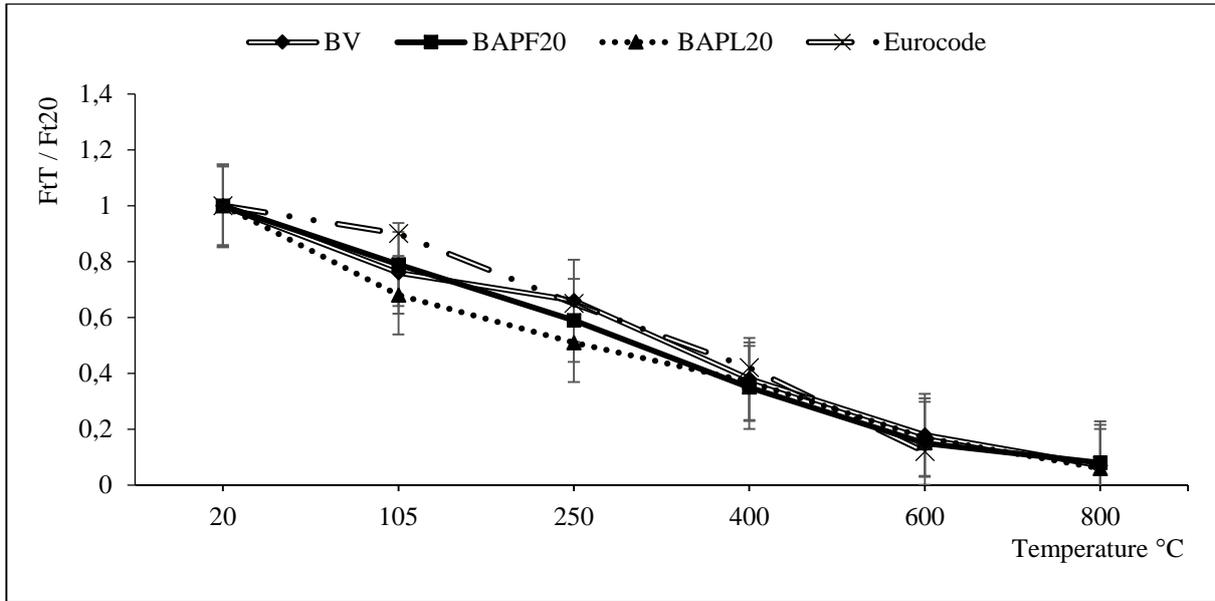


Figure V.2.a. Résistance de Flexion résiduelle

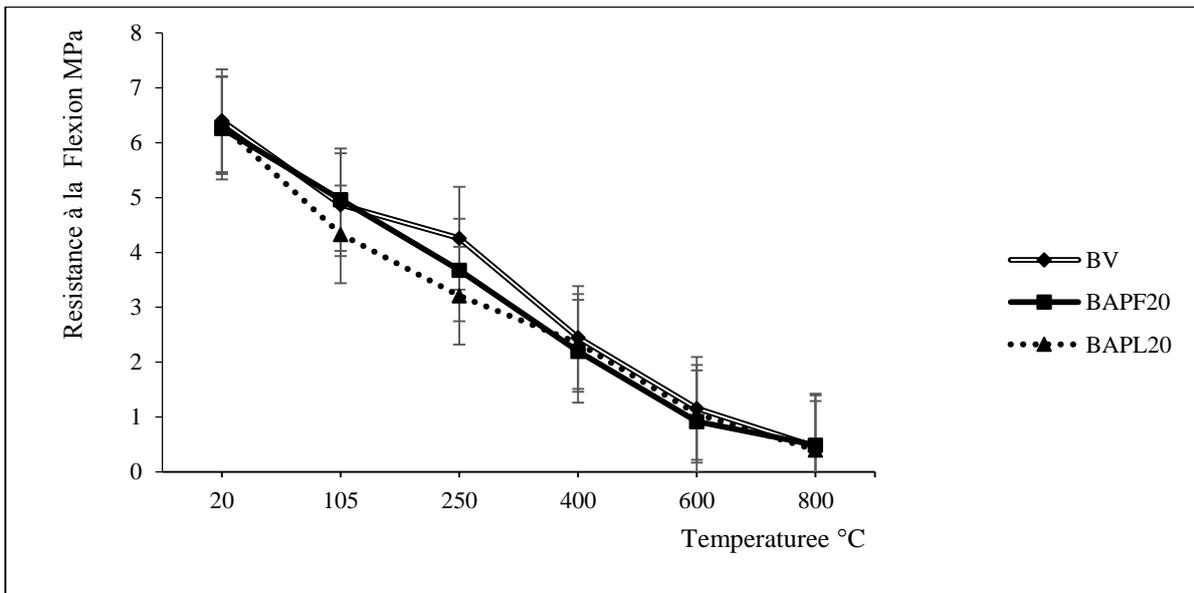


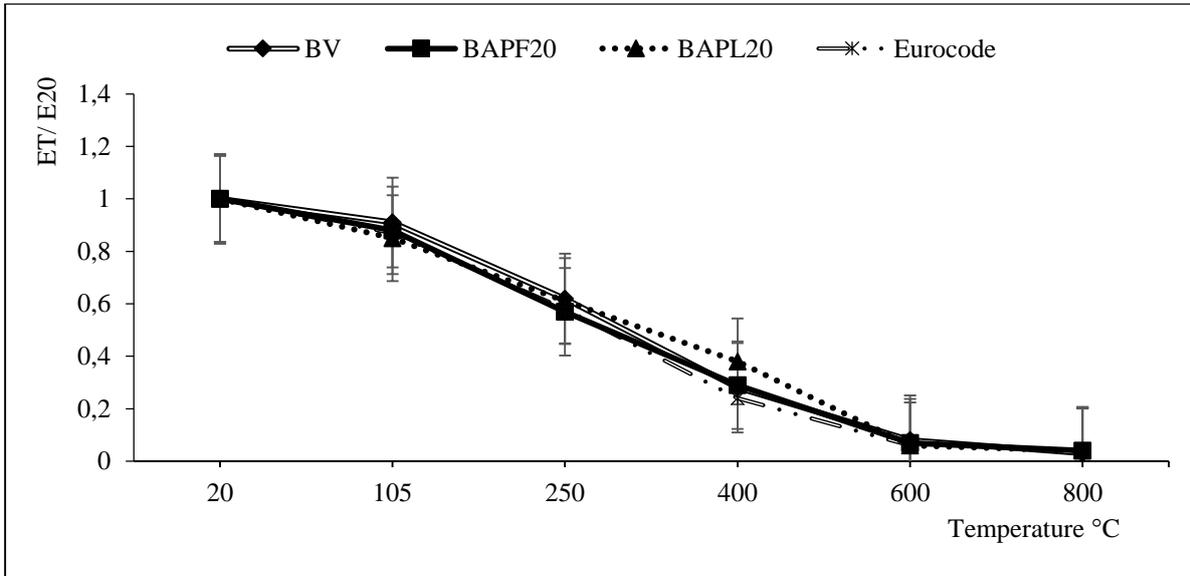
Figure V.2.b. Résistance de Flexion résiduelle

### V.I.2.1.3. Module d'élasticité dynamique

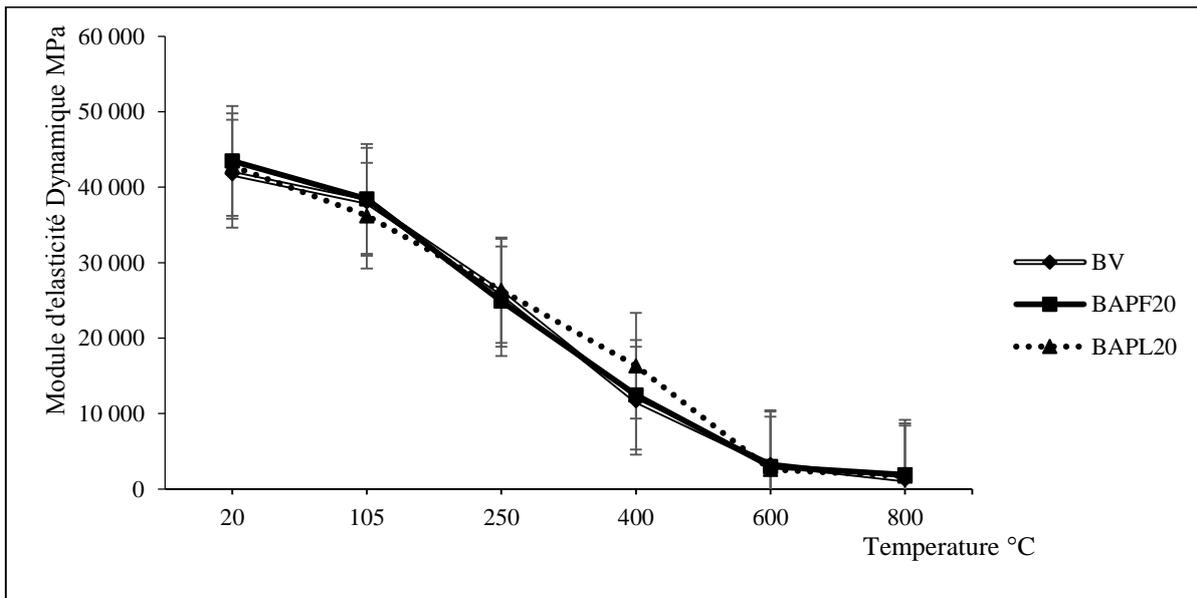
Les figures (V.3.a) et (V.3.b) montrent la variation du module d'élasticité dynamique de chaque mélange par rapport à la température de chauffage. Le module dynamique d'élasticité des bétons étudiés diminue continuellement quel que soit le type d'addition, à mesure que la température de chauffage augmente. L'évolution du module résiduel d'élasticité est pratiquement la même pour tous les groupes de bétons.

**Tableau 33.** Module d'élasticité dynamique en fonction de la température

Composition	Eprouvettes	Température					
		20°C	105°C	250°C	400°C	600°C	800°C
<b>BV</b>	N° 1 (MPa)	42 082	37 751	25 885	11 983	3 136	1 874
	N° 2 (MPa)	42 736	38 390	26 132	11 390	3 309	1 575
	N° 3 (MPa)	40 574	38 102	26 046	11 757	3 371	1 923
	<b>Moyenne (MPa)</b>	<b>41 797</b>	<b>38 081</b>	<b>26 021</b>	<b>11 710</b>	<b>3 272</b>	<b>1 724</b>
	<b>Et/ Et<sub>20°C</sub></b>	<b>1</b>	<b>0,91</b>	<b>0,62</b>	<b>0,28</b>	<b>0,08</b>	<b>0,04</b>
	<hr/>						
<b>BAP<sub>F20</sub></b>	N° 1 (MPa)	44 661	38 557	24 627	12 100	2 925	1 977
	N° 2 (MPa)	43 027	38 122	25 088	12 874	3 012	1 869
	N° 3 (MPa)	42 571	38 686	24 967	12 502	3 081	1 869
	<b>Moyenne (MPa)</b>	<b>43 480</b>	<b>38 455</b>	<b>24 894</b>	<b>12 492</b>	<b>3 006</b>	<b>1 905</b>
	<b>Et/ Et<sub>20°C</sub></b>	<b>1</b>	<b>0,88</b>	<b>0,57</b>	<b>0,29</b>	<b>0,07</b>	<b>0,07</b>
	<hr/>						
<b>BAP<sub>L20</sub></b>	N° 1 (MPa)	42 280	35 435	26 344	16 156	2 941	1 770
	N° 2 (MPa)	43 454	36848	26 349	16 417	2 477	1 575
	N° 3 (MPa)	42 678	36 398	26 345	16 453	2 410	1 827
	<b>Moyenne (MPa)</b>	<b>42 804</b>	<b>36 227</b>	<b>26 346</b>	<b>16 342</b>	<b>2 609</b>	<b>1 724</b>
	<b>Et/ Et<sub>20°C</sub></b>	<b>1</b>	<b>0,85</b>	<b>0,61</b>	<b>0,38</b>	<b>0,06</b>	<b>0,04</b>



**Figure V.3.b.** Le module d'élasticité dynamique relatif par rapport à la température de chauffage



**Figure V.3.b.** Le module d'élasticité dynamique par rapport à la température de chauffage

Plusieurs études sur l'évolution du module d'élasticité ont été menées [99, 100, 57, 94] et tous ont conclu que le module d'élasticité décroît avec l'augmentation de la température. Hager-Gaweska [57] montre dans ses travaux que le rapport E/C n'influence pas sur l'évolution du module d'élasticité.

Il faut noter qu'entre 20°C et 250°C correspond à une diminution régulière du module d'élasticité. A ce stade, tous les BAP ont montré une perte du module d'élasticité supérieur à

50% du module initial d'élasticité, ce qui s'explique par l'apparition de fissures velues (microfissures) dans les spécimens. Phan [95] a constaté lors de ses travaux une perte de module de l'ordre de 70% au-delà de 300°C pour tous les bétons, et Kanema [94] a trouvé une baisse de plus de 95% pour les BHP et 85% pour les autres bétons. Au-delà de 250°C, ce qui correspond à un petit module d'élasticité (82% à 400°C), un grand nombre de fissures ont été observées, ce qui a endommagé davantage les spécimens et le module d'élasticité dynamique. Comme rapporté par de nombreux auteurs, y compris [36, 101&102] une perte de module d'élasticité d'environ 70% -95% a été notée à 300°C. Entre 400°C et 600°C, les bétons ne possèdent plus de raideur et donc le module d'élasticité peut être considéré comme négligeable

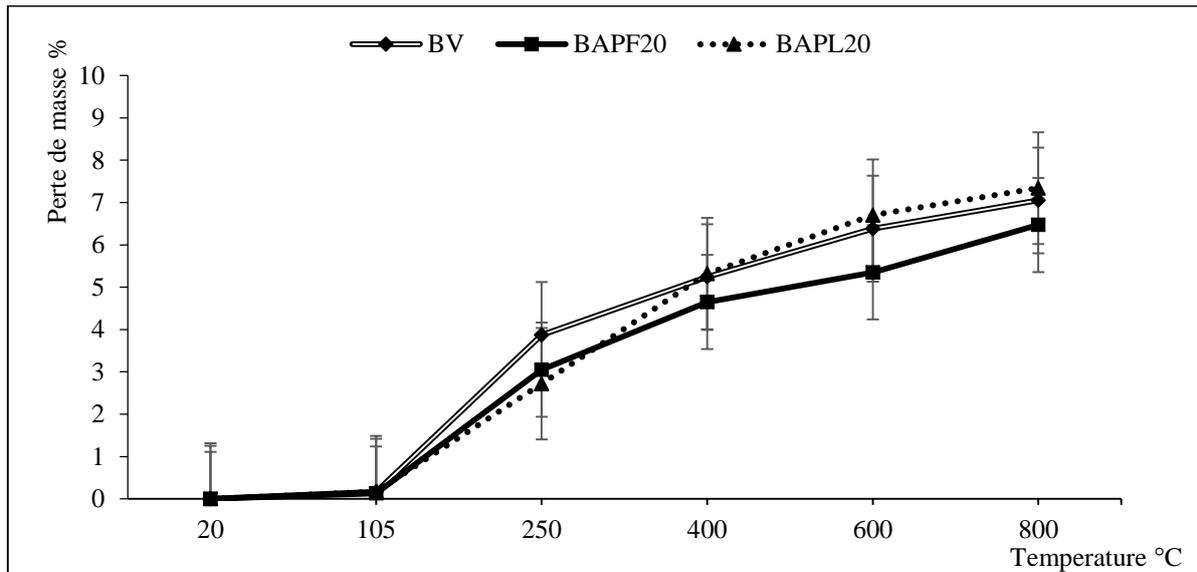
### V.I.2.2. Résultat des essais physique

#### V.I.2.2.1. Essai de perte de masse

**Tableau 34.** Perte de masse en fonction de la température

Composition	Eprouvettes	Température					
		20°C	105°C	250°C	400°C	600°C	800°C
<b>BV</b>	N° 1 %	0	0,13	3,84	4,92	6,46	6,96
	N° 2 %	0	0,19	3,45	5,50	6,31	7,09
	N° 3 %	0	0,19	4,32	5,30	6,37	7,10
	<b>Moyenne%</b>	<b>0</b>	<b>0,17</b>	<b>3,87</b>	<b>5,24</b>	<b>6,38</b>	<b>7,05</b>
<b>BAP<sub>F20</sub></b>	N° 1 %	0	0,19	2,99	4,63	5,54	6,46
	N° 2 %	0	0,13	2,60	4,66	5,40	6,44
	N° 3 %	0	0,06	3,57	4,66	5,11	6,49
	<b>Moyenne %</b>	<b>0</b>	<b>0,13</b>	<b>3,05</b>	<b>4,65</b>	<b>5,35</b>	<b>6,47</b>
<b>BAP<sub>L20</sub></b>	N° 1 %	0	0,14	2,56	5,29	6,75	7,22
	N° 2 %	0	0,19	2,38	5,37	6,66	7,60
	N° 3 %	0	0,18	3,22	5,30	6,69	7,20
	<b>Moyenne %</b>	<b>0</b>	<b>0,17</b>	<b>2,72</b>	<b>5,32</b>	<b>6,7</b>	<b>7,34</b>

La figure V.4 montre la perte de masse en fonction de la température de chauffage. La tendance générale de ce graphe est presque la même pour les trois groupes de béton. Entre 20°C et 250°C, la variation de masse est faible. Cette perte de masse représente le départ de l'eau libre contenue dans les pores capillaires. Entre 250°C et 400°C, on peut observer une augmentation de la perte de masse correspondant à 4% de la masse initiale pour tous les bétons sauf pour le BAP<sub>F20</sub> où la perte de masse était moins importante que les deux autres échantillons. Plus de 70% de l'eau contenue dans les bétons a été évaporée à 400°C.



