
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

.....
UNIVERSITE MENTOURI CONSTANTINE
FACULTE DES SCIENCES DE L'INGENIEUR
DEPARTEMENT DE GENIE CIVIL

Thèse
Doctorat en science
en Génie Civil

Option : Matériaux et Structures

**CONTRIBUTION A L'ETUDE EXPERIMENTALE DU
COMPORTEMENT THERMOMECHANIQUE DES BETONS
AUTOPLACANTS**

Présentée par : BOUKNI Bariza

Directeur de thèse : Prof. HOUARI Hacène

Composition de Jury :

Président : Prof. CHIKH NasrEddine U.M. Constantine

Rapporteur : Prof. HOUARI Hacène U.M.C

Examineurs : Prof. BELACHIA Mouloud Université de Skikda

Prof. ARABI NourEddine Université de Annaba

Dr FERKOUS salah U.M.C

Juin 2012

REMERCIEMENTS

Ce travail a été mené au sein de laboratoire matériaux et durabilité des constructions du département de génie civil, Université Mentouri Constantine.

Je suis gré à Monsieur Chikh NasrEddine, Professeur à l'université Mentouri Constantine de m'avoir fait l'honneur de présider le Jury de soutenance.

Je tiens à remercier Monsieur Belachia Mouloud, Professeur à l'université de Skikda d'avoir accepté de participer à ce jury et pour ses remarques pertinentes. Je suis très honoré de son intérêt pour notre travail.

Un grand merci à Monsieur Arabi NourEddine, Professeur à l'université de Annaba pour l'intérêt qu'il a porté à ce sujet de m'avoir fait le plaisir de participer à mon jury de thèse.

Je remercie cordialement, Monsieur Ferkous Salah, Docteur de l'université Mentouri Constantine, pour ses encouragements et son soutien durant toutes ces années, et de m'avoir fait le plaisir de participer à mon jury de thèse.

*J'adresse mes plus vifs remerciements à monsieur **Houari Hacène**, Professeur à l'université Mentouri Constantine qui, en tant que Directeur de thèse, a permis l'aboutissement heureux de ce travail. Je le remercie pour sa confiance, et pour son aide scientifique et qui par son expérience et sa compétence m'a transmis sa passion pour la recherche. Sans lui, cette thèse n'aurait jamais vue le jour.*

Je remercie tout particulièrement Ghofrane pour les bons moments que nous avons partagés ensemble durant la période de la thèse. Sans oublié Chahinez pour son soutien et son encouragement. Et aussi un grand merci pour Meriem, Radia, Soumia, Wided et Nawel.

En fin, une grande pensée pour féliciter et remercier du fond du cœur mes parents, ma sœur Hiba, mes frères, pour le soutien et les encouragements sans faille tout au long de cette thèse. Qu'ils trouvent ici l'expression de ma gratitude.

Résumé :

L'utilisation des bétons autoplçants (BAP) s'est considérablement développée au cours des dernières années et une attention grandissante est portée à l'étude de leurs propriétés mécaniques à l'état durci. Les spécificités de formulation de ces bétons liées à leurs exigences de mise en œuvre pourraient modifier leur comportement mécanique à l'état durci. Le comportement des BAP à haute température doit en particulier être évalué.

Le travail présenté vise à une meilleure compréhension des phénomènes mis en jeu lors de l'exposition à haute température des bétons autoplçants. Nous nous sommes plus particulièrement intéressés au comportement mécanique.

Dans les observations que nous avons réalisées, l'influence des paramètres de composition des bétons testés a été étudiée ainsi que l'influence de l'âge sur les propriétés mécaniques des BAP subissant une cure à des températures élevées. Les observations de l'évolution des propriétés mécaniques réalisées nous ont permis de constater que les résultats de ce comportement sont fortement influencés par la présence de l'addition dans le matériau et la température du traitement thermique ainsi que l'âge du béton.

Une grande partie de la recherche a été consacrée à l'étude des variations dimensionnelles et pondérales avant et après un choc thermique. Ce comportement a été étudié sur trois bétons autoplçants de rapport (addition/ ciment) différent.

Parmi les paramètres influençant la variation dimensionnelle et pondérale avant et après choc thermique nous pouvons citer : le rapport addition/ ciment, la teneur en eau du béton et le mode de conservation.

En dernière investigation, une étude des propriétés mécaniques résiduelles des bétons autoplçants a été réalisée, soumis à des températures élevées. Les résultats présentés montrent une ressemblance avec la littérature.

Mots clefs : BAP, haute température, traitement thermique, propriétés mécaniques, variation dimensionnelle, perte en poids.

ملخص

استعمال الخرسانة ذاتية التوضع شهدت تطورا كبيرا بمرور السنين. اهتمام كبير أولي لدراسة خصائصها الميكانيكية في الحالة الصلبة. مميزات وصفة الخرسانة المرتبطة بوضعها في مكانها تستطيع تغيير سلوكها الميكانيكي في الحالة الصلبة. من الضروري دراسة سلوك الخرسانة تحت تأثير درجات حرارة مرتفعة.

العمل المقدم موجه إلى فهم الظواهر الموجودة في حالة تعرض الخرسانة ذاتية التوضع إلى ارتفاع في درجة الحرارة، اهتمامنا الأكبر موجه إلى دراسة السلوك الميكانيكي.

في بادئ الأمر، قمنا بدراسة تأثير عوامل تركيبة الخرسانة و أيضا تأثير عمر الخرسانة على الخصائص الميكانيكية تحت تأثير معالجة حرارية. النتائج المتحصل عليها تبين التأثير الكبير للإضافات المعدنية و درجة حرارة المعالجة الحرارية على الخصائص الميكانيكية. جزء كبير من هذه الدراسة أولي الى دراسة التغيرات الحجمية والوزنية قبل و بعد تعرضها إلى صدمة حرارية. من بين العوامل التي تؤثر على التغيرات الحجمية و الوزنية، نسبة الإضافة المعدنية على الإسمنت و طرق حفظ الخرسانة.

في نهاية البحث قمنا بدراسة الخصائص الميكانيكية المتبقية تحت تأثير إرتفاع درجة الحرارة. النتائج تبين تشابه بين دراستنا و الدراسات الأخرى.

الكلمات المفتاحية:

خ.ذبت، حرارة مرتفعة، معالجة حرارية، خصائص ميكانيكية، تغير حجمي، فقدان الوزن.

Abstract:

The use of self-compacting concrete (SCC) has developed considerably in recent years, increasing attention is given to the study of their mechanical properties when cured. The specific formulation of these requirements related to their concrete implementation might change their mechanical behavior in the hardened state. BAP behavior at high temperature should be especially valued. The present work aims to understand the phenomena involved during exposure to high temperature of compacting concrete. We are particularly interested in the mechanical behavior.

In the observations we have made, the influence of compositional parameters of tested concretes was investigated and the influence of age on the mechanical properties of SCC undergoes a cure at elevated temperatures. Observations of changes in mechanical properties realized, we have found that the results of this behavior are heavily influenced by the presence of addition in the material and heat treatment temperature and the age of concrete. Much research has been devoted to the study of dimensional changes and weight before and after heat shock. This behavior was studied on three compacting concrete report (addition / cement) different.

Among the parameters influencing the dimensional change and weight before and after thermal shock we can mention: the ratio addition / cement, the water content of the concrete and the method of conservation.

In the final part, a study of residual mechanical properties of self-compacting concrete was conducted. The results presented show a resemblance to the literature.

Keywords: SCC, high temperature heat treatment, mechanical properties, dimensional change, weight loss.

Table des matières

Remerciement.....	2
Résumé.....	3
Résumé arabe.....	4
Abstract.....	5
Table de matière.....	6
Introduction générale.....	11
Chapitre1 :.....	15
Comportement hydrique et mécanique des matériaux à matrice cimentaire.....	15
1.1 Introduction :.....	15
1.2 Structuration des matériaux cimentaires :.....	15
1.2.1Hydratation du ciment :.....	15
1.2.2 Structuration d'une pâte de ciment.....	16
1.2.3. Les pores dans la pâte de ciment hydratée.....	17
1.3 Les différents états de l'eau dans la pâte de ciment :.....	19
1.3.1Eau capillaire :.....	19
1.3.2 Eau adsorbée et chimiquement liée :.....	20
1.4. Interface pâte de ciment/granulats :.....	21
1.5 Le séchage :.....	22
1.5.1 Mécanismes du séchage :.....	22
1.5.2 L'effet de séchage sur les propriétés mécanique :.....	24
1.5.3 Influence de cure à température élevée sur les propriétés mécaniques :.....	25
1.5.4Retrait :.....	26
1.5.4.1 Le retrait thermique.....	26
1.5.4.2 Le retrait endogène.....	26
1.5.4.3 Le retrait de séchage.....	26
1.5.4.4 Le retrait de carbonatation.....	26
1.5.4.5 Influence de la composition.....	27
1.5.4.6 Influence de la température.....	27
1.6 Conclusion :.....	27

Chapitre 2 :	29
évolution du comportement du béton soumis à des hautes températures	29
2.1 Introduction :	29
2.2 Modification de la pâte de ciment	29
2.4 Evolution des granulats :	31
2.5 Dégradation de l'interface pâte-granulats :	31
2.6 Evolution des propriétés thermique (Déformation thermique) :	32
2.7 Evolution des propriétés physico-chimiques :	35
2.7.1 Variation de la porosité :	35
2.7.2 La densité apparente :	36
2.7.3 Perte de masse :	36
2.8 Évolution des caractéristiques mécaniques avec la température.....	37
2.8.1 Résistance en compression	38
2.8.2 Résistance en traction :	40
2.8.3 Module d'élasticité :	41
2.9 Eclatement	42
2.10 Conclusion	43
Chapitre 3 :	44
ETAT DE CONNAISSANCES DES BETONS AUTOPLAÇANTS.....	44
3.1 Introduction :	44
3.2 Concept des BAP :	44
3.3 Modes de formulation des BAP :	46
3.3.1 Méthodes basées sur l'optimisation des mortiers	46
3.3.2 Méthodes basées sur l'optimisation du volume de pâte.....	46
3.3.3 Méthodes basées sur l'optimisation du squelette granulaire	47
3.4 spécificité des compositions des BAP :	48
3.4.1 Un grand volume de pâte.....	48
3.4.2 Une quantité de fines importante	48
3.4.3 L'emploi de superplastifiants	48
3.4.4 L'utilisation d'un agent de viscosité	49
3.4.5 Un faible volume de gravillon	50
3.6 Propriétés des BAP à l'état frais.....	51
3.6.1 Fluidité	51
3.6.2 Homogénéité.....	52
3.7 Propriétés à l'état durci.....	53

3.7.1 Résistances mécaniques	53
3.7.2 Module d'élasticité.....	55
3.7.3 La résistance à la traction	56
3.7.4 Retrait.....	57
3.7.4.1 Retrait endogène.....	57
3.7.4.2 Retrait de séchage.....	58
3.7.5 Perte de masse.....	60
3.8 Comportement des bétons autoplaçants soumis à des hautes températures	62
3.8.1 Propriétés physico-chimiques.....	62
3.8.2 Aspect et stabilité thermique.....	62
3.8.4 Perte en poids.....	66
3.9.5 Propriétés mécaniques.....	67
3.9.5.1 La résistance en compression	67
3.10 Conclusion	69
CHAPITRE 4 :	73
CARACTERISATION DES BETONS	73
4.1 Introduction :	73
4.2 Matériaux de base utilisés :	73
4.2.1 Granulats :	73
4.2.2 Ciment:.....	74
4.2.3FillerS :	75
4.2.4Adjuvant :	76
4.3 COMPOSITIONS DES MELANGES RETENUES :	76
4.3.1 Méthode de formulation.....	76
4.3.2 FormulationS retenuEs	79
4.4 Fabrication et cure	79
4.4.1Fabrication	79
4.4.2 Cure :	80
4.5 Essais de caractérisation des BAP	80
4.5.1 Essais sur béton frais :	80
4.5.1.1 Essai d'étalement	80
4.5.1.2 Essai de la boîte en L	81
4.5.1.3Essai V-funnel :	82
4.5.1.4 Essai de stabilité au tamis.....	84
4.5.1.5 airs occlus	85

4.5.1.6 Densité	86
4.5.2 Essais sur béton durci :	86
4.5.2.1 Essai de compression :	86
4.5.2.2 Essai de traction par flexion	87
4.5.2.3 Module d'élasticité.....	89
4.6 Conclusion :	90
CHAPITRE 5 :	92
COMPORTEMENT THERMOMECHANIQUE DES BAP	92
5.1 Introduction.....	92
5.2 Rappel des matériaux élaborés :	92
5.3 Présentation des programmes expérimentaux :	93
5.3.1 Traitement thermique :	93
5.3.1.1 Introduction.....	93
5.3.1.2 Préparation des éprouvettes :	94
5.3.1.3 Conditions d'étude	94
5.3.1.4 Disposition dans le four :	94
5.3.2 Variation dimensionnelle et pondérale	95
5.3.2.1 Introduction :	95
5.3.2.2 Moules et éprouvettes utilisées :	96
La mesure du retrait s'effectue sur éprouvette prismatique, de dimensions 7x7x28 cm.....	96
5.3.2.3 Mode de mûrissement :	96
5.3.2.4 Essais de Retrait et de perte en poids :	96
5.3.3 Propriétés mécaniques résiduelles à haute température :	97
5.3.3.1 Introduction :	97
5.3.3.2 Cure :	98
5.3.3.3 Cycle de chauffage :	99
5.3.3.4 Choix des températures d'essai.....	99
5.3.3.5 Essais macrostructuraux :	99
5.4 Conclusion :	100
CHAPITRE 6 :	101
RESULTATS ET DISCUSSIONS	101
6.1 INTRODUCTION :	101
6.2 FORMULATION TESTEES :	101
6.3 PERFORMANCES MECANIQUES SOUS TRAITEMENT THERMIQUE :	101

6.3.1:Résistance en compression :	101
6.3.1.1 Sans traitement thermique (témoin)	101
a. Effet des paramètres de composition :	102
b. Influence de l'âge :	103
6.3.1.2 Influence de la température :	104
6.3.2 Résistance de la traction par flexion :	107
6.3.2.1. Sans choc thermique :	107
a. Influence de paramètres de composition :	107
c. L'influence de l'âge du béton :	107
6.3.2.2 Influence de la température :	108
6.3.3 Module d'élasticité :	109
6.3.3.1 sans traitement thermique :	109
6.3.3.2 avec traitement thermique :	111
6.4 VARIATIONS DIMENSIONNELLES ET PONDERALES	113
6.4.1 Avant choc thermique :	113
6.4.1.1 Variations dimensionnelles :	113
6.4.1.2 Variations pondérales :	117
6.4.1.3 Relation retrait perte en poids :	120
6.4.2 Choc thermique :	121
6.4.2.1 Variations dimensionnelles :	121
6.4.2.2 Variations pondérales :	123
6.4.3 Après choc thermique :	124
6.4.3.1 Variations dimensionnelles :	124
6.4.3.2 Variations pondérales :	127
6.4.3.3 Relation retrait/perte en poids :	129
6.5 PROPRIETES MECANIQUES A HAUTES TEMPERATURES :	131
6.5.1 Résistance à la compression :	131
6.6 CONCLUSION :	133
Conclusion générale et perspectives :	135
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES:	139

INTRODUCTION GENERALE :

Au milieu des années 80, des efforts importants ont été entrepris au Japon afin d'améliorer la durabilité des ouvrages en béton grâce à des mesures appropriées. A l'origine d'une durabilité insuffisante on retrouvait souvent un compactage du béton non conforme aux règles de l'art. Ce constat fut le point de départ pour le développement du béton autoplaçant.

Ces matériaux initialement appelés Bétons Hautes performances, sont aujourd'hui connus sous le nom de bétons autoplaçants, bétons autocompactants, ou bétons autonivellants, selon les applications [Okamura 03]. Ils connaissent à l'heure actuelle un essor considérable en Europe et aux Etats-Unis et prendront dans les années à venir une place de plus en plus importante dans les autres pays comme l'Algérie. Les domaines d'application des BAP sont nombreux, mais leur utilisation implique une évolution ou une adaptation des moyens et des techniques traditionnellement employées.

Donc l'objectif essentiel de notre équipe de recherche au LMDC est de vulgariser la technique de béton autoplaçant au cahier de charges Algériens. Plusieurs recherches sont lancées, commençant par l'utilisation des matériaux locaux pour la conception de ces bétons (thèse Bensebti 08), en passant par l'étude de leur comportement différé (Chabane 08, Benkechkeche 12), considérés comme des nouveaux bétons en Algérie. La présente recherche est consacrée pour l'étude de l'effet de la température sur les propriétés des bétons autoplaçants.

Le climat algérien se distingue par la différence de la température qui arrive à plus de 40°C en été et des températures négatives en période d'hiver. L'élévation de la température au cours de mise en œuvre influence significativement la maturation du béton et par conséquent le comportement des bétons, essentiellement les propriétés mécaniques.

D'autre part peu de travaux dans la littérature qui traite l'influence de la température sur la maturation des BAP. Ainsi le déclenchement des plusieurs accidents (feu) dans les constructions, rend l'étude des BAP à haute température indispensable.

D'autre part, compte-tenu du volume important de pâte présent dans ces bétons (lié aux quantités importantes de fines préconisées), comment se comportent les BAP à des températures élevées ? Du point de vue de la maturation, et plus précisément de l'évolution de la résistance et module d'élasticité suite à un traitement thermique ? De plus, des questions se posent quant aux déformations différées (variations dimensionnelles) des BAP?

Les objectifs de la présente recherche concernent l'étude de l'influence de la température sur le comportement des BAP à différentes échéances, commençant par les premiers jours et exactement l'effet du traitement thermique (cure) sur les propriétés mécaniques, passant à moyen terme (28 jours) pour les soumettre à un choc thermique (de 150°) pour suivre l'évolution des variations dimensionnelles et pondérales avant et après ce choc thermique. Et enfin la soumission des BAP à hautes températures (jusqu'à 400°) et de quantifier les pertes de résistance à 90 jours.

Ce mémoire de thèse s'articule autour de deux grandes parties. Dans la première partie, une analyse bibliographique a pour rôle de répertorier et de synthétiser les documents existants qui touchaient de près ou de loin à notre thème de recherche. Le premier chapitre présente une synthèse bibliographique, sur les matériaux cimentaires et sur leurs paramètres microstructuraux, qu'à leurs propriétés mécaniques et du comportement hydromécanique, alliant à la fois les constatationsexpérimentales et les modélisations adoptées dans la littérature, est effectuée. Cette analysetente de relier la microstructure du matériau béton, à son comportement macroscopique.

Le deuxième chapitre de cette partie présente une synthèse des travaux réalisés sur l'évolution des propriétés physiques et mécaniques des bétons soumis à hautes températures. Les résultats présents dans la littérature sont variés, parfois contradictoires et confus.

Tout d'abord, nous décrivons l'évolution de la composition chimique et de la microstructure du béton sous l'effet de la température. Nous illustrons ce chapitre en présentant des résultats d'études expérimentales. Dans la suite de ce chapitre, l'évolution des propriétés mécaniques en fonction de la température élevée est analysée. Les évolutions de la résistance en compression, résistance en traction et module d'élasticité, sont présentées en fonction des différents paramètres influençant ces comportements. En outre, le comportement au feu est abordé sous l'angle du phénomène de l'écaillage.

Le troisième chapitre présente par conséquent l'état de l'art au moment où a débuté cette étude ainsi que l'actualisation progressive des recherches menées. Les informations présentées relatent plusieurs aspects concernant la caractérisation des propriétés intrinsèques aux BAP et des résultats nécessaires à l'évaluation des résultats obtenus dans nos essais expérimentaux. Les particularités de la composition des BAP et leur caractérisation à l'état frais (essais spécifiques) sont ainsi abordées puis des données publiées sont citées dans les domaines des propriétés mécaniques (instantanées et différées), ainsi une synthèse des travaux

réalisés sur le comportement des BAP à haute température sont présentés. Ce chapitre a permis d'établir les bases (choix des facteurs et des réponses) 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 est consacrée à l'étude expérimentale. Tout d'abord, les deux derniers chapitres se focalisent sur deux problématiques inhérentes aux bétons, la conception des bétons autoplaçants en utilisant des matériaux locaux et l'influence de la superposition (couplage) des paramètres de composition/température sur le comportement des BAP. Le premier chapitre de cette partie est consacré pour définir les matériaux utilisés, présentant les principes de la méthode de formulation utilisée. La caractérisation à l'état frais des BAP (l'étalement, la boîte en L, V- funnel et la stabilité au tamis) est réalisée ainsi que l'air occlus et la densité. Et enfin des essais de compression, de traction par flexion et de module d'élasticité sont élaborés pour caractériser les BAP à l'état durci. Les protocoles expérimentaux qui nous ont permis de mesurer toutes les grandeurs mécaniques (résistances mécaniques, module d'élasticité statique, déformations différées sans charge sur béton durci) sont exposés en deuxième chapitre. Un bref rappel sur les formulations étudiées et leur caractérisation à l'état frais et durci. Ensuite chaque partie de programme est décrite : leur conditionnement, cycle de chauffage, température, essai à réaliser. En dernier chapitre, les résultats obtenus sont exhibés, il débute par montrer l'influence du traitement thermique sur les propriétés mécaniques en fonction des paramètres de composition et de l'âge. Ensuite, les propriétés résiduelles des bétons soumis à des températures jusqu'à 400°C, sont analysées. Et enfin, on présente les résultats de l'évolution des variations dimensionnelles et pondérales avant et après un choc thermique.

Les conclusions générales clôturent ce mémoire, en synthétisant les principaux résultats sur le comportement des BAP du point de vue mécanique et variation dimensionnelle et pondérale en présentant l'effet de l'élévation de la température sur le comportement des BAP. Des perspectives de recherche sont aussi présentées pour continuer à apporter de nouvelles informations pertinentes à ces nouveaux matériaux du génie civil.

CHAPITRE 1 :

COMPORTEMENT HYDRIQUE ET MECANIQUE DES MATERIAUX A MATRICE CIMENTAIRE

1.1 INTRODUCTION :

Le béton est un matériau hétérogène, conséquence d'une large étendue granulométrique des inclusions (granulats, sable, grains d'anhydre et de fines), ainsi les pores dont les tailles caractéristiques présentent une distribution multi échelles d'hétérogénéité d'un béton.

Le suivi du développement d'un matériau cimentaire dévoile l'existence de plusieurs phases pendant lesquelles le matériau se transforme d'une suspension liquide initiale jusqu'à un squelette solide résistant.

Une grande partie des caractéristiques mécaniques et de durabilité des matériaux à matrice cimentaire provient des performances du ciment hydraté, matrice cohésive qui enrobe le squelette granulaire.

Ce chapitre est divisé en deux parties. Tout d'abord, nous décrivons la pâte de ciment, de son hydratation jusqu'aux principales approches pour modéliser sa microstructure. La deuxième partie, aborde la structure hydrique des matériaux testés par une caractérisation de leur porosité et de la distribution de cette dernière. Après avoir présenté les différents rôles et états de l'eau au sein de ces matériaux.

1.2 STRUCTURATION DES MATERIAUX CIMENTAIRES :

Les bétons sont des mélanges de granulats, de sable, de ciment et d'eau. Ils sont très utilisés dans la construction. Les granulats et sables ont des comportements généralement stable dans le temps, par conséquent c'est la pâte de ciment que va dépendre le comportement d'un béton.

1.2.1 HYDRATATION DU CIMENT :

Quatre constituants principaux, aux cinétiques d'hydratation différentes et évolutives au cours du temps, se retrouvent en effet systématiquement dans la composition du ciment :

60 à 65% - **C3S** = $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ - silicate tricalcique ($\text{Ca}_3[\text{SiO}_4]\text{O}$ - alite)

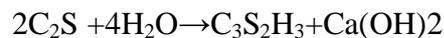
20 à 25% - **C2S** = 2CaO.SiO2 - silicate bicalcique (β Ca2[SiO4] -bélite)

8 à 12% - **C3A**= 3CaO.Al2O3 - aluminate tricalcique (C3[Al2O6] - célit)

8 à 10% - **C4AF**=4CaO. Al2O3. Fe2O3 - alumino-ferrite tétracalcique

L'ajout de l'eau au ciment anhydre engendre une hydratation de ces constituants, qui deviennent alors très peu solubles ; ce qui aboutit à la création d'un liant stable et résistant d'un point de vue mécanique.

La réaction principale de l'hydratation du ciment peut être présentée de façon simplifiée :



Les deux hydrates principalement formés sont les Silicates de Calcium Hydratés de la forme C3S2H3, notés « CSH » et la Portlandite Ca(OH)2 symbolisée « CH ». D'autres composés mineurs sont aussi formés durant l'hydratation, tels que des hydroxydes d'aluminium, des aluminates de calcium hydratés ou de l'ettringite [Baroghel 94].

Le C-S-H (ou gel de C-S-H) est l'hydrate principal du ciment Portland. Il est responsable de la structuration de la pâte de ciment durcie. Les surfaces du gel de ciment sont très attractives. Elles adhèrent entre elles et avec les autres éléments constitutifs du béton (sable, granulats, portlandite ...), ce qui explique le rôle de « colle » du ciment.

1.2.2 STRUCTURATION D'UNE PÂTE DE CIMENT

De nombreux chercheurs se sont intéressés à l'évolution de la prise, ou plus principalement à la transition du fluide au solide [Barcelo 01] et [Benboudjema 02]. Ce phénomène peut être décomposé en quatre phases, représentées à la Figure 1.1 [Benboudjema 02]. Cette description se base sur l'analyse des résultats obtenus par méthode ultrasonique combinée à des mesures de retraits chimique et externe.

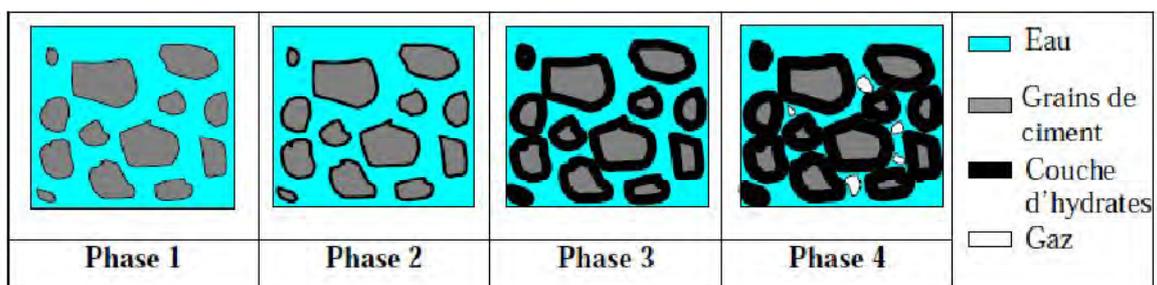


Figure 1.1 : Structuration d'une pâte de ciment [Barcelo 01].

Selon [Benboudjema 02] les quatre phases sont :

- Phases 1 et 2

Les grains de ciment anhydre sont isolés dans la phase liquide durant les phases 1 et 2. On remarque l'amorçage de l'hydratation. Le mélange étant liquide, ne peut pas s'opposer aux variations volumiques engendrées par la contraction Le Chatelier. L'étendue de cette période dépend du rapport E/C : elle est généralement de courte durée pour de faibles rapports E/C.

- Phase 3

Les hydrates se développent autour des grains de ciment anhydre créant progressivement une phase « solide » et un réseau capillaire interconnectés. Un squelette continu apparaît, c'est le seuil de percolation qui correspond au début de prise. La réaction d'hydratation étant continue, elle impose au matériau une variation volumique, qui est localement gênée par les formations solides.

- Phase 4

Durant cette phase, les variations volumiques dues à l'hydratation sont plus grandes que les déformations susceptibles d'être supportées par le squelette. Ainsi, de la vapeur d'eau apparaît dans les pores capillaires afin de compenser les contraintes liées au développement de la dépression capillaire.

Les produits d'hydratation remplissent petit à petit les capillaires, ce qui permet au matériau de se densifier. Le réseau poreux est alors de moins en moins interconnecté. L'accroissement des hydrates implique une augmentation du volume de micropores (pores de gel). Dans ces micropores, il reste de l'eau emprisonnée.