**Figure V.4.** La perte de masse en fonction de la température

La courbe de perte de masse pour les deux bétons est donc très similaire, sauf BAP<sub>F20</sub>, qui contenait de la chaux. Les résultats actuels concordent avec les données publiées [36, 103 et 104]. On peut noter qu'une augmentation de la perte de masse pour tous leurs bétons entre 250 et 400°C est d'environ 2%.

#### V.I.2.2.2. Essai de porosité et densité

##### V.I.2.2.2.1. Essai de porosité

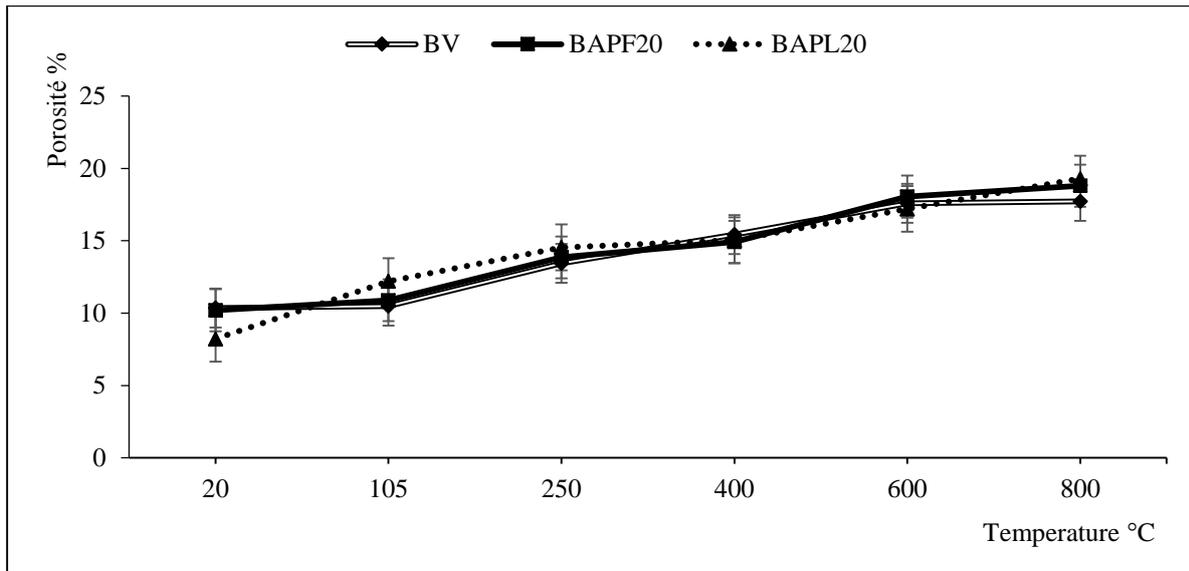
La porosité totale de chaque mélange par rapport à la température est représentée sur la figure V.5. Comme prévu, à 20°C, le BAP<sub>F20</sub> a une porosité plus faible que le BAP<sub>L20</sub>, Cela est dû à la teneur en cendres volantes élevée dans CEM 42,5 R, combiné avec la chaux résultant de l'hydratation des composants actifs du ciment Portland, les pores sont remplis et les espaces capillaires fermés par les composés formés. Au-delà de 105°C, pour tous les mélanges, on observe une légère augmentation de la porosité à mesure que la température

augmente. Cette augmentation était uniforme et plutôt monotone. A 250°C, plusieurs fissures ont été observées sur tous les spécimens. Ceci est lié aux changements de microstructure comme rapporté par différents auteurs [63, 105-107].

**Tableau 35.** La porosité des BAP en fonction de la température

Composition	Eprouvettes	Température					
		20°C	105°C	250°C	400°C	600°C	800°C
<b>BV</b>	N° 1	10,48	10,70	13,78	15,13	17,65	17,77
	N° 2	10,24	10,40	14,05	15,77	17,83	17,65
	<b>Moyenne</b>	<b>10,36</b>	<b>10,57</b>	<b>13,45</b>	<b>15,42</b>	<b>17,59</b>	<b>17,71</b>
<b>BAP<sub>F20</sub></b>	N° 1	10,39	10,94	15,46	14,91	18,12	19,05
	N° 2	10,05	10,84	12,43	14,91	18,04	18,53
	<b>Moyenne</b>	<b>10,2</b>	<b>10,89</b>	<b>13,85</b>	<b>14,92</b>	<b>18,05</b>	<b>18,8</b>
<b>BAP<sub>L20</sub></b>	N° 1	8,53	13,1	14,37	14,63	17,16	19,15
	N° 2	7,93	10,96	14,8	15,25	17,25	19,4
	<b>Moyenne</b>	<b>8,22</b>	<b>12,2</b>	<b>14,54</b>	<b>15,03</b>	<b>17,2</b>	<b>19,29</b>

Selon [noumowe et Khoury], l'augmentation de la porosité avec la température est causée par le départ de l'eau liée et le micro craquage généré par l'expansion différentielle entre la pâte et les agrégats. Certains auteurs [Khoury] ont étudié la porosimétrie par intrusion de mercure une augmentation de la taille des pores au-delà de 120°C et Gallé et al attribuent l'évolution de la porosité à la génération de pores capillaires importants, due à la libération d'eau adsorbée des pores capillaires et l'eau liée dans la pâte de ciment hydrates.



**Figure V.5.** La porosité totale de chaque mélange par rapport à la température

Les résultats expérimentaux actuels sont en ligne avec les données publiées. En comparant l'évolution de la résistance à la compression avec la porosité entre 250°C et 400°C, on a observé une augmentation de la résistance à la compression de 32% pour le BAPL<sub>20</sub> et une augmentation de la porosité de 2% pour les BAPF<sub>20</sub>. Selon de nombreux auteurs [60, 106 & 107], cela est dû à une modification des propriétés de délimitation des hydrates de la pâte de ciment en fonction de la charge contenue dans le mélange.

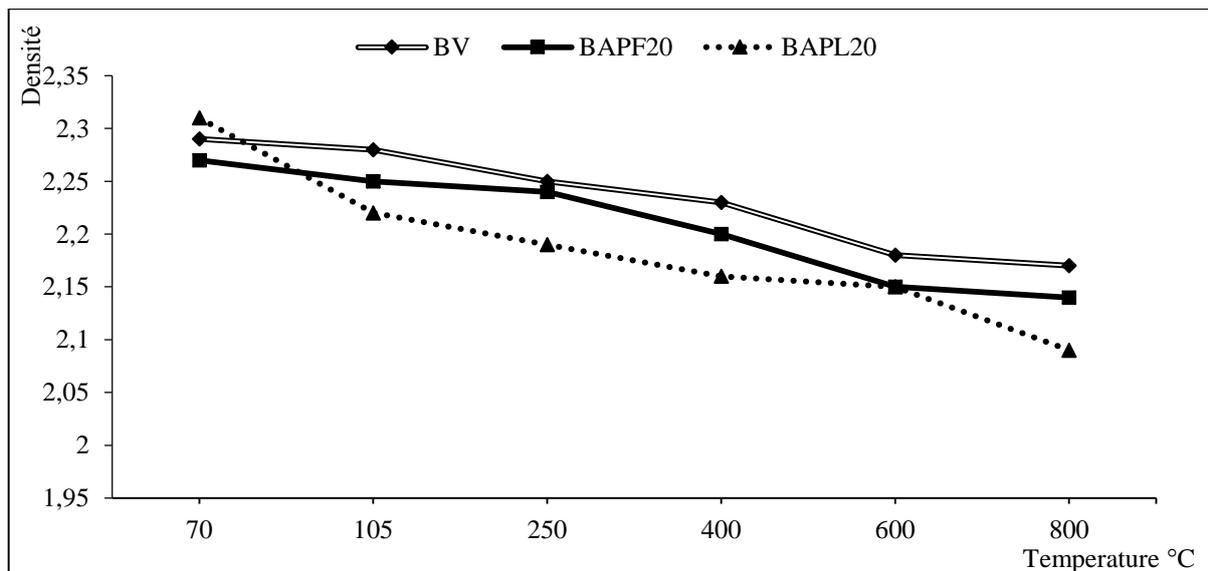
Ye et al. [108] attribuent l'augmentation de la porosité à la décomposition des C-S-H et de la portlandite. Leur transformation entraîne la destruction des hydrates et crée une porosité additionnelle par le biais de l'altération du réseau poreux. [36]

#### V.I.2.2.2.2. Essai de densité

L'évolution de la densité apparente en fonction de la température est illustrée à la figure V.6. Pour tous les mélanges, on a observé une légère diminution de la densité apparente entre 105°C et 800°C. La diminution globale était d'environ 5% pour BAPF<sub>20</sub> tandis que BAPL<sub>20</sub> avec une résistance plus élevée, la densité a diminué d'environ 10%. Comme il a été rapporté par de nombreux auteurs, y compris [57, 66, 109], la réduction de la densité est due au départ de l'eau pendant le chauffage ou la dilatation thermique du béton. Selon Bazant [66], la diminution est associée à l'expansion thermique du béton, et plus particulièrement des granulats. L'évolution de la densité est corrélée à celle de la porosité car les deux phénomènes sont liés [36].

**Tableau 36.** La densité des BAP en fonction de la température

Composition	Eprouvettes	Température					
		70°C	105°C	250°C	400°C	600°C	800°C
<b>BV</b>	N° 1	2,29	2,28	2,25	2,24	2,18	2,17
	N° 2	2,29	2,30	2,25	2,22	2,18	2,17
	<b>Moyenne</b>	<b>2,29</b>	<b>2,28</b>	<b>2,25</b>	<b>2,23</b>	<b>2,18</b>	<b>2,17</b>
<b>BAP<sub>F20</sub></b>	N° 1	2,27	2,25	2,24	2,20	2,15	2,13
	N° 2	2,27	2,25	2,24	2,20	2,16	2,15
	<b>Moyenne</b>	<b>2,27</b>	<b>2,25</b>	<b>2,24</b>	<b>2,2</b>	<b>2,15</b>	<b>2,14</b>
<b>BAP<sub>L20</sub></b>	N° 1	2,30	2,23	2,20	2,16	2,15	2,10
	N° 2	2,31	2,21	2,20	2,17	2,16	2,09
	<b>Moyenne</b>	<b>2,31</b>	<b>2,22</b>	<b>2,19</b>	<b>2,16</b>	<b>2,15</b>	<b>2,09</b>



**Figure V.6.** L'évolution de la densité apparente en fonction de la température

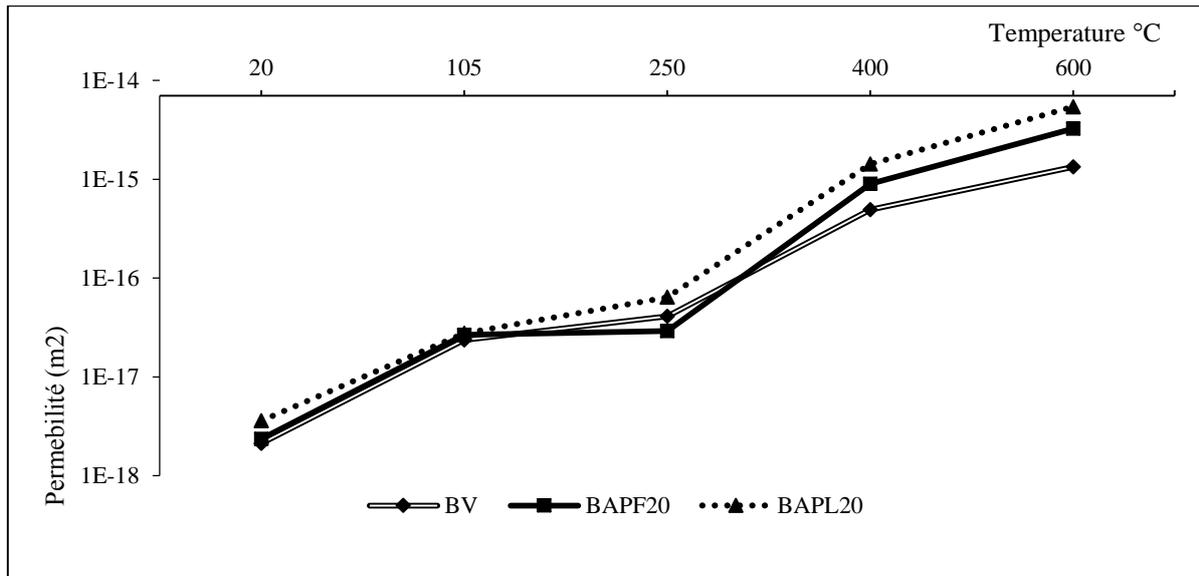
**V.I.2.3. Essai de perméabilité**

**V.I.2.3.1. Perméabilité au gaz**

L'évolution de la perméabilité résiduelle intrinsèque par rapport à la température est présentée dans la figure.V.7. Pour tous les bétons, la perméabilité augmente de façon monotone entre 20 et 250°C. Au-delà de cette température, l'augmentation peut être considérée comme exponentielle et la perméabilité était très élevée. Les échantillons présentaient un réseau dense de fissures ouvertes. Ainsi, les valeurs obtenues à 600 et 800°C peuvent comporter une grande erreur.

**Tableau 37.** La perméabilité au gaz en fonction de la température

Composition	Eprouvettes	Température				
		20°C	105°C	250°C	400°C	600°C
<b>BV</b>	N° 1	2,47 E-17	2,55 E-17	0,30 E-16	3,46 E-16	
	N° 2	1,99 E-17	2,91 E-17	0,43 E-16	3,21 E-16	
	N° 3	2,20 E-17	<del>0,87 E-17</del>	0,48 E-16	<del>0,8 E-15</del>	
	<b>Moyenne</b>	<b>2,22 E-17</b>	<b>2,73 E-17</b>	<b>0,40 E-16</b>	<b>3,33 E-16</b>	<b>1,33 E-15</b>
<b>BAP<sub>F20</sub></b>	N° 1	2,44 E-17	<del>0,18 E-16</del>	0,22 E-16	0,91 E-15	
	N° 2	2,01 E-17	2,77 E-17	0,25 E-16	0,88 E-15	
	N° 3	2,81 E-17	2,59 E-17	erreur	0,91 E-15	
	<b>Moyenne</b>	<b>2,42E-17</b>	<b>2,68 E-17</b>	<b>0,23 E-16</b>	<b>0,9 E-15</b>	<b>3,25 E-15</b>
<b>BAP<sub>L20</sub></b>	N° 1	0,33 E-17	2,47 E-17	0,64 E-16	1,32 E-15	
	N° 2	0,34 E-17	3,07 E-17	0,58 E-16	1,03 E-15	
	N° 3	0,36 E-17	2,77 E-17	0,70 E-16	1,91 E-15	
	<b>Moyenne</b>	<b>0,34 E-17</b>	<b>2,76 E-17</b>	<b>6,40 E-17</b>	<b>1,42 E-15</b>	<b>5,41 E-15</b>



**Figure V.7.** L'évolution de la perméabilité résiduelle intrinsèque par rapport à la température

Entre 20 et 105°C, pour tous les bétons, la perméabilité à l'air a fortement augmenté avec un facteur moyen de 10 pour tous les spécimens. Entre 105 et 250°C, la variation était presque constante pour BAP<sub>F20</sub> et a augmentée avec un facteur de 1,5 pour BV et de 12 pour BAP<sub>L20</sub>. Entre 250 et 400°C, la variation était plutôt complexe. Au-delà de 250°C et jusqu'à 400°C, il y avait une forte augmentation de la perméabilité à l'air, après une petite variation de la perméabilité entre 105 et 250°C, exactement le même comportement que dans la résistance à la compression. Il y a donc des similitudes entre la perméabilité à l'air et la résistance à la compression. Comme cela a été rapporté par de nombreux auteurs, y compris [71&110], à ces températures, la création de pores modifie la connectivité du réseau poreux avec l'expansion des pores capillaires et conduit à l'évolution de la perméabilité. Ces phénomènes contribuent à l'augmentation de la taille des pores capillaires et à la formation de fissures fines. Par conséquent, la connectivité des pores et des microfissures sont les principaux facteurs qui déterminent la perméabilité du béton soumis à des températures élevées. Au-delà de 400°C, les microfissures deviennent le principal facteur influençant la perméabilité.

#### V.I.2.3.2. Essais de pénétration de l'eau

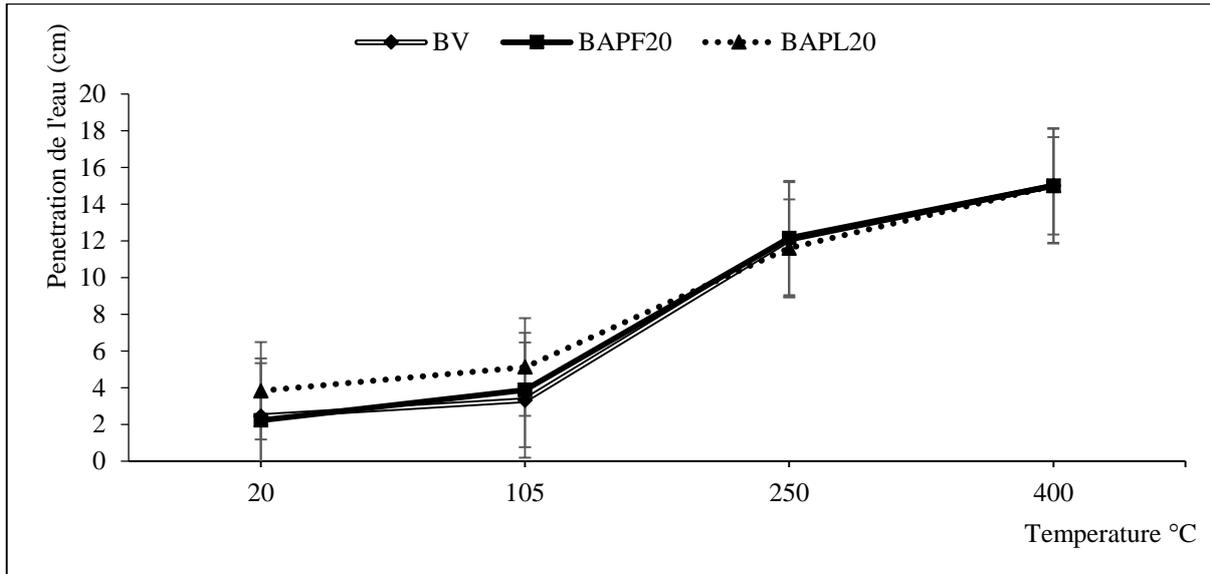
La figure V.8 montre la pénétration de l'eau en fonction de la température. Après 72 heures de test, tous les spécimens ont été coupés en deux, par scission. Comme on peut le voir sur cette figure que la pénétration de l'eau dans le béton entre 20°C et 105°C est assez stable. Au-delà de cette température, une augmentation monotone de la pénétration de l'eau entre 105°C et 400°C, quel que soit le mélange. Passé les 400°C, les spécimens ont éclatés sous la

pression de l'eau à cause des macros fissures et de l'augmentation de la porosité ainsi que la dégradation des spécimens

**Tableau 38.** La pénétration de l'eau en fonction de la température

Composition	Eprouvettes	Température					
		20°C	105°C	250°C	400°C	600°C	800°C
<b>BV</b>	N° 1	2,25	2,95	11,65	15	Ecl	Ecl
	N° 2	2,50	3,15	11,75	15	Ecl	Ecl
	N° 3	2,65	3,75	12,80	15	Ecl	Ecl
	<b>Moyenne</b>	<b>2,46</b>	<b>3,28</b>	<b>12,06</b>	<b>15</b>	<b>Ecl</b>	<b>Ecl</b>
<b>BAP<sub>F20</sub></b>	N° 1	2	3,5	12,10	15	Ecl	Ecl
	N° 2	2,5	4,25	12,10	15	Ecl	Ecl
	N° 3	2,2	3,9	12,25	15	Ecl	Ecl
	<b>Moyenne</b>	<b>2,23</b>	<b>3,88</b>	<b>12,15</b>	<b>15</b>	<b>Ecl</b>	<b>Ecl</b>
<b>BAP<sub>L20</sub></b>	N° 1	3,75	5	11,75	15	Ecl	Ecl
	N° 2	4,25	5,5	11,45	15	Ecl	Ecl
	N° 3	3,5	6	11,6	15	Ecl	Ecl
	<b>Moyenne</b>	<b>3,83</b>	<b>5,13</b>	<b>11,6</b>	<b>15</b>	<b>Ecl</b>	<b>Ecl</b>

*Ecl : Eclatement*

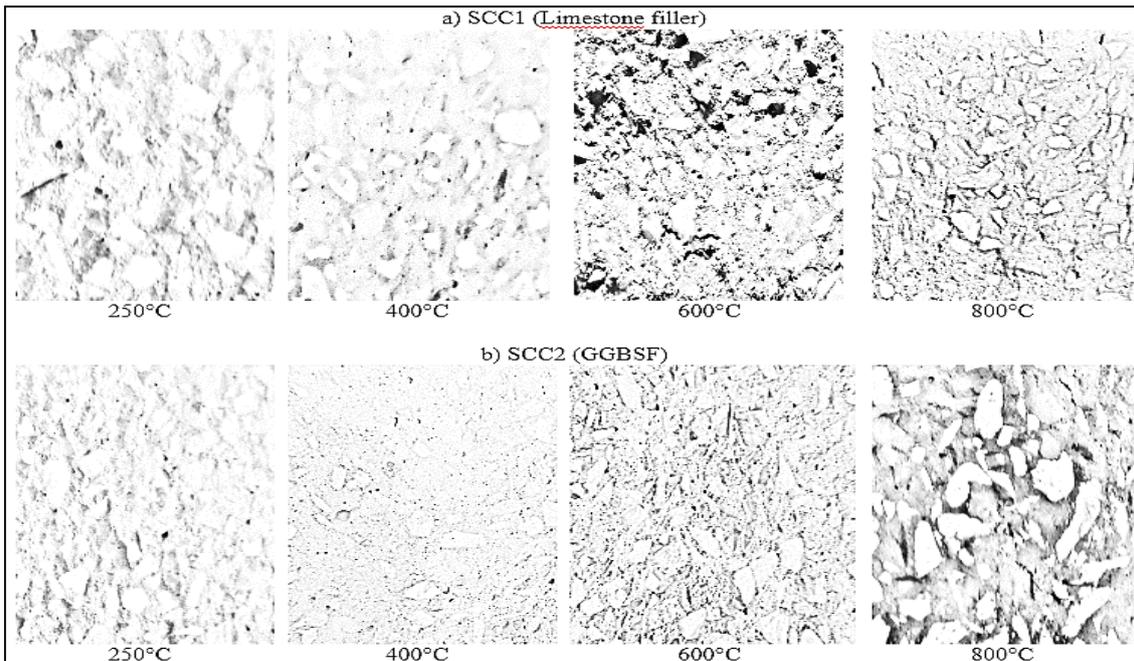


**Figure V.8.** La pénétration de l'eau en fonction de la température

#### V.I.2.4. Observation de la structure

##### V.I.2.4.1. Analyse des images

Nous avons observé que la porosité augmente avec l'augmentation de la température. Cela est dû à la détérioration de la pâte de ciment avec le départ de l'eau liée. A basse température, la porosité est plus faible et les pores sont plus irréguliers que ceux observés au-delà de 400°C comme on peut le voir à la figure V.9. La taille des pores augmente également avec l'augmentation de la température et les fissures commencent à apparaître clairement vers la température de 600°C. A 800°C, les fissures sont plus nettes et plus grandes du fait des granulats et du comportement de la pâte de ciment à haute température. Liu et al. [106-107] ont observé que la taille et la forme des pores sont fortement influencées par la température. Ils rapportent que jusqu'à 500°C, les principaux changements physicochimiques sont la perte d'eau et la décomposition de l'hydroxyde de calcium. Ces transformations induisent l'effondrement de la structure du gel et créent une porosité supplémentaire par l'altération du milieu poreux.



**Figure V.9.** Evolution de la structure du béton en fonction de la température

### V.I.3. Conclusion

Les effets du type d'additions sur les matériaux physiques et mécaniques du béton autoplaçant à haute température ont été analysés et étudié sur trois groupes de bétons. Les propriétés mécaniques et physiques résiduelles ont été déterminées après différents cycles de chauffage jusqu'à 105, 250, 400, 600 et 800°C. La vitesse de chauffage de 1°C / min était conforme aux recommandations de RILEM [83] et la durée de séjour était d'une heure, sauf pour 600°C et 800°C, où deux heures étaient nécessaires. Les conclusions suivantes peuvent être tirées des résultats expérimentaux :

- Les propriétés mécaniques (résistance à la compression, résistance à la traction - flexion, module d'élasticité dynamique) des bétons testés ont généralement diminué avec l'augmentation de la température.
- L'addition du laitier granulé aux BAP<sub>L20</sub> a eu peu d'effet sur la résistance à la compression résiduelle relative ainsi que sur la perte de masse, par rapport à la charge de calcaire contenue dans le BAP<sub>F20</sub>. En fait, l'ajout du laitier granulé a accéléré la réduction de la résistance à la flexion entre 105°C et 250°C. Cependant, étant donné la dispersion des résultats, on ne peut pas conclure que l'évolution de la résistance à la flexion résiduelle avec la température est la même pour tous les bétons étudiés.

- Entre la température ambiante et 250°C, une petite perte de résistance a été observée. Cette perte de résistance correspond à l'évaporation de l'eau libre contenue dans les pores capillaires et elle est associée à une augmentation de la porosité totale pour tous les bétons testés. Cette augmentation de la porosité peut être expliquée par une dilatation des diamètres des pores, d'où une augmentation de la perméabilité.
- Entre 250 et 400°C, on a observé une augmentation importante de la résistance à la compression pour les BAP, tandis que les autres propriétés mécaniques ont diminué à mesure que la température augmentait. L'augmentation de la résistance à la compression du BAP est due à une modification des propriétés de collage de la pâte de ciment.
- Au-delà de 400°C, les propriétés mécaniques et physiques de tous les groupes de béton ont fortement diminué. A une température de chauffage de 600°C tous les spécimens ont montré quelques microfissures, mais il n'y avait pas d'écaillage. Une augmentation de la perméabilité et de la porosité de tous les bétons testés a été observée, ce qui pourrait être expliqué comme une modification du réseau poreux.

***Partie II : Influence du taux d'addition sur le  
comportement physico-mécanique à haute température  
des bétons autoplaçants***

### **V.II.1. Introduction**

Dans cette deuxième partie de ce chapitre nous présenterons les résultats des essais effectués sur les BAP<sub>SA</sub>, BAP<sub>L20</sub> et BAP<sub>L30</sub> avant et après traitement thermique, ainsi que l'analyse de ces résultats.

Comme pour la première partie, 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.II.2. Résultats Et Analyses**

Les mêmes paramètres étudiés dans la première partie ont été étudié pour cette partie afin de voir l'influence du taux d'addition sur le comportement des BAP à haute température. Plusieurs recherches ont déjà été faites sur ce sujet avec différentes addition. Dans notre étude nous avons choisi le laitier granulé comme addition. Le laitier granulé se compose essentiellement de pouzzolane, elle entraîne une augmentation de la compression du béton. Il se révèle être une bonne alternative pour remplacer le ciment à 50-60% [111]. Jiang et al. [112] ont présenté une augmentation de la résistance à la flexion et de la compression à l'augmentation de la surface spécifique du laitier granulé.

#### **V.II.2.1. Résultat des essais mécaniques**

La résistance à la compression, la résistance à la flexion, le module d'élasticité dynamique et la perte de masse ont été étudiées en fonction de la température de surface des éprouvettes chauffées et présentées dans les figures : *V-10*, *V-11*, *V-12* et *V-13* respectivement. Le tableau 39 montre les propriétés des bétons à l'état frais ainsi que certaines propriétés mécaniques initiales obtenues sur des échantillons non chauffés. Pour tous les groupes de bétons, aucun éclatement n'a été observé. Les propriétés résiduelles, mesurées après les cycles de chauffage et de refroidissement, ont été comparées aux propriétés initiales

**Tableau 39.** Les propriétés des bétons

Ingrédients	Quantité (kg/m <sup>3</sup> )		
	BAP <sub>SA</sub>	BAP <sub>L20</sub>	BAP <sub>L30</sub>
Eau	200	200	200
Ciment	400	400	400
Laitier Granulé	0	80	120
Gravier 5/15	865	865	865
Sable	765	765	765
Superplastifiant	6.8	6.8	6.8
E/C	0.50	0.50	0.50
Cône d'Abrams	72	70	71
Boite en L	0.82	0.84	0.83
Essai de tamis (%)	13.83	9.27	7.91
Résistance à la 7Jours	18.75	19.39	24.47
Compression (MPa) à 28 Jours	27.66	34.57	38.56
température ambiante 90 Jours	33.71	41.73	47.58

**V.II.2.1.1. Essai de compression**

Les figures (V.10.a) et (V.10.b) représentent la variation de la résistance résiduelle à la compression par rapport à la température. On remarque que les courbes des trois bétons ont la même tendance et présente donc un comportement similaire.

**Tableau 40.** Résistance à la compression en fonction de la température

Composition	Eprouvettes	Température					
		20°C	105°C	250°C	400°C	600°C	800°C
BAP <sub>SA</sub>	N° 1 (MPa)	31,70	34,12	30,36	30,86	19,35	11,84
	N° 2 (MPa)	32,61	31,58	31,71	35,65	19,60	12,02
	N° 3 (MPa)	36,82	30,36	28,04	36,63	20,72	12,53
	Moyenne (MPa)	<b>33,71</b>	<b>32,02</b>	<b>30,34</b>	<b>34,38</b>	<b>19,89</b>	<b>12,13</b>
	Fct/ Fc20°C	<b>1</b>	<b>0,95</b>	<b>0,90</b>	<b>1,02</b>	<b>0,59</b>	<b>0,36</b>

<b>BAP<sub>L20</sub></b>	N° 1 (MPa)	43,04	41,59	32,17	40,07	27,32	16,87
	N° 2 (MPa)	43,00	33,15	26,98	43,95	26,45	15,48
	N° 3 (MPa)	39,24	33,41	31,31	46,29	19,27	14,90
	<b>Moyenne (MPa)</b>	<b>41,73</b>	<b>36,05</b>	<b>30,15</b>	<b>43,43</b>	<b>24,35</b>	<b>15,75</b>
	<b>F<sub>cT</sub>/ F<sub>c20°C</sub></b>	<b>1</b>	<b>0,86</b>	<b>0,72</b>	<b>1,04</b>	<b>0,59</b>	<b>0,38</b>
<b>BAP<sub>L30</sub></b>	N° 1 (MPa)	45,88	37,78	34,52	41,82	30,36	12,66
	N° 2 (MPa)	51,68	40,45	30,26	42,37	29,64	13,34
	N° 3 (MPa)	45,2	37,65	28,58	47,85	27,83	15,82
	<b>Moyenne (MPa)</b>	<b>47,58</b>	<b>38,63</b>	<b>30,12</b>	<b>44,01</b>	<b>29,28</b>	<b>13,94</b>
	<b>F<sub>cT</sub>/ F<sub>c20°C</sub></b>	<b>1</b>	<b>0,81</b>	<b>0,63</b>	<b>0,93</b>	<b>0,61</b>	<b>0,30</b>

On analysant les graphes on remarque une légère diminution pour le BAP<sub>SA</sub> jusqu'à 250°C contrairement au BAP avec du laitier ou une forte baisse est à signalé, on remarque aussi que le pourcentage de cette baisse de résistance est plus importante pour le BAP<sub>L30</sub> (environ 40% à 250°C) comparé à celle du BAP<sub>L20</sub> (environ 30% à 250°C). Une augmentation de résistance pour tous les BAP entre 250°C et 400°C. Dépassé les 400°C une dégradation de la résistance est noté pour tous les BAP.