1.2.3. LES PORES DANS LA PÂTE DE CIMENT HYDRATÉE

La porosité globale d'une pâte de ciment représente en moyenne 28% du volume total du matériau (pour un rapport E/C = 0,5) [Verbeck 69]. Les limitations concernant les dimensions de pores observables sont dues soit aux protocoles expérimentaux porosimétrie mercure [Verbeck 69], par isotherme d'adsorption [Diamond 76] ou par pycnométrie à l'hélium [Thomas 98], soit aux traitements des données (il est très important de signaler que l'utilisation de ces techniques suppose une forme de pore régulière, tandis que les pores réels des matrices cimentaires forment un réseau d'une grande irrégularité géométrique. Les courbes de distribution de la porosité obtenues, sont donc issues d'un calcul approximatif.

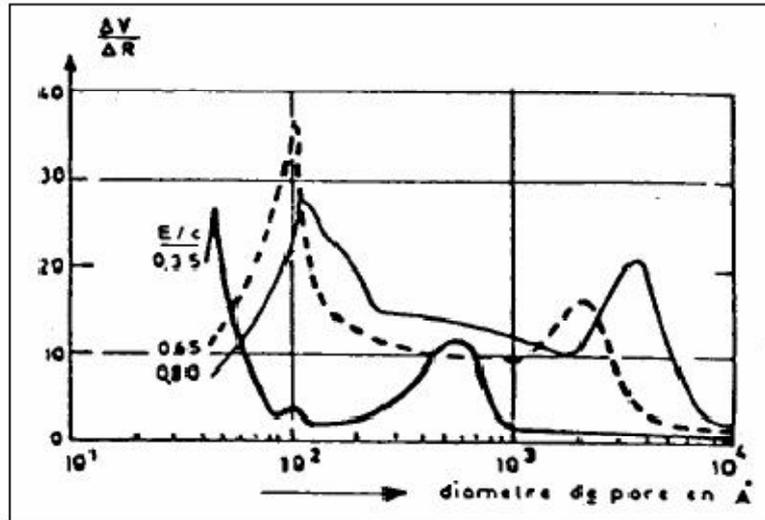


Figure 1.2 : Distribution (en volume cumulé) des pores dans une pâte de ciment durcie à différents âges [Diamond 76]

La Figure 1.2 met en évidence une répartition bimodale de la porosité au sein des pâtes de ciment. Ceci nous amène à définir deux types de pores :

- les premiers, appelés capillaires et dépendent fortement du rapport E/C, correspondant au pic des grands diamètres (entre 5 nm à 1 µm) sur les courbes de Verbeck et Helmuth [Verbeck 69]. Le volume total et la dimension de ces pores, conditionnent la perméabilité du béton et, par suite, les échanges hydriques avec le milieu extérieur.
- Les seconds sont associés au pic des petits diamètres (diamètres < 4 nm) et sont généralement peu affectés par le rapport E/C. Ce type de pores est une caractéristique intrinsèque des hydrates formés et influence peu la perméabilité du béton.

Sur la Figure 1.3, on remarque l'influence du rapport E/C sur l'évolution de la porosité capillaire. On constate que pour un même volume de vides capillaires et pour un âge donné, le rayon maximal des pores remplis d'eau est beaucoup plus faible pour un rapport E/C = 0,4 que pour un rapport égal à 0,6.

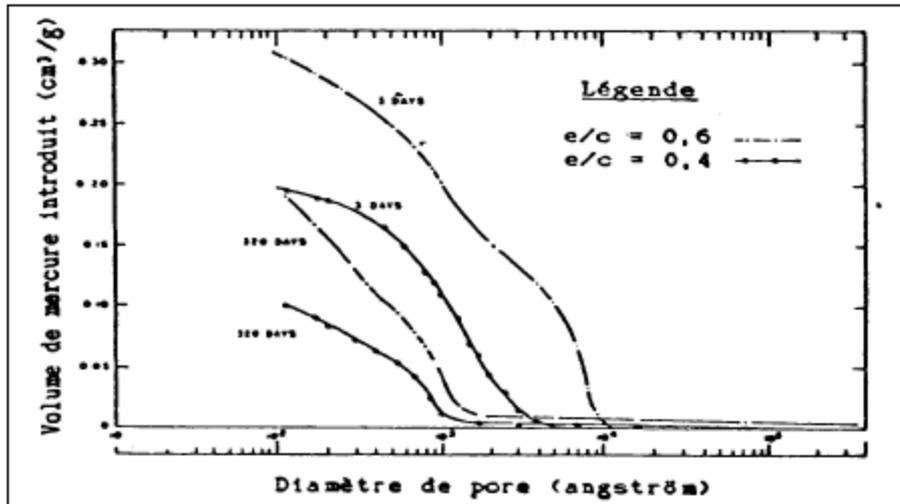


Figure 1.3 : Courbes de distribution de la porosité pour différents rapports E/C
[Verbeck 69]

Dans une pâte de ciment, on peut également observer des pores d'air occlus, qui sont des défauts de mise en œuvre (lors du malaxage et du coulage) et dont les diamètres sont supérieurs à 1 mm. Ces vides ne sont généralement pas remplis d'eau.

1.3 LES DIFFERENTS ETATS DE L'EAU DANS LA PATE DE CIMENT :

L'eau est un élément essentiel de la microstructure des matrices cimentaires, elle participe au développement des propriétés mécaniques et physiques du béton.

Différents auteurs ont proposé des classifications des différents états de l'eau dans la pâte de ciment en général et dans l'unité élémentaire des C-S-H en particulier

L'eau ainsi associée se trouve sous trois formes distinctes selon leurs énergies de liaison avec le solide :

1.3.1 EAU CAPILLAIRE :

Une partie de l'eau contenue dans les matériaux cimentaires se trouve sous forme de condensat dans des pores capillaires, au-delà des couches d'eau adsorbées. Ces pores résultent principalement de l'eau présente entre les grains de ciment qui est consommée pour former des hydrates. Le volume de ces pores tend donc à diminuer à mesure que l'hydratation progresse, cette eau est considérée comme libre et évaporable entre 30 et 120°C. Mais, si la vitesse de montée en température est élevée, la vapeur n'arrive pas à s'échapper de

l'échantillon [Khoury83]. Seulement 3 % de l'eau s'évapore de l'échantillon chauffé à une vitesse de montée en température de 1°C /min à 100°C, tandis qu'avec une vitesse de 0,2°C/min la quantité d'eau évaporée à cette température atteint 9%.

1.3.2 EAU ADSORBÉE ET CHIMIQUEMENT LIÉE :

L'eau consommée durant les réactions d'hydratation du ciment est combinée avec d'autres composantes telles que calcium ou silice. En considérant le modèle lamellaire du gel de CSH, l'eau dans le CSH peut apparaître sous trois formes : interfeuille, interlamellaire, hydroxylique.

- l'eau hydroxylique :

Elle est constituée d'hydroxyde OH⁻ qui sont liés soit à des atomes Si soit à des atomes Ca et qui font partie intégrante du solide. Ces molécules sont situées sur les deux faces des feuillets.

L'eau ainsi combinée représente environ 23% de la masse du ciment qui a réagi et possède une densité moyenne de 1,2. Ces caractéristiques font d'elle un composant très stable qui ne s'évapore qu'assez difficilement. Elle ne peut être « déplacée » que sous de sévères conditions de séchage (au four).

- L'eau interlamellaire :

C'est l'eau des micropores, adsorbée à la surface externe des particules (lamelles). L'eau interlamellaire est une eau structurée, soit fixée sur un hydroxyle isolé soit liée à d'autres molécules d'eau. Les épaisseurs des espaces entre les feuillets du gel sont inférieures à 20 Å. En sachant que l'épaisseur moyenne d'une couche de H₂O est de 2,6 Å, nous pouvons observer que 6 couches d'eau peuvent être adsorbées à la surface des lamelles (Sierra 1974) repris par [Gaweska 04].

- l'eau interfeuille :

Elle est située entre les lamelles constituant le C-S-H et sa liaison avec le solide se fait à l'aide des liaisons hydrogènes. Cette eau y est présente sous forme structurée et a une densité moyenne de 1. L'arrangement moléculaire vient du fait que ces lamelles exercent un champ de forces sur l'eau présente dans les espaces interlamellaires à faibles dimensions. Si le degré d'humidité du milieu devient inférieur à 50%, cette eau adsorbée peut être facilement retirée.

Dans ce modèle, les C-S-H se présentent sous la forme de fibres formées de lamelles enroulées sur elles-mêmes. La lamelle de C-S-H est considérée de forme prismatique et ses dimensions

sont environ de $100\ 000 \times 5000 \times 300\ \text{nm}^3$ (estimées à partir de mesures au microscope électronique à balayage, [Hansen 86]). Chaque lamelle est constituée de 2 à 4 feuillets simples mal cristallisés (Figure 1.4), séparés par des espaces interfoliaires de 150 à 300 nm environ [Regourd 82]. Ces feuillets sont capables d'avoir un mouvement relatif et la pénétration ou le départ de l'eau des espaces interfoliaires est possible.

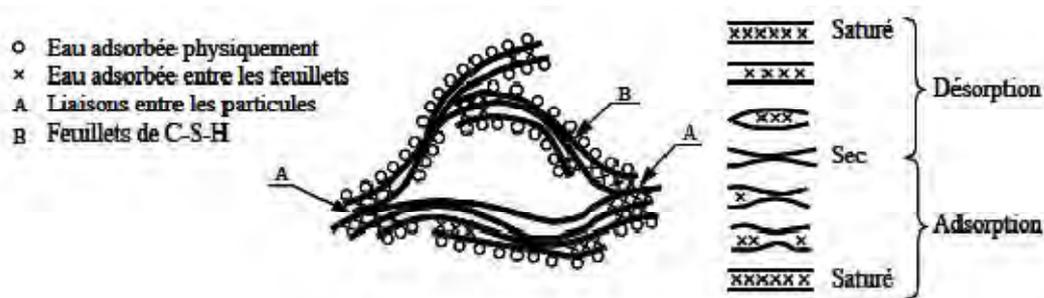


Figure 1.4 : Représentation schématique de la microstructure du gel de C-S-H selon le modèle de Feldman et Sereda (1968). cité par [Benboudjema 02]

1.4. INTERFACE PÂTE DE CIMENT/GRANULATS :

L'interface pâte de ciment/granulat est souvent décrite comme une zone dont l'épaisseur, variable de 10 à 50 μm . Cette zone présente généralement une forte porosité ce qui induit des caractéristiques mécaniques médiocres et une fragilité particulière. Il est souvent avancé que l'adhésion entre les granulats et la pâte de ciment conditionne la résistance mécanique et les propriétés de transfert du béton.

Basheer et al. [Basheer05] ont étudié l'effet de la taille des granulats et de leur distribution granulaire sur la microstructure de la zone d'interface de bétons matures soumis au séchage pendant 14 jours. Ils ont utilisé des granulats de taille 10 et 20 mm, en maintenant un rapport granulat/ciment constant et en faisant varier la quantité relative de grains de 10 et 20 mm de diamètre. Leurs résultats indiquent que l'augmentation du dosage en granulats de 20 mm provoque une augmentation significative de la porosité et de l'épaisseur de la zone d'interface. La diminution du rapport E/C conduit à un rétrécissement de la zone d'interface citant les travaux de Cwirzen et Penttala [Cwirzen 05], où ils ont trouvés que l'épaisseur de la zone d'interface de bétons à hautes performances âgés de 28 jours passe de 40 μm à moins de 5 μm lorsque le rapport E/C diminue de 0,42 à 0,30.

De leur part, Elsharief et al. [Elsharief 03] ont mis en évidence que l'effet du rapport E/C sur les propriétés de la zone d'interface dépend de la taille des granulats. Ils ont observé que pour

des granulats fins (150-300 μm) la diminution du rapport E/C (de 0,55 à 0,40) élimine presque totalement la zone d'interface. Pour des granulats plus grossiers (2,36 à 4,75 mm), la diminution de rapport E/C ne modifie pas de façon significative la porosité de la zone d'interface.

Pour Diamond et Huang [Diamond01], la différence de porosité entre la zone d'interface et le cœur de la pâte s'affaiblit progressivement à mesure que des cristaux de portlandite et des CSH remplissent la zone d'interface. Ils observent, qu'à l'âge mûr, il n'existe qu'une faible différence entre la porosité de la zone d'interface et le cœur de la pâte. Vivekanandam et Patnaikuni [Vivekanandam 97] ont abouti à des conclusions différentes sur bétons à hautes performances. Selon eux, la zone de transition augmente de 8 μm à 13 μm entre 3 et 56 jours d'hydratation ; par ailleurs, ils notent également une très faible variation de l'épaisseur au-delà de 14 jours d'hydratation.

1.5 LE SECHAGE :

L'eau au sein des matériaux sous les formes citées précédemment est en équilibre avec les conditions ambiantes (pression, humidité relative, température) dans lesquelles l'échantillon est placé. Cet équilibre peut alors se produire dans le cas où ces conditions viennent à être modifiées.

L'exposition d'une structure en béton à une humidité relative environnante, inférieure à celle régnant au sein du matériau est à l'origine d'un déséquilibre hygrométrique. Ce déséquilibre se traduit par un mouvement de l'eau de l'intérieur du matériau vers l'extérieur, amenant au séchage de celui-ci. La prise en compte du transport de l'eau au sein du béton est d'une grande importance pour les matériaux à matrice cimentaire. En effet, la teneur en eau affecte considérablement l'évolution des déformations de retrait et de fluage. En outre, le séchage s'accompagne généralement d'effets structuraux, du fait du gradient de déformations induit. Ainsi, la connaissance des mécanismes du séchage est primordiale.

1.5.1 MECANISMES DU SECHAGE :

Au sein du matériau cimentaire se trouve une quantité d'eau libre qui peut s'évaporer lorsque le matériau est mis en contact avec un milieu dont l'humidité relative est inférieure à celle qui règne dans ce matériau. Le séchage fait intervenir de multiples mécanismes complexes, qui se produisent de façon plus ou moins couplés [Mainguy 01]. Les phénomènes de perméation, diffusion, adsorption-désorption, condensation-évaporation sont en effet mis en jeu dans la pâte de ciment (Figure 1.5).

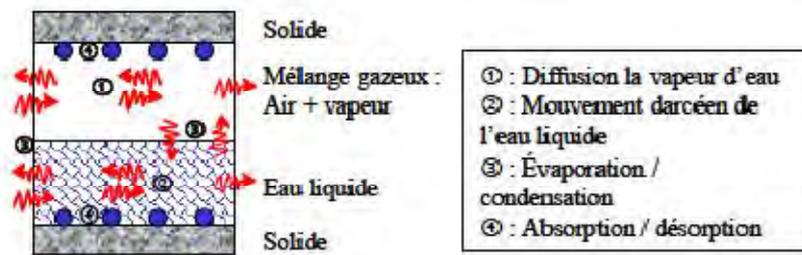


Figure 1.5 : représentation schématique des mécanismes de transport de l'eau au sein de la pâte de ciment [benboudjema 02]

Néanmoins, trois mécanismes prédominants de migration de l'eau se dégagent (Xi et al. 1994) cité par [benboudjema 02] :

La diffusion moléculaire :

Lorsque l'humidité relative est assez faible dans les pores, une seule couche d'eau est adsorbée à la surface (Figure 1.5). Dès que l'humidité relative augmente, le nombre de couches d'eau adsorbée augmente, induisant deux effets opposés. D'une part, l'espace disponible à la vapeur d'eau pour diffuser diminue et donc la résistance au transport augmente. D'autre part, les forces d'attraction de la surface du solide diminuent et donc la résistance au transport diminue. Lorsque l'humidité relative dépasse une valeur seuil, un ménisque se forme à chaque extrémité des cols reliant les macropores (Figure 1.6). Étant donné qu'une partie du transport de l'eau se fait sous phase vapeur, les processus de condensation et d'évaporation aux extrémités des cols accélèrent fortement le processus de diffusion.

Ce mécanisme est dominant pour des pores de dimension 50 nm – 10 µm (Xi et al. 1994) cité par [benboudjema 02], ce qui correspond typiquement à la taille des pores capillaires.

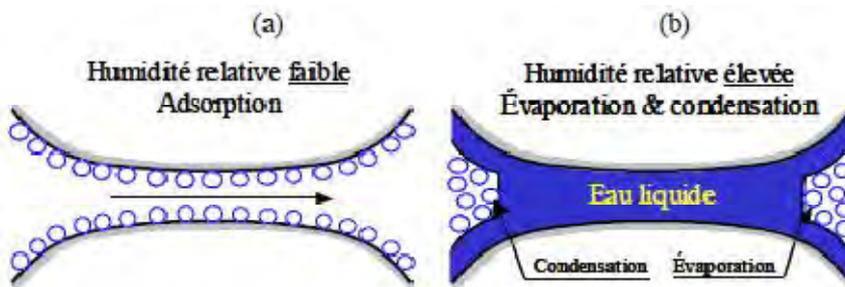


Figure 1.6 : la diffusion moléculaire (Xi 94) cité par [benboudjema 02]

La diffusion de Knudsen :

Les nanopores (de dimension inférieure à 50 nm) constituent une grande partie des pores de la pâte de ciment. Les dimensions de ces pores sont plus faibles que le libre parcours moyen des molécules d'eau (environ 80 nm). Les collisions entre les molécules, ainsi que les

collisions contre les parois des pores constituent alors la principale source de résistance à la diffusion des molécules d'eau (Figure 1.7).

La diffusion surfacique :

Ce mécanisme a lieu aussi dans les nanopores, où les molécules d'eau sont soumises aux champs de force des parois des pores. Le processus de transport est thermiquement activé. Il est gouverné par les sauts des molécules d'eau entre les sites d'adsorption (Figure 1.7). Ce mécanisme a lieu principalement lorsque l'eau présente est essentiellement adsorbée, ce qui est le cas lorsque l'humidité relative est faible (Xi 94) cité par [benboudjema 02] .

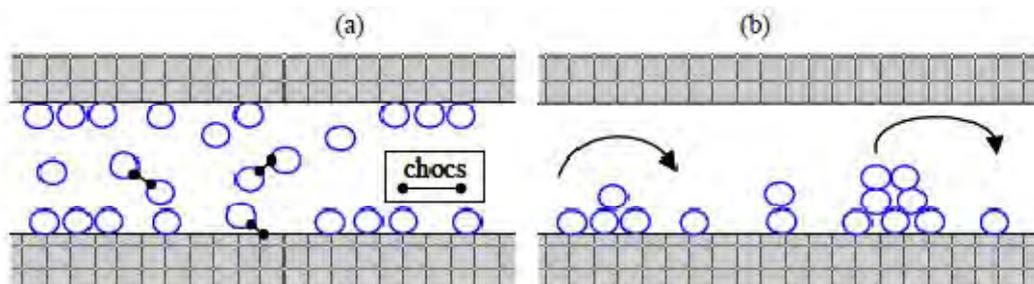


Figure 1.7 : la diffusion de knudsen (a) et la diffusion surfacique (b) (Xi 94) cité par [benboudjema 02]

1.5.2 L'EFFET DE SECHAGE SUR LES PROPRIETES MECANIQUE :

Pour des éprouvettes jeunes, l'effet de la fissuration induite par le séchage s'accompagne des effets d'inhibition de l'hydratation. En effet, la réaction d'hydratation s'arrête lorsque l'humidité relative descend en dessous de 70-80 % (Xi 94) cité par [benboudjema 02] . Par conséquent, une éprouvette préséchée au jeune âge sera prédisposée à avoir des propriétés mécaniques plus faibles. A cela s'ajoutent (et c'est le cas aussi des éprouvettes chargées tardivement) les effets des pressions existantes dans la pâte de ciment (osmotique, capillaire ou disjonction) qui peuvent jouer le rôle de « précontraintes » et donc modifier les propriétés mécaniques (Torrenti 1987) cité par [Benboudjema 02].

Les résistances mécaniques mesurées sur des éprouvettes séchées (en compression et en traction) sont toujours supérieures à celles mesurées sur des éprouvettes conservées dans l'eau. Néanmoins, on peut observer que les résistances mécaniques des éprouvettes séchées diminuent entre 56 et 84 jours.

Il est intéressant de noter que dans tout l'intervalle de l'humidité relative (0 – 100 %), [Kanna 98] ont observé en parallèle une forte diminution du module d'Young lorsque l'humidité relative décroît.

La figure 1.8 présente l'évolution du module de Young. Ces courbes sont données en fonction de la perte en poids des éprouvettes [Yurtdas 03].

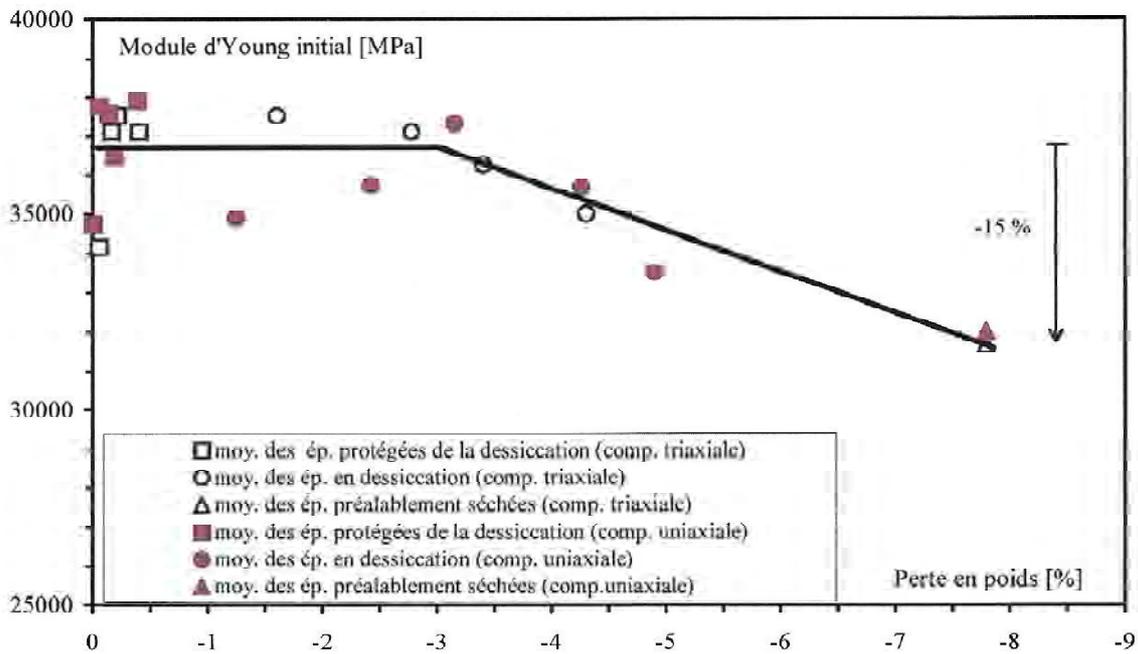


Fig. 1. 8 : Evolution du module de Young en fonction de la perte en poids d'un mortier à $E/C=0,5$ [Yurtdas 03]

Les tendances des coefficients élastiques montrent deux parties : une première pour une variation de masse inférieure à 3% où les coefficients restent constants et une seconde partie, pour des pertes de masse supérieures à 3%, qui présente une diminution jusqu'à l'état sec. Cette valeur « limite » de 3% se retrouve également sur la courbe qui relie le retrait et la perte de masse correspondant à l'apparition de la microfissuration. L'effet de compétition entre les effets structurels des gradients hydriques et la succion capillaire est alors mis en exergue : tant que les effets de la pression capillaire sont prépondérants, les propriétés élastiques n'évoluent pas. Une fois que la microfissuration, induite par les gradients hydriques, ne peut plus être compensée par l'état précontraint du matériau, les propriétés élastiques diminuent avec la microfissuration. Yurtdas conclut à l'existence d'un endommagement hydrique qui conditionne l'endommagement mécanique.

1.5.3 INFLUENCE DE CURE A TEMPERATURE ELEVEE SUR LES PROPRIETES MECANIQUES :

Des spécimens produits d'un même mélange sont conservés à 1, 21, 43°C par Volz et al. Testés à la compression à l'âge de 1, 3, 5, 7, 28j, les résultats obtenus montrent que la relation résistance maturation qui sont obtenus après la conservation des spécimens à température

normale après exposition à une cure à différentes températures pendant 6, 18, 30, 48h n'a pas changée. Volz et al expliquent que la température de cure appliquée 6h peut influencer le mouvement de la courbe maturité résistance. Et enfin ces variations de températures ne changent pas la courbe [Volz 81].

Alou et al ont étudiés des résistances en compression sur des cubes de 15cm pour un jour de cure à des températures de 4, 18, 31, 55°C. Aucun effet significatif sur la résistance n'est obtenu à basse température. Mais à la température élevée, un effet négatif est observé sur la résistance à 7 jours, une diminution considérable est remarquée Alou et al cité par [Topcu 11].

1.5.4 RETRAIT :

Après la prise, le béton, qui est devenu un solide poreux, va encore subir quatre formes de retrait d'origine hydrique (retrait endogène dû à l'autodessiccation) ou d'origine thermique (production de chaleur due à l'hydratation et échange thermique avec l'extérieur), le retrait de dessiccation (lié au séchage du matériau à partir de sa surface extérieure) et le retrait de carbonatation. Selon [Turcry 04], les différents types des retraits à l'état durci sont :

1.5.4.1 Le retrait thermique : Les réactions d'hydratation libèrent en fin de prise une certaine quantité de chaleur. Un élément en béton subit alors un échauffement, fonction des conditions d'échange avec le milieu extérieur. En découle une dilatation, suivie d'une contraction, qualifiée de retrait thermique, lorsque sa température diminue jusqu'à la température ambiante. A première vue, le retrait thermique ne devrait pas avoir de conséquence pour le béton, car la contraction n'est que le retour au volume initial, d'avant la dilatation (si, bien sûr, le coefficient de dilatation thermique est supposé constant).

1.5.4.2 Le retrait endogène ou d'autodessiccation : Nous avons vu dans la deuxième partie que l'hydratation du ciment s'accompagne d'une diminution de volume. Après la prise, l'hydratation se poursuit. Le retrait endogène est la conséquence macroscopique de la contraction d'origine chimique.

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

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

1.5.4.5 Influence de la composition

Le retrait de dessiccation dépend des paramètres de composition du matériau. Le rapport E/C (et donc la porosité) influence l'amplitude du retrait de dessiccation, comme le montrent les résultats expérimentaux de Ma *et al.* Voir figure 1.9, qui mesurent le retrait de dessiccation d'un mortier avec différents rapports E/C [Ma 07]

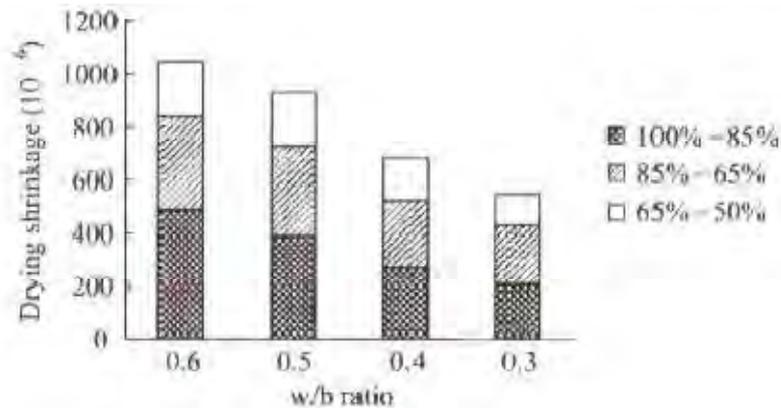


Fig. 1. 9 : Influence du rapport E/C sur le retrait de dessiccation [Ma 07]

La hausse du rapport E/C accroît les déformations de retrait de dessiccation. L'augmentation de la proportion d'eau libre au sein du réseau poreux, lui-même de volume plus important, conduit à une matrice cimentaire moins dense et plus sensible aux mouvements de l'eau.

Ainsi, sous l'effet de la pression capillaire, la matrice cimentaire présente une contraction locale plus importante et cela donne, à l'échelle macroscopique un retrait de dessiccation plus important. La nature du ciment est aussi un paramètre qui influence le retrait de dessiccation [Kanna98 ; Mokarem 05].