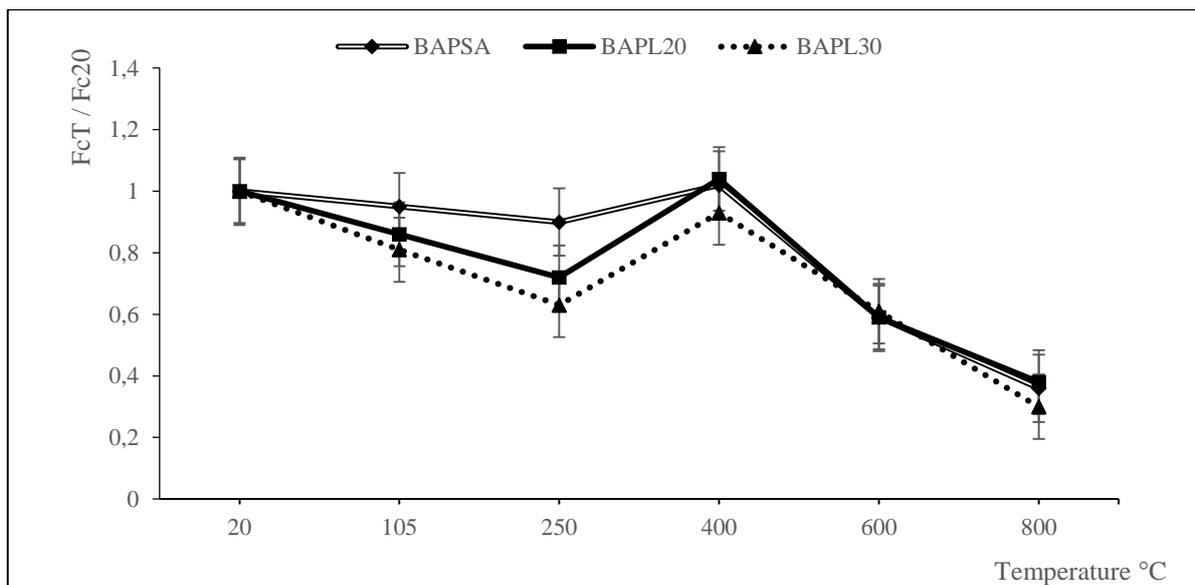
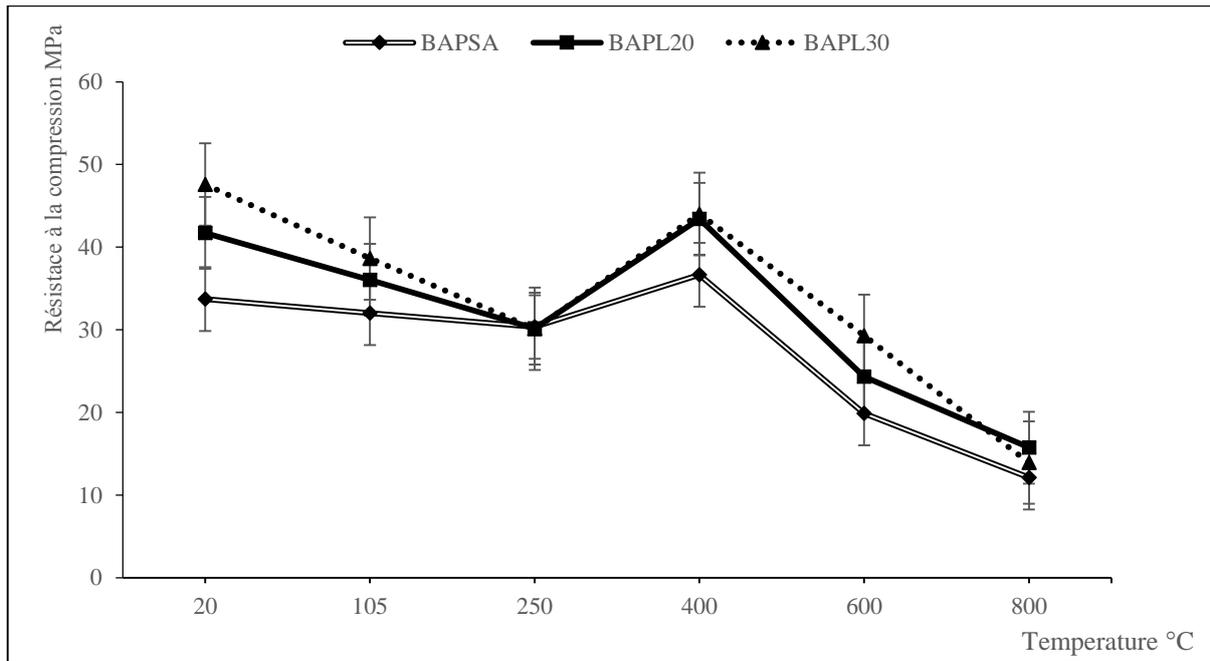


Figure V.10.a. Résistance de compression résiduelle relative



**Figure V.10.b.** Résistance de compression résiduelle

D'après Behnood [113], l'augmentation de la résistance à la compression est attribuée à l'augmentation des forces entre les particules de gel (forces Van der Waals) en raison de l'élimination de l'eau et la modification des propriétés de liaison des hydrates de la pâte de ciment. Dias et al. [96] ont attribué l'augmentation de la résistance à la compression entre 150 et 300 °C à une réhydratation de la pâte en raison de la migration de l'eau dans les pores.

Une forte perte de résistance a été observée dans la gamme de température de 400 à 600°C. La perte de résistance était comprise entre 30% et 55%. Cette perte rapide de la résistance à la compression pour les mélanges BAP a été attribuée aux microstructures denses dans ce type de béton, ce qui entraîne une accumulation de pression interne élevée pendant le chauffage.

En outre, plusieurs chercheurs ont signalé que cette perte de résistance est largement attribuée à la décomposition de l'hydroxyde de calcium, qui se connaît entre 450 et 500°C [114].

A des températures élevées, le lien entre l'agrégat et la pâte est affaibli parce que la pâte se contracte suite à une perte d'eau pendant l'expansion des agrégats. De plus, la transformation allotropique du quartz-a en quartz-b se produit avec une expansion [36].

Tous les BAP ont montré une forte détérioration entre 600 et 800 °C, et la perte moyenne était de 68% pour les bétons.

La perte de résistance à la compression des BAP avec addition est supérieure au BAPSA. Ces résultats sont attribués à la présence et à la quantité du laitier dans les mélanges ce qui a produit des zones de transition très denses entre les agrégats et la pâte en raison de leurs particules ultrafines comme charges et de leurs réactions pouzzolaniques.

Pendant l'expansion des agrégats et la contraction de la pâte, des concentrations de contraintes plus élevées sont produites dans la zone de transition, ce qui influence la liaison entre l'agrégat et la pâte avec le laitier. Ainsi, des pertes de résistance accrues ont eu lieu. En outre, la décomposition du gel CSH est une autre cause de la forte détérioration [115]

### V.II.2.1.2. Essai de Flexion

Les figures (V.II.a) et (V.II.b) représentent la variation de la résistance résiduelle à la flexion par rapport à la température. Tout comme pour les bétons déjà étudiés dans la première partie de ce chapitre, la tendance générale de la résistance résiduelle à la flexion est une diminution de la force résiduelle de flexion pour tous les bétons. L'évolution de la résistance résiduelle à la flexion avec la température est la même pour tous les bétons étudiés. De 20 à 400°C on remarque que contrairement à la résistance à la compression le BAP<sub>L30</sub> a une meilleure résistance à la flexion avec une perte de 50% de résistance à 400°C contre 63% pour les BAP<sub>L20</sub> et 60% pour le BAP<sub>SA</sub>. Au-delà des 400°C la dégradation de résistance est assez importante pour tous les types de béton.

Les fissures et la dégradation du béton produites à cause de l'incompatibilité thermique entre les agrégats et la pâte de ciment, conduisant ainsi à la perte de résistance à la traction pour les BAP, [36, 56 &100].

**Tableau 41.** Résistance à la flexion en fonction de la température

Composition	Eprouvettes	Température					
		20°C	105°C	250°C	400°C	600°C	800°C
BAP <sub>SA</sub>	N° 1 (MPa)	6,09	4,09	3,87	2,63	1,09	0,42
	N° 2 (MPa)	6,90	4,50	4,69	2,11	1,16	0,46
	N° 3 (MPa)	5,76	5,10	3,66	2,79	1,11	0,44

	<b>Moyenne (MPa)</b>	<b>6,25</b>	<b>4,56</b>	<b>3,75</b>	<b>2,51</b>	<b>1,12</b>	<b>0,44</b>
	<b>Ft<sub>t</sub>/ Ft<sub>20°C</sub></b>	<b>1</b>	<b>0,73</b>	<b>0,60</b>	<b>0,40</b>	<b>0,18</b>	<b>0,07</b>
<b>BAP<sub>L20</sub></b>	N° 1 (MPa)	6,52	4,36	3,31	2,75	0,92	0,42
	N° 2 (MPa)	6,66	4,28	3,15	1,93	1,2	0,36
	N° 3 (MPa)	5,78	4,35	3,17	2,37	1,09	0,42
	<b>Moyenne (MPa)</b>	<b>6,32</b>	<b>4,33</b>	<b>3,21</b>	<b>2,35</b>	<b>1,06</b>	<b>0,40</b>
	<b>Ft<sub>t</sub>/ Ft<sub>20°C</sub></b>	<b>1</b>	<b>0,68</b>	<b>0,51</b>	<b>0,37</b>	<b>0,17</b>	<b>0,06</b>
	<b>BAP<sub>L30</sub></b>	N° 1 (MPa)	7,13	4,94	4,26	3,54	1,12
N° 2 (MPa)		5,85	5,34	4,47	2,94	1,07	0,43
N° 3 (MPa)		6,82	5,59	4,38	3,32	1,30	0,35
<b>Moyenne (MPa)</b>		<b>6,6</b>	<b>5,29</b>	<b>4,37</b>	<b>3,27</b>	<b>1,17</b>	<b>0,37</b>
<b>Ft<sub>t</sub>/ Ft<sub>20°C</sub></b>		<b>1</b>	<b>0,80</b>	<b>0,66</b>	<b>0,49</b>	<b>0,18</b>	<b>0,06</b>

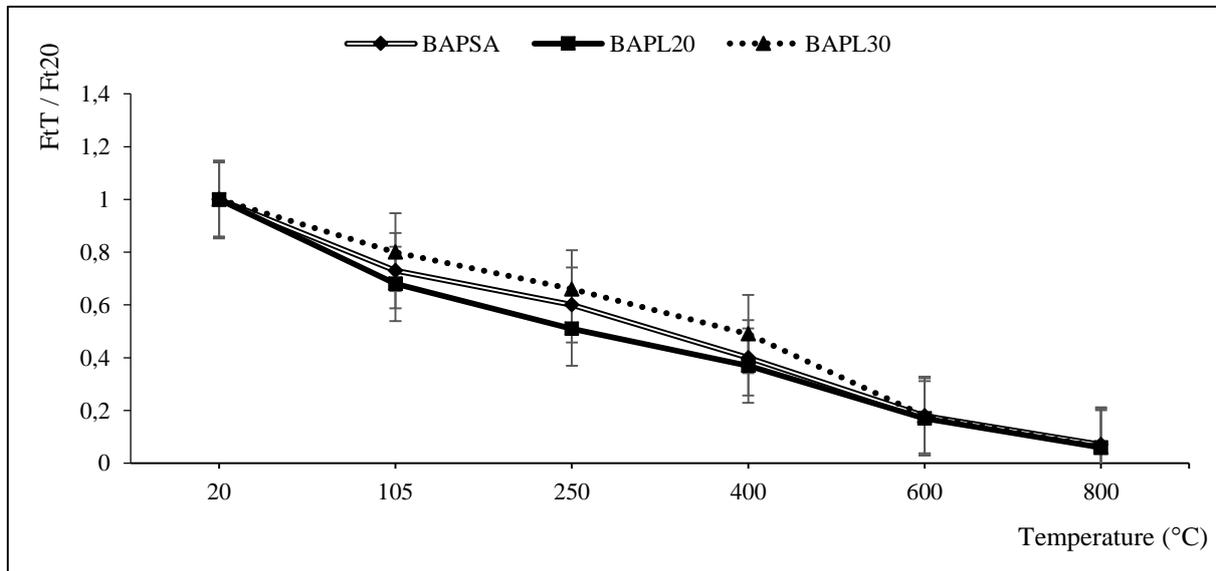


Figure V.11.a. Résistance de Flexion résiduelle relative

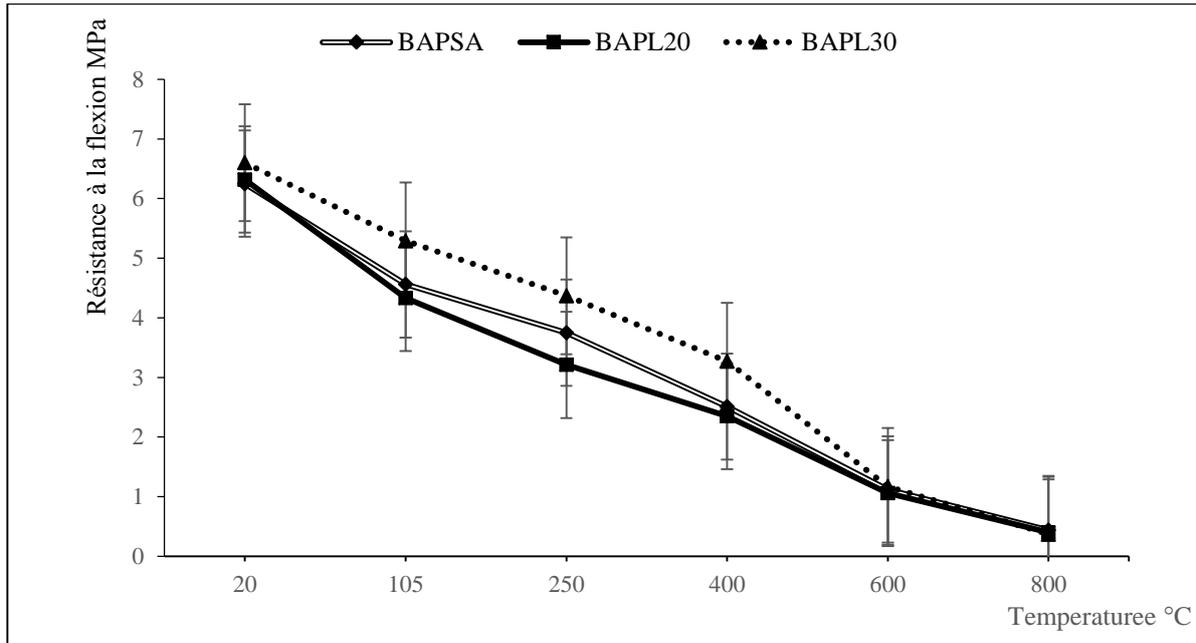


Figure V.11.b. Résistance de Flexion résiduelle

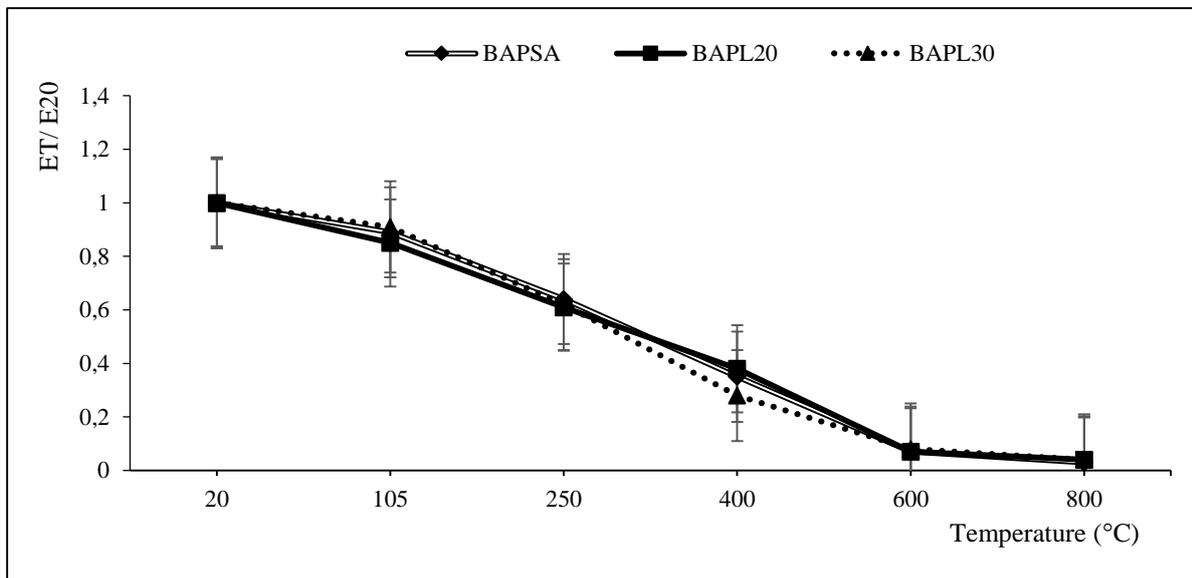
### V.II.2.1.3. Module d'élasticité dynamique

Comme nous l'avons déjà précisé dans la première partie de ce chapitre ; plusieurs chercheurs [57, 59, 94, 100] ont étudiés l'évolution du module d'élasticité. Ils ont trouvé que le module d'élasticité décroît avec l'augmentation de la température. Hager-Gaweska [57] montre dans ses travaux que le rapport E/C n'influence pas l'évolution du module d'élasticité. Comme le montre les figures (V.12.a) et (V.12.b), lorsque la température augmente le module d'élasticité dynamique diminue continuellement quel que soit le taux d'addition, et son évolution est pratiquement la même pour tous les groupes de bétons, contrairement aux résistances.

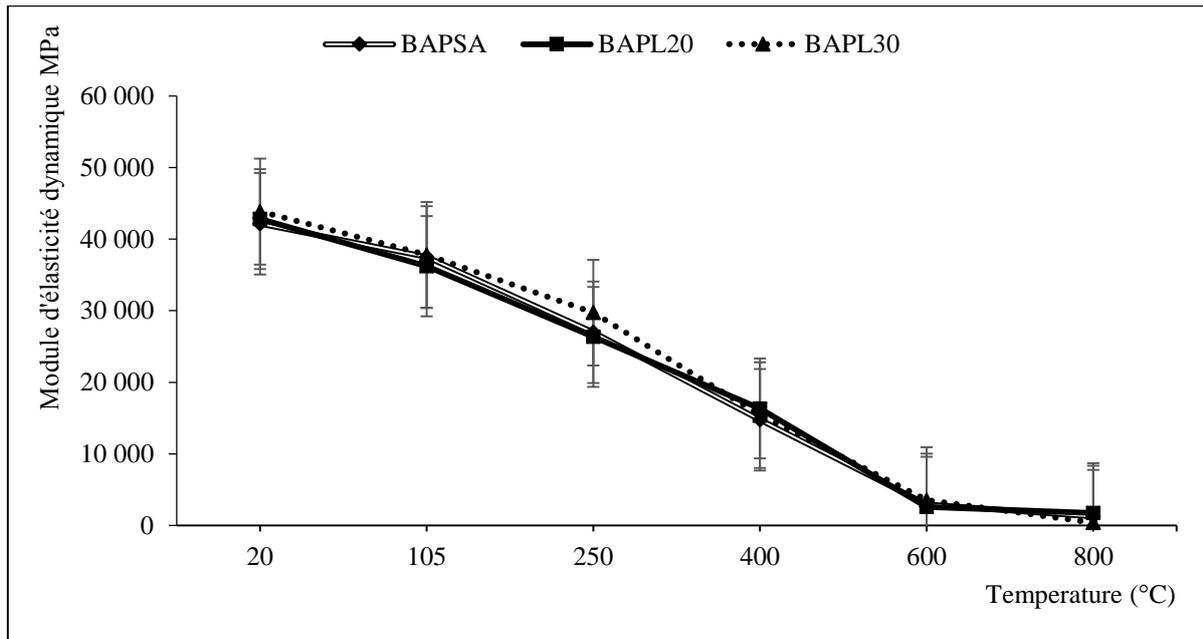
Tableau 42. Module d'élasticité dynamique en fonction de la température

Composition	Eprouvettes	Température					
		20°C	105°C	250°C	400°C	600°C	800°C
BAP <sub>SA</sub>	N° 1 (MPa)	42 282	38 154	27 421	14 958	2 977	1 388
	N° 2 (MPa)	42 356	37 387	26 962	14 670	3 329	1 240
	N° 3 (MPa)	41 863	37 046	26 978	11 646	2 550	1 167
	Moyenne(MPa)	42 167	37 529	26 987	14 758	2 952	1 265
	Et/ Et <sub>20°C</sub>	1	0,89	0,64	0,35	0,07	0,03

<b>BAP<sub>L20</sub></b>	N° 1 (MPa)	42 280	35 435	26 344	16 156	2 941	1 770
	N° 2 (MPa)	43 454	36 848	26 349	16 417	2 477	1 575
	N° 3 (MPa)	42 678	36 398	26 345	16 453	2 410	1 827
	<b>Moyenne (MPa)</b>	<b>42 804</b>	<b>36 227</b>	<b>26 346</b>	<b>16 342</b>	<b>2 609</b>	<b>1 724</b>
	<b>Et/ Et<sub>20°C</sub></b>	<b>1</b>	<b>0,85</b>	<b>0,61</b>	<b>0,38</b>	<b>0,06</b>	<b>0,04</b>
<b>BAP<sub>L30</sub></b>	N° 1 (MPa)	43 660	37 372	29890	15191	3 329	518
	N° 2 (MPa)	43 914	38 438	29673	15214	3 822	225
	N° 3 (MPa)	43 983	37538	29644	15806	3 437	438
	<b>Moyenne (MPa)</b>	<b>43852</b>	<b>37 783</b>	<b>29736</b>	<b>15404</b>	<b>3 529</b>	<b>394</b>
	<b>Et/ Et<sub>20°C</sub></b>	<b>1</b>	<b>0,91</b>	<b>0,62</b>	<b>0,28</b>	<b>0,08</b>	<b>0,04</b>



**Figure V.12.a** La variation du module d'élasticité dynamique relatif par rapport à la température de chauffage



**Figure V.12.b.** La variation du module d'élasticité dynamique par rapport à la température de chauffage

Dans cette recherche, une perte de module d'élasticité autour 90% a été observée avec l'augmentation de la température et du laitier granulé. Et cette diminution est due à l'augmentation du volume poreux de bétons et aussi à la fissuration de la zone de transition inter faciale. Des résultats similaires ont été observés par Phan [95]. Il a observé une perte de module d'élasticité autour de 70% au-delà 300°C. Hanaa et al. [36] ont observé une diminution du module d'élasticité d'environ 90% par chauffage de 20°C à 450°C et attribue cette diminution à l'apparition de fissures (microfissuration) sur les éprouvettes testées et bien entendu par la déshydratation qui entraîne une augmentation de la porosité contribuant à l'endommagement du béton.. Kanema [94] a constaté une diminution supérieure à 95% pour les BHP et 85% pour les bétons ordinaires au-delà de 300°C. Les résultats de cette étude sont donc en ligne avec la littérature publiée.

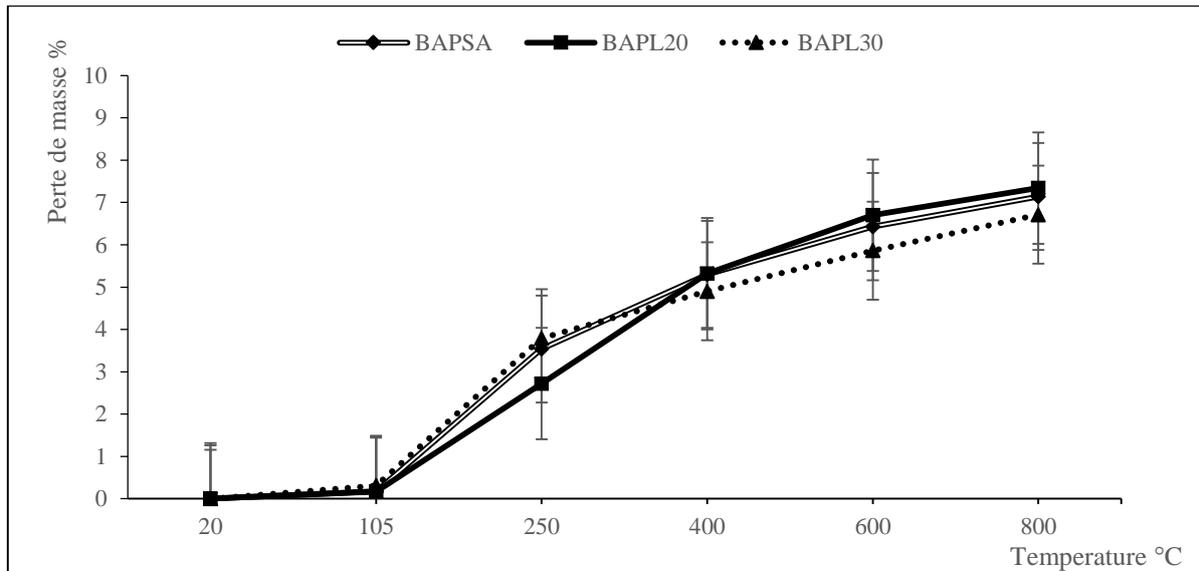
## V.II.2.2. Résultat des essais physique

### V.II.2.2.1. Essai de perte de masse

**Tableau 43.** Perte de masse en fonction de la température

Composition	Eprouvettes	Température					
		20°C	105°C	250°C	400°C	600°C	800°C
<b>BAP<sub>SA</sub></b>	N° 1 %	0	0,15	3,77	5,11	6,48	6,91
	N° 2 %	0	0,20	3,59	5,59	6,46	7,31
	N° 3 %	0	0,18	3,26	5,20	6,35	7,20
	<b>Moyenne %</b>	<b>0</b>	<b>0,18</b>	<b>3,54</b>	<b>5,30</b>	<b>6,43</b>	<b>7,14</b>
<b>BAP<sub>L20</sub></b>	N° 1 %	0	0,14	2,56	5,29	6,75	7,22
	N° 2 %	0	0,19	2,38	5,37	6,66	7,60
	N° 3 %	0	0,18	3,22	5,30	6,69	7,20
	<b>Moyenne %</b>	<b>0</b>	<b>0,17</b>	<b>2,72</b>	<b>5,32</b>	<b>6,7</b>	<b>7,34</b>
<b>BAP<sub>L30</sub></b>	N° 1 %	0	0,31	3,99	4,90	5,93	6,26
	N° 2 %	0	0,31	3,67	4,89	5,77	7,05
	N° 3 %	0	0,32	3,72	4,92	5,88	6,84
	<b>Moyenne %</b>	<b>0</b>	<b>0,31</b>	<b>3,79</b>	<b>4,90</b>	<b>5,86</b>	<b>6,71</b>

Sur La figure (V.13) on remarque que la perte de masse en fonction de la température de chauffage est presque la même pour les trois groupes de béton. Entre 20°C et 250°C, la variation de masse pour les BAP<sub>SA</sub> et BAP<sub>L30</sub> est plus importante que celles des BAP<sub>L20</sub>. Cette perte de masse représente, selon Kanema [94], le départ de l'eau libre contenue dans le béton. Entre 250°C et 400°C, on peut observer une augmentation de la perte de masse correspondant à 4% de la masse initiale pour le BAP<sub>L20</sub> contrairement aux BAP<sub>SA</sub> et BAP<sub>L30</sub> où la perte de masse était moins importante. Au de-là de 400°C la perte devient quasiment linéaire pour tous les bétons avec un inversement dans perte de masse ou on trouve que le pourcentage de perte de masse pour les BAP<sub>L20</sub> devient plus important que celui des deux autres BAP étudiées.



*Figure V.13.* La perte de masse en fonction de la température

## V.II.2.2.2. Essai de porosité et densité

### V.II.2.2.2.1. Essai de porosité

La figure (V.14) présente l'évolution de la porosité des bétons étudiés en fonction de la température du cycle de chauffage refroidissement. On observe pour tous les bétons une augmentation monotone et assez régulière de la porosité avec la température.

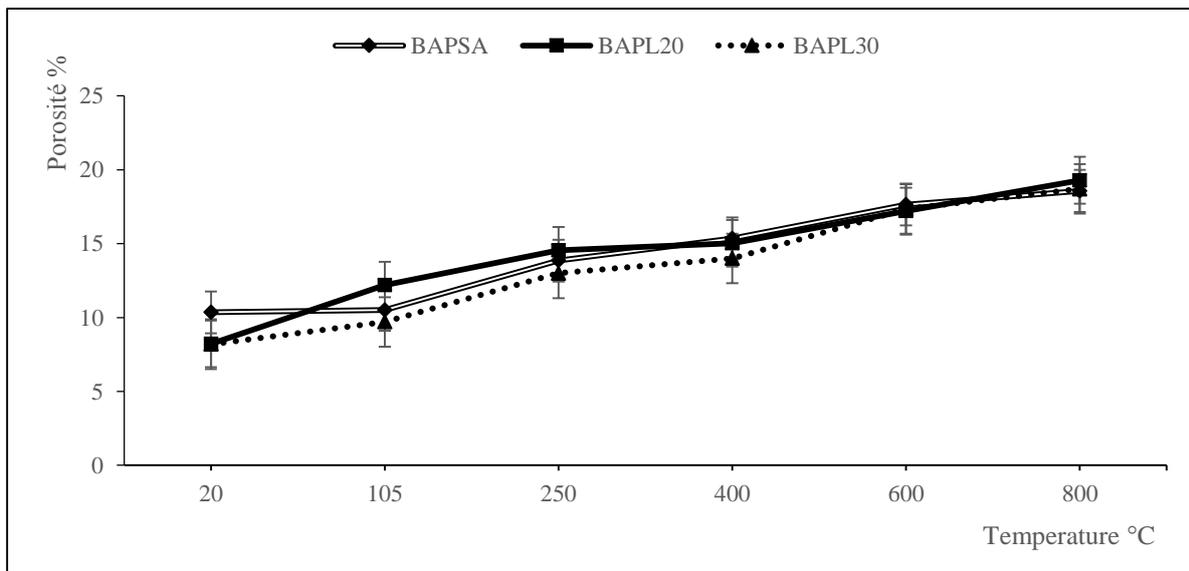
On remarque qu'à température ambiante la porosité diminue avec l'augmentation du taux d'addition. Cela est dû au remplissage de vide par les additions.

Dépassé les 105°C, la porosité augmente pour tous les mélanges à mesure que la température augmente de manière uniforme et plutôt monotone. A 400°C, plusieurs fissures ont été observées sur tous les spécimens. Ceci est lié aux changements de microstructure comme rapporté par différents auteurs [60, 105-107 & 116]. Selon [60-62], l'augmentation de la porosité avec la température est causée par le micro craquage généré par l'expansion différentielle entre la pâte et les agrégats.

Gallé et al. [105] attribuent l'évolution de la porosité à la génération de pores capillaires plus larges due au départ de l'eau adsorbée des pores capillaires et au départ de l'eau liée des hydrates de la pâte de ciment. Gallé et al. Observent également des macropores qui sont liés aux microfissures observées à la surface des éprouvettes chauffées [36]

**Tableau 44.** La porosité des BAP en fonction de la température

Composition	Eprouvettes	Température					
		20°C	105°C	250°C	400°C	600°C	800°C
<b>BAP<sub>SA</sub></b>	N° 1	10,40	10,60	13,55	15,10	17,50	18,70
	N° 2	10,30	10,45	14,15	15,60	17,80	18,45
	<b>Moyenne</b>	<b>10,35</b>	<b>10,52</b>	<b>13,85</b>	<b>15,35</b>	<b>17,65</b>	<b>18,57</b>
<b>BAP<sub>L20</sub></b>	N° 1	8,53	13,1	14,37	14,63	17,16	19,15
	N° 2	7,93	10,96	14,8	15,25	17,25	19,4
	<b>Moyenne</b>	<b>8,22</b>	<b>12,2</b>	<b>14,54</b>	<b>15,03</b>	<b>17,2</b>	<b>19,29</b>
<b>BAP<sub>L30</sub></b>	N° 1	8,26	9,7	12,50	14,30	17,40	18,91
	N° 2	8,13	9,7	13,50	13,70	17,30	18,52
	<b>Moyenne</b>	<b>8,19</b>	<b>9,7</b>	<b>13</b>	<b>14</b>	<b>17,35</b>	<b>18,71</b>



**Figure V.14.** La porosité totale de chaque mélange par rapport à la température

**V.II.2.2.2.2. Essai de densité**

La perte de densité apparente en fonction de la température est représentée dans la figure (V.15).

Avec l'augmentation de la température la densité de tous les bétons décroît. Certains auteurs [57, 68, 108] attribuent cette décroissance au départ d'eau du béton mais aussi à la dégradation des constituants de ce béton. Une diminution globale de 4,5% pour BAP<sub>SA</sub>. La perte est plus importante pour les bétons avec le laitier, ou on trouve une diminution d'environ 9,5% pour le BAP<sub>L20</sub> et d'environ 6,5%.