1.5.4.6 Influence de la température

L'augmentation de la température fait accroître la dépression capillaire. Ceci aura pour conséquence d'intensifier la contraction locale de la phase solide du matériau, ce qui donne à l'échelle macroscopique un retrait plus important et donc un risque de fissurations plus élevé. De la même manière, la pression de disjonction va évoluer avec la température. En effet, l'élévation de température diminue le nombre de couches d'eau adsorbée, ce qui fait diminuer la pression de disjonction, causant un retrait de dessiccation plus important.

1.6 CONCLUSION :

Le comportement mécanique des matériaux cimentaires dépend de l'état hydrique. En effet, tout comme la matrice cimentaire, la phase liquide du matériau reprend une partie des

charges appliquées à la structure. Par conséquent, la dessiccation influence les propriétés mécaniques.

A court terme, la résistance est dépendante de l'état hydrique et ainsi la sollicitation appliquée engendre une compétition entre les mécanismes de transferts hydriques et ceux liés au comportement mécanique du matériau. A long terme, le comportement différé du matériau est également influencé par la dessiccation.

La dessiccation des matériaux cimentaires influence leur comportement mécanique à court et long terme. A court terme, deux effets concurrentiels interviennent : la dépression capillaire et la microfissuration de séchage. L'augmentation de pression capillaire au sein du réseau poreux conduit à la précontrainte de la matrice cimentaire et par voie de conséquence améliore la résistance.

A long terme, le comportement mécanique est également influencé par la dessiccation. Les mécanismes mis en jeu sont fonction de la présence ou absence de gradients hydriques dans le matériau

CHAPITRE 2 :

EVOLUTION DU COMPORTEMENT DU BETON SOUMIS A DES HAUTES TEMPERATURES

2.1 INTRODUCTION :

Les modifications subies simultanément par la matrice cimentaire et les granulats engendrent une forte dégradation de la microstructure du béton. En plus d'effets directs de modifications de ces deux composants élémentaires, les incompatibilités de comportement de ceux-ci engendrent des dégradations spécifiques au matériau béton.

Dans ce chapitre on donnera une description du comportement du béton à haute température ; ceci nous permettra d'introduire les différents phénomènes qui sont entraînés lorsque le béton est soumis à des températures élevées.

2.2 MODIFICATION DE LA PATE DE CIMENT

Les modifications physico-chimiques qui se produisent suite à l'élévation de la température sont représentées par des pics sur les thermogrammes suite à une analyse thermogravimétrique ou thermo différentielle

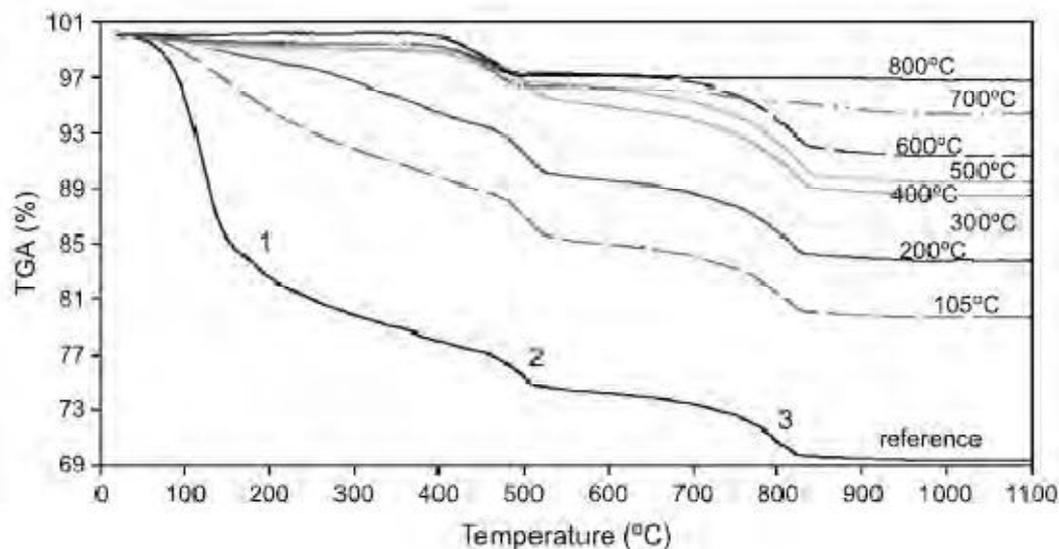


Figure 2.1: ATG d'une pâte de ciment soumise à de hautes températures [Noumowé 95]

Les principales modifications physico-chimiques se passent dans la pâte de ciment, en raison de la présence de l'eau sous différentes formes.

D'après la figure 2.1 on observe trois stades importants :

Entre 30 et 120 °C, l'eau libre et l'eau adsorbée s'évaporent, et au-delà de 105°C les hydrates commencent à se décomposer selon [Hilsdorf 67]. Cependant d'autres travaux, notamment ceux de Harmathy cité par [Menou 04], montrent que la déshydratation de la pâte de ciment débute dès l'évacuation de l'eau évaporable.

A 450°C décomposition de l'hydroxyde de calcium (CH) en chaux libre et eau suivant la réaction : $\text{Ca(OH)}_2 \rightarrow \text{CaO} + \text{H}_2\text{O}$

Et la 3^{ème} phase c'est à 700°C on observe une décomposition de CaCO_3 qui résulte de la présence de calcaire dans la pâte testée : $\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$ [Noumowé 95].

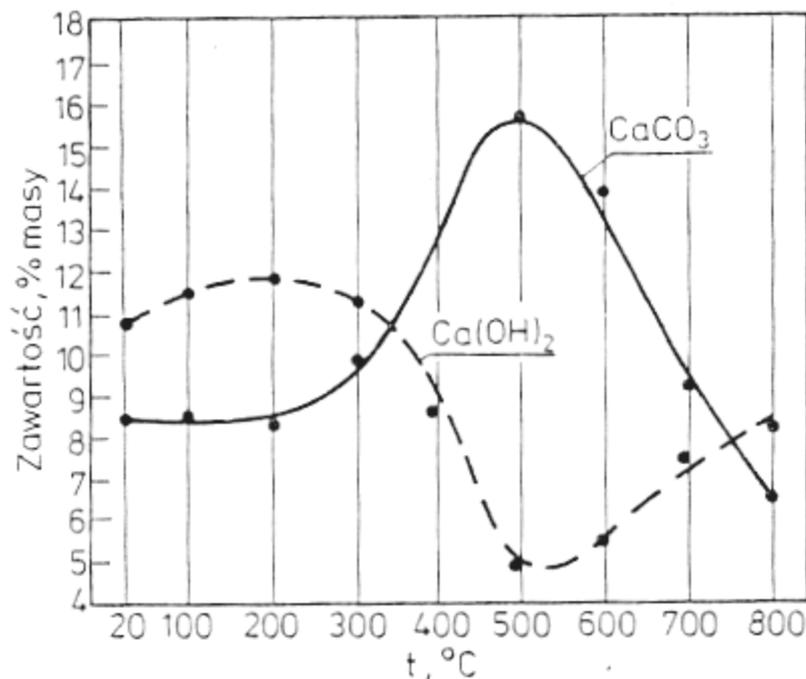


Figure 2.2: Evolution de la quantité des phases de la pâte de ciment Portland au cours d'un traitement thermique Piasta 96 cité par [gaweska04].

On trouve en parallèle à ces principales modifications, que les autres constituants de la pâte de ciment subissent des transformations au cours du traitement thermique. Piasta 1984 cité par [Hana 10] a remarqué, dans le cas des pâtes de ciment soumises aux températures élevées, une augmentation de la quantité de Ca(OH)_2 . On remarque sur la figure 2.2, qu'après 200 °C, la carbonatation de la portlandite s'accélère. Ceci se manifeste par la diminution de la quantité de Ca(OH)_2 corrélativement à l'augmentation de la quantité de CaCO_3 . Dès le début du

chauffage, les hydrates du ciment subissent des modifications. Les auteurs observent que la disparition de l'ettringite se produit avant 100°C, avec une déshydratation progressive des C-S-H jusqu'à 600°C. A 500°C, la portlandite se décompose en CaO et en eau. Cette transformation s'appelle la déshydroxylation.

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

2.4 EVOLUTION DES GRANULATS :

A haute température, les granulats se décomposent et subissent des transformations chimiques et minéralogiques importantes qui modifient les caractéristiques microstructurales du matériau. C'est essentiellement la structure minérale qui est modifiée avec la température. L'analyse thermique différentielle (ATD) permet de déterminer, par des pics endothermiques et exothermiques, les températures auxquelles une instabilité peut survenir dans les granulats. Prenons les granulats siliceux utilisés pour la fabrication du béton (minéraux: quartz, calcédoine, opale, silex). Dans la structure de ces minéraux contiennent de l'ordre de 20% d'eau combinée (Felliciti95) cité par [gaweska04]. Cette eau, entre 120 - 600°C est capable de se libérer partiellement en réduisant la résistance de ce matériau.

A 575°C, il se produit la transformation allotropique du quartz. A ces températures, le quartz- α se transforme en quartz- β sans changement de masse, cette transformation est accompagnée d'un gonflement du granulat de l'ordre de 1 à 1.4%.

Pour les granulats calcaires, la décarbonatation ($\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$) se produit entre 600 et 900°C. En phase de refroidissement, la chaux libre (CaO) formée lors de la réaction de décarbonatation, se combine avec l'humidité atmosphérique sous forme de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ avec une augmentation de volume de 44%. Cela entraîne une déstructuration du granulat. Le monoxyde de calcium relâché peut réagir avec de l'eau pour reformer de la portlandite. Cette réaction entraîne un gonflement, donc un accroissement de fissures dans le béton qui est sans doute à l'origine des diminutions de résistances observées.

2.5 DEGRADATION DE L'INTERFACE PÂTE-GRANULATS :

Dans les bétons, l'interface pâte-granulat est la partie la plus fragile, la plus poreuse et la mieux cristallisée. A haute température cette partie, appelée aussi l'auréole de transition, se dégrade progressivement en montant en température. Après 105°C, la matrice cimentaire

subitun retrait tandis que les granulats subissent une expansion. Ce comportement opposé engendre une microfissuration.

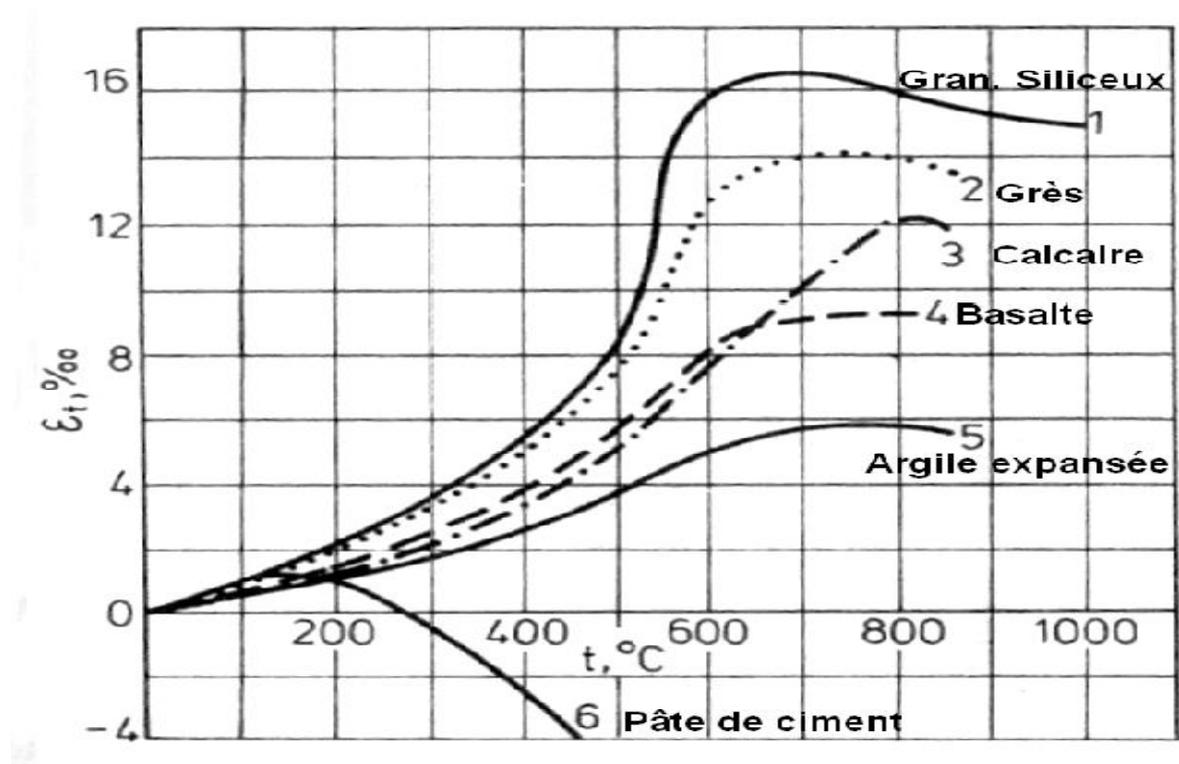


Figure 2.3: Déformations thermiques de bétons formulés avec différents granulats Piasta 96 cité par [gaweska04].

Ces deux évolutions créent à l'interface pâte-granulats des incompatibilités de déformations induisant des contraintes de traction au sein de la pâte de ciment et de compression au sein des granulats. Ceci est dû au départ de l'eau piégée dans les pores et liée chimiquement et au-delà de 120 °C, les phénomènes de déshydratation engendrent une détérioration rapide des liaisons créées entre les granulats et la pâte de ciment. Cela entraîne l'apparition de microfissures.

La présence de la fumée de silice réduit sa porosité et permet ainsi une bonne adhérence entre la matrice cimentaire et les granulats.

2.6 EVOLUTION DES PROPRIETES THERMIQUE (DEFORMATION THERMIQUE) :

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

- L'expansion thermique des constituants du béton
- Retrait de dessiccation du mortier

- Fissuration
- Détérioration physique des divers constituants

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

La Figure 2.4 montre les déformations thermiques de la pâte de ciment ordinaire (OPC), avec fumée de silice (Si), avec cendre volante (Lt), sans ajout pouzzolanique (Tr)) en fonction de la température.

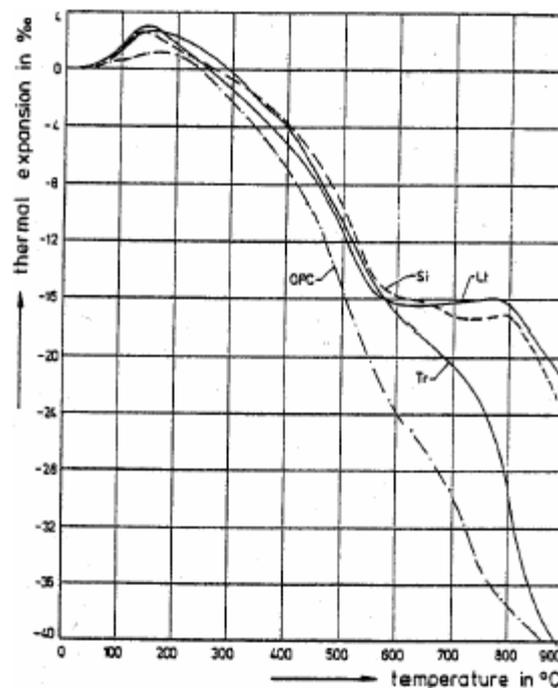


Figure 2.4 : Expansion thermique de pâte de ciment [Menou 04]

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

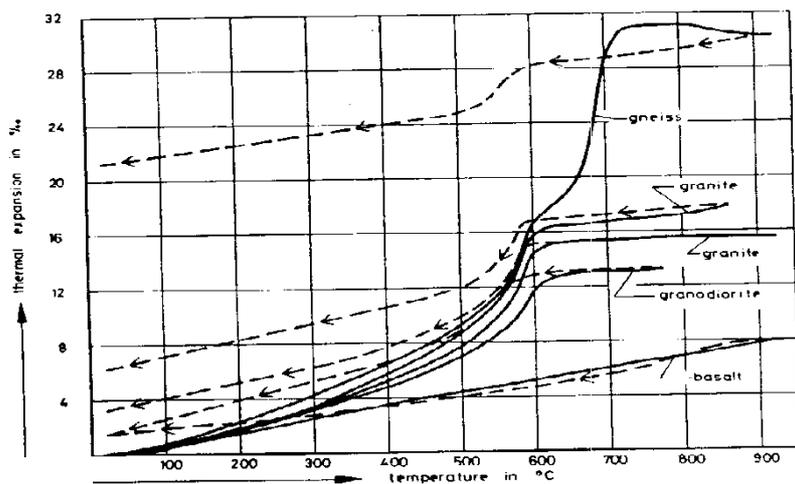


Figure 2.5: Expansion thermique de granulats [Menou 04]

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

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

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

Dans la figure 2.5, les courbes d'expansion des éprouvettes chargées et non chargées mécaniquement pendant le chauffage n'ont pas du tout la même évolution. La déformation mécanique se superpose à la déformation thermique et modifie le comportement de béton.

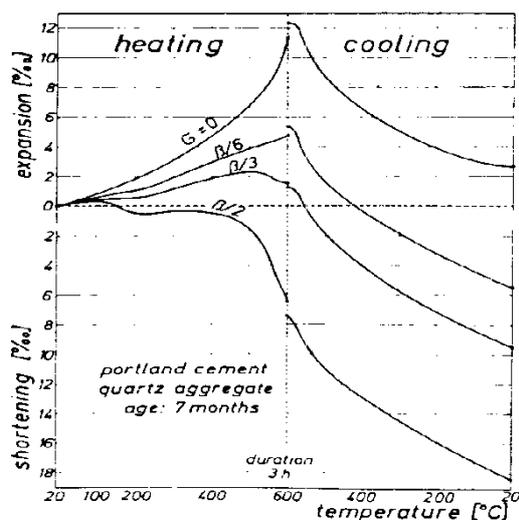


Figure 2.6 : Influence du chargement mécanique sur la déformation [Fisher 73]

2.7 EVOLUTION DES PROPRIETES PHYSICO-CHIMIQUES :

2.7.1 VARIATION DE LA POROSITE :

Deux méthodes sont utilisées pour la détermination de la porosité. La porosité à l'eau qui permet de déterminer le volume de la porosité accessible à l'eau, donc la porosité capillaire, sans la possibilité de déterminer les classes des pores selon leur diamètre. Une autre façon de mesurer, c'est la porosité au mercure. Cette technique permet de détecter les pores capillaires, dont la taille oscille entre environ 4 nanomètres et quelques microns (≈ 7500 nm).

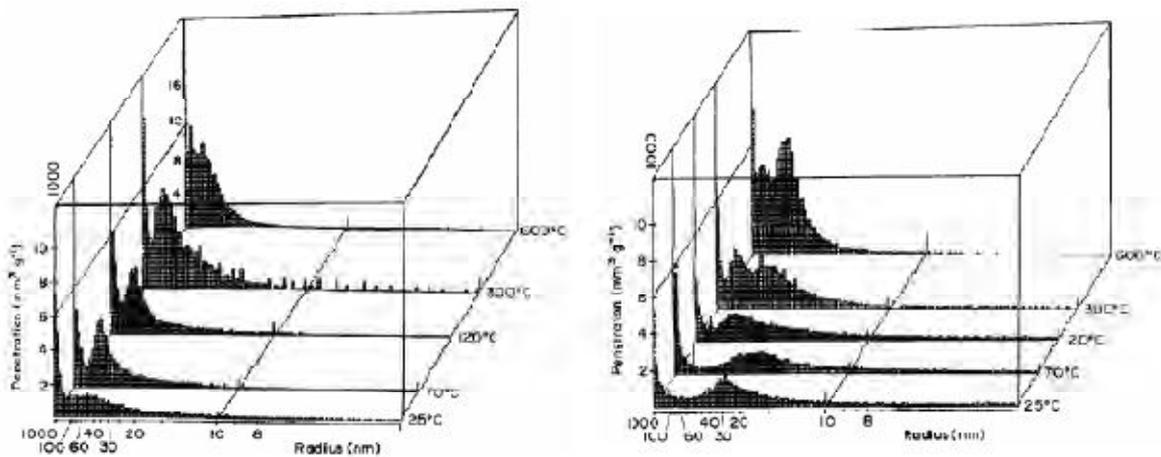


Figure 2.7 : distribution des pores- à gauche BO - à droite BHP [Noumowé 95]

[Noumowé 95] montre que la porosité augmente en fonction de la température voir figure 2.7. Cette augmentation est due en partie à l'augmentation du volume total de la dimension des pores ainsi qu'à la microfissuration engendrée par la dilatation différentielle entre la pâte et les granulats.

[Luo 00] établit une comparaison de la porosité totale de BO et de BHP avant et après exposition à une température de 800°C voir figure 2.8. [Luo 00] constate que la porosité augmente avec l'élévation de la température. Les trois BHP ont des comportements similaires, montrent une porosité plus faible que le BO. La majeure différence entre les deux types de bétons existe dans les micropores avec un diamètre inférieur à 0.4 μm

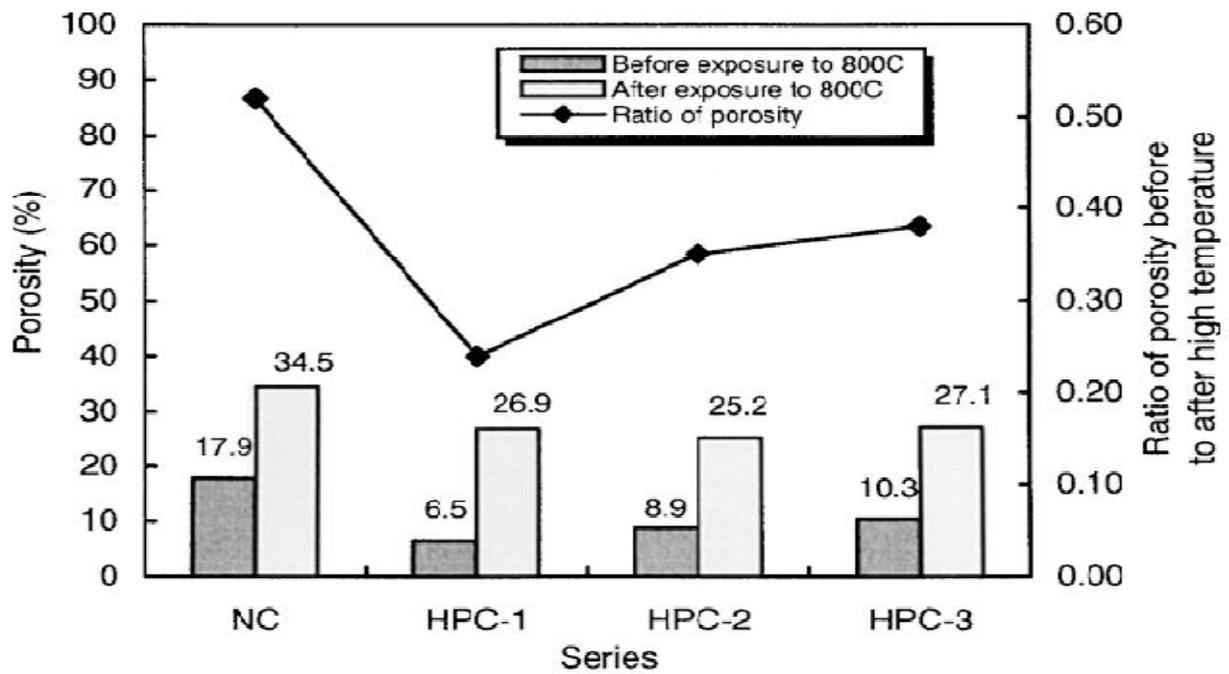


Figure 2.8: La porosité des bétons avant et après exposition à 800°C [Luo 00].

2.7.2 LA DENSITE APPARENTE :

La densité de béton montre seulement une dépendance légère de température comme indiqué dans la figure 2.9, qui est surtout en raison des pertes d'humidité pendant le chauffage.

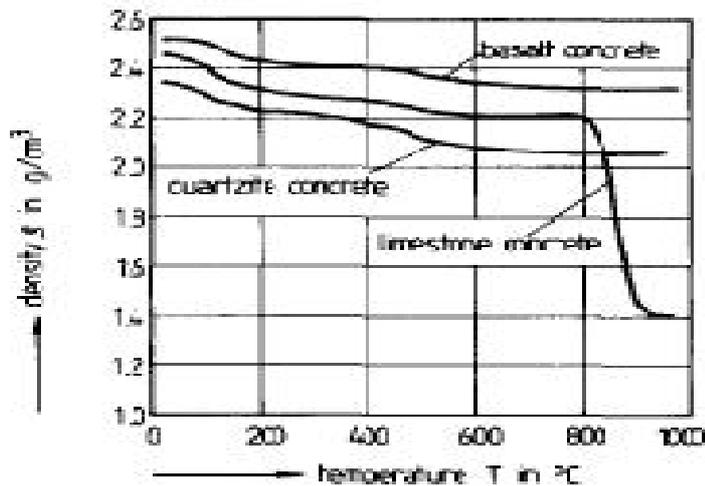


Figure 2.9 : Densité apparente des bétons [Schneider 88]

2.7.3 PERTE DE MASSE :

Pendant l'échauffement du béton, la masse du béton diminue à cause de l'évaporation de l'eau et la déshydratation progressive des hydrates de la pâte de ciment. Sur la Figure 2.10 nous pouvons observer une courbe caractéristique de la perte de masse durant l'échauffement.

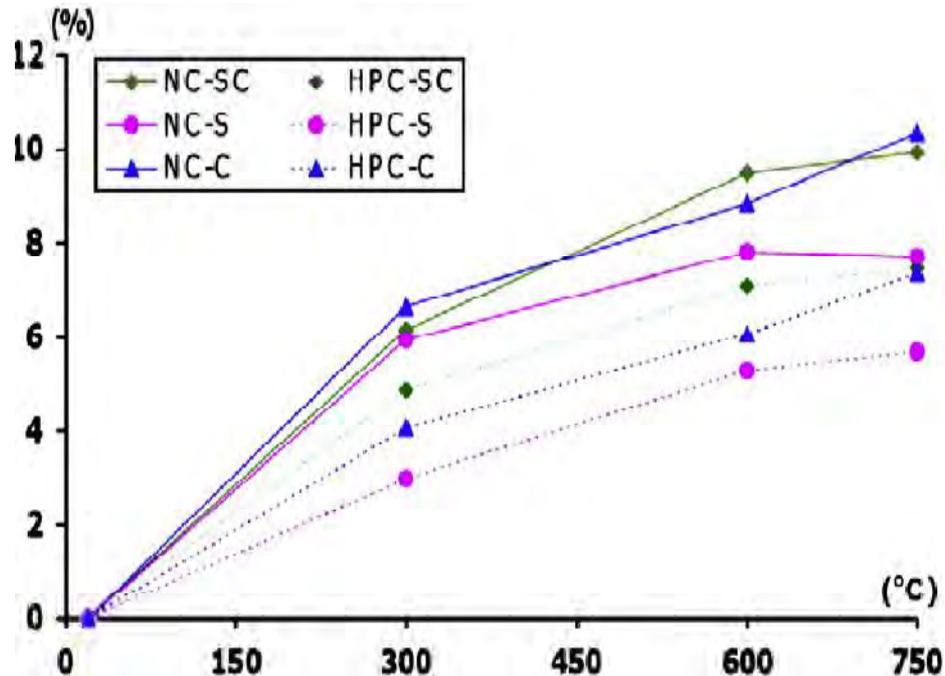


Figure 2.10 : perte de masse en fonction de la température [Zhi 11].

Durant l'échauffement du béton, la masse du béton diminue à cause de l'évaporation de l'eau et la déshydratation progressive des hydrates de la pâte de ciment et aussi la perte de masse des granulats. [Zhi 11] a trouvé que les quantités de perte massive de béton sont conformément aux résultats de la perte massive des granulats

La perte de masse sert à quantifier l'eau sortant du matériau. Il est possible d'étudier la cinétique du processus de séchage et de déshydratation. [Gaweska 04] observe que la perte de masse commence par la perte de l'eau capillaire présente dans la couche externe du matériau. Puis progressivement, les gaz et fluides présents dans le matériau sont mis en mouvement.