**Tableau 45.** La densité des BAP en fonction de la température

Composition	Eprouvettes	Température					
		70°C	105°C	250°C	400°C	600°C	800°C
<b>BAP<sub>SA</sub></b>	N° 1	2,27	2,25	2,23	2,21	2,17	2,16
	N° 2	2,26	2,25	2,23	2,20	2,19	2,17
	<b>Moyenne</b>	<b>2,26</b>	<b>2,25</b>	<b>2,23</b>	<b>2,20</b>	<b>2,18</b>	<b>2,16</b>
<b>BAP<sub>L20</sub></b>	N° 1	2,30	2,23	2,20	2,16	2,15	2,10
	N° 2	2,31	2,21	2,20	2,17	2,16	2,09
	<b>Moyenne</b>	<b>2,31</b>	<b>2,22</b>	<b>2,19</b>	<b>2,16</b>	<b>2,15</b>	<b>2,09</b>
<b>BAP<sub>L30</sub></b>	N° 1	2,23	2,23	2,20	2,15	2,13	2,10
	N° 2	2,23	2,22	2,21	2,16	2,12	2,08
	<b>Moyenne</b>	<b>2,23</b>	<b>2,22</b>	<b>2,20</b>	<b>2,15</b>	<b>2,12</b>	<b>2,09</b>

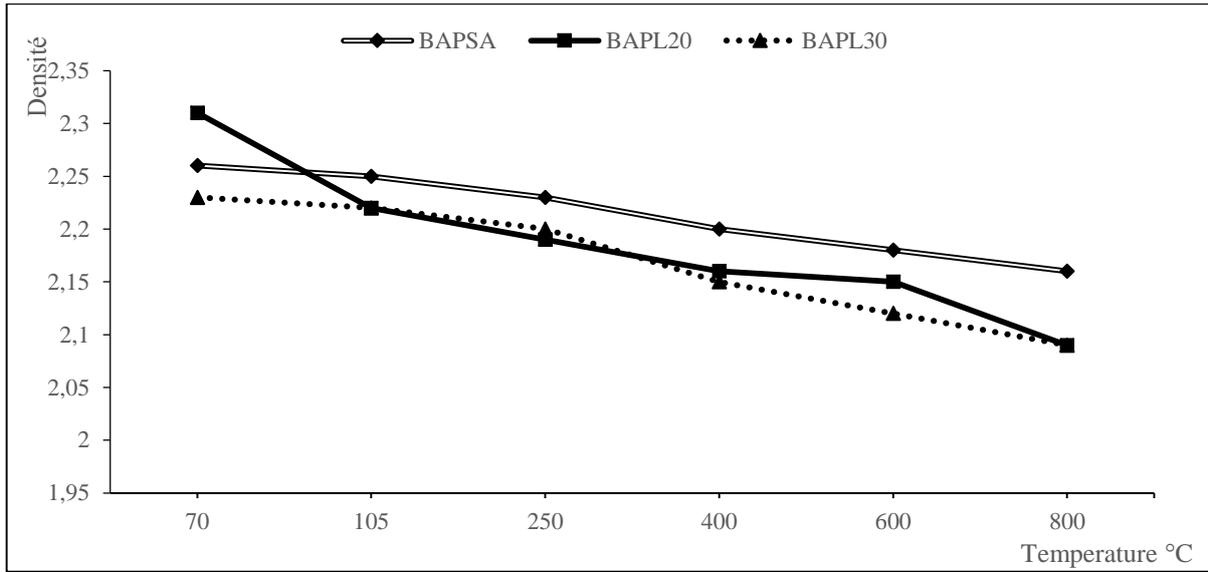


Figure V.15. Evolution de la densité apparente en fonction de la température

### V.II.2.3. Essai de perméabilité

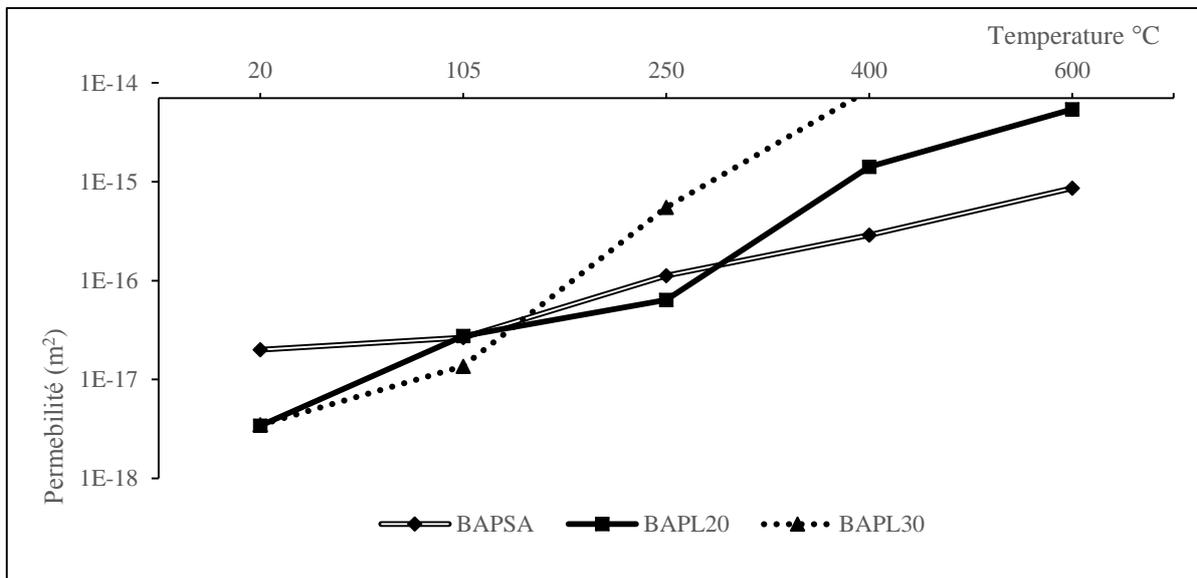
#### V.II.2.3.1. Perméabilité au gaz

Le tableau 46 montre l'évolution de la perméabilité résiduelle intrinsèque par rapport à la température. On remarque que plus la température augmente plus la perméabilité augmente et cela pour tous les bétons étudiés. Tout comme pour la première partie de ce chapitre, les échantillons présentaient un réseau dense de fissures ouvertes. Ainsi, les valeurs obtenues à 600 et 800°C peuvent comporter une grande erreur.

Tableau 46. La perméabilité au gaz en fonction de la température

Composition	Eprouvettes	Température				
		20°C	105°C	250°C	400°C	600°C
BAP <sub>SA</sub>	N° 1	2,23 E-17	2,48 E-17	0,95 E-16	2,67 E-16	
	N° 2	1,72 E-17	2,61 E-17	1,26 E-16	3,06 E-16	
	N° 3	2,14 E-17	2,87 E-17	1,15 E-16	2,94 E-15	
	<b>Moyenne</b>	<b>2,00 E-17</b>	<b>2,65 E-17</b>	<b>1,12 E-16</b>	<b>2,89 E-16</b>	<b>0,86 E-15</b>
BAP <sub>L20</sub>	N° 1	0,33 E-17	2,47 E-17	0,64 E-16	1,32 E-15	
	N° 2	0,34 E-17	3,07 E-17	0,58 E-16	1,03 E-15	

	N° 3	0,36 E-17	2,77 E-17	0,70 E-16	1,91 E-15	
	<b>Moyenne</b>	<b>0,34 E-17</b>	<b>2,76 E-17</b>	<b>0,64 E-16</b>	<b>1,42 E-15</b>	<b>5,41 E-15</b>
<b>BAPL30</b>	N° 1	3,18 E-18	1,32 E-17	0,50 E-17	0,80 E-16	
	N° 2	3,51 E-18	1,39 E-17	0,51 E-17	0,86 E-16	
	N° 3	3,72E-18	1,38 E-17	0,65 E-17	0,89 E-16	
	<b>Moyenne</b>	<b>3,47 E-18</b>	<b>1,36 E-17</b>	<b>0,55 E-17</b>	<b>0,85 E-16</b>	<b>Erreur</b>



**Figure V.16.** évolution de la perméabilité résiduelle intrinsèque par rapport à la température

Entre 20 et 105°C, pour tous les bétons, la perméabilité à l'air augmente pour tous les spécimens.

A partir de 250°C, on constate une augmentation très rapide de la perméabilité comparée à 20 et 105°C.

Selon Tsimbrovska [71], l'évolution de la perméabilité est due à l'apparition d'une classe de pores qui modifie la connectivité du réseau poreux avec, notamment, l'élargissement des pores capillaires entre 75 et 300°C. Pour des températures supérieures à 300°C, cette évolution serait due non pas à une modification de la porosité capillaire mais à la détérioration de la matrice cimentaire entraînant une modification de la porosité fine du béton.

Selon Gallé et al. [105], les modifications sont attribuées au départ d'eau du réseau poreux, au départ de l'eau adsorbée et à la déshydratation des hydrates du ciment. Ces phénomènes contribuent à l'augmentation de la taille des pores capillaires et à la génération de fissures.

La connectivité des pores et les microfissures sont donc les principaux facteurs qui déterminent la perméabilité aux gaz des bétons soumis à de hautes températures.

Au-delà de 400°C, les microfissures deviennent le principal facteur influençant la perméabilité.

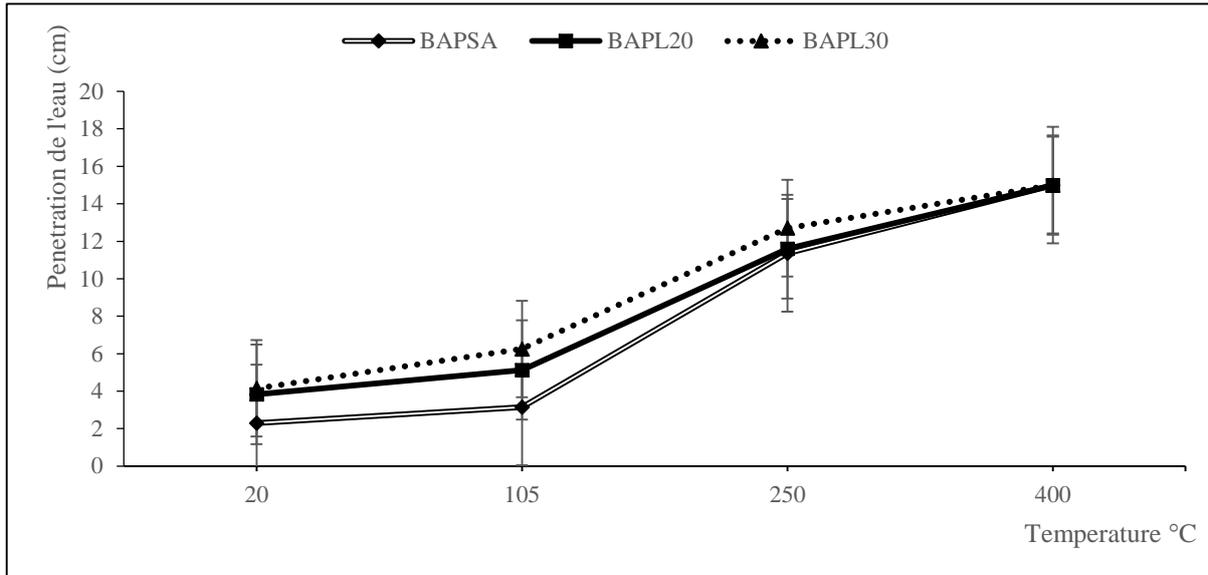
### V.II.2.3.2. Essais de pénétration de l'eau

La figure (V-17) montre la pénétration de l'eau en fonction de la température. Après 72 heures de test, tous les spécimens ont été coupés en deux, par scission. Tous comme la première partie de ce chapitre, on peut le voir sur cette figure que la pénétration de l'eau dans le béton entre 20°C et 105°C est assez stable. Au-delà de cette température, une augmentation monotone de la pénétration de l'eau entre 105°C et 400°C, quel que soit le mélange. On remarque que la pénétration de l'eau augmente avec l'augmentation du taux d'addition. Passé les 400°C, les spécimens ont éclatés sous la pression de l'eau à cause des macros fissures et de l'augmentation de la porosité ainsi que la dégradation des spécimens

**Tableau 47.** La pénétration de l'eau en fonction de la température

Composition	Eprouvettes	Température					
		20°C	105°C	250°C	400°C	600°C	800°C
<b>BAP<sub>SA</sub></b>	N° 1	2,40	2,75	10,15	15	Ecl	Ecl
	N° 2	2,20	3,05	11,55	15	Ecl	Ecl
	N° 3	2,30	3,65	12,40	15	Ecl	Ecl
	<b>Moyenne</b>	<b>2,30</b>	<b>3,15</b>	<b>11,36</b>	<b>15</b>	<b>Ecl</b>	<b>Ecl</b>
<b>BAP<sub>L20</sub></b>	N° 1	3,75	5	11,75	15	Ecl	Ecl
	N° 2	4,25	5,5	11,45	15	Ecl	Ecl
	N° 3	3,5	6	11,6	15	Ecl	Ecl
	<b>Moyenne</b>	<b>3,83</b>	<b>5,13</b>	<b>11,6</b>	<b>15</b>	<b>Ecl</b>	<b>Ecl</b>

<b>BAP<sub>L30</sub></b>	N° 1	4,25	6,25	12,65	15	Ecl	Ecl
	N° 2	4,20	6,50	12,25	15	Ecl	Ecl
	N° 3	4	6	13,20	15	Ecl	Ecl
	<b>Moyenne</b>	<b>4,15</b>	<b>6,25</b>	<b>12,7</b>	<b>15</b>	<b>Ecl</b>	<b>Ecl</b>



**Figure V.17.** La pénétration de l'eau en fonction de la température

#### V.II.2.4. Observation de la structure

##### V.II.2.4.1. Analyse des images des surfaces

Une inspection visuelle approfondie a été effectuée pour évaluer les signes visibles de craquage et d'écaillage à la surface des spécimens après avoir été soumis à des températures élevées. Aucun craquage ou écaillage visible n'a été observé dans les échantillons dans la gamme de température de 105 à 250°C. Des petites fissures ont commencé à apparaître largement à environ 400°C et ont continué de croître à mesure que la température augmentait jusqu'à 800°C. Cependant, aucun d'écaillage n'a été observé ; tous les échantillons ont montré un écaillage visible sur les bords et les coins à 800°C. L'apparition de fissures a augmentée à mesure que la température et la teneur en laitier granulé augmentait.



20°C



400°C



600°C



800°C

(a) Sans Addition



20°C



400°C



600°C

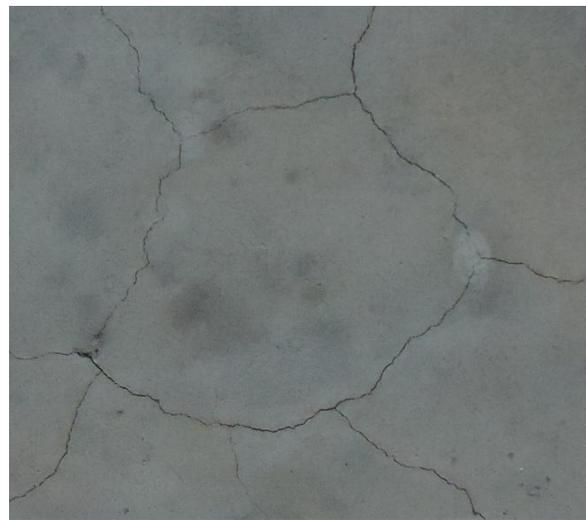


800°C

(b) Avec 20% de Laitier Granulé



20°C



400°C



600°C



800°C

(c) Avec 30% de Laitier Granulé

**Figure V.18.** Caractère de surface des échantillons avant et après chauffage

### V.II.3. Conclusion

L'effet des taux d'additions sur les matériaux physiques et mécaniques du béton autoplaçant à haute température a été analysé et étudié sur trois groupes de bétons. Les propriétés mécaniques et physiques résiduelles ont été déterminées après différents cycles de chauffage jusqu'à 105, 250, 400, 600 et 800°C. Le rythme de chauffage de 1°C / min était conforme aux recommandations de la RILEM [83] et la durée de séjour était d'une heure, sauf pour 600°C et 800°C, où deux heures étaient nécessaires. Les conclusions suivantes peuvent être tirées des résultats expérimentaux :

- Les propriétés mécaniques des bétons testés ont généralement diminué avec l'augmentation de la température.
- L'addition du laitier granulé a amélioré le comportement mécanique et physique des BAP.
- Entre la température ambiante et 250°C, une petite perte de résistance a été observée. Cette perte de résistance correspond à l'évaporation de l'eau libre contenue dans les pores capillaires et elle est associée à une augmentation de la porosité totale pour tous les bétons testés. Cette augmentation de la porosité peut être expliquée par une dilatation des diamètres des pores, d'où une augmentation de la perméabilité.
- Entre 250 et 400°C, on a observé une augmentation importante de la résistance à la compression pour les BAP, tandis que les autres propriétés mécaniques ont diminué à mesure que la température augmentait. L'augmentation de la résistance à la compression du BAP est due à une modification des propriétés de collage de la pâte de ciment.
- Au-delà de 400 ° C, les propriétés mécaniques et physiques de tous les groupes de béton ont fortement diminué. Une augmentation de la perméabilité et de la porosité de tous les bétons testés a été observée,
- L'inspection visuelle de la surface des spécimens après la soumission à des températures élevées n'a révélé aucune fissuration ou écaillage visible sur les échantillons dans la gamme de température de 20-250 ° C. A partir de 400°C et au fur et à mesure que le rythme de l'élévation de la température augmentait, le craquage et les fissurations devenaient plus prononcés. Ce qui pourrait être expliqué comme une modification du réseau poreux.

## ***CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES***

## CONCLUSION GENERALE

Le développement du béton autoplaçant (BAP) a récemment été un des développements les plus importants dans l'industrie du bâtiment. Le BAP offre plusieurs avantages en termes techniques, économiques et environnementaux. Le BAP exige une grande quantité poudre comparé au béton vibré conventionnel (BV) pour produire un mélange homogène et cohésif. Un grand nombre d'articles traitant le sujet a été publié, mais très peu ont été fait sur le BAP incorporant de mélanges minéraux et à des températures élevées. À cette fin, deux fois trois groupes de béton ont été choisis et analysés. Le premier groupe était un remplissage non-pouzzolanique (la poudre de calcaire) tandis que le deuxième groupe était pouzzolanique (la scorie de haut fourneau granulée moulue) pour être comparé avec le troisième groupe de béton vibré. La deuxième partie comprend des BAP avec des taux différents d'addition. Les propriétés mécaniques et physiques ont été étudiées à froid et après avoir été chauffé. La résistance à la compressive, la résistance à la flexion, la résistance à la traction, le module élastique dynamique, la perte de masse, la porosité, l'analyse d'image, la perméabilité à l'air et la pénétration à l'eau ont été étudiées. Les spécimens ont été soumis aux températures de chauffage diverses (20°C, 105°C, 250 °C, 400°C, 600°C et 800 °C) avec un taux chauffant de 1°C/ minute. Une phase de stabilité variant d'une heure à deux heures (600°C et 800°C), a été appliquée pour étendre la température partout dans les spécimens, suivi d'une phase de refroidissement jusqu'à température ambiante. Plusieurs conclusions peuvent être tirées des résultats expérimentaux.

- Le comportement des BAP est similaire à celui du béton ordinaire à haute température.
- Les propriétés mécaniques des bétons testés ont généralement diminué avec l'augmentation de la température.
- Entre la température ambiante et 250°C, une petite perte de résistance a été observée. Cette perte de résistance correspond à l'évaporation de l'eau libre contenue dans les pores capillaires et elle est associée à une augmentation de la porosité totale pour tous les bétons testés. Cette augmentation de la porosité peut être expliquée par une dilatation des diamètres des pores, d'où une augmentation de la perméabilité.
- L'augmentation du taux du laitier granulé a amélioré le comportement mécanique et physique des BAP.

- Entre 250 et 400°C, on a observé une augmentation importante de la résistance à la compression pour les BAP, tandis que les autres propriétés mécaniques ont diminué à mesure que la température augmentait. L'augmentation de la résistance à la compression du BAP est due à une modification des propriétés de collage de la pâte de ciment.
- Au-delà de 400 ° C, les propriétés mécaniques et physiques de tous les groupes de béton ont fortement diminué. Une augmentation de la perméabilité et de la porosité de tous les bétons testés a été observée,
- L'inspection visuelle de la surface des spécimens après la soumission à des températures élevées n'a révélé aucune fissuration ou écaillage visible sur les échantillons dans la gamme de température de 20-250 ° C. A partir de 400°C et au fur et à mesure que le rythme de l'élévation de la température augmentait, le craquage et les fissurations devenaient plus prononcés. Ce qui pourrait être expliqué comme une modification du réseau poreux.
- Une forte perte de résistance a été observée dans la gamme de température de 400 à 600°C. Les mélanges contenant des additifs de remplissage ont été meilleurs par rapport aux mélanges contenant des additifs pouzzolaniques. Tous les mélanges de SCC ont montré une forte détérioration de la 600-800 ° C et la perte moyenne était de 75% pour les bétons. Toutes les séries ont connu des fissure et craquements importants.

## **PERSPECTIVES**

Vu les performances mécaniques physiques et thermiques par rapport aux bétons ordinaires les bétons autoplacants peuvent, s'imposer progressivement et remplaceront dans les prochaines années pour un grand nombre d'applications les bétons mis en œuvre par vibration.

La formulation et la fabrication des bétons autoplacant peut être aujourd'hui de pratique courante en Algérie et ne sera plus du domaine expérimentale vu la disponibilité locale des différents constituants entrant dans leurs compositions.

La banalisation des bétons autoplaçants à haute résistance peut être rendue possible par la disponibilité du produit au sein du réseau des centrales de béton prêt à l'emploi de manière homogène en Algérie.

Des analyses plus poussées doivent être faites pour pouvoir mieux comprendre les changements qui se produisent au niveau de la microstructure tel que les ATG, ATD, Rayons et des observations au microscope.

D'autres types d'additions peuvent être utilisés dans ce genre de recherche tel que les fillers de marbre ou de verres etc...

L'ajout de fibres telles que les fibres de verre ou polypropylène peuvent aussi améliorer le comportement à haute température de ce genre de béton.

Des essais chimiques peuvent aussi être réalisés pour mieux comprendre les transformations à différentes températures et leur influence sur le comportement des bétons et l'effet du type de composant sur ce comportement.

## **BIBLIOGRAPHIE**

- [1] Assié S., *Durabilité Des Bétons Autoplaçants*, L'institut National Des Sciences Appliquées De Toulouse, Thèse de doctorat, Octobre 2004.
- [2] Heiza K.M., *Performance of Self-Compacted Concrete Exposed to Fire or Aggressive Media*, Concrete Research Letters, Vol. 3(2) - June 2012.
- [3] Okamura H. & Ouchi M., *Self Compacting Concrete*, Journal of Advanced Concrete Technology vol.1, No1, (2003) 5-15
- [4] AFGC, Association Française du Génie Civil, *Recommandations pour l'utilisation des BAP AFGC / PN BAP*, Document scientifique et technique 2008
- [5] Seddik A, *Le béton autoplaçant sous conditions locales*, mémoire de magistère en Génie Civil, Université de Sétif (Algérie).Février 2008
- [6] Bethmont S., *Mécaniques de ségrégation dans les bétons autoplaçants (BAP)*, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, thèse de doctorat, Décembre 2005
- [7] Collection Technique CIM Béton, *Les bétons : formulation, fabrication et mise en œuvre, fiche technique Tome 2*, Octobre 2006
- [8] Collection Technique CIM Béton, *Monographie d'ouvrages en BAP, B 52*, Décembre 2003
- [9] Colleparidi M., Colleparidi S., Troli R., *Practical Applications of SCC in European Works, Int. Conf: Sustainable construction materials and technologies*, 11-13 June 2007 Coventry, Special papers proceedings., Pub. UW Milwaukee CBU, p51-50.
- [10] Boukni B., *Contribution à l'étude expérimentale du Comportement thermomécanique des bétons Autoplaçants*, Université Mentouri Constantine, Thèse de doctorat, 2012
- [11] Bensebti S., *Formulation et Propriétés des Bétons Autoplaçants à Base de Matériaux Locaux*, Université Mentouri Constantine, Thèse de Doctorat, Juillet 2008.
- [12] Turcry P., *Retrait et Fissuration des Bétons Autoplaçants, Influence de la Formulation*, Ecole Centrale de Nantes, Thèse de doctorat, Février 2004.
- [13] Okamura H., Ozawa K., and Ouchi M., *Self-compacting concrete*. Structural Concrete, (1):317, March 2000
- [14] Bilberg P. 1999, *Fine mortar rheology in mix design of SCC*, Proceedings of 1<sup>st</sup> inter RILEM Conf on SCC, Cachan cedex, pp. 47-58
- [15] Sedran T, *Les Bétons Autonivelants*, bulletin LCPC 196, réf. 3889, pp. 53-60, mars-avril 1995.
- [16] Oh S.G., Nogushi T., and Tomosawa F., *Toward mix design for rheology of self-compacting concrete*. In Proceedings of the First International RILEM Symposium of Self-Compacting Concrete. RILEM, 1999
- [17] Bui V. K. and Montgomery D., *Mixture proportioning method for self-compacting high performance concrete with minimum paste volume*. In Proceedings of the First International RILEM Symposium of Self-Compacting Concrete. RILEM, 1999
- [18] Petersson Ö., Billberg P. and VAN B.K., *A model for Self-Compacting Concrete* International RILEM Conference, Production methods and workability of concrete, RILEM Proceedings 32, 1996

- [19] Chanvillard G. and Basuyaux O., *Une méthode de formulation des bétons de sable à maniabilité et résistance fixées*. Bulletin des laboratoires des Ponts et Chaussées, (205) :49\_63, Septembre-Octobre 1996
- [20] Turcry P., Ahmed Loukili. *Différentes approches pour la formulation des bétons autoplacants : Influence sur les caractéristiques rhéologiques et mécaniques*. Revue Française de Génie Civil, Taylor & Francis, 2003, 7 (4), pp.425-450.
- [21] Sedran T., De Larrard F. *Optimization of self-compacting concrete thanks to packing model*, Proceedings of the First International RILEM Symposium of Self-Compacting Concrete, RILEM Publications S.A.R.L, p.321-332. 1999, Paris,
- [22] Djehaichia S., Benmarce A., *Durabilité des Bétons Autoplacants*, Université 08 Mai 1945, Guelma, Mémoire de Magister, 2009
- [23] Khayat K.H., Ghezal A., and Hadriche M.S., *Utility of statistical models in proportioning self-consolidating concrete*. In Proceedings of the First International RILEM Symposium of Self-Compacting Concrete. RILEM, 1999.
- [24] Haddad O. , Aggoun S., Waller V. & Nachbaur L., *Estimation de la résistance au jeune âge du BAP à partir d'essais sur MBE: une nouvelle approche de la maturométrie*, European Journal of Environmental and Civil Engineering Volume 16, 2012 Issue 10 Pages 1202-1215
- [25] Billberg P. *Influence of filler characteristics on SCC rheology and early hydration* Proceedings of the International Symposium on Self-Compacting Concrete, Tokyo, Japon, pp. 285-294, 23-25 October 2001.
- [26] Ferhani K., *Etude de l'absorption d'eau des bétons autoplacants*, université de Guelma, memoir de magister, Janvier 2010
- [27] Park, Noh, Park, *Rheological properties of cementitious materials containing mineral admixtures*, Cement and concrete research, 2005, Vol 35, pp 842-849
- [28] Ferraris, Obla et Hill, *Influence of mineral admixtures on the rheology of cement paste and concrete*, Cement and concrete research, 2001, Vol 31, pp245-255.
- [29] Carlsward et al., *Effect of constituents on the workability and rheology of self-compacting concrete*, Proceedings of the third international RILEM conference on SCC, Août 2003, Reykjavik, Island, pp 143-153.
- [30] Shi and al., *A study of effect of superfine powders on fluidity of cement paste*, Transactions of the Japan Concrete Institute, 1998, Vol 20, pp 9-14.
- [31] Zhu W. and Gibbs J.C. *Use of different limestone and chalk powders in self-compacting concrete*. Cement and Concrete Research, Vol. 35, N\_8 :1457-1462, 2005.
- [32] Aïtcin et al. *L'interaction ciment / superplastifiant. Cas des polysulfonates*, Bulletin des laboratoires des Ponts et Chaussées, Juillet-Août 2001, n° 233, pp 87-98.
- [33] Shindoh et Matsuoka, *Development of combination type Self-Compacting Concrete and Evaluation Test Methods*, Journal of Advanced Concrete technology, 2003, Vol 1, n°1, pp 26-36
- [34] Holcim, *Le béton autocompactant*, Recommandation éditée par Holcim (Suisse) SA, 2004
- [35] Khayat. K., *Les bétons autonivelants, Les bétons, bases et données pour leur formulation*, p479-483, Eyrolles, 1997.

- [36] Fares H. *Propriétés mécaniques et physico-chimiques de bétons autoplaçants exposés à une température élevée*, Université de Cergy-Pontoise (France), Thèse de doctorat 2009
- [37] RILEM, *Workability and Rheology of Fresh Concrete: Compendium of Tests*, Report of Technical Committee TC145 WSM. Edité par Bartos, Sonebi et Tamimi.
- [38] Sedran T., *Rhéologie et Rhéométrie des bétons : application aux bétons autonivelants*, 1999, thèse de l'École nationale des Ponts et Chaussées, 220 pages.
- [39] Boukni B., *Tenue au feu des bétons Autoplaçants*, Université Mentouri Constantine, Thèse de Magister, 2007
- [40] Domone P.L., *A review of the hardened mechanical properties of self-compacting concrete*, Cement Concrete Composites Volume 29, Issue 1, January 2007, Pages 1–12
- [41] Gibbs J.C. & Zhu W. 1999, *Strength of hardened self-compacting concrete*, Proceedings of First International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete (PRO 7), Stockholm, Suède, pp. 199-209
- [42] Burak F., Selcuk T., Bulent B., *Effect of water/cement ratio on the fresh and hardened properties of self-compacting concrete*. Building and Environment Volume 42, Issue 4, April 2007, Pages 1795–1802
- [43] Burak F., *Comparative study on the performance of sands rich and poor in fines in self-compacting concrete*, construction and building material 22(4):646-654 · April 2008
- [44] Persson B., *Fire resistance of self-compacting concrete*, SCC Materials and Structures / Matériaux et Constructions, Vol. 37, November 2004, pp 575-584
- [45] Jacobs F. and Hunkeler F., *Design of self-compacting concrete for durable concrete structure*. In Proceedings of the First International RILEM Symposium of Self Compacting Concrete. RILEM, 1999.
- [46] Denoël J.F., *Sécurité incendie et constructions en béton*, Edition FEBELCEM 2007
- [47] Ulm F.J., Coussy O., and Bazant Z.P., *The "Chunnel" Fire I: Chemoplastic softening in rapidly heated concrete*. Journal of engineering mechanism, Vol.125, N\_3 :272{282, 1999
- [48] Hertz K.D. *Limits of Spalling of Fire-Exposed Concrete*, Fire Safety Journal 38 (2003) pp 103-116
- [49] INERIS, *Développement d'une méthodologie d'évaluation des effets thermiques et toxiques des incendies d'entrepôts (DRA-03)*, Rapport intermédiaire Comportement de structures soumises à un incendie. Premières réflexions Direction des Risques Accidentels MAI 2001
- [50] Grommerch J., *Le comportement au feu du béton (en particulier le BHR)*, Luxembourg
- [51] Ghomari F., *Comportement au feu du béton, science des matériaux de construction*, Université Aboubekr Belkaid
- [52] ACI Committee 363. 1993. *State-of-the-Art Report on High-Strength Concrete (ACI 363R-92)*. ACI Manual of Concrete Practice. American Concrete Institute, Detroit, MI, Part 1, 55pp
- [53] Mohammad S. Z., *Etude du comportement Thermo - Hydrique d'une paroi en béton à hautes performances ; Application au cas des enceintes de confinement en situation accidentelles*, thèse Soutenue le 22 janvier 1999, INSA de Lyon
- [54] Toumi B., *étude de l'influence des hautes températures sur le comportement du béton*, Thèse de doctorat, Université Mentouri Constantine.

- [55] U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration, *By the High Performance Concrete Technology Delivery Team High Performance Concrete Structural Designers' Guide*, First Edition March 2005
- [56] Castillo C., Durrani A.J. , *effect of transient high temperature on high strength concrete*, ACI Material Journal, Vol 87 N°1, 1990
- [57] Gaweska Hager I., *Comportement à haute température des bétons à haute performance*. In Thèse de doctorat, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées ; Ecole Polytechnique de Cracovie. Nov. 2004
- [58] Dejong M.J. and Ulm F.J. *The nanogranular behavior of c-s-h at elevated temperatures (up to 700°C)*. Cement and Concrete Research, Vol. 37, N\_1 :1{12, 2007
- [59] Noumowé, N.A. *Effet de hautes températures (20°C – 600°C) sur le béton. Cas particulier du BHP*. Thèse de Doctorat de l'INSA de Lyon, 1995.
- [60] Khoury, G.A. *Compressive strength of concrete at high temperatures: a reassessment*. Magazine of Concrete Research, 1992. 44, n ° 161, pp 291-309
- [61] Persson B., *Self-Compacting Concrete At Fire Temperatures*, Lund Institute of Technology, Division of Building Materials 2003.
- [62] Metin H., *The effects of high temperature on compressive and flexural strengths of ordinary and high-performance concrete*, Fire Safety Journal 41 (2006) 155–163
- [63] Kalifa P. and Tsimbrovska M., *Comportement des BHP à hautes températures - Etat de la question et résultats expérimentaux*. Cahier du CSTB, no 3078, 1998
- [64] Khoury, G.A. *Mechanical behaviour at high temperature*. Final report, Brite Euram III, HITECO programme BE-95-1158. 1999
- [65] Menou A., *Etude du comportement thermomécanique des bétons à haute température : approche multi échelle de l'endommagement thermique* ; thèse de l'Université de Pau et des Pays de l'Adour 2004
- [66] Bazant Z. P & Kaplan M. F. (1996), *Concrete at High temperatures, Material properties and mathematical models*, Concrete Design & Construction Series, © Longman, Group Limited 1996
- [67] Diederichs U., Jumppanen U. M. and Pentalla V., *Behavior of high strength concrete at elevated temperatures*. Espoo 1989. Helsinki University of Technology, Department of structural Engineering, Report 92 p 72 1992
- [68] Parrot, L. T. *A study of transitionnal thermal creep in hardened cement paste*. Magazine of Concrete Research, 1979, vol 31, n°107, p 99-103.
- [69] Mounajed G., Obeid W, *A new coupling F.E. model for the simulation of thermal-hydro-mechanical behaviour of concretes at high temperatures*, Materials and Structures July 2004, Volume 37, Issue 6, pp 422–432
- [70] Neville, A. and Aitcin, P., *High-performance concrete –An overview*, Material.Structure.31 (206) (1998) 111-117
- [71] Tsimbrovska M., Kalifa P., Quenard D, *Quenard D., High Performance Concretes at Elevated Temperatures — Permeability and Microstructure*, SMIRT 14, Lyon, France, August 17–22 (1997), pp. 475–482.