2.8 ÉVOLUTION DES CARACTERISTIQUES MECANQUES AVEC LA TEMPERATURE

Le béton est un matériau qui s'endommage sous l'effet de la température, il subit de fortes modifications physico-chimiques qui influencent l'évolution de ses propriétés mécaniques avec la température. La déshydratation, les réactions de transformation, la pression dans les

pores, la dilatation différentielle entre la pâte de ciment et les granulats engendrent des effets importants sur la résistance de béton à haute température.

2.8.1 RESISTANCE EN COMPRESSION

La résistance en compression à haute température dépend essentiellement de la composition initiale du matériau (type de granulat, rapport eau/ciment, liant, ajouts, ...). Plusieurs chercheurs ont étudié (Alessandra 08 ; Noumowé 95, 03 ; Persson 03...) l'influence de la température sur la résistance à la compression. On distingue ici les essais réalisés à chaud et ceux réalisés après refroidissement (figure 2.11). En effet, l'expérience montre que les éprouvettes à chaud ont une résistance en compression plus importante que les éprouvettes refroidies.

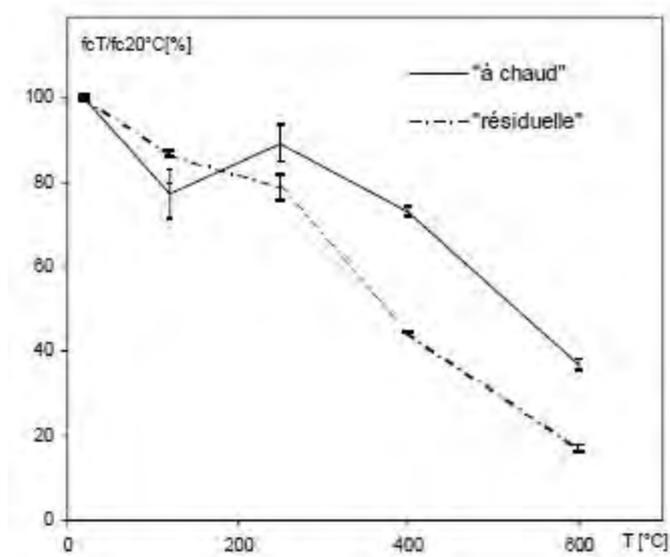


Figure 2.11 : la résistance à la compression de BHP à chaud et après refroidissement [gaweska 04].

Sur la figure 2.12, [Phan 03] a comparé la résistance à la compression en fonction de la température de chauffage de différents auteurs. Il observe pour la plupart des bétons une diminution de la résistance avec l'augmentation de température

Entre 100 et 200°C, l'évolution de la résistance est complexe : on observe soit des gains ou soit des pertes de résistance. Mais, pour la plupart des bétons, la tendance est à la perte de résistance. Puis, entre 250 et 350°C, l'évolution de la résistance à la compression est également délicate à analyser : on constate soit une augmentation, soit une diminution de la résistance. Au-delà de 350°C, le comportement à haute température des bétons est plus net : la résistance diminue.

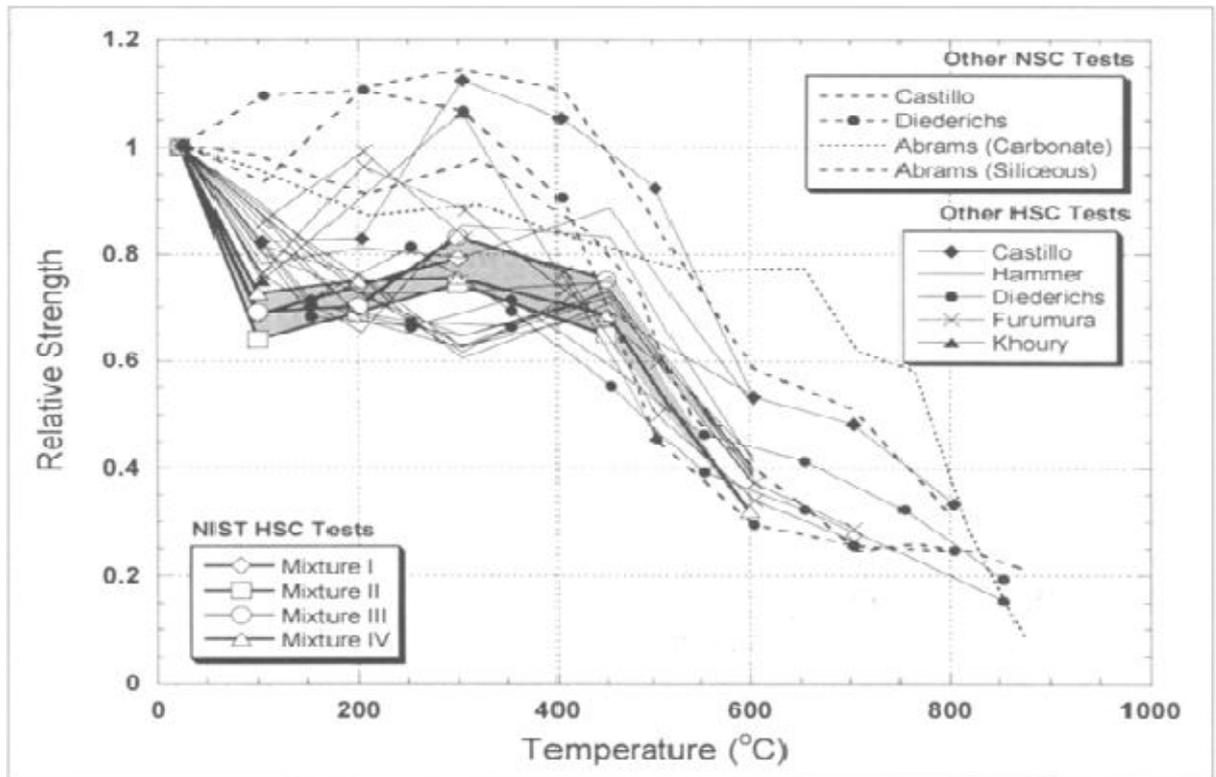


Figure 2.12 : Evolution de résistance à la compression selon différents auteurs [Phan 03].

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) [Dejong 07]. 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 [Gaweska 04].

Au-delà de 350°C, la résistance en compression chute très rapidement. Cela est expliqué par la décomposition des hydrates de ciment comme la portlandite, les C-S-Het enfin la transformation allotropique du quartz qui fragilise les granulats. Mais, également, l'apparition des fissures permet d'expliquer cette diminution [Noumowé 95].

D'après la figure 2.13 [Peng 08] montre que le mode de refroidissement influe significativement la résistance en compression des bétons.

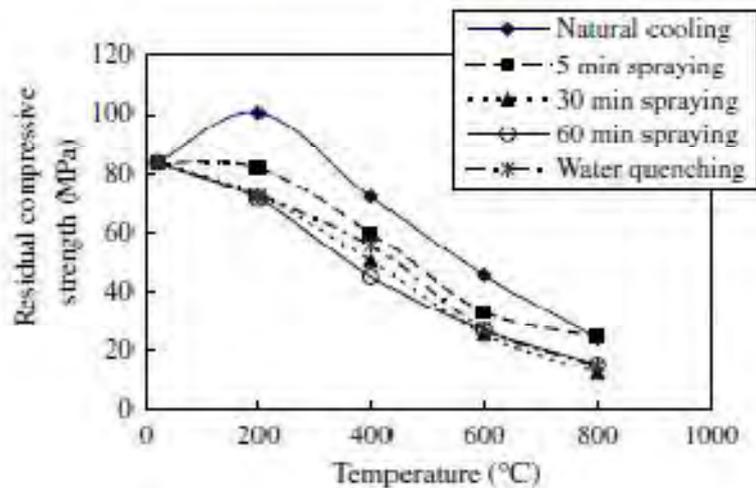


Figure 2.13 : l'effet du mode de refroidissement sur la résistance en compression. [Peng 08]

2.8.2 RESISTANCE EN TRACTION :

L'évolution de la résistance en traction en fonction de la température n'a pas été étudiée aussi souvent que celle de la résistance en compression. Pourtant cette donnée est primordiale, la résistance en traction conditionne en partie la stabilité thermique des bétons (éclatements).

La figure 2.14, présente plusieurs résultats de résistance à la traction résiduelle déterminée en flexion par Malhotra et al 1989 et en traction directe par Noumowé et al. [Noumowé95]. Les mesures sont effectuées sur des éprouvettes ayant préalablement été refroidies. On remarque sur cette figure que toutes les valeurs déterminées se situent au-dessus de celles de DTU.

On observe en général une diminution de la résistance à la traction avec l'augmentation de la température. Dès 150°C, la résistance en traction directe baisse de 15 à 20% alors qu'elle ne diminue que 8 à 9% pour la compression. Après exposition à 500 °C, les bétons gardent 60 à 63 % de leur résistance en compression alors qu'ils n'ont plus que 42 à 53 % de leur résistance en traction.

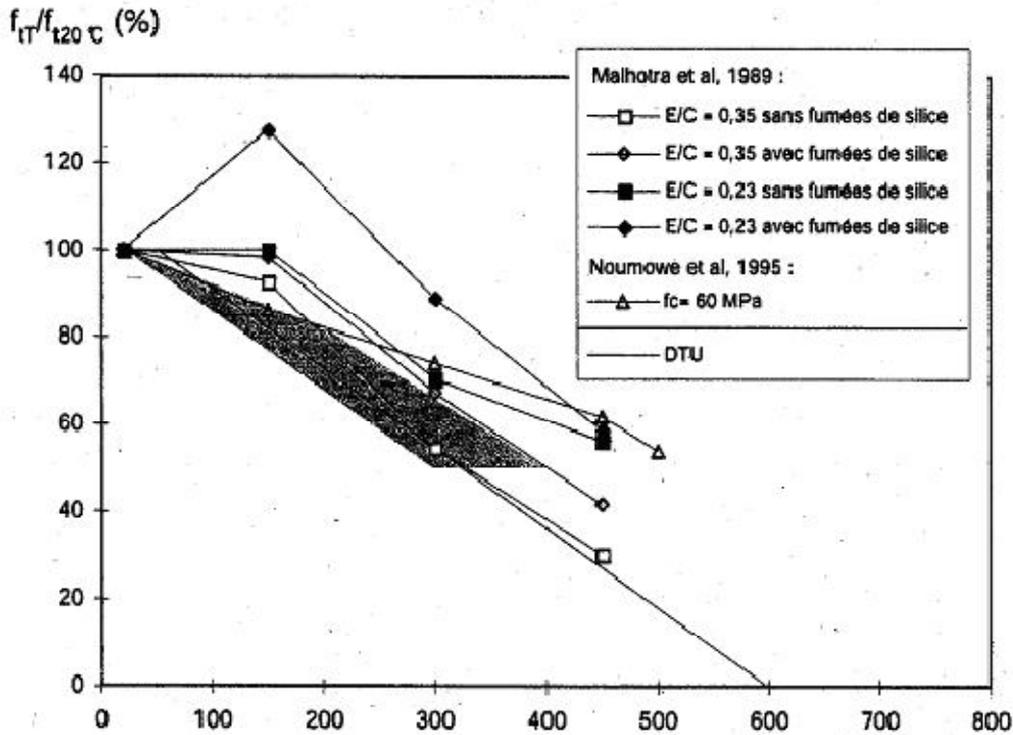


Figure 2.14 : Différents résultats de résistance à la traction. [Noumowé95]

2.8.3 MODULE D'ELASTICITE :

Plusieurs auteurs ont étudié l'influence de la température sur le module élastique du béton à chaud et à froid ([Gaweska 04], [Noumowé95], [Shoukry 10]). Les différents résultats expérimentaux donnent des valeurs assez dispersées. Cela est sans doute dû à l'hétérogénéité du matériau d'une part et les paramètres expérimentaux d'autre part (vitesse de chauffage, la nature des granulats, condition de conservation, géométrie, teneur en eau ...). Cependant, on voit clairement l'évolution du module avec la température. La Figure 2.15 montre les évolutions des modules élastiques à chaud et après refroidissement.

Avec l'augmentation de la température, les variations du module d'élasticité dépendent principalement de la microstructure de la pâte de ciment [Noumowé 95] (augmentation de l'endommagement du matériau par la déshydratation et la fissuration de la matrice) et traduit l'évolution de la rigidité du béton avec la température.

La figure 2.15 apportée par [Gaweska 04] présente les modules d'élasticité déterminés par Diederichs et al (1992) sur les trois BHP et par Castillo et Durrani (1990) sur le BHP et le béton ordinaire. Les valeurs du DTU sont également données sur la même figure. Bien que les modalités expérimentales adoptées par Castillo et Durani puissent entraîner une surestimation des déformations nous pouvons observer, qu'au-delà de 200°C, les modules d'élasticité

déterminés sont supérieurs à ceux obtenus par Diederichs et al.(1992). Les deux séries de courbes restent cependant supérieures à celles du DTU. Les différences sont importantes sur une grande plage de température. Elles sont maximales à $T = 400\text{ }^{\circ}\text{C}$ et comprises entre 20 et 70 %.

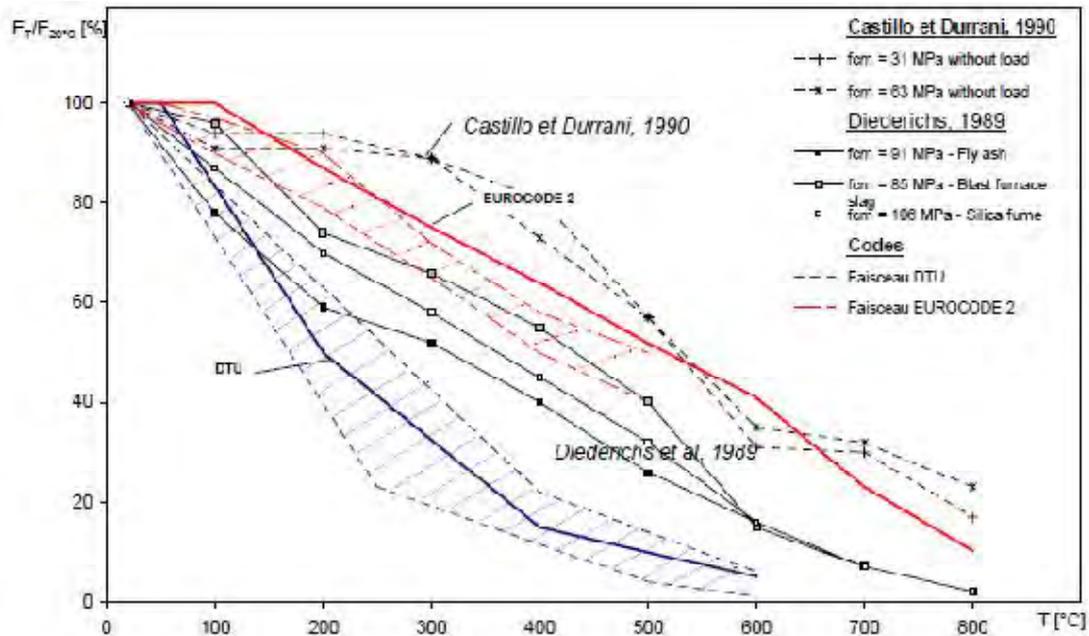


Figure 2.15 : Evolution du module d'élasticité [Gaweska 04]

2.9 ECLATEMENT :

Au cours d'une exposition à une température élevée, certains éléments en béton éclatent. La compacité des bétons gêne la migration de la vapeur d'eau et de l'humidité. Deux explications sont rapportées de la bibliographie par [Msaad 05] pour expliquer le phénomène d'éclatement :

- L'écaillage hydraulique par Pression (Hypothèse I) : L'hypothèse I repose sur la présence d'une zone de forte saturation liquide. Le « bouchon hydraulique » provoque l'augmentation des pressions de gaz du côté chaud du front de saturation. Ceci suppose l'existence d'une zone complètement sèche, une zone en phase de séchage, une zone quasi-saturée appelée « bouchon hydraulique » et une zone froide gardant les caractéristiques initiales.
- L'écaillage par Dilatation Thermique Empêchée (Hypothèse II) : La dilatation thermique causée par le chauffage, lorsqu'elle est empêchée, entraîne des contraintes de compression parallèles à la surface du béton soumise au feu. La déshydratation du béton chauffé engendre une baisse du module d'Young (adoucissement) et une chute de la résistance mécanique

(décohésion) en traction et en compression. Ces contraintes peuvent engendrer la rupture par écaillage ou éclatement du béton chauffé.

2.10 CONCLUSION:

Les recherches présentées lors de cette étude, notamment sur le plan expérimental, ont mis en évidence la complexité du comportement des bétons soumis à haute température et l'existence d'une combinaison de mécanismes d'endommagement de différentes origines : mécanique (déformations), physique (transfert de chaleur, départ d'eau libre, variation de conductivité,...) et chimique (déshydratation, carbonatation, transformations chimiques). L'étude bibliographique a permis de mettre en évidence un certain nombre de points à intégrer dans le plan expérimental. Nous avons regroupé à partir des différents travaux, les évolutions des caractéristiques thermiques, hydriques et mécaniques de différents bétons à haute température.

CHAPITRE 3 :

ETAT DE CONNAISSANCES DES BETONS AUTOPLAÇANTS

3.1 INTRODUCTION :

La mise en œuvre d'un béton traditionnel nécessite une phase de vibration afin de remplir correctement les coffrages. Cette étape conditionne la qualité de la structure finale, mais c'est également un travail pénible qui demande un savoir-faire particulier.

La solution proposée a été d'utiliser un matériau très fluide, capable de se compacter sous son propre poids, sans vibration extérieure.

Les bétons autoplaçants (BAP) ont été développés au Japon à la fin des années 80. Leur origine semble provenir de la nécessité d'utiliser des matériaux de plus en plus « performant » pour palier une réduction de la qualité des constructions due à une mauvaise mise en place du matériau [Okamura 03].

Dans ce chapitre sont présentées les grandes familles de méthodes de formulation des bétons autoplaçants, des plus empiriques aux plus sophistiquées.

3.2 CONCEPT DES BAP :

La principale différence, entre un BAP et un béton traditionnel, réside dans le comportement du matériau à l'état frais et donc dans sa mise en œuvre. La spécificité d'un BAP est d'être extrêmement fluide. Il se compacte sous l'effet de son propre poids et ne nécessite donc pas de vibration pour être mis en place. Par ailleurs, le matériau doit être stable pour assurer l'homogénéité de la structure finale.

En termes de mise en œuvre, les BAP offrent des conditions plus souples que le béton traditionnel du fait de la suppression de la vibration, et la réduction de la durée de la phase de coulage : la vidange de la benne se fait plus rapidement, l'écoulement du matériau est bien évidemment plus aisé, la phase de vibration est supprimée et l'arasement supérieur est plus facile à réaliser.

Comparé au béton vibré, les arguments en faveur du béton autoplaçant sont les suivants:

- rendements améliorés et exécution plus rapide
- réduction des nuisances sonores durant l'exécution
- liberté accrue des formes de coffrage

- facilité de bétonnage d'éléments exigus
- qualité accrue des surfaces de béton, obtention d'une texture de surface plus fine et plus fidèle à la peau coffrant utilisée.
- réduction/suppression des travaux de ragréage
- facilité de bétonnage d'éléments avec une armature dense ou importante
- remplissage de parties difficilement accessibles
- diminution de la pénibilité du travail et suppression de l'apparition du syndrome du vibreur.

Cependant, ces avantages s'accompagnent fatalement de certains inconvénients :

- augmentation du coût des matières premières (additions, adjuvants),
- modifications des outils de fabrication (outils de mise en place).

Le béton autocompactant constitue dans de nombreux domaines une alternative intéressante au béton conventionnel vibré. Ces domaines comprennent le bâtiment, le génie civil, les tunnels, la préfabrication et les travaux d'assainissement et de réhabilitation.

Walraven, cité par [Bethmont05] rappelle à juste titre que la réglementation n'est pas encore adaptée au cas des BAP. En effet, la norme NF EN 206 ne définit que cinq classes de consistance (ferme → fluide). Actuellement, tous les BAP sont donc regroupés dans la classe 5 (fluide). L'expérience acquise en France a permis de classifier les BAP selon trois catégories suivant leur domaine d'application. 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 comme le montre le tableau

Tableau 3.1 : classification des BAP suivant leur application [Bethmont05]

Intervalle d'écoulement (mm)	Application horizontale		Application verticale
	Épaisseur ≤ 300 mm	Épaisseur > 300 mm	
$I \geq 100$	1	2	2
$80 \leq I < 100$	2	2	3
$I < 80$	3	3	3

Les classes 2 et 3 contiennent deux sous-classes en fonction de la longueur maximale de cheminement horizontal du BAP : 5 m pour les classes 2a et 3a, 10 m pour les classes 2b et 3b.

3.3 MODES DE FORMULATION DES BAP :

Plusieurs approches de formulation des BAP ont été élaborées à travers le monde (approche japonaise, approche chinoise, approche suédoise, approche du LCPC, etc.) pour répondre aux exigences d'ouvrabilité de ce type de béton.

[Turcry04] a regroupé ces méthodes en trois grandes familles qui sont :

3.3.1 METHODES BASEES SUR L'OPTIMISATION DES MORTIERS :

Okamura, 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 cité par [turcry 04] 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.

3.3.2 METHODES BASEES SUR L'OPTIMISATION DU VOLUME DE PATE :

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

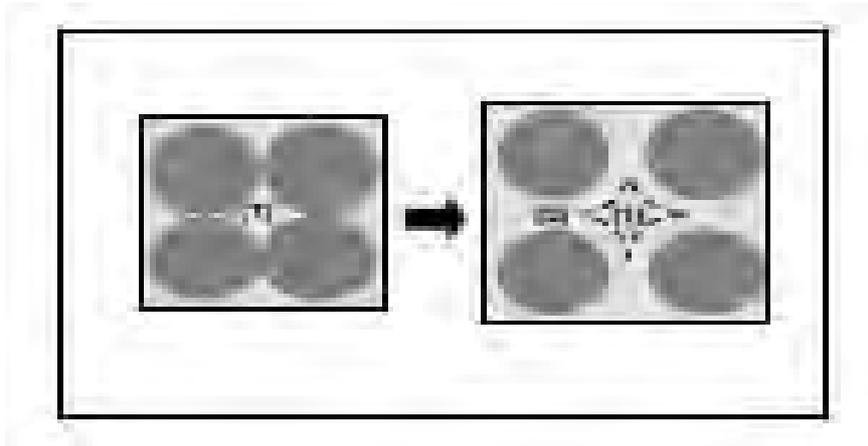


Figure 3.1 : Notion d'excès de pâte : la pâte remplit la porosité (1) et écarte les granulats (2.).

Oh et al [Turcry 04] 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.

3.3.3 METHODES BASEES 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 cimentaux 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 3.1, en considérant maintenant que la phase interstitielle est l'eau de gâchage, et non plus la pâte. Plus la quantité d'eau qui écarte les grains (2) est importante, plus la suspension est fluide. A quantité d'eau constante, si on minimise la porosité (1) de l'empilement de grains, on maximise en conséquence le volume d'eau disponible pour fluidifier le mélange. Cet exemple simple nous montre donc le lien entre compacité et rhéologie. Sedran et de Larrard cité par [Turcry 04] 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 de plus de simuler les autres propriétés du béton (résistance, déformations différées,

etc...). Ses auteurs proposent un cahier des charges spécifique pour les BAP, avec des indices pour estimer la capacité de remplissage et la stabilité du béton

3.4 SPECIFICITE DES COMPOSITIONS DES BAP :

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

3.4.1 UN GRAND VOLUME DE PATE

En considérant le béton comme un mélange de pâte et de granulats, il existe une quantité de pâte minimum nécessaire au remplissage des interstices entre les granulats. La quantité de pâte supplémentaire provoque une certaine dispersion des granulats, limitant ainsi les frottements intergranulaires, et confère au matériau sa fluidité, son volume dans les BAP est donc élevé (330 à 600l/m³).

3.4.2 UNE QUANTITE DE FINES IMPORTANTE

Pour augmenter la quantité de pâte d'un BAP, on peut alors envisager d'augmenter la quantité de ciment. Or ceci conduirait à une augmentation significative du coût du matériau mais également à des problèmes de retrait dus à l'élévation de la température lors de l'hydratation du ciment. Il est donc nécessaire de remplacer une partie du ciment par des additions minérales.

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

Différentes additions sont citées dans la littérature : cendres volantes, laitiers de hauts fourneaux, fumées de silice et filler calcaire. L'introduction d'additions minérales entraîne une modification de la porosité de la matrice cimentaire et influence les caractéristiques mécaniques et autoplaçantes du béton [Billberg 01].

3.4.3 L'EMPLOI DE SUPERPLASTIFIANTS

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 floccs est de nouveau disponible pour l'hydratation ou pour fluidifier le mélange (figure 3.2). 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.

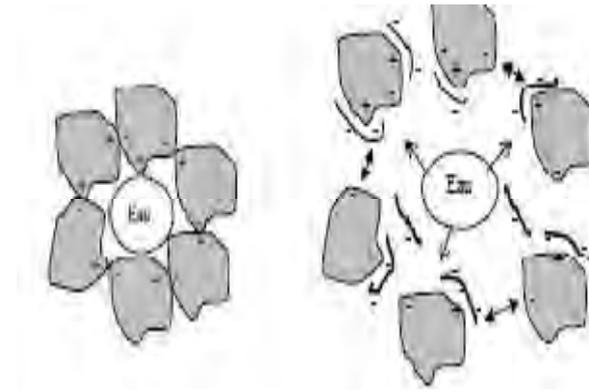


Figure 3.2 : action du superplastifiant[Bethmont 05]

3.4.4 L'UTILISATION D'UN AGENT DE VISCOSITE :

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 3.3). 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.

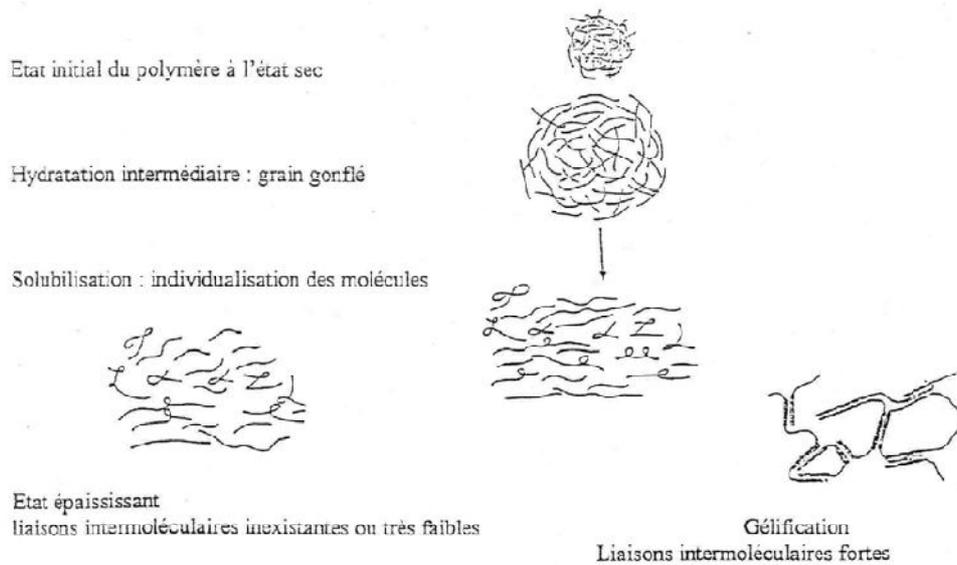


Figure 3.3 : Interaction entre l'eau et les polysaccharides [Hasni 99]

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

3.4.5 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 (figure 3.4). Toutefois, comme ils conduisent par ailleurs à une augmentation de la compacité du squelette granulaire du béton, ils permettent de réduire la quantité de liant nécessaire à une bonne ouvrabilité et une résistance souhaitée.

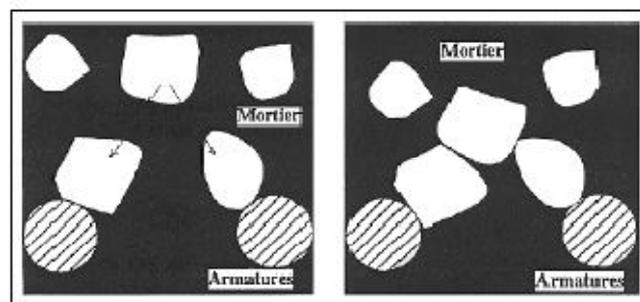


Figure 3.4 :phénomène de blocage des granulats au droit d'un obstacle [sedran 95].