- [72] Noumowé A., H. Carré, A. Daud, and H. Toutanji. *High strength selfcompacting concrete exposed to fire test*. *Journal of Materials in Civil Engineering*, ASCE, Vol. 18 Issue N°6 :754-758, 2006
- [73] Noumowe, A., *Temperature Distribution and Mechanical Properties of High Strength Silica Fume Concrete at Temperatures up to 200°C*, *ACI Materials Journal*, July-August 2003
- [74] Doughill, J. W., *The relevance of the established method of structural fire testing to reinforced concrete*, *Applied Materials Research*, 5, N°4. Oct. 1996, p.235
- [75] Kodur V.K.R. , *Tenue au feu des éléments de structure en béton haute résistance*, solution constructive no 31, Déc. 1999, Conseil national de recherche Canada
- [76] Noumowe A., N. A., Debicki, G., *Effect of Elevated Temperature from 200 to 600 °C on the Permeability of HPC*, Symposium on Utilization of High Strength/High Performance Concrete. University of Leipzig. Ed.: König, G., Dehn, F., Faust, T., Leipzig. 2002,431-444.
- [77] Kodur, V.K.R. *Spalling in high strength concrete exposed to fire – Concerns, causes, critical parameters and cures*, actes du congrès de l'ASCE sur les structures, Philadelphie (PA), 2000.
- [78] Neville A. M., *Propriétés des Bétons*, traduction CRIB, Sherbrooke, Canada, éd. Paris Eyrolles 2000
- [78] Recueil des normes Algériennes 31-12-2008 ; CTN N°37« Liants-Bétons-Granulats »
- [79] Zhang X. & Han J. 2000, *The effect of ultra-fine admixture on the rheological property of cement paste*, *Cement and Concrete Research.*, Vol 30, pp. 827-830.
- [80] Yahia A., Tanimura M. & Shimoyama Y. 2005, *Rheological properties of highly flowable mortar containing limestone filler-effect of powder content and W/C ratio*, *Cemented concrete*, 35, pp. 532-539.
- [81] Shi. & al. 1998, *A study of effect of superfine powders on fluidity of cement paste*, *Transactions of the Japan Concrete Institute*, vol 20, pp 9-14
- [82] Behim M. & al 2009, *Effet des additions micronisées sur l'écoulement des bétons autoplaçants (laitier de haut fourneau, filler calcaire et poudre de verre)*, 1st International Conference on Sustainable Built Environment Infrastructures in Developing Countries ENSET Oran (Algeria) - October 12-14, 2009
- [83] Comité technique RILEM, *129-MHT*, *Materials and Structure* .28 (1995) 410–414
- [84] NF EN934-2, *Adjuvants pour bétons, mortier et coulis - Partie 2 : adjuvants pour béton - Définitions, exigences, conformité, marquage et étiquetage* (2012).
- [85] NF EN 206-1, AFNOR. *Essai pour béton durci – Partie 3 : Résistance à la compression des éprouvettes, Indice de classement : (2003) P 18-455.*
- [86] NF EN 12390-5, AFNOR. *Essai pour béton durci – Partie 3 : Résistance à la flexion des éprouvettes, Indice de classement : (2001) P 18-433.*
- [87] NF P 18-418, *Auscultation Sonique, Mesure du temps de propagation d'ondes soniques dans le béton* (1989).
- [88] AFPC-AFREM, *Méthodes recommandées pour la mesure des grandeurs associées à la durabilité des bétons*, INSA-LMDC, (1997) pp. 11–12.
- [89] Lau A., Anson M., *Effect of high temperatures on high performance steel fibre reinforced concrete*. *Cement and Concrete Research* 36 (2006) 1698 –1707

- [90] Klinkenberg L.J., *The permeability of porous media to liquid and gases*, American Petroleum Institute, Drilling and Production Practices (1941) 200–214.
- [91] Kameche Z.A., *La perméabilité relative comme indicateur de durabilité : Influence de l'état hydrique du béton et de la taille des éprouvettes*, XX<sup>e</sup> Rencontres Universitaires de Génie Civil. Chambéry, 6 au 8 juin 2012
- [92] NF EN 13390-8, AFNOR. *Essai pour béton durci – Partie 8 : profondeur de pénétration d'eau sous pression, Indice de classement : P18-430*.
- [93] Eurocode 4, *Calcul des structures mixtes acier-béton. Partie 1-2 : Règles générales, calcul du comportement au feu*, NF EN 1994-1-2. AFNOR, (octobre 2005).
- [94] Kanema M. (2007), *Influence des paramètres de formulation et microstructuraux sur le comportement à haute température des bétons*, Thèse de doctorat, Université de Cergy-Pontoise.
- [95] Phan L.T., Lawson J.R., Davis F.L. (2001), *Effects of elevated temperature exposure on heating characteristics, spalling, and residual properties of high performance concrete*, Materials and Structures 34; 83–91
- [96] Dias W.P.S, Khoury G.A, Sullivan PJE (1990). *Mechanical properties of hardened cement paste exposed to temperatures up to 700 C*. ACI Mater J 1990; 87(2):160–166.
- [97] Xu Y., Wong Y.L., Poon C.S., Anson M. (2001), *Impact of high temperature on PFA concrete*, Cement and Concrete Research 31; 1065–1073.
- [98] Mehta P.K., Monteiro P.J.M. (1993), *Concrete: Structure, Properties and Materials*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N.J. (1993).
- [99] Bidossessi A. *Contribution des fibres de polypropylène et métalliques à l'amélioration du comportement du béton soumis à une température élevée*, thèse de doctorat, Université de Cergy-Pontoise (France), 2010
- [100] Tolentino E., Lameiras A.M, Gomes A.S, Rigo da Silva C.A and Vasconcelos W.L., *Effects of high temperature on residual performance of portland cement concrete*. Materials research, Vol. 5, no 5:301-307, 2002.
- [101] Persson B., *Fire resistance of SCC*, Materials and Structures Vol 37;pp 575–584 (2004)
- [102] Bamonte P., Gambarova G., *High-temperature Resistance of Self-consolidating Concrete*, ACI Spring Convention 2010, Chicago, USA.
- [103] Pathak & Siddique , *Properties of self-compacting-concrete containing fly ash subjected to elevated temperatures*; Construction and Building Materials 30; 274–280 30. (2012)
- [104] Uysal M., Yilmaz K., Ipek M. , *Properties and behavior of self-compacting concrete produced with GBFS and FA additives subjected to high temperatures*, Construction and Building Materials 28; 321–326. (2012)
- [105] Gallé C., Sercombe J. , *Permeability and pore structure evolution of silicocalcareous and hematite high-strength concretes submitted to high temperatures*, Materials and Structures 34; 619–628. (2001)
- [106] Liu X., Ye G., De Schutter G., Yuan Y., Taerwe L., *on the mechanism of polypropylene fibres in preventing fire spalling in self-compacting and highperformance cement paste*, Cement and Concrete Research 38 487–499. (2008)

- [107] Liu X., Ye G., De Schutter G., Yuan Y., *Modeling the microstructure change of high performance cement paste at elevated temperature*, CONMOD'08, RILEM Proceedings PRO, Vol. 58, pp. 439–446. (2008)
- [108] Ye G., Liu X., De Schutter G., Taerwe L., and Vandeveldel P., *Phase distribution and microstructural changes of self-compacting concrete paste at elevated temperature*. Cement and Concrete Research, Vol. 37:978–987, 2007.
- [109] Kalifa P., Menneteau F.D., Quenard D. , *Spalling and pore pressure in HPC at high temperature*, Cement and Concrete Research 30; 1915–1927. (2000)
- [110] Lin Wei-Ming, Lin TD, Powers-Couche LJ. *Microstructures of fire-damaged concrete*. ACI Mater J 1996; 93(3):199–205.
- [111] Suchita H., Pravin G.; *Effect of Addition of Ground Granulated Blast Furnace Slag (GGBS) on Mechanical Properties of Fiber Reinforced Concrete*; International Journal of Current Engineering and Technology; Vol.5, No.3 (June 2015)
- [112] Jiang J., *The Summarization of Slag Powder Used in Cement and Concrete*, Concrete Cement Product. Vol.3 pg 3-6 (2002)
- [113] Behnood A, Ziari H. *Effects of silica fume addition and water to cement ratio on the properties of high-strength concrete after exposure to high temperatures*. Cement Concr Compos 2008; 30:106–12.
- [114] Zhang B, Bicanic N. *Residual fracture toughness of normal-and high-strength gravel concrete after heating to 600 C*. Mater J 2002;99(3):217–26.
- [115] Demirel B., Kelestemur O., *Effect of elevated temperature on the mechanical properties of concrete produced with finely ground pumice and silica fume*. Fire Saf J 2010;45:385–91
- [116] Benzaid M., Benmarce A., *Behaviour of Self Compacting Concrete mixed with different additions at high-temperature*, JMES, 2017 Volume 8, Issue 9, Page 3081-3092

## ***ANNEXES***



# FILLERS

## Fiche technique

Le gisement El-khroub occupe la partie sud ouest du massif Oum Settas au sud-est de Constantine, il est constitué de calcaire d'origine néritique caractérisé par une grande pureté chimique et une blancheur élevée.

### Caractéristiques chimiques

CaCO <sub>3</sub>	98%
CaO	56,03%
SiO <sub>2</sub>	0,04%
Na <sub>2</sub> O	0,05%
MgO	0,17%
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,03%
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,02%
K <sub>2</sub> O	0,02%
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,008%
TiO <sub>2</sub>	0,009%
Chlorure	0,0033%
SO <sub>3</sub> (soluble dans l'eau)	0,0021%
SO <sub>3</sub> (soluble dans l'acide)	0,19%
Soufre totale	0,0137%
Résidu insoluble	1,15%
Solubilité dans l'eau (Ws)	0,24%
Perte au feu	43%
Ph	9

### Caractéristiques physiques

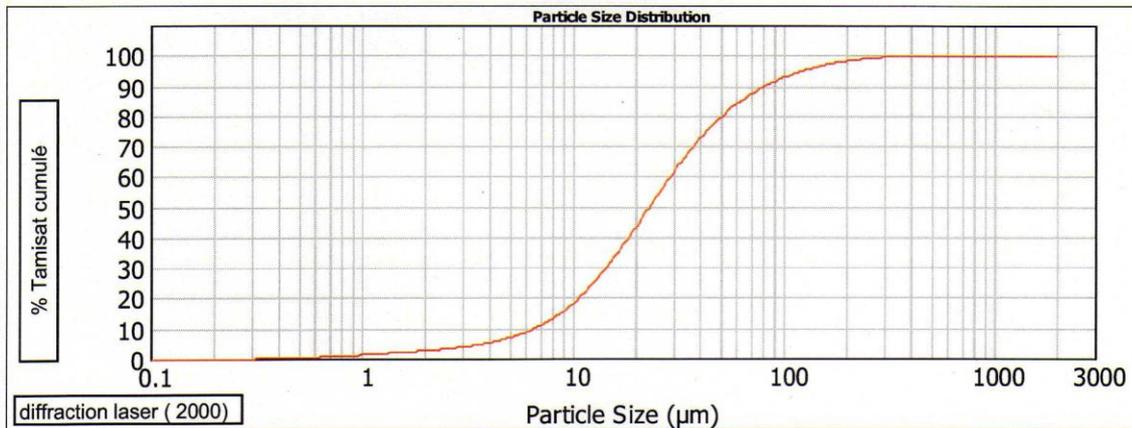
Masse volumique réelle:	2,7
Masse volumique en vrac	1.11gr/cm <sup>3</sup>
Valeur de bleu de méthylène MB <sub>r</sub>	1.67gr/kg

### Répartition granulométrique

Inférieur à 63 $\mu$  : 85%

Inférieur à 125 $\mu$  : 95%

Inférieur à 2mm : 100%



Les valeurs figurant dans cette fiche technique sont des valeurs caractéristiques moyennes de la production

### Conditionnement

Vrac  
Big Bag ( 1 tonne )

### Principales utilisations

Ajout pour matériaux de construction  
Béton roulé compacté ( B R C )

<p><b>ARCELORMITTAL ANNABA</b></p> <p><b>D.MQ</b></p>	<p align="center"><b><u>SPECIFICATION TECHNIQUE</u></b></p> <p align="center"><b>LAITIER DES HAUTS FOURNEAUX</b></p>	<p>SPT-DMQ/COQ/MPF-13 Page 1 sur 1 Edition : Avril/2008 Date : 20/04/08 Révision : 01</p>
---	--	---

## I OBJET DE LA SPECIFICATION

Il s'agit du laitier rocheux ou granulé produit par les hauts fourneaux 1et 2.

## II SPECIFICATION TECHNIQUE

### 1. Composition chimique :

- Humidité totale H<sub>2</sub>O = 12 - 18 %
- Fer = 0.5 - 1.9 %
- MnO = 1.3 - 2.5
- CaO = 36 - 46 %
- SiO<sub>2</sub> = 35 - 45 %
- Indice de basicité : CaO/SiO<sub>2</sub> = 0.98 - 1.20
- Soufre = 0.6 - 0.75 %
- MgO = 3.0 - 8
- Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> = 4 - 12 %
- P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ≤ 0,10 %
- Na<sub>2</sub>O ≤ 0,30 %
- K<sub>2</sub>O ≤ 0,50 %
- Densité sur humide = 0,88 - 0,92

### 2. Granulométrie :

- Rocheux : tout venant = 0 - 500 mm
- Granulé = 0 - 5 mm
- > 3,5 mm = 5 % maxi
- 0 - 3 mm ≥ 95 % mini

<u>REDACTEURS</u>	<u>VERIFICATEUR</u>	<u>APPROBATEUR</u>
<p><b>CHEF SERVICE COQ/PMA-HFx:</b></p> <p><b>M: S. FADEL</b></p>	<p><b>CHEF DEPARTEMENT COQ/MPF :</b></p> <p><b>M : S. KHERAIF</b></p>	<p><b>DMQ :</b> <b>M : A.LEMBOUB</b></p> <p>Date</p> <p>Visa</p>

# MEDAPLAST SP 40

Conforme à la norme EN 934-2 Tab 1 , 3.1  
et 3.2 NA 774

Super plastifiant - haut réducteur d'eau

## DESCRIPTION

Le MEDAPLAST SP 40 est un superplastifiant haut réducteur d'eau permettant d'obtenir des bétons et mortiers de très haute qualité. En plus de sa fonction principale de superplastifiant, il permet de diminuer considérablement la teneur en eau du béton.

## DOMAINES D'APPLICATION

- Bétons à hautes performances
- Bétons pompés
- Bétons précontraints
- Bétons architecturaux
- Bétons extrudés
- Bétons BCR

## PROPRIÉTÉS

Grâce à ses propriétés le MEDAPLAST SP 40 permet :

Sur béton frais :

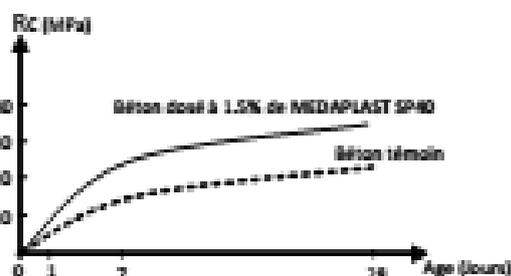
- Améliorer la fluidité
- Augmenter la maniabilité
- Réduire l'eau de gâchage
- Éviter la ségrégation
- faciliter la mise en œuvre du béton

Sur béton durci :

- Augmenter les résistances mécaniques même à jeune âge
- Diminuer la porosité
- Augmenter la durabilité
- Diminuer le retrait

## CARACTÉRISTIQUES

- Aspect ..... Liquide
- Couleur ..... Marron
- pH ..... 8,2
- Densité .....  $1,20 \pm 0,01$
- Teneur en chlore .....  $< 1\text{g/L}$
- Extrait sec ..... 40%



Evolution des résistances en compression

## MODE D'EMPLOI

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.

## DOSAGE

Plage de dosage recommandée :

0,6% à 2,5% du poids de ciment soit 0,5L à 2L pour 100 kg de ciment

Le dosage optimal doit être déterminé sur chantier en fonction du type de béton et des effets recherchés.

## CONDITIONNEMENT ET STOCKAGE

Le MEDAPLAST SP 40 est conditionné en bidons de 12Kg, fûts de 270 kg et cubitenaire de 1200 kg.

Délai de conservation :

Une année emballage d'origine, à l'abri du gel et de la chaleur ( $5^{\circ}\text{C} < t < 35^{\circ}\text{C}$ ).

## PRÉCAUTIONS D'EMPLOI

Manipulation non dangereuse.

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

PV d'essais conforme aux normes, établi par le CNERIB en Janvier 2007.

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



Granitex

Zone Industrielle Oued Smar - BP85 Oued Smar - 16270 Alger

Tel : (213) 021 51 66 81 & 82

Fax : (213) 021 51 64 22 & 021 51 65 23

[www.granitex-dz.com](http://www.granitex-dz.com) - E-mail: [granitex@granitex-dz.com](mailto:granitex@granitex-dz.com)