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

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

3.6 PROPRIETES DES BAP A L'ETAT FRAIS :

3.6.1 FLUIDITE :

La fluidité caractérise la capacité du béton à s'écouler sous son propre poids avec un débit suffisant. L'essai le plus courant pour caractériser la fluidité des BAP est l'essai au cône d'Abrams. Cet essai est couramment utilisé pour mesurer l'affaissement d'un béton et ainsi définir son caractère plus ou moins plastique (norme NF EN 206). Pour les BAP, l'affaissement des BAP étant total, on mesure le diamètre de la galette obtenue après étalement. Cette mesure permet de déterminer la capacité du matériau à s'écouler en milieu non confiné et sans obstacle.

Les constituants du BAP ont une grande influence sur sa fluidité (dosage, quantité de la pâte, dimensions des granulats).

La présence d'une quantité de pâte supplémentaire provoque une certaine dispersion des granulats, limitant ainsi les frottements intergranulaires, et confère au matériau sa fluidité.

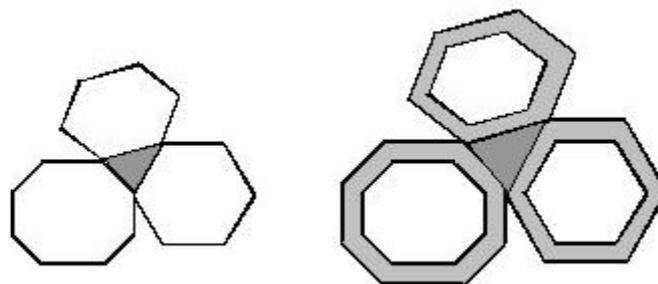


Figure 3.5 : dispersions des granulats par excès de pâte [Bethmont 04]

[L'AFGC 00] ne donne pas de recommandations particulières sur ce sujet et déclare que des granulats roulés ou concassés peuvent être utilisés dans les BAP. Il est généralement admis que les granulats ronds confèrent au béton une plus grande ouvrabilité.

[Ouchi 99] observent que moins il y a de frottements entre les grains de sable, plus le mortier s'écoule facilement et donc plus le béton lui-même s'écoule facilement. D'après eux,

la résistance au cisaillement du mortier augmenterait en fonction de l'effort normal engendré par le rapprochement entre les grains du sable et serait dépendante de la quantité de particules fines contenues dans le mortier (figure 3.6). En d'autres termes,

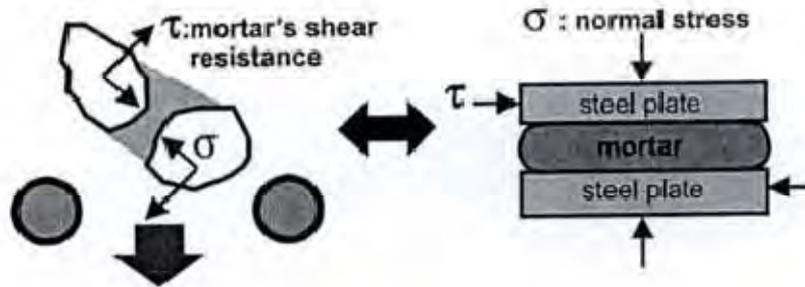


Figure 3.6: Mécanisme de déformation du mortier sous l'action du rapprochement des granulats [Ouchi 99]

[Yen 99] mettent en évidence un phénomène similaire. Pour un même dosage en gros granulat (pour un rapport eau sur liant (E/l) et un dosage en superplastifiant constants) plus la quantité de sable est faible, plus l'étalement du béton est important.

L'ajout d'un superplastifiant permet ainsi d'augmenter significativement la fluidité des BAP. Donc ils permettent d'obtenir des bétons très fluides en réduisant les frottements entre grains de ciment et en libérant une certaine quantité d'eau. Leur utilisation n'est pas suffisante dans le cas des BAP. Nous avons vu que la fluidité de la pâte avait une certaine influence sur le comportement du matériau mais que la quantité de pâte jouait également un rôle vis-à-vis la fluidité du mélange. Les interactions entre les plus gros grains doivent aussi être réduites, il est donc nécessaire de les remplacer avec des fines pour assurer une bonne fluidité.

3.6.2 HOMOGENEITE :

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

- ségrégation dynamique :

Afin de vérifier la capacité de béton à s'écouler à travers des armatures, l'essai le plus répandu pour caractériser la ségrégation dynamique des BAP est l'essai de la boîte en L.

Pour limiter le risque de blocage, et d'après l'AFGC, le diamètre maximal des gravillons est compris entre 10 et 20 mm. Moins il y a d'interaction entre les particules, plus le béton s'écoule facilement quelle que soit la configuration d'essai [Bethmont 04].

Pour limiter le risque du blocage, on doit réduire la quantité des gros granulats en prenant en considération que l'augmentation de la quantité du sable en détriment des gros granulats ne soit pas trop élevée parce que cela augmente la résistance à l'écoulement et la viscosité. Par ailleurs, la viscosité doit être relativement faible pour que le BAP s'écoule avec un débit important. Mais nous avons vu qu'elle doit être suffisante pour résister au cisaillement généré par le déplacement des granulats lors de l'écoulement. L'intérêt d'utiliser une quantité de fines élevée apparaît donc de nouveau puisque la viscosité du matériau peut être augmentée (en augmentant la fraction volumique du fluide) tout en limitant le volume de sable.

3.7 PROPRIETES A L'ETAT DURCI :

3.7.1 RESISTANCES MECANIQUES :

Les auteurs observent une accélération de la résistance au jeune âge et cela jusqu'à 28 jours. Ceci est expliqué par une hydratation favorisée par une multiplication des sites de nucléation des fines du filler.

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.

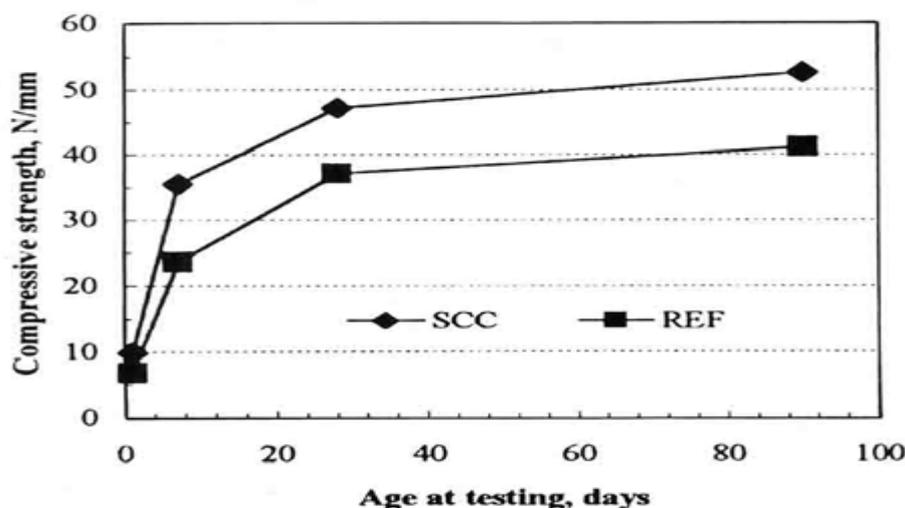


Figure 3.7 : Evolution de la résistance mécanique d'un BAP (SCC) et d'un BV (REF) correspondant [Gibbs 99].

[Uysal 11, Zhu 05] affirment que cette augmentation de résistance est d'autant plus marquée pour les BAP que la finesse du filler (exprimée en valeur Blaine) est grande (figure 3.8). Cet effet tend lui aussi à s'annuler au-delà de 28 jours. [Uysal 11] a montré que les BAP avec des poudres de marbre présente une grande résistance cause de sa finesse réduit par rapport aux autres additions utilisées. De même le pourcentage d'addition comme le laitier diminue la résistance de BAP [Boukendakdji 11]

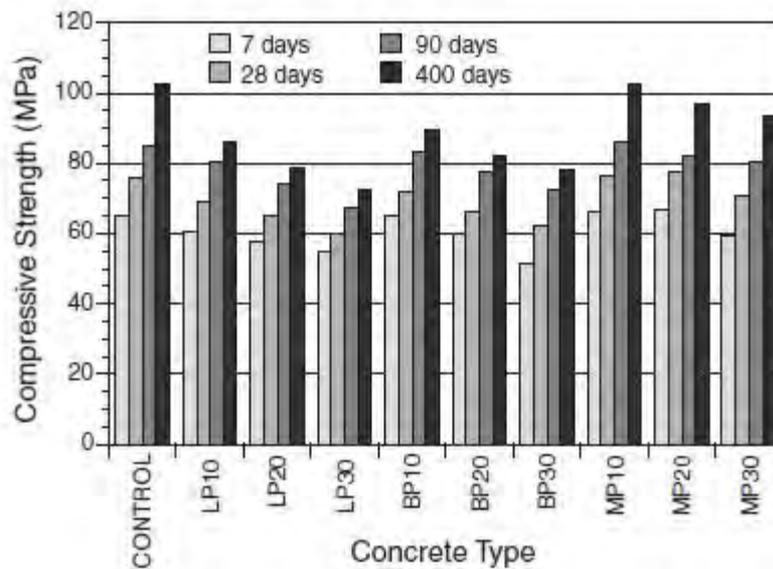


Figure 3.8 : Résistance mécanique d'un béton vibré et de dix mélanges de BAP avec des additions (fillers calcaires, fine de marbre, poudre de basalte) [Uysal 11]

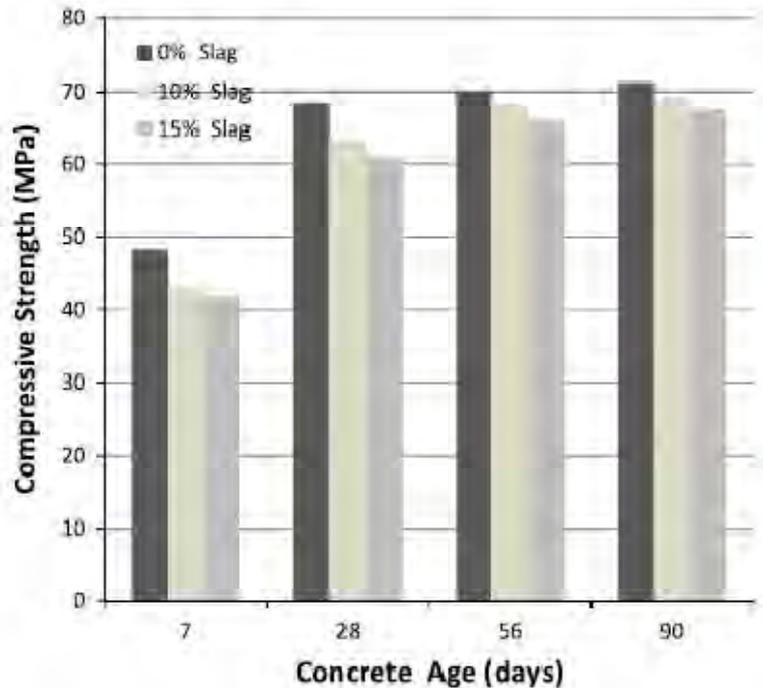


Figure 3.9 : l'évolution de la résistance en fonction de l'âge d'un BAP réalisé avec différents dosages de laitier [Boukendakdji 11].

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.

De même, certains superplastifiants utilisés pour contrôler la fluidité des formulations ont pour effets secondaires de retarder le temps de prise et d'augmenter le développement de la résistance mécanique Shi et al 02 cité par [Assié 04]. Etant donné la défloculation du liant hydraulique qu'ils engendrent, leur dosage important dans les BAP conduit à considérer que ceux-ci seront plus résistants que des bétons vibrés supposés similaires au départ.

3.7.2 MODULE D'ELASTICITE :

Lorsque les proportions granulaires sont plus faibles (57%), ce qui est le cas pour les BAP, le module calculé est plus faible de 7000 à 9000 MPa que celui prévu par le règlement, soit une diminution relative de 15 à 30%. Ces écarts deviennent deux fois moins importants pour une proportion moyenne de granulats ($g = 62\%$) puisque les modules sont inférieurs aux prévisions du règlement de 7 à 20%.

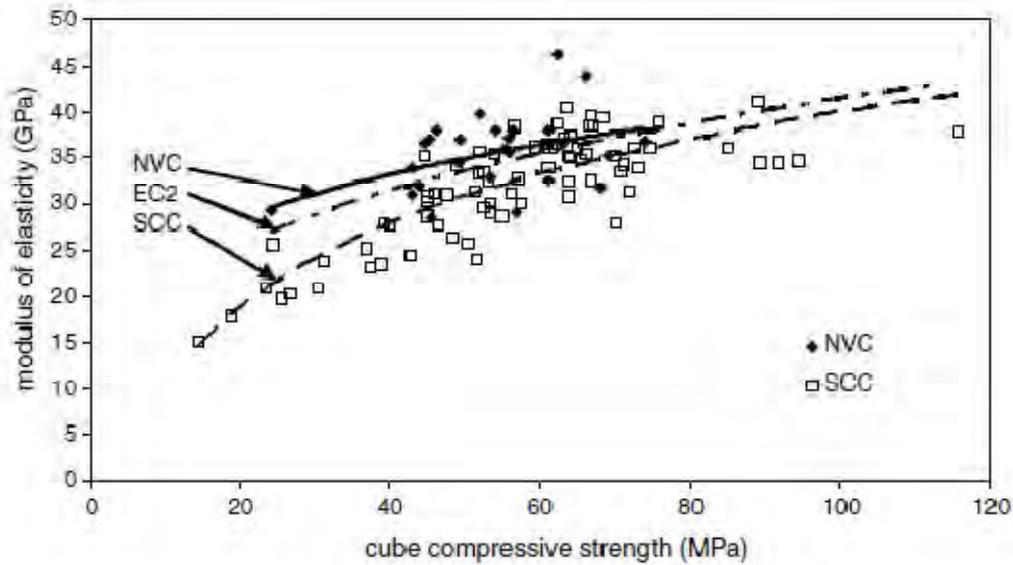


Figure 3.10 : module d'élasticité des bétons vibrés et bétons autoplaçants [Domone 07]

La droite de meilleur ajustement pour les données BV est très proche de celle de la relation approximative donnée dans EC2, mais la rigidité des mélanges de BAP est en moyenne, environ 40% inférieurs à ceux de la BV mélange à faible résistance, d'autre part le module d'élasticité des BAP se réduit à moins de 5% à des résistances élevées. Ce comportement correspond à la baisse des quantités des gros granulats dans les BAP [Domone 07].

L'analyse statistique des résultats ne révèlent pas statistiquement des différences significatives entre les deux bétons. Néanmoins, il y a une légère tendance pour les BAP de montrer un peu plus un faible module d'élasticité (figure 3.11), d'environ 2% en moyenne [Parra 11].

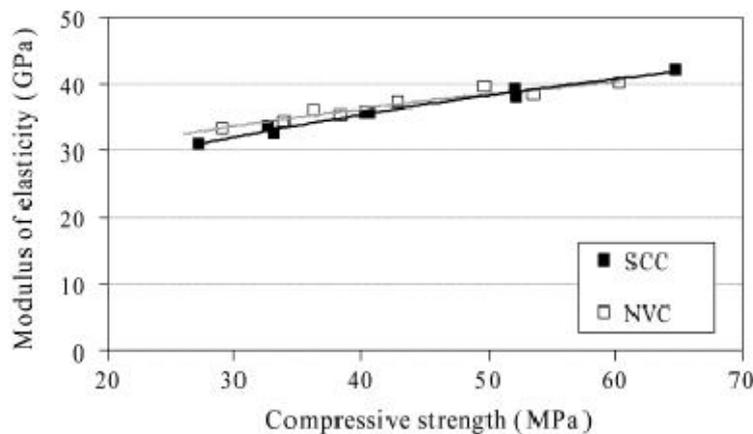


Figure 3.11 : module d'élasticité à 28j et 90 jours [Parra 11].

3.7.3 LA RESISTANCE A LA TRACTION :

La résistance d'un béton à la traction est conditionnée par de nombreux paramètres. On peut noter que la microstructure de la pâte cimentaire et la porosité de l'auréole de transition sont

fréquemment utilisées dans la littérature pour expliquer les variations ou les résultats de résistance à la traction obtenus.

Pour certains auteurs, la porosité de l'auréole de transition des BAP est inférieure à celle des BV. Donc, la résistance en traction des BAP est supérieure à celle des BV (de l'ordre de 10%). Ces résultats sont repris. Il suggère que la qualité de l'interface pâte-granulats est meilleure dans les BAP et la faible proportion de granulats diminue le risque de propagation des premières fissures.

3.7.4 RETRAIT :

3.7.4.1 Retrait endogène :

Le retrait endogène d'un béton sera d'autant plus fort que son rapport E/C sera faible (ou sa résistance en compression élevée). Ce phénomène existe pour tout type de béton, en particulier les BAP qui ne se distinguent pas des bétons vibrés sur ce point.

Les types de différentes fines utilisées dans cette étude n'ont pas abouti à une différence significative dans les diamètres de pore critique de la microstructure. Ceci peut expliquer l'absence d'une différence significative dans les valeurs finales de retrait endogène en utilisant les différents types fines (filler calcaire, quartz, cendre volante) [Craeye 10].

Persson [Persson 99] montre aussi que les BAP sont sujets à des déformations libres (retraits endogène et de dessiccation) équivalentes à celles des bétons vibrés pour un grand domaine de résistance. L'augmentation de volume de pâte produit une augmentation de retrait [Rozière 07].

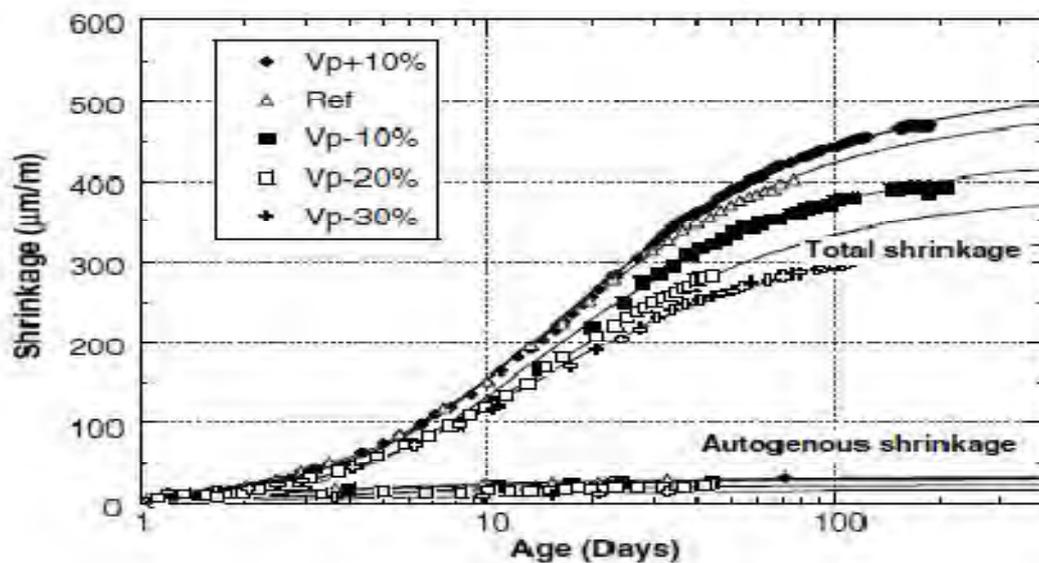


Figure 3.12 : le retrait endogène et le retrait total des bétons autoplaçants en variant le volume de pâte [Rozière 07].

3.7.4.2 Retrait de séchage :

Les données sur le retrait total, et donc sur le retrait de séchage, sont très partagées : d'un côté, le retrait total est trouvé équivalent pour BAP et BO [Persson 99]; de l'autre, il est trouvé sensiblement supérieur dans le cas des BAP [Leemann 11].

Le retrait de séchage est une fonction croissante du rapport E/C, parce que la diffusivité, qui contrôle les transferts d'humidité, augmente avec la porosité. Sur la plage [0,35 - 0,5], l'effet du rapport E/C est assez faible [Bissonnette 99]. Au-delà de 0,6, l'effet est plus marqué.

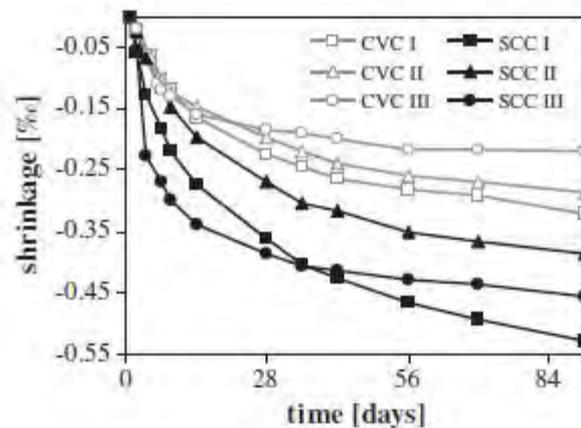


Figure 3.13 : le retrait des BAP et des BV [Leemann 11].

Il existe différents types d'additions. Les plus courantes sont les fillers calcaires, les cendres volantes, et la fumée de silice, qui sont utilisées en général pour diminuer le coût du béton en remplacement d'une partie du ciment, ou pour améliorer la continuité du squelette granulaire et ainsi réduire les problèmes de ressuage et/ou ségrégation. On utilise principalement la fumée de silice pour obtenir des bétons à hautes performances, par augmentation de la compacité ou effet pouzzolannique.

D'après Van 99 cité par [Assié 04], le filler calcaire peut avoir un effet positif en limitant le retrait de séchage des BAP, s'il est utilisé avec une finesse et une proportion adéquates. Cependant, la prépondérance de cet effet n'est pas toujours affirmée [Hasni 99].

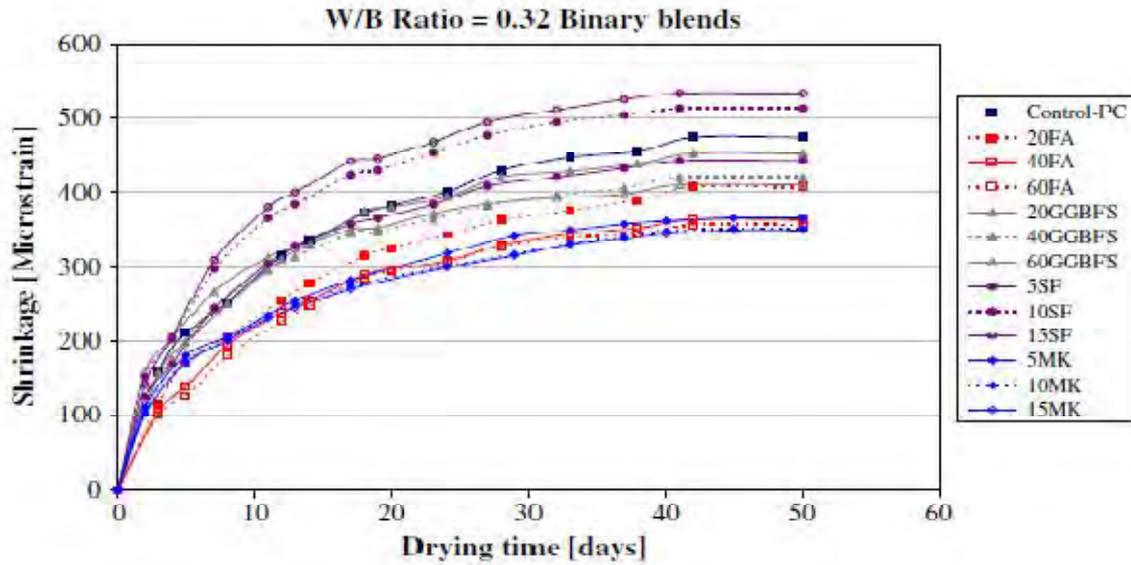


Figure 3.14 : l'évolution de retrait pour des BAP avec différentes combinaisons de fines [Guneyisi 10]

[Guneyisi 10] a conclu que dans les mélanges binaires, en remplaçant CP de CV, GGBFS, et MK le retrait au séchage du BAP est réduit tandis que l'utilisation du FS (fumé de silice) avec CP (ciment portland) a progressivement augmenté le retrait de séchage du BAP. Par ailleurs, Plus le niveau de remplacement des CV (cendre volante), GGBFS (laitier granulé de haut fourneau), et MK (métakaoline), supérieur de la réduction du rétrécissement des bétons. L'effet croissant de FS sur le retrait de séchage du BAP a été éliminés dans le ternaire et quaternaire des mélanges minéraux.

Utilisation de SF semblait être l'ajout minéral le plus efficace sur le retrait au séchage des BAP. La contribution de la FS dans la variation du retrait de séchage était de 41,2% tandis que celles de MK, CV, et ont été GGBFS 14,7%, 10,3% et 6,2%, respectivement [Guneyisi 10].

Concernant le retrait, les résultats divergent. Pour certains, les entraîneurs d'air n'ont pas d'effet sur le retrait, ce qui est a priori paradoxal. A l'opposé, ces adjuvants semblent augmenter le retrait, par augmentation de la diffusivité du matériau.

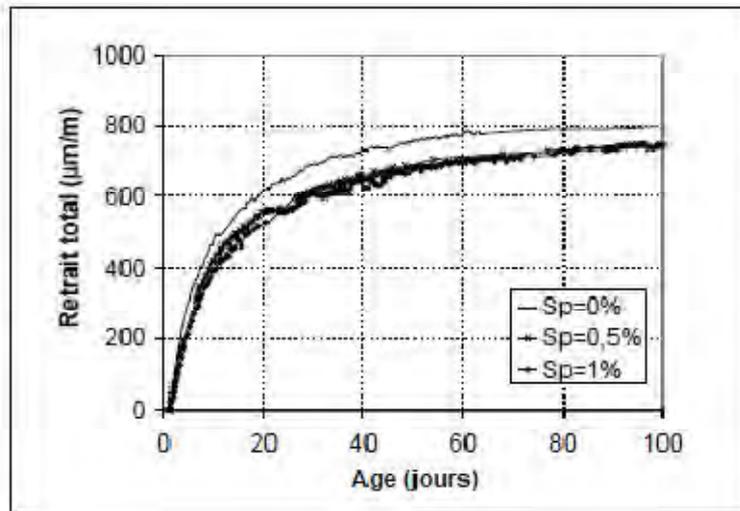


Figure 3.15: Effet du dosage en superplastifiant sur le retrait total [Turcry 04].

Le retrait total est sensiblement le même pour les mortiers contenant de l'adjuvant ; il est environ 10% plus grand pour le mortier sans adjuvant (figure 3.15). On peut d'abord suspecter le superplastifiant d'être un produit tensio-actif et donc de diminuer la pression capillaire. Mais, dans cette hypothèse, son effet ne doit pas être très important, puisqu'entre 0,5 et 1% le retrait n'évolue pas [Turcry 04].

3.7.5 PERTE DE MASSE :

L'exposition d'une structure en béton à une humidité relative environnante, inférieure à celle régnant au sein du matériau est à l'origine d'un déséquilibre hygrométrique. Ce déséquilibre se traduit par un mouvement de l'eau de l'intérieur du matériau vers l'extérieur, conduisant au séchage de celui-ci. [Rozière 07] a étudié l'évolution de la perte en poids en fonction du temps des bétons vibrés et des bétons autoplaçants, les deux bétons suivent la même cinétique de séchage. Le BAP est plus susceptible à la perte de masse.

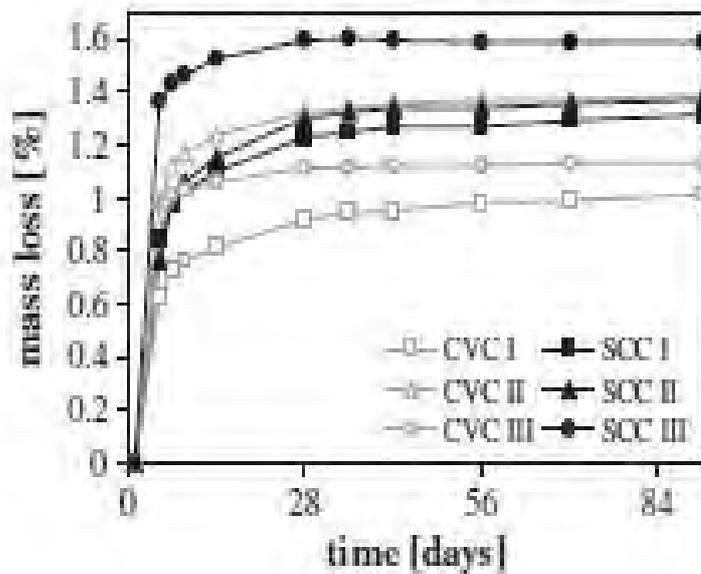


Figure 3.16 : Perte de masse en fonction du temps [Rozière 07].

Trois zones se figurent dans la relation retrait perte de masse (figure 3.17) :

- Une zone dormante où la perte en poids n'engendre aucun retrait. Granger cité par [Benboudjema 02] suggère que ce comportement soit plutôt lié à la fissuration en surface de l'éprouvette.
- Une zone linéaire, où le retrait est proportionnel à la perte de masse.
- La troisième zone, Une zone asymptotique, où le retrait tend vers une valeur asymptotique. Le gradient de teneur en eau disparaît progressivement et les fissures créées dans la phase dormante tendent à se fermer partiellement, induisant une déformation de retrait apparente plus faible (Granger 1996).

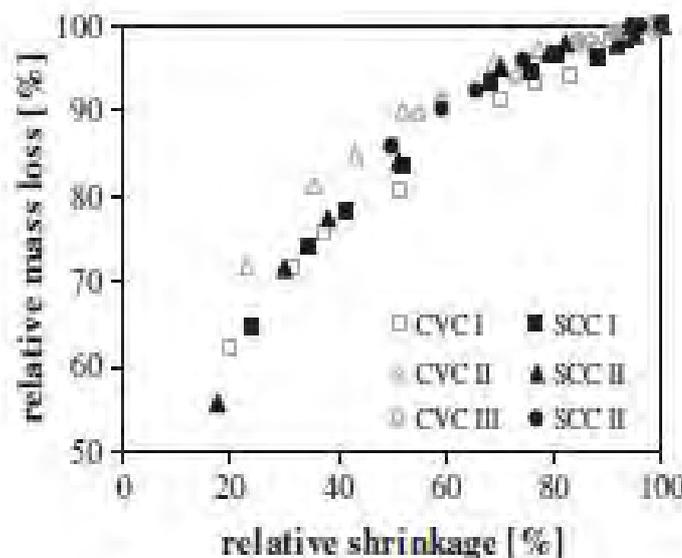


Figure 3.17 : relation retrait perte en poids [Rozière 07].

3.8 COMPORTEMENT DES BETONS AUTOPLAÇANTS SOUMIS A DES HAUTES TEMPERATURES:

3.8.1 PROPRIETES PHYSICO-CHIMIQUES :

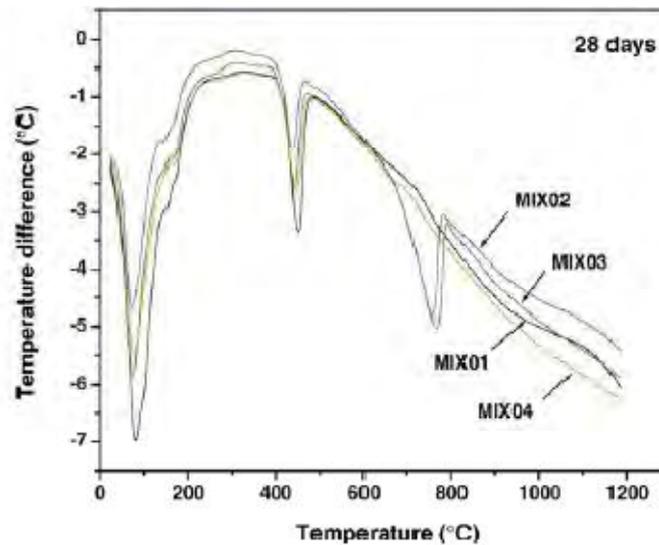


Figure 3.18: décomposition thermique avec l'analyse thermogravimétrique (TGA) et l'analyse différentielle (DTA) [Ye 07].

[Ye 07] a étudié les changements de la microstructure pour des pâtes autoplçantes et des pâtes ordinaires. Les résultats sont regroupés dans la figure 3.18. Entre 30°C et 150°C, une perte d'eau rapide apparaît pour tous les échantillons testés. Cette perte est due à l'évaporation de l'eau libre et une partie de l'eau adsorbée. Un petit pic est observé autour de 400°C, [shah 99] attribut ce pic à la déshydrations d'une solution solide de Fe₂O₃. Entre 110 et 700°C, la perte de l'eau inclut l'eau chimiquement liée due à la décomposition du (CSH). Ainsi, entre après 700°C, la perte de masse des BAP présente une diminution plus importante. Cette baisse est le résultat de la décarbonatation des fillers calcaires : $\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$.

3.8.2 ASPECT ET STABILITE THERMIQUE :

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

L'aspect des fissures a été plus prononcé pour les échantillons chauffés à 450 ° C, et surtout à 600 ° C. À ces températures, de nombreuses fissures ont pu être observé dans les interfaces de la zone de transition, mais aussi dans la pâte et les granulats, notamment à 600 °. Ces fissures observées à travers les granulats à cette température certainement due à la présence de quartz

(SiO₂) dans les agrégats. En effet, vers 570 ° C, la transformation allotropique du quartz- α en quartz- β se produit. La transformation réversible a eu des effets importants sur les propriétés physiques de quartz et induit en particulier une expansion de 0,8% en volume. Ces observations pourraient être faites sur chaque béton. Des fissures similaires sont apparues à la même température pour tous les bétons.

[Noumowé 06] a étudié la stabilité thermique des BAP HP (BAP à haute performance) avec et sans fibres de polypropylène lors d'un chauffage lent (0.5°C/min jusqu'à 400°C) et lors d'un chauffage rapide (Feu ISO 834 jusqu'à 600°C). Les résultats sont regroupés dans le tableau 3.2

Eprouvettes cylindriques 16x32cm	Chauffage lent (0.5°C/min)	Feu ISO 834
BAPHP sans FPP	Eclatement	Eclatement
BAPHP avec FPP	Aucun désordre	Aucun désordre

Tableau 3.2 : stabilité thermique des BAP selon [Noumowé 06].



Figure 3.19: les éprouvettes avant et après chauffage [Hana 09]

[Hana 09] a étudié deux bétons autoplaçants avec un rapport E/L= 052 Les deux BAP ayant subi des éclatements possèdent un rapport E/L de 0.52 et des résistances en compression de 37 et 54 MPa. Comparativement, les éprouvettes restées intactes après chauffage (BV 40) ont un rapport E/L respectifs de 0.54 avec une résistance en compression de 41 MPa. Ce résultat

montre que les BAP semblent plus instables que les BV. Les éclatements sont en effet survenus pour des bétons de résistances en compression modérées, contrairement aux observations de (Hertz , Diederichs et al) cité par [Hana 10] et [Phan 01] qui n'ont observé des éclatements que pour des bétons de faible E/C et de résistance en compression supérieures à 60 MPa.

[Persson 04] étudie différents rapports Eau/Liant (variant de 0.40 à 0.70) ainsi que l'influence des additions minérales (Filler calcaire et filler de verre) et le dosage en fibres de polypropylène. Les BAP et les BV étudiés ont le même comportement hormis à 800°C car les BAP contiennent des fillers calcaires. [Persson 04] observe d'importants éclatements et écaillages qui sont fonction du rapport E/L. Pour une conservation dans l'eau, l'éclatement apparaît pour des E/L inférieurs à 0.40 et dans l'air pour des E/L inférieurs à 0.35. Mais, en confectionnant des BV dans les mêmes conditions de conservation et ayant la même humidité relative, ces BV résistent mieux à l'éclatement que les BAP.

3.8.3 Porosité :

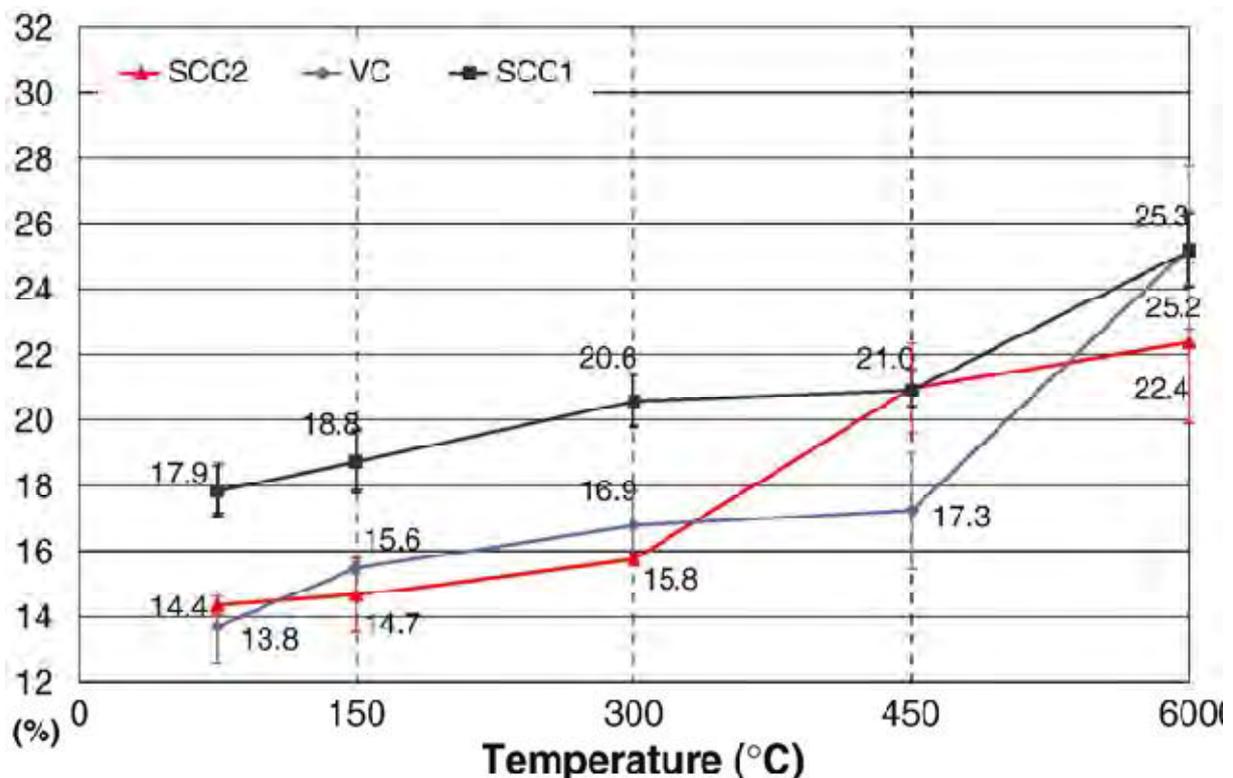


Figure 3.20 : porosité à l'eau des bétons en fonction de la température [Hana 09]

La figure 3.20 présente la porosité totale pour les mélanges étudiés par [Hana 09] en fonction de la température. Tous les mélanges présentent, une augmentation assez uniforme de la porosité avec la température.

Entre 300 et 450 ° C, la porosité augmente fortement pour le SSC2 (soit une augmentation de 4% en moyenne) tandis que l'augmentation a été beaucoup plus modérée pour les deux autres bétons (environ 1%). Pour les valeurs au-delà 450 ° C, les écarts-types sont importants parce que les spécimens sont très faibles et friables.

[Noumowe 95] et [Lui 08] attribuent l'augmentation de la porosité avec la température au départ de l'eau liée et à la microfissuration générée par la dilatation différentielle entre la pâte et les granulats.

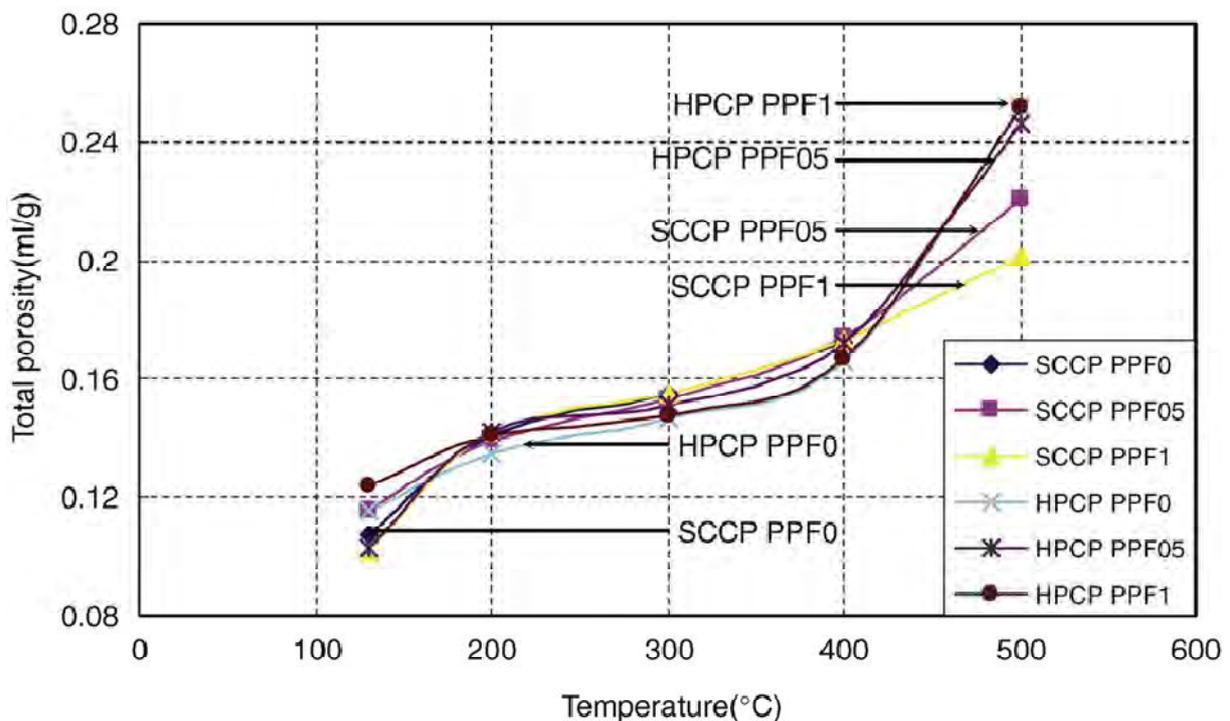


Figure 3.21 : évolution de la porosité totale avec la température [Lui 08].

[Lui 08] a étudié l'influence des fibres polypropylène sur l'évolution de la porosité des bétons autoplaçants et des bétons à haute performances. L'auteur a montré que le changement de volume des pores ne montre pas l'influence des additions de FPP, la fusion des fibres ne donne pas une grande augmentation des pores. L'explication donnée par [Lui 08] est : la quantité des FPP est de 0.75% du volume total tandis que la porosité totale dans les bétons autoplaçants sans FPP est de 14.2% à 200°C.

3.8.4 PERTE EN POIDS :

Les pertes de poids des BAP en fonction de la température sont indiquées dans la Figure 3.22. Il a été observé que l'évolution de la perte de poids fonction de la température est très proche pour les trois bétons étudiés. A des niveaux plus élevés de remplacement de LP (filler de calcaire), de BP (poudre de basalte) et MP (fine de marbre), une perte de poids plus élevée a été observée. Des pertes plus importantes présentées par LP, puis BP et enfin MP.

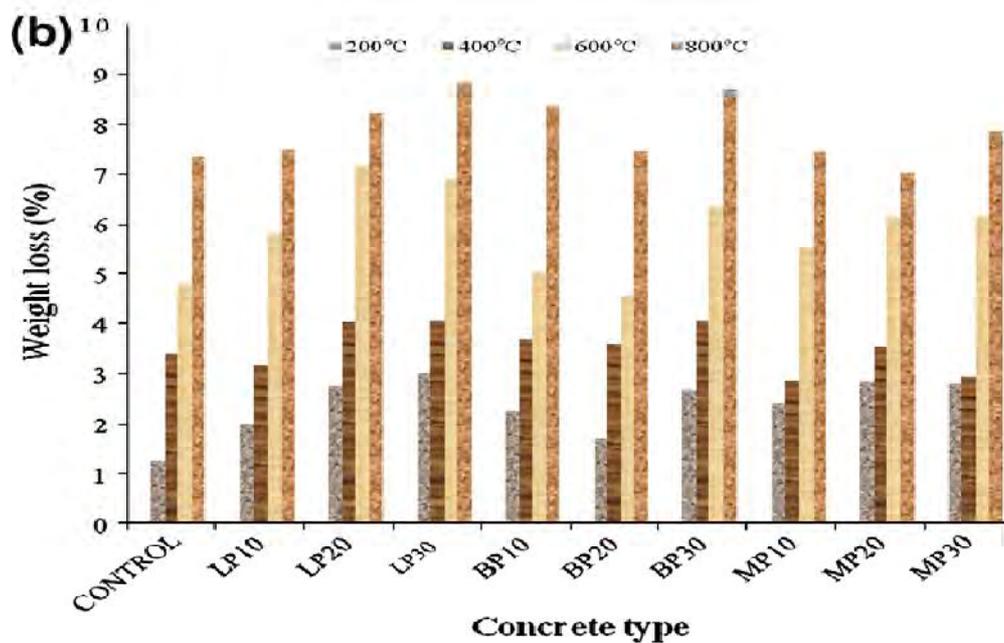


Figure 3.22 : la perte en masse des BAP [Uysal 12].

3.9.5 PROPRIETES MECANIQUES :

3.9.5.1 La résistance en compression :

[Bakhtiary 11] a étudié l'influence de l'ajout de Quartz comme filler sur les propriétés des BAP. Les résultats indiquent, si la poudre en Quartz est utilisée comme fillers dans le BAP, il se produit une accélération de développement de la résistance à 500°C cause de son activité pouzzolanique partielle qui augmente à cette température. Un tel effet peut causer une augmentation de la pression dans les pores qui produit l'éclatement.

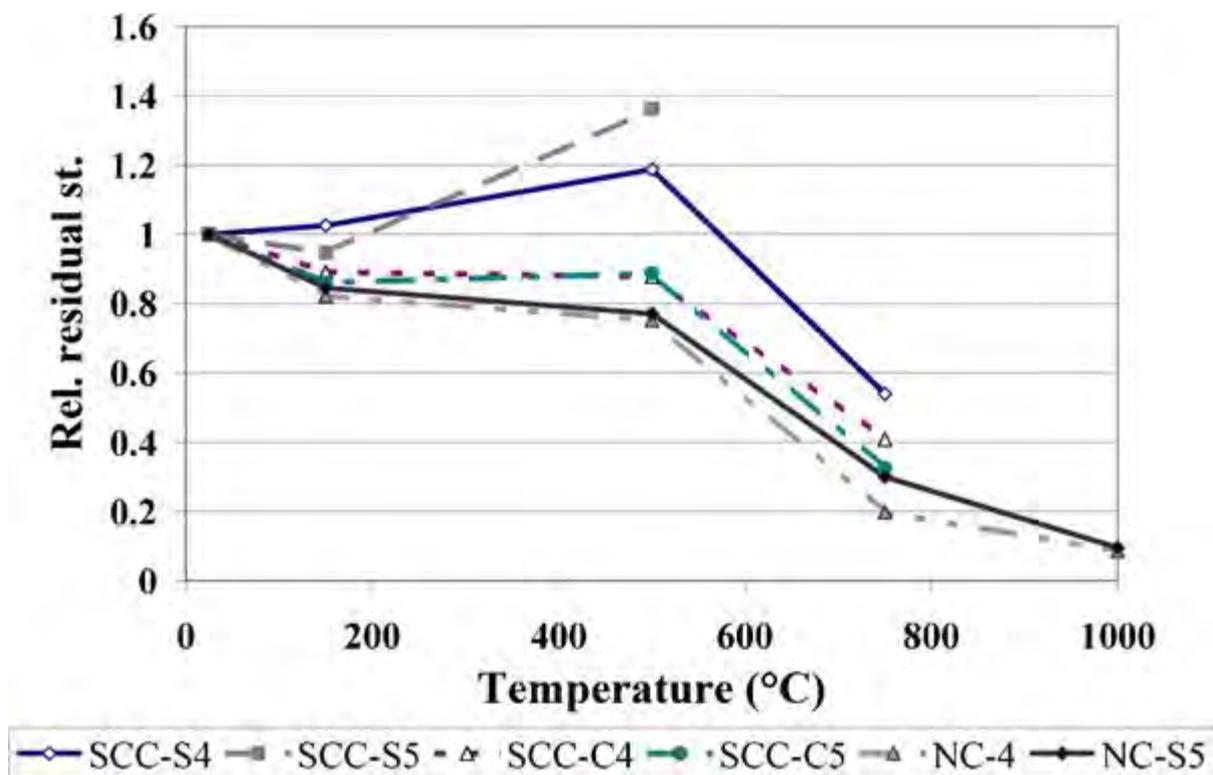


Figure 3.23 : la résistance à la compression résiduelle des BAP et BV [Bakhtiary 11].

[Persson 04] a réalisé une étude sur des BAP avec un rapport E/L varie entre 0.28 et 0.7. L'influence de deux ajouts (fillers calcaires, fillers de verre) et les fibres de polypropylène a été étudié. Persson a remarqué une baisse continue de la résistance aboutit 15% à 800°C. D'un autre part, [Hana10] a mentionné dans son étude une augmentation de température entre 150 et 300°C. (Figure 3.24).

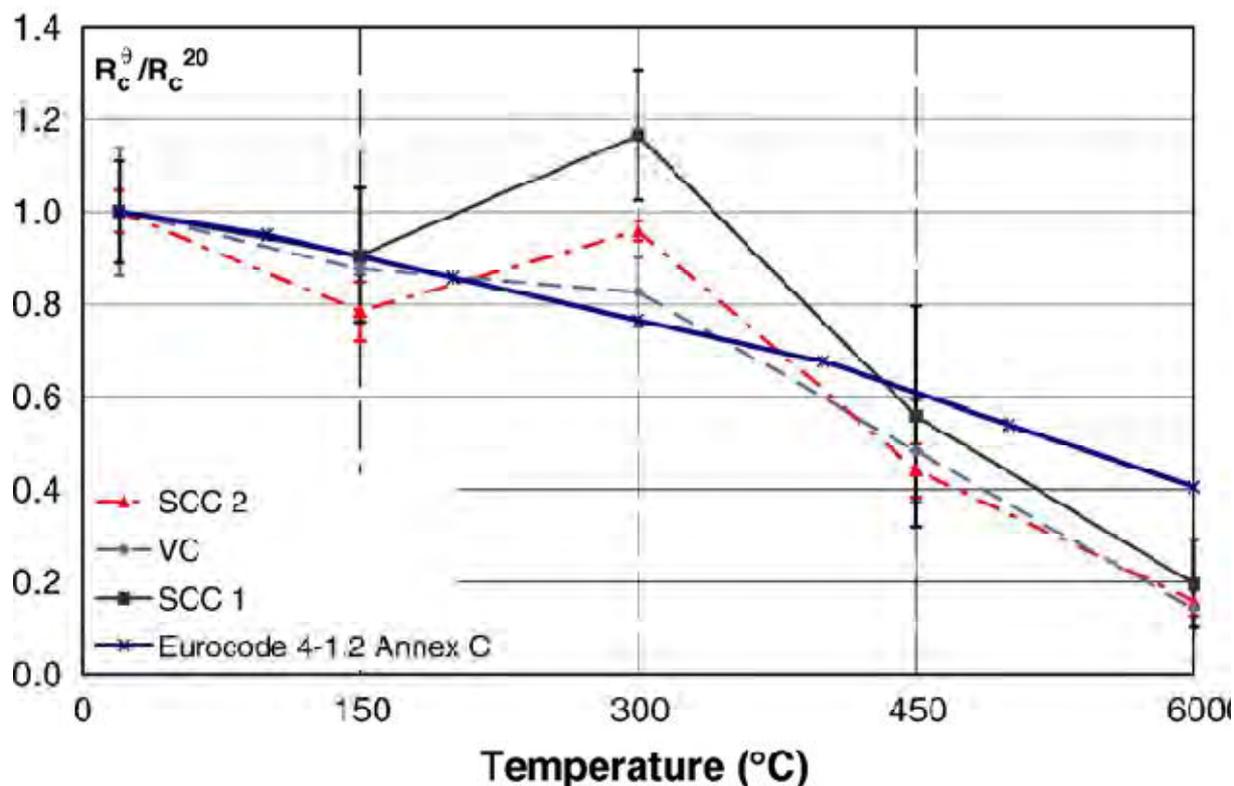


Figure 3.24: L'évolution de la résistance en compression [Hana09].

3.9.5.2 Résistance à la traction :

Il est apparu que la résistance à la traction résiduelle a un rôle significatif dans l'éclatement du béton [Bakhtiary 11]. Il a été révélé que la résistance à la traction résiduelle est très important dans cet égard et devraient être considérées lors des recherches. Les BAP préparés avec des fillers calcaires semblent généralement avoir des meilleures performances par rapport à des BAP avec d'autre ajout. Ils conservent une grande proportion des propriétés résiduelles à haute température [Anagnostopoulos 09].

Le degré de fissuration a une influence plus importante sur la résistance en traction qu'en compression. Les fissures générées par un chauffage à 300°C, ne causent pas de pertes immédiates de capacité en compression, mais font baisser la résistance à la traction, et donc la résistance en flexion [Hana 10].

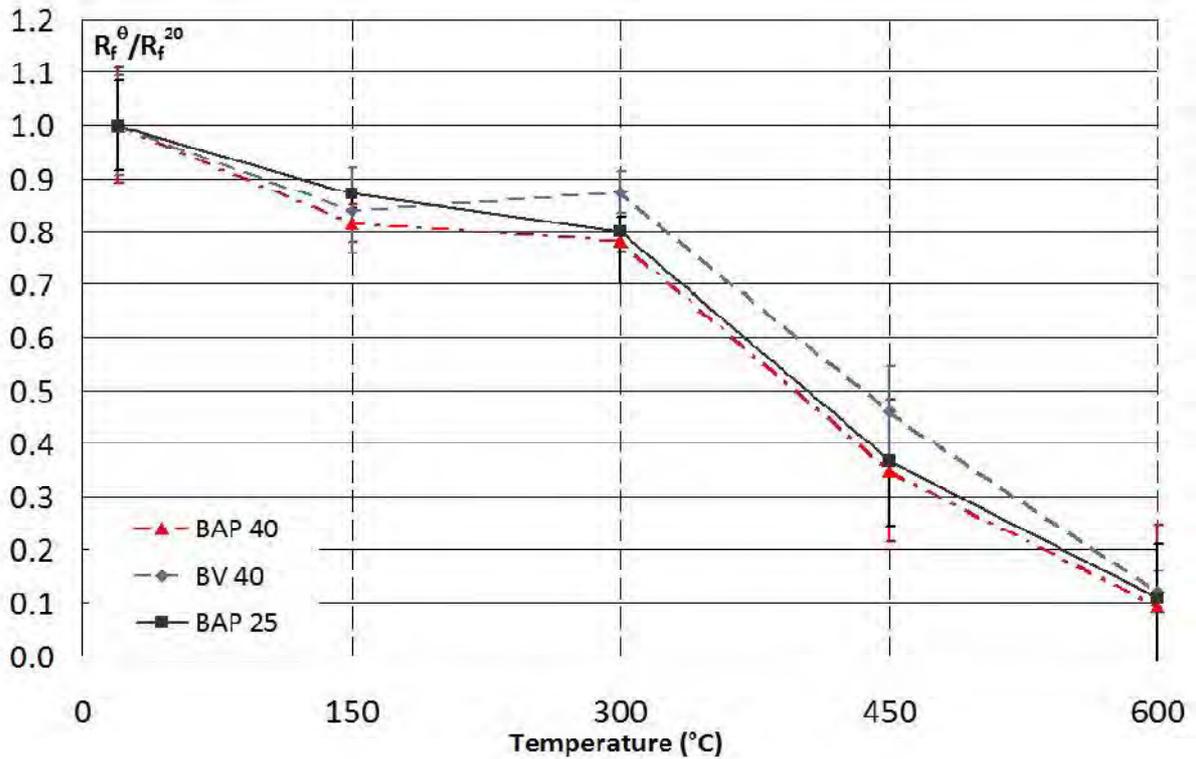


Figure 3.25 : Variation de la résistance résiduelle à la traction par flexion en fonction de la Température [Hana 10].

3.10 CONCLUSION :

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

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

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

SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUES :

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

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. 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, paradoxalement, que l'utilisation des agents de viscosité n'est pas très diffusée, justement à cause de leur coût.

Toutes les méthodes demandent un certain nombre d'essais pour caractériser les constituants ou leurs interactions. Les essais en laboratoire sont pratiquement indispensables à une formulation scientifique des BAP, ou à des logiciels.

Ainsi, les formulations étudiées sont couramment les bétons avec une résistance 50 MPa ou plus en raison des grandes quantités de liant présentes dans ces bétons. Malgré cela, les bétons représentant la plus forte production dans le domaine de construction dans la plupart des pays sont des formulations de résistances moyennes comprises entre 20 et 40 MPa. L'extension des recherches à de telles formulations était donc nécessaire pour favoriser le développement de cette nouvelle technologie du béton.

De plus, les possibilités de variation des paramètres d'étude pour de tels bétons sont nombreuses (utilisation de différentes additions minérales, de superplastifiant, variation du volume de pâte, du rapport G/S, du rapport E/C, etc.). Tout ceci engendre une vision au cas par cas de chaque propriété étudiée et ne permet pas de généraliser les observations effectuées à une gamme de résistance mécanique étendue.

La synthèse des observations et des expérimentations réalisées concernant l'effet de la température sur le béton, effectué dans la partie bibliographique, a révélé que l'évolution des

propriétés mécaniques est fortement liée à l'évolution de la microstructure, au départ de l'eau et aux réactions de déshydratation.

L'étude bibliographique ne permet pas de montrer clairement l'influence de la température sur les propriétés mécaniques des BAP. Néanmoins, les propriétés mécaniques sont influencées par la composition, et notamment la nature et le dosage de l'addition minérale.

Il est connu qu'une cure adéquaté du béton est très importante non seulement pour atteindre la résistance à la compression voulue mais aussi pour obtenir un béton durable [Neville 98]. Les conditions de climats secs et chauds causent des problèmes de malaxage, de mise en place ainsi que de leurs propriétés (Berhane 92) cité par [Cano 04].

Une température élevée, accélère les réactions chimiques d'hydratation et affecte avantageusement la résistance au jeune âge. Elle réduit la période dormante et la structure globale de la pâte de ciment hydraté s'établit très tôt. Cet effet sur la résistance s'inverse entre 7 et 15 jours d'hydratation du fait qu'une hydratation rapide présente une structure physique moins compacte [Neville 00]. Par ailleurs, un fort dosage en ciment ou encore la présence des additions minérales dans la composition, accélère le durcissement à des températures élevées. Les additions minérales peuvent accélérer voire participer à la formation des hydrates [Domone 07]. Donc notre objectif est de comprendre l'effet de la composition sur l'interaction entre le comportement mécanique et la température.

CHAPITRE 4 :

CARACTERISATION DES BETONS

4.1 INTRODUCTION :

Ce chapitre a pour objectif de présenter les différentes formulations des bétons autoplaçants.

Les matériaux utilisés (ciments, granulats, fillers calcaires) sont identiques dans les formulations de BAP. La fabrication des BAP a pu être réalisée sans problème avec des moyens conventionnels.

Tous les essais menés au cours de cette étude ont été effectués sur béton. Les premiers concernent non seulement l'identification et la caractérisation des composants anhydres, mais aussi l'étude des propriétés des mélanges à l'état frais afin d'estimer leur fluidité et leur ségrégation dynamique et statique (essais d'étalement au cône, de la boîte en L, V-funnel et de stabilité au tamis). Ensuite, divers essais relatifs aux domaines mécaniques ont été réalisés sur les mêmes mélanges à des échéances précises (performances mécaniques, module d'élasticité).

4.2 MATERIAUX DE BASE UTILISES :

4.2.1 GRANULATS :

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

Sable 0/3, Gravillon 3/15.

<i>Tableau 4.1 : caractéristiques physiques des granulats utilisés</i>			
	Granulats calcaires concassés		
	0/3		3/15
Masse volumique absolue	2,76		2,63
Masse volumique apparente	1,44		1,35

<i>Tableau 4.2 : Caractéristiques chimiques des granulats utilisés</i>	
Propriétés mesurées	Granulats calcaires concassés
Insoluble%	1,9

Sulfates %	Traces
Carbonates %	89
Chlorure %	0,29

Propriétés mesurées	Granulats calcaires concassés	
	0/3	3/15
Equivalent de sable (%)	78,67	/
Valeur au bleu de méthylène	0,39	/
Coefficient d'absorption	1,1	1,35

4.2.2 CIMENT:

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

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

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

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

Temps de prise		Expansion De Le chatelier		Surface spécifique (BLAINE)	Consistance normale
début	Fin	à chaud	à froid		
50min	4h 06min	2,9	1,65	3891	26,91

Essais	Age		
	2jours	7jours	28jours
Compression	143,2	266,4	433,1
Flexion	35,7	58,3	77,9

4.2.3 FILLERS :

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

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

Tableau 4.9 : composition chimique des fillers calcaires.

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

Tableau 4.10 : caractéristiques physiques des fillers

En ce qui concerne les morphologies du filler calcaire utilisé, le diamètre moyen des grains des fillers : diamètre pour lequel 50% des fillers sont inférieurs à 19 μ m.

4.2.4 ADJUVANT :

Un superplastifiant de type Genuim 27 à base de d'éther polycarboxylique modifié a été employé pour assurer une fluidité satisfaisante pour les différentes formulations. Il appartient aux familles des superplastifiants réducteurs d'eau. Sa masse volumique est 1.05 \pm 0.02 g/cm³, son PH est 7.0 \pm 1, l'extrait sec est de 20 \pm 2%.

4.3 COMPOSITIONS DES MELANGES RETENUES :

4.3.1 METHODE DE FORMULATION :

Par définition, un béton autoplaçant (BAP) est un béton très fluide, homogène et stable, qui se met en place par gravitation et sans vibration. Il ne doit pas subir de ségrégation et doit présenter des qualités comparables à celles d'un béton vibré classique. Le terme de béton autonivelant peut aussi être utilisé mais il concerne plutôt des applications horizontales (dallage par exemple). 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. Ce retour d'expérience, dont bénéficient les bétons vibrés (BV) employés jusqu'ici, est essentiel pour le comportement ; mécanique et autres ; à long terme des BAP. De plus, la nécessité actuelle de trouver de nouvelles solutions techniques respectant le développement durable amène à étudier tous les propriétés des BAP en respectant le cahier des charges Algérien.

La formulation des BAP repose sur le remplacement d'une partie du ciment par des fines minérales [Petersson 96]. Ces additions, comme les fillers calcaires, permettent d'obtenir un squelette granulaire plus compact et plus homogène. L'introduction d'additions minérales entraîne une modification de la porosité de la matrice cimentaire et influence les caractéristiques mécaniques et autoplaçantes du béton [Billberg 01].

Plusieurs approches de formulation des BAP ont été élaborées à travers le monde (approche japonaise, approche suédoise, approche du LCPC, approche chinoise, etc.) pour répondre aux exigences d'ouvrabilité de ce type de béton. 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.

Donc la mise au point d'une formule de BAP est beaucoup plus complexe, parce que, d'abord, les constituants sont au nombre minimal 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.

Lors de la présentation des principales caractéristiques des BAP, nous avons mis en évidence l'influence des différents constituants et établi certains critères permettant d'obtenir les propriétés visées. 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.
- 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/m³. En complément, la masse d'addition se situe entre 120 et 200 kg/m³.
- 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. Différentes méthodes de formulation ont été proposées à partir d'une optimisation du mortier, une optimisation de la quantité de pâte ou une optimisation du squelette granulaire.

La méthode de formulation utilisée pour concevoir les compositions des BAP testés dans cette étude expérimentale est une méthode de calcul élaborée par Nan Suet al [Nan Su 01].

La principale considération de la méthode chinoise est que les vides entre les granulats seront bien remplis avec la pâte (ciment, fillers et l'eau). Un coefficient de packing factor (PF) est introduit pour ajuster la teneur relative de granulats et de pâte. Le PF est défini comme étant le rapport entre la masse des granulats compactés sur la masse des granulats non compactés.

La procédure de la méthode est résumée dans les étapes qui suivent :

Etape 1 : Calcul des granulats et du sable

$$Wg = PF \times Wgl \left(1 - \frac{S}{a}\right)$$

$$Ws = PF \times Wsl \times \frac{S}{a}$$

Wg : masse de granulats.

PF : packing factor

Wgl : masse volumique du granulat

Ws : masse de sable

Wsl : masse volumique du sable

S/a : rapport entre sable et granulat

Etape 2 : Calcul de la quantité de ciment

$$C = \frac{f'c}{20}$$

C : dosage en ciment

F'c : la résistance à la compression du ciment

Etape 3 : Calcul de la quantité d'eau nécessaire pour le malaxage de ciment

$$W_{wc} = \left(\frac{W}{C}\right) \times C$$

W/C : le rapport eau/ciment

Etape 4 : Calcul de la teneur en fillers (Wpf) :

$$V_{pf} = 1 - \frac{Wg}{1000 \times Gg} - \frac{Ws}{1000 \times Gs} - \frac{C}{1000 \times Gc} - \frac{W_{wc}}{1000 \times Gw} - V_a$$
$$V_{pf} = \left(1 + \frac{W}{F}\right) \times \frac{W_{pf}}{1000 \times Gf}$$

Gg : densité du granulat

Gs : densité du sable

Gc : densité du ciment

Gw : densité de l'eau

Gf : densité du fillers

Va : volume de l'air

Gf, Gc, W/F sont obtenus à partir des tests.

W/F : rapport eau sur fillers

Calcul d'eau nécessaire pour malaxer les fillers

$$W_{wf} = \left(\frac{W}{F}\right) \times Wf$$

Etape 5 : Calcul d'eau :

$$W_w = W_{wc} + W_{wf}$$

Etape 6 : Calcul du dosage du superplastifiant

$$W_{sp} = n\%(C + Wf)$$

$$W_{wsp} = (1 - m\%)W_{sp}$$

n% : pourcentage du superplastifiant dans la pâte

m% : pourcentage du superplastifiant pour les fines.

Etape 7 : Ajustement d'eau nécessaire pour le BAP

Etape 8: validation des calculs par les essais à l'état frais – essais de conformité

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

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

4.3.2 FORMULATIONS RETENUES :

	Gra3/15	sable	ciment	filler	eau	superpla
BAP3	721	870	300	220	206	7.5
BAP4	721	870	400	133	208	9.6
BAP5	721	870	500	60	204	10.7

Tableau 4.11 : formulation des trois bétons autoplaçants retenus.

4.4 FABRICATION ET CURE :

4.4.1 FABRICATION :

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

La fabrication se déroule comme suit :

- Pré mouillage du malaxeur pour limiter une absorption supplémentaire de l'eau de gâchage par les parois du malaxeur,
- Introduction des constituants solides en commençant par les graviers, le sable, puis les fillers calcaires et pour finir le ciment.
- Malaxage puis introduction de l'eau et des adjuvants conformément à la procédure indiquée à la figure 4.1.

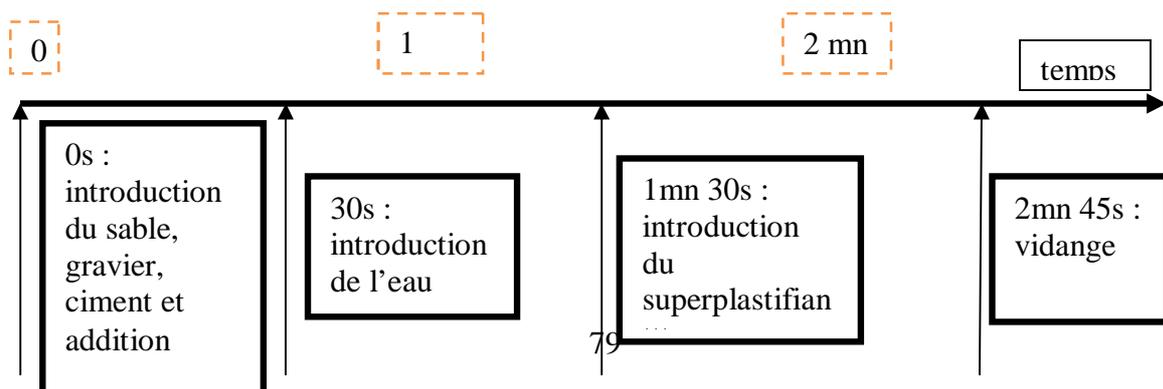


Figure 4.1 : les phases de malaxage.

4.4.2 CURE :

- Toutes les éprouvettes sont laissées dans leur moule, pendant 24 heures (± 4 heures), après réalisation ; à une température de $20 \pm 2^\circ\text{C}$:
- Puis, conservation dans des sacs plastiques jusqu'au jour d'essai
- Les éprouvettes ne sont pas laissées à l'extérieur (condition ambiante) plus de 2 heures avant de réaliser les essais.

4.5 ESSAIS DE CARACTERISATION DES BAP

4.5.1 ESSAIS SUR BETON FRAIS :

4.5.1.1 Essai d'étalement

L'essai le plus courant, car le plus facile à mettre en œuvre, permettant de caractériser la mobilité en milieu confiné est l'essai d'étalement réalisé à l'aide du cône d'Abrams (voir figure 4.2). En effet, la valeur de l'étalement, donnée par la mesure du diamètre de la galette de béton, s'avère être plus représentative que celle de l'affaissement. Les valeurs d'étalement sont habituellement fixées entre 60 et 80 cm, sans auréole de laitance ou d'amoncellement de gros granulats au centre en fin d'essai [AFGC 00]. Il peut éventuellement être associé à une mesure du temps écoulé pour obtenir un étalement de 500 mm (T500), ce qui fournit une indication sur le caractère visqueux du matériau. En 2002, les recommandations en termes d'étalement admissible définissaient la fourchette : 600-750 mm. Depuis, différentes classes de BAP ont été désignées en fonction du type d'application. Ainsi, différentes classes d'étalement ont été définies [BETHMONT 05]:

- Classe SF1 : étalement compris entre 550 et 650 mm
- Classe SF2 : étalement compris entre 660 et 750 mm
- Classe SF3 : étalement compris entre 760 et 850 mm



Figure 4.2 : la galette d'étalement des BAP

Les résultats obtenus pour les trois BAP utilisés sont présentés dans le tableau 4.12

	BAP3	BAP4	BAP5
Etalement (cm)	77	75.5	71.5
T50 (s)	5	6	5

Tableau 4.12 : l'étalement et le T50 des BAP.

L'étalement spécifié était respectivement compris entre 71.5 et 77cm. Le tableau 4.12 montre que cette exigence du cahier des charges a été convenablement remplie par les différents bétons.

Pour toutes les compositions de BAP, l'auréole de laitance à la périphérie des galettes de béton était très faible. De plus, les gros granulats ont toujours été entraînés correctement par la matrice cimentaire et ne sont pas restés amoncelés au milieu des galettes de béton.

La diminution de l'étalement entre 770mm pour le BAP3, 755mm pour le BAP4 et 715mm pour BAP5 est du probablement à la diminution de dosage de fillers de 220Kg/m³ pour le BAP3 à 133Kg/m³ pour le BAP4 et à 60kg/m³ pour le BAP5, malgré l'augmentation du dosage de superplastifiants. Les résultats montrent plus qu'il y a de fillers en remplacement du ciment, moins il faut de superplastifiants pour atteindre un étalement donné [Zhu 05].

4.5.1.2 Essai de la boîte en L

L'essai de la boîte en L a pour objectif d'évaluer la capacité du béton à s'écouler dans une zone confinée. La partie verticale du L est remplie de béton en une seule fois. Après ouverture

de la trappe, le béton s'écoule à travers un ferrailage standard (39 mm entre 3 barres $\phi 14$) qui correspond à des ouvrages très ferrailés mais qui peut être éventuellement allégé (58 mm d'espace libre entre 2 barres) [AFGC 00].

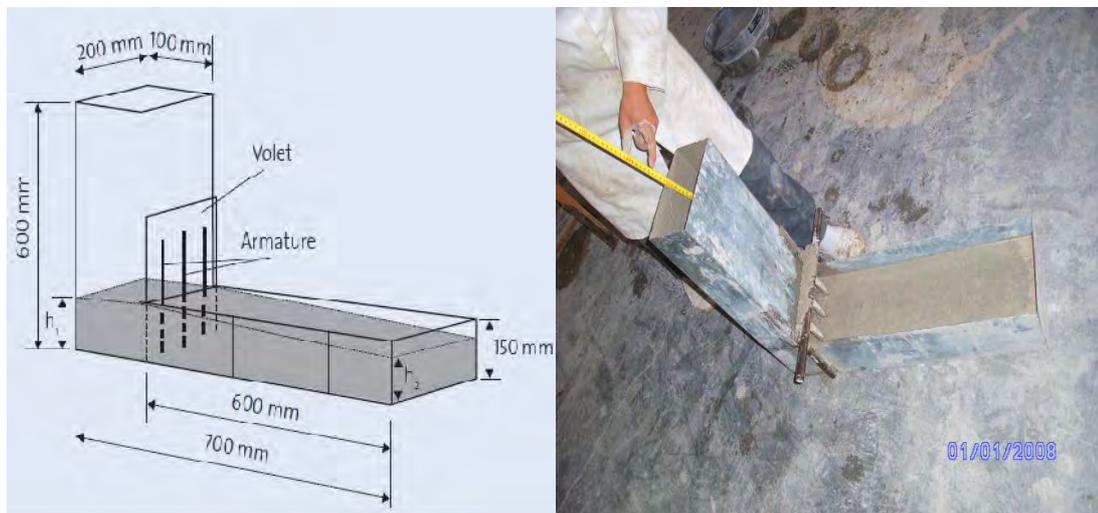


Figure 4.3 : l'essai de la boîte en L.

Pour que le BAP soit accepté, le taux de remplissage de la boîte en L (rapport des hauteurs $H2/H1$), doit être supérieur à 0,8.

	BAP3	BAP4	BAP5
$H1/H2$	0.87	0.87	0.83

Tableau 4.13 : les résultats du rapport $H1/H2$

L'essai de la boîte en L est exploité au travers du taux de remplissage (rapport des hauteurs de béton en fond et en début de boîte), qui doit en principe être supérieur à 0,8 [AFGC 00]. Les trois formulations de BAP respectent cette condition. Le BAP3 et le BAP4 donnent le même rapport $H1/H2$ malgré la différence entre l'étalement des deux BAP où on remarque une diminution suite à la diminution des rapports addition / ciment. Entre le BAP4 et le BAP5, la diminution du (a/c) révèle une diminution du taux de remplissage.

4.5.1.3 Essai V-funnel :

Actuellement, tous les BAP sont donc regroupés dans la classe 5 (fluide). L'expérience acquise aux Pays-Bas a permis d'étendre la classification en fonction des différences existantes entre les BAP et de déterminer les différents domaines d'emploi, selon leurs

propriétés. Les temps d'écoulement au V-funnel dépendent également du type d'application comme le montre la figure 4.4

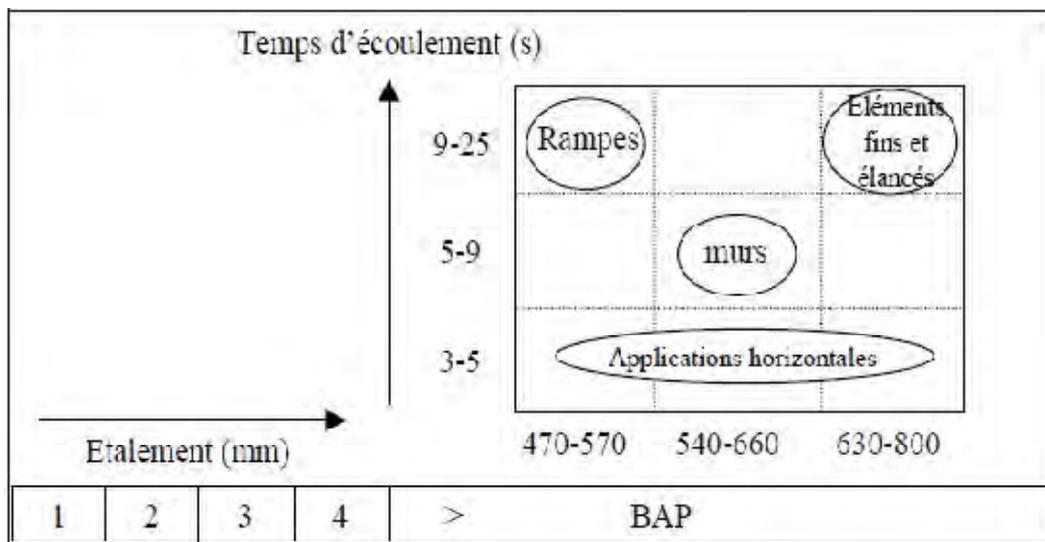


Figure 4.4 : Domaines de classification des bétons étendus au cas des BAP

La fluidité est plus généralement étudiée au moyen de l'essai au V-funnel [BETHMONT 05] (figure 4.5). Ce dispositif permet en effet de mesurer la vitesse d'écoulement d'un échantillon de béton passant à travers une ouverture étroite.

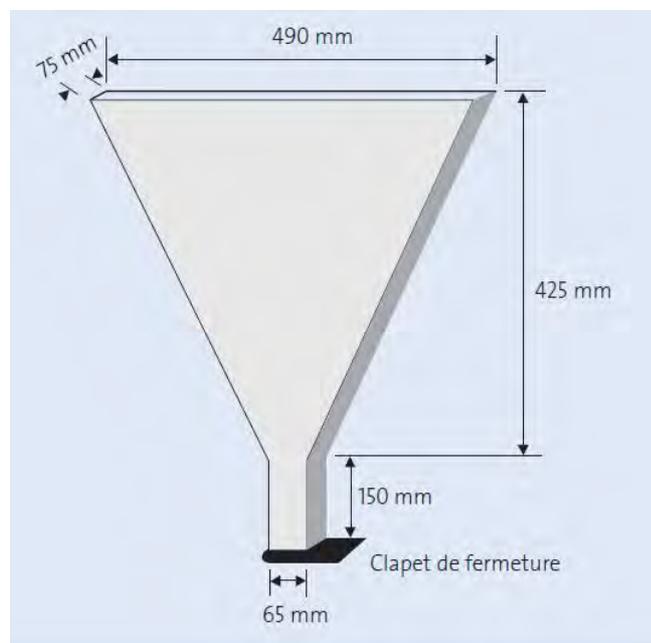


Figure 4.5 : l'essai de V-funnel.

BAP3

BAP4

BAP5

Vitesse	10	10.66	14
d'écoulement(s)			

Tableau 4.14 : résultats de l'essai de V-funnel.

L'essai d'étalement est généralement relié au seuil d'écoulement du matériau, l'essai au VFunnel (figure 4.5) est relié à la viscosité. Plus le temps d'écoulement est court, plus la fluidité du béton est importante. Le BAP5 présente un temps d'écoulement plus grand et un étalement plus petit. Le temps d'écoulement augmente quand le rapport a/c diminue au contraire de l'étalement qui diminue avec la diminution de ce rapport.

4.5.1.4 Essai de stabilité au tamis :

L'essai de la stabilité au tamis (figure 4.6) , qui consiste à évaluer le pourcentage en masse de laitance (noté P_{LAITANCE} par la suite) d'un échantillon de béton ($4,8 \pm 0,2$ kg) passant à travers un tamis de 5 mm. Les critères d'acceptabilité d'une formulation de BAP sont divisés en trois classes :

- $0\% < P_{\text{LAITANCE}} < 15\%$: stabilité satisfaisante,
- $15\% < P_{\text{LAITANCE}} < 30\%$: stabilité critique (essai de ségrégation à réaliser sur site),
- $P_{\text{LAITANCE}} > 30\%$: stabilité très mauvaise (ségrégation systématique, béton inutilisable).



Figure 4.6 : essai de stabilité au tamis.

BAP3

BAP4

BAP5

P
LAITANCE

14.32%

8.52%

4.8%

Tableau 4.15 : résultats de la stabilité au tamis.

L'essai de stabilité au tamis permet de calculer un taux de ségrégation et de déduire si le béton testé possède une stabilité satisfaisante ou non. Tous les BAP ont un taux de ségrégation inférieur à 15%, synonyme d'une stabilité correcte. Le pourcentage de laitance diminue quand le rapport a/c diminue.

4.5.1.5 airs occlus :

La mesure de l'air occlus a été effectuée au moyen d'un aéromètre de huit litres modèle « CONTROLS ». Figure 4.7

On commence d'abord par remplir la chambre inférieure de l'appareil, sur trois couches égales tout en vibrant à chaque fois, on fixe ensuite la chambre supérieure, on injecte de l'eau à l'aide d'une pissette dans le premier robinet, le deuxième est ouvert, quand l'eau commencera à sortir de ce dernier on ferme les deux robinets et on applique une pression en actionnant la pompe manuelle intégrée jusqu'à ce que l'aiguille du manomètre de l'appareil indique la valeur de référence 0%,

On ouvre la valve qui sépare les volumes des deux chambres (supérieures et inférieures), le mélange est alors comprimé et le pourcentage d'air occlus est directement indiqué par l'aiguille du manomètre.



Figure 4.7 : dispositif de mesure de l'air occlus.

Les résultats obtenus sont regroupés dans le tableau 4.16

	BAP3	BAP4	BAP5
Air occlus (%)	2%	1.8%	1.5%

Tableau 4.16 : le pourcentage d'air occlus des BAP

L'air occlus diminue avec la diminution du rapport (a/c). La diminution du dosage d'addition (fillers calcaires) réduit le pourcentage d'air occlus.

4.5.1.6 Densité :

On se sert toujours de la chambre inférieure de l'aéromètre remplis par le mélange avant la mesure de l'air occlus, si les poids de la chambre pleine et vide sont successivement P et P0, la densité du mélange frais est tel que : (V = 7 litres, volume de la chambre inférieure)

	BAP3	BAP4	BAP5
Densité (kg/m ³)	2373.4	2581.4	2584

Tableau 4.17 : la densité des différents bétons.

D'après le tableau 4.17 on remarque que la densité augmente quand le dosage en fillers diminue.

La diminution des fillers entraîne une augmentation de l'air occlus, donc la densité varie inversement avec l'air occlus.

4.5.2 ESSAIS SUR BETON DURCI :

4.5.2.1 Essai de compression :

Les échantillons utilisés pour déterminer la résistance mécanique en compression des différents bétons étudiés sont des éprouvettes cylindriques de diamètre 10 cm et de hauteur 20 cm qui ont été conservées après démoulage dans un milieu à 20°C et 95 ± 5% d'humidité relative jusqu'à l'échéance déterminée (7 jours, 28 jours).

La presse utilisée est d'une capacité maximale de 2000 kN, asservie en force (figure 4.8). La résistance en compression a été évaluée suivant la norme NF P 18-406 : les essais ont été réalisés sur l'échelle de force la mieux appropriée (600 ou 1500 kN), avec une vitesse de chargement de 0,5 MPa/s.



Figure 4.8 : essai de compression

Les valeurs des résistances à la compression sont données dans le tableau 4.18. Les valeurs correspondent à ce qui était attendu à 28j. On remarque que la résistance augmente avec la diminution du rapport addition/ciment.

	7j	28j
BAP300	23.23	30.9
BAP400	32.75	38.55
BAP500	44.72	49.2

Tableau 4.18 : résistance à la compression à 7 et 28j des BAP (Mpa).

On remarque ,dans le tableau 4.18, que les trois bétons atteignent à 7 jours entre 75% pour le BAP3, 84.95% pour le BAP4 et plus de 90% pour le BAP5 de leur résistance à 28 jours.

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

4.5.2.2 Essai de traction par flexion :

Pour l'étude de la résistance de traction par flexion, on a utilisé des éprouvettes prismatiques de dimension 7x7x28cm qui ont subies le même mode de conservation que les éprouvettes cylindriques.



Figure 4.9: dispositif de l'essai de traction par flexion

Les résultats sont regroupés dans le tableau 4.19 suivant :

	7j	28j
BAP300	4.99	5.88
BAP400	6.07	6.36
BAP500	6.36	6.67

Tableau 4.19 : résistance à la traction par flexion (Mpa) des BAP à 7 et 28j.

Les trois bétons étudiés atteignent plus de 80% de la résistance à la traction à l'âge de 7 jours. Les résistances augmentent proportionnellement avec le rapport C/L. La diminution du rapport addition / ciment (a/c) n'a pas un grand effet sur la variation de la résistance en traction. On remarque un accroissement de résistance ne dépassant pas 0.5 MPa pour une élévation de dosage en ciment de 100kg à 28 jours.

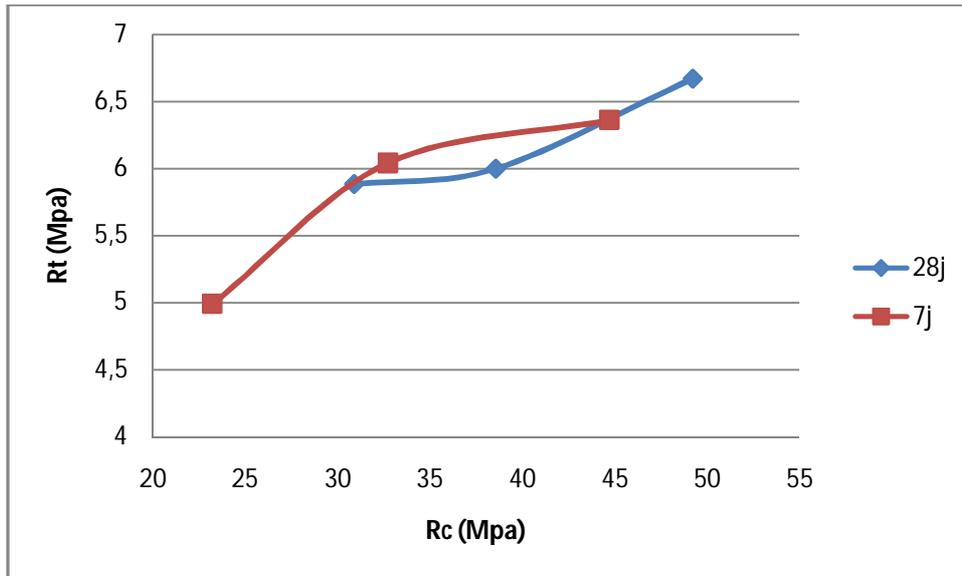


Figure 4.10 : l'évolution de la résistance de la traction par flexion en fonction de la résistance en compression.

La résistance en traction par flexion augmente quand la résistance à la compression augmente.

4.5.2.3 Module d'élasticité :



Figure 4.11: essai de module d'élasticité.

Les résultats d'essai du module d'élasticité (module sécant) en compression sont donnés dans le tableau 4.20

Le module d'élasticité du béton dépend en fait des quantités relatives de granulats et de pâte de ciment. Dans notre cas les différents BAP étudiés englobent le même squelette granulaire, ce qui laisse en jeu que le dosage en ciment. On remarque que le module d'élasticité augmente quand le dosage en ciment augmente et quand le dosage en filler diminue.

	7j	28j
BAP300	31.81	32.6
BAP400	33.25	35.5
BAP500	39.37	42

Tableau 4.20 : résultats d'essai du module d'élasticité (gpa)

D'un autre côté 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. Cette théorie est confirmée par la linéarité de la relation entre le module d'élasticité et la résistance à la compression, observée sur la figure 4.12 à 28j.

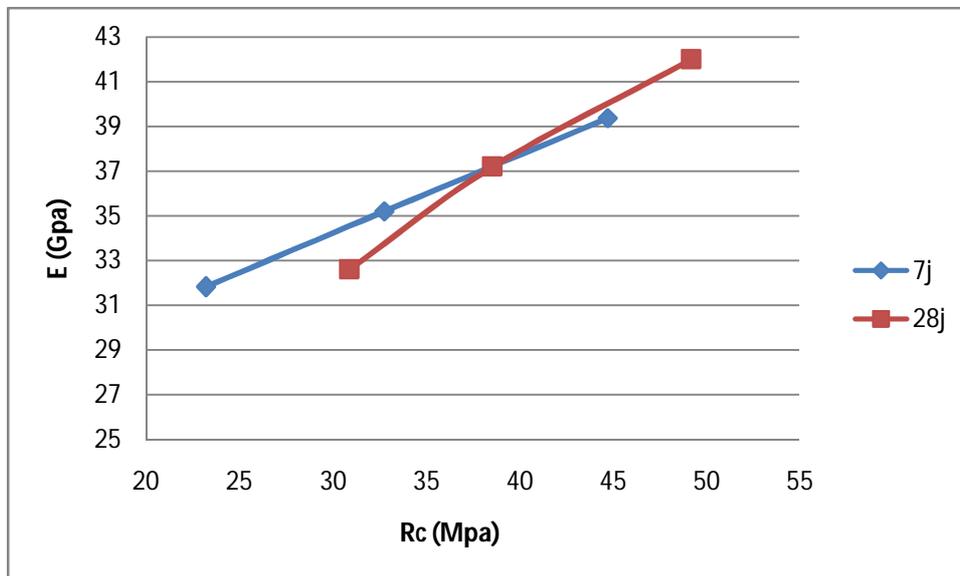


Figure 4.12 : l'évolution du module d'élasticité en fonction de la résistance en compression.

4.6 CONCLUSION :

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

Pour cela, plusieurs formulations de BAP ont été mises au point, à partir de matériaux identiques, dans une gamme de résistance variant de 30 à 50 MPa : Les formulations de BAP ont été établies à partir de la méthode chinoise basée sur la méthode de [NanSu 01].

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

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

CHAPITRE 5 :

COMPORTEMENT THERMOMECHANIQUE DES BAP

5.1 INTRODUCTION

A la différence des BHP, qui demeurent des bétons destinés aux chantiers exceptionnels, les BAP se démocratisent petit à petit en séduisant le monde du bâtiment. La production reste certes minimemais les BAP ont les atouts nécessaires à la consolidation de leur développement actuel. Au LMDC, on travaille sur la vulgarisation de cette technique aux chantiers Algériens en utilisant des matériaux locaux pour l'étude des différentes propriétés des bétons autoplaçants.

Dans la présente recherche on s'intéresse à l'influence de la température sur le comportement des BAP.

Le programme s'articule en trois parties qui suivent la "vie" du béton. La première est consacrée au jeune âge à l'influence d'une cure à des températures élevées sur les propriétés mécaniques des BAP, la deuxième traite l'évolution des variations dimensionnelles et pondérales et l'effet d'un choc thermique à 28 jours sur ces variations et la troisième partie prescrit les propriétés mécaniques résiduelles sous des hautes températures à une échéance de 90 jours.

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.

5.2 RAPPEL DES MATERIAUX ELABORES :

Dans ce travail trois formulations de BAP sont étudiées. On désigne par BAP3 un béton autoplaçant avec un rapport C/L égale à 0.58, le BAP4 indique un béton autoplaçant qui a le rapport C/L= 0.75 et enfin le BAP5 c'est le béton autoplaçant avec C/L= 0.89.

Tous les bétons autoplaçants contiennent de fillers calcaires de dosage différent. Les fillers calcaires jouent dans le béton un double rôle. A l'état frais, limiter les risques de ressuage et de ségrégation. Au cours de durcissement, éviter des chaleurs d'hydratation trop grandes. Pour assurer une bonne "défloculation" des grains de ciment et fillers, les substances fluidifiantes

ont été utilisées. Ceci a permis notamment une réduction de la quantité de l'eau dans la formulation en maintenant la maniabilité du béton. Ainsi le rapport eau/liant équivalent noté (E/L) a été maintenu le plus proche pour les trois formulations de béton. Les matériaux utilisés sont identiques pour les trois compositions étudiées, ainsi que le dosage des différents granulats.

	BAP3	BAP4	BAP5
Gra 3/15 (kg/m ³)	721	721	721
Sable(kg/m ³)	870	870	870
Ciment(kg/m ³)	400	400	500
Filler(kg/m ³)	220	133	60
Eau (l)	206	208	204
Superpla (l)	7.5	9.6	10.7
C/L	0.58	0.75	0.89
E/L	0.39	0.39	0.36
E/C	0.67	0.52	0.41
Etalement (cm)	77	75.5	71.5
Rc (Mpa)	30.9	38.55	49.2

Tableau5.1 : formulations retenues avec leur caractérisation.

5.3 PRESENTATION DES PROGRAMMES EXPERIMENTAUX :

5.3.1 TRAITEMENT THERMIQUE :

5.3.1.1 Introduction

Du fait d'une forte demande de production, l'industrie de construction a souvent recours à l'utilisation de la température (traitement) [Neuville 00]. Il est bien reconnu que la cure adéquate de béton est très importante non seulement d'aboutir à la résistance de compression désirée, mais aussi d'obtenir un béton durable.

Le traitement thermique permet une accélération des réactions d'hydratation du béton par la chaleur, appelée aussi thermo-maturation, qui constitue la plupart du temps, le moyen le plus efficace pour obtenir la résistance nécessaire au démoulage en quelques heures.

Depuis la découverte des BAP, de nombreuses recherches ont été réalisées, notamment sur sa formulation ainsi que ses propriétés mécaniques à température ambiante, et il a bénéficié d'une large utilisation dans l'industrie de construction [YE 07]. Cependant, peu de travaux

sont effectués sur l'influence d'un traitement thermique sur son comportement mécanique [Reinhardt 06].

Des conditions météorologiques sèches chaudes causent normalement des problèmes de mélanger, de placer et de cure de béton telles que ses propriétés et de maintenance peuvent être altérées.

5.3.1.2 Préparation des éprouvettes :

La mise en place a été effectuée dans les différents moules destinés aux échantillons correspondants aux essais programmés. Donc les diverses formes d'échantillons coulées selon les essais envisagés étaient les suivantes :

Des éprouvettes cylindriques de dimension 10x20cm pour la détermination des valeurs de résistance en compression.

Des éprouvettes 16x32cm sont utilisées pour réaliser les essais du module d'élasticité

Et enfin des éprouvettes prismatiques 7x7x28cm pour des essais de la traction par flexion.

5.3.1.3 Conditions d'étude

Notre étude présente trois paramètres variables : la température, le facteur d'âge et le paramètre de composition le rapport C/L. La température est fixée à trois valeurs cibles : 20°C, 40°C et 60°C. Ce choix permet de mesurer l'influence de la température sur le comportement des bétons, tout en respectant les ordres de grandeur des températures de fonctionnement pour les bétons dans le contexte de cette étude.

Les éprouvettes ont subi un traitement thermique dans une étuve de capacité 150 litre et une température maximale de 200°C.

L'étuve présente une valeur d'humidité relative inférieure à 10% et autorise à considérer l'échantillon obtenu comme étant à l'état sec. La température de 60°C permet d'affranchir des effets de microfissuration dus à des contraintes thermiques élevées.

5.3.1.4 Disposition dans le four :

Les éprouvettes sont mises dans l'étuve d'une manière à assurer une homogénéité de chauffage. Dès le démoulage, les éprouvettes sont placées dans l'étuve pendant une période de cure accélérée de 30h.



Figure 5.1 : la disposition des éprouvettes dans l'étuve

5.3.2 VARIATION DIMENSIONNELLE ET PONDERALE

5.3.2.1 Introduction :

Les BAP sont formulés différemment des bétons ordinaires : ils contiennent moins de gravillons, plus d'éléments fins et de fluidifiants. C'est bien sûr ce qui leur donne un caractère auto-compactant. Mais il est probable aussi que cela entraîne un comportement mécanique différent par rapport aux bétons ordinaires.

Même en l'absence de chargement extérieur, un élément en béton voit son volume diminuer au cours du temps. Cette contraction, plus connue sous le nom de retrait, a notamment pour causes le séchage et l'hydratation du ciment.

La prise constitue la transition entre le moment où le béton ne présente pas de cohésion et celui où il commence à devenir résistant. Avant la prise, les déformations libres du béton sont dues à la gravité, aux réactions d'hydratation et aux échanges thermiques avec le milieu extérieur.

A partir du début de prise, le développement de la formation des hydrates constitue un squelette devenant de plus en plus dense et résistant. La contraction, due à la différence de volumes entre produits et réactifs, va donc être progressivement restreinte [Barcelo 01].

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

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

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

5.3.2.2 Moules et éprouvettes utilisées :

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

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

5.3.2.3 Mode de mûrissement :

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

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

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

5.3.2.4 Essais de Retrait et de perte en poids :

Il s'agit de suivre l'évolution des variations dimensionnelles et pondérales des éprouvettes avant et après un choc thermique (de 150°C) et d'évaluer l'endurance à la chaleur des bétons autoplaçants.

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

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

Le suivi continu des éprouvettes des différents mélanges (retrait et perte de masse) est effectué jusqu'au choc thermique à 28 jours (soumission des corps d'épreuve à des élévations de température). Ensuite, un suivi continu est réalisé, après le choc thermique afin d'évaluer les modifications des variations dimensionnelles et pondérales jusqu'à l'âge de 90 jours après le démoulage.

5.3.3 PROPRIETES MECANIQUES RESIDUELLES A HAUTE TEMPERATURE :

5.3.3.1 Introduction :

Le béton est un matériau qui s'endommage sous l'effet de la température, il subit de fortes modifications physico-chimiques qui influencent l'évolution de ses propriétés mécaniques avec la température. La déshydratation, les réactions de transformation, la pression dans les pores, la dilatation différentielle entre la pâte de ciment et les granulats engendrent des effets importants sur la résistance de béton à haute température. Les résultats issus de différentes investigations sur le comportement du béton exposé à des hautes températures, interprètent différemment les évolutions de ces paramètres.

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

Les recherches menées jusqu'à présent sur les bétons ont visé principalement, l'amélioration de ses performances mécaniques à l'état durci aussi bien qu'à l'état frais. En revanche l'amélioration de ses performances vis-à-vis du comportement au feu reste un champ d'investigation assez peu développé.

Cette partie de l'étude expérimentale présente l'évolution des propriétés mécaniques du béton avec l'augmentation de la température.

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

Les deux premières méthodes sont utilisées pour caractériser le matériau à chaud (pendant le traitement thermique), tandis que la troisième sert à déterminer les propriétés mécaniques après refroidissement. Dans le cas d'un essai chargé, la charge représente 20 à 40% de la charge ultime en compression du matériau. Cette charge est appliquée pendant le chauffage. Le traitement thermique est continu jusqu'à atteindre la température cible. Puis, on augmente la charge jusqu'à la rupture du béton. Par contre, les essais réalisés après refroidissement indiquent les valeurs « post incendie », importantes du point de vue d'étude des propriétés résiduelles du matériau testé. Les essais après refroidissement sont aussi nommés « essais résiduels » (résistance résiduelle). Le fait de refroidir le matériau, peut entraîner l'apparition d'une fissuration supplémentaire et une ré-humidification provoquant la réhydratation du gel CSH mais aussi la réaction de la CaO avec l'eau présente dans l'environnement endommageant d'avantage la structure du béton. Mais, il existe une variante des essais après refroidissement : il s'agit des essais réalisés après un certain temps après le refroidissement. Ces essais sont menés après un temps défini qui suit le cycle de chauffe. Il a été rapporté [Khoury 85] 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 présents dans les bétons caractérisés par un rapport E/C très faible.

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

5.3.3.2 Cure :

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

-
1. Toutes les éprouvettes sont laissées dans leur moule, pendant 24 heures (± 4 heures), après réalisation, à une température de $20 \pm 2^\circ\text{C}$:
 2. Puis, conservation dans des sacs plastiques
 3. Les éprouvettes sont âgées 90 jours au moment des essais mécaniques,
 4. Les éprouvettes ne sont pas laissées à l'extérieur (condition ambiante) plus de 2 heures avant de réaliser les essais.

5.3.3.3 Cycle de chauffage :

Nous appliquons deux cycles de chauffage-refroidissement de 20°C à différentes températures de palier : 200 et 400°C . La première phase du cycle se compose d'une rampe de montée en température de vitesse égale à $14.33^\circ\text{C}/\text{min}$. La seconde est un palier de température dans le four durant une heure. La dernière phase est une rampe de refroidissement jusqu'à la température ambiante.

5.3.3.4 Choix des températures d'essai

Les températures d'essais seront 20, 200 et 400°C .

La température 200°C a été choisie pour encadrer la température de vaporisation de l'eau dans le matériau.

Les essais à 400°C ont été choisis pour mieux connaître les multiples transformations physico-chimiques qui peuvent arriver dans le matériau, ainsi que pour pouvoir comparer nos résultats avec ceux d'autres auteurs.

Notons qu'entre 200 et 400°C plusieurs phénomènes physico-chimiques se passent [pic de porosité du BO, densification (due à l'hydratation complémentaire, et la carbonatation de la portlandite), éclatement des BAP, début de macro-fissuration...].

5.3.3.5 Essais macrostructuraux :

1- Essai de compression

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

2- Essai de flexion :

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

5.4 CONCLUSION :

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

CHAPITRE 6 : RESULTATS ET DISCUSSIONS

6.1 INTRODUCTION :

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

6.2 FORMULATION TESTEES :

LE TABLEAU 6.1 DONNE DES INFORMATIONS SUR LES MELANGES RETENUS, EN RAPPELANT NON SEULEMENT LES DIFFERENTES COMPOSITIONS MAIS AUSSI QUELQUES CARACTERISTIQUES INTRINSEQUES.

	BAP3	BAP4	BAP5
Grav 3/15 (kg/m ³)	721	721	721
Sable(kg/m ³)	870	870	870
Ciment(kg/m ³)	300	400	500
Filler(kg/m ³)	220	133	60
Eau(l/m ³)	206	208	204
Superpla(l/m ³)	7.5	9.6	10.7
C/L	0.58	0.75	0.89
E/L	0.39	0.39	0.36
E/C	0.67	0.52	0.41
Etalement (cm)	77	75.5	71.5
Rc (Mpa)	30.9	38.55	49.2

Tableau 6.1 : formulations étudiées.

On constate que nos trois bétons possèdent des résistances caractéristiques distinctes allant des bétons de bâtiments au béton d'ouvrages respectivement de 30, 40 et 50 Mpa.

6.3 PERFORMANCES MECANIQUES SOUS TRAITEMENT THERMIQUE :

6.3.1: RESISTANCE EN COMPRESSION :

6.3.1.1 SANS TRAITEMENT THERMIQUE (TEMOIN)

La résistance mécanique en compression est une caractéristique essentielle du matériau béton et l'un des paramètres fondamentaux de notre étude. Par conséquent, sa détermination et son évolution ont été suivies pour toutes les compositions de bétons étudiées.

Cette résistance mécanique a été déterminée à différentes échéances par la moyenne des résistances d'une série de trois échantillons cylindriques 10x20 cm.

a. EFFET DES PARAMETRES DE COMPOSITION :

La cinétique de durcissement au jeune âge peut être évaluée par le rapport de la résistance à 3 jours et de la résistance à 28 jours (R_{c3}/R_{c28}). Une différence flagrante apparaît entre les trois bétons testés, la cinétique augmente avec l'augmentation du rapport C/L. On a obtenu une cinétique de 0.57, 0.75, 0.87 pour les bétons ayant des rapports C/L = 0.58, 0.75, 0.89 respectivement.

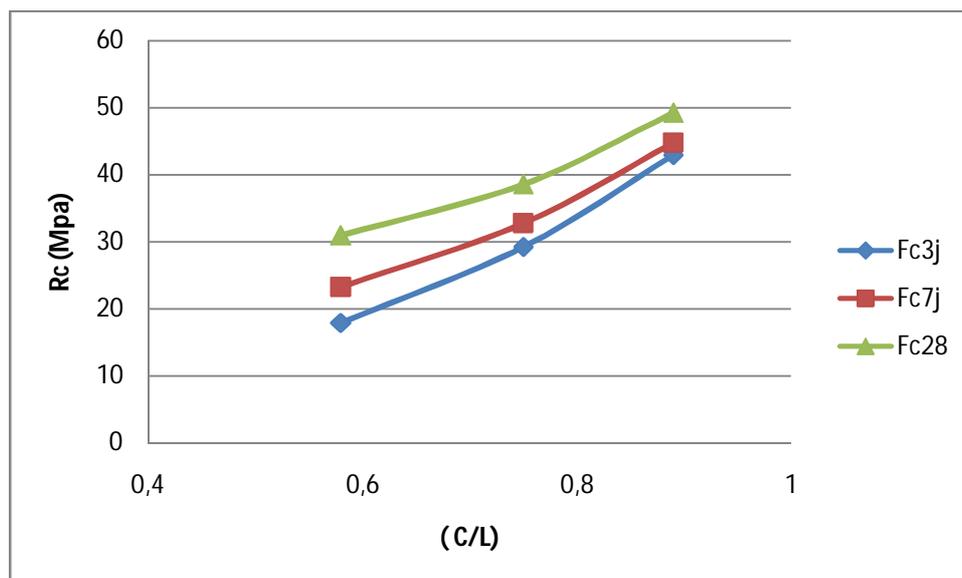


Figure 6.1 : résistance de compression en fonction de C/L du béton.

A partir de la figure 6.1 on remarque que la résistance se corrèle mieux avec le rapport C/L. Cette corrélation est bien sûr très grossière, puisque la résistance dépend d'autres facteurs (quantité des fines, type des granulats). Les résistances diminuent quand le rapport (a/c) augmente. L'inconvénient de l'addition minérale est la réduction des résistances quand une partie de ciment est remplacée par les additions [Sahmaran 06]. Nous remarquons une proportionnalité entre les valeurs trouvées, les résistances augmentent avec l'élévation du

dosage du ciment. La résistance augmente quand le rapport E/C diminue, donc l'augmentation du dosage en eau augmente la porosité capillaire et donc abaisse la compacité, une conséquence macroscopique de ce processus est une chute de résistances mécaniques [Neuville 00].

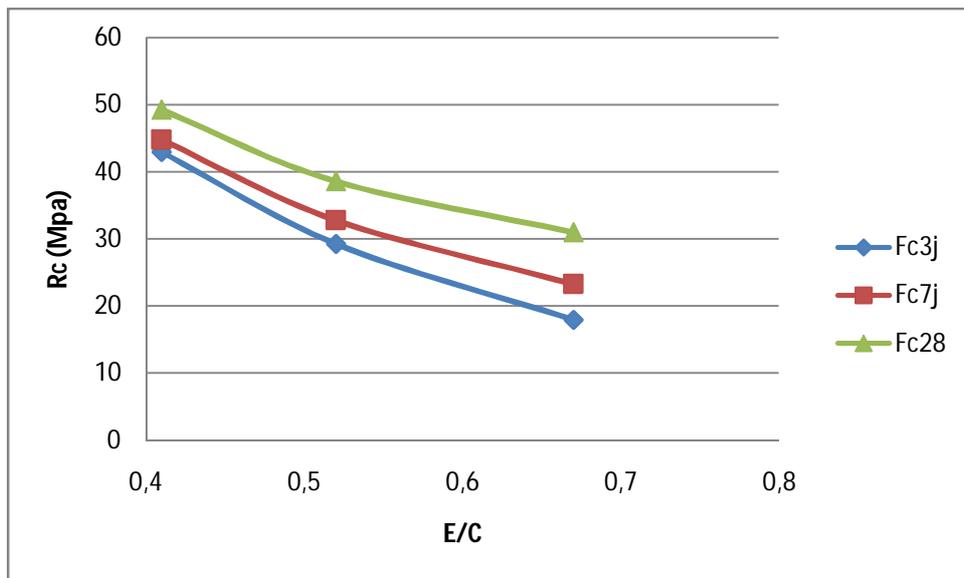


Figure 6.2 : Résistance de compression en fonction du rapport E/C.

b. Influence de l'âge :

A température ambiante, l'évolution de la résistance en compression est présentée dans la figure 6.3 pour les trois formulations étudiées.

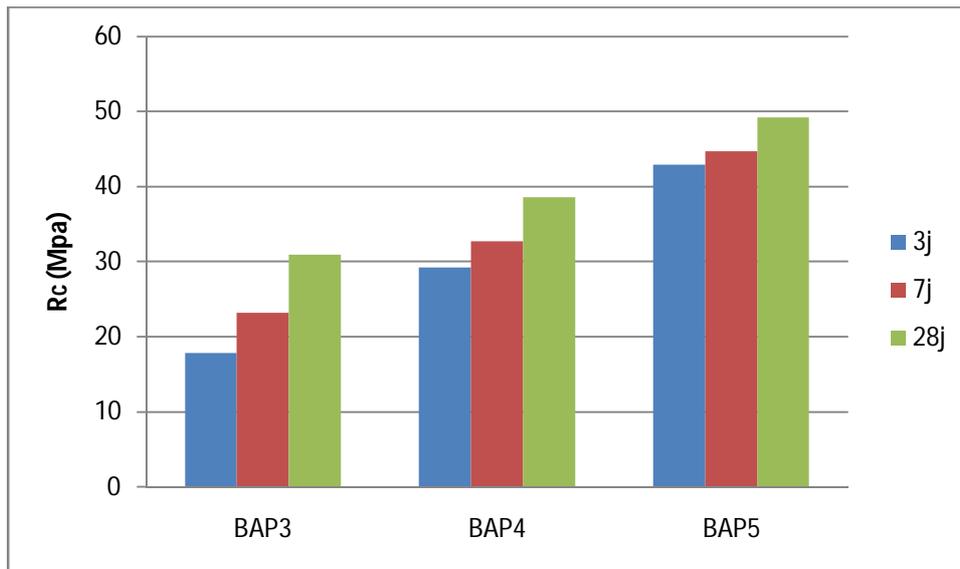
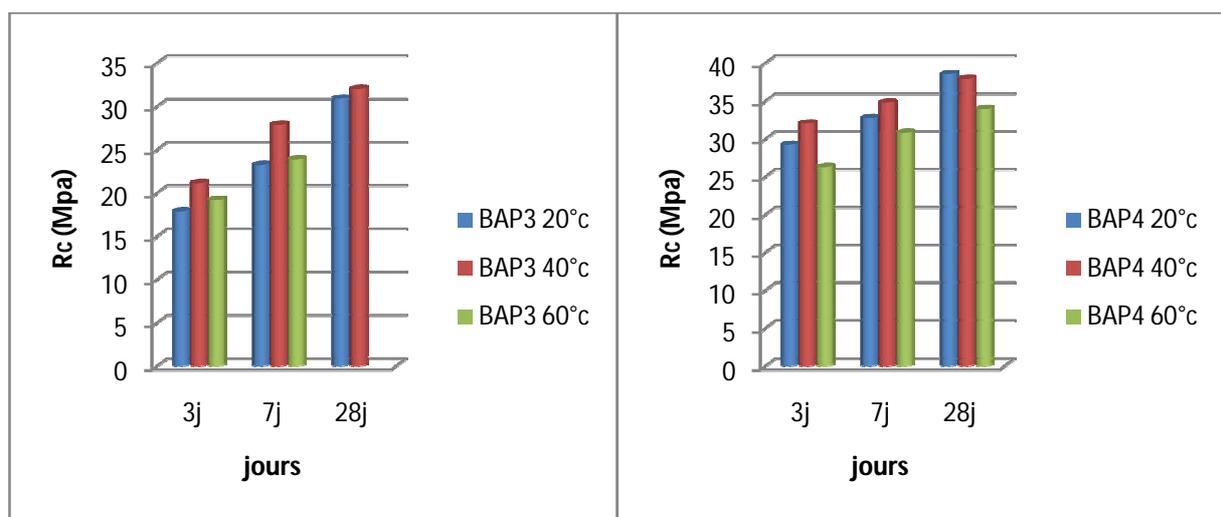


Figure 6.3 : évolution de la résistance en fonction de l'âge

Les résultats montrent que le BAP5(C/L=0.89) atteint en trois jours plus de 80% de sa résistance à 28jours. Le BAP3 avec C/L=0.58 atteint les 57% de sa résistance à 28jours en trois jours. Et le BAP4 (C/L=0.75) aboutit dans les premiers trois jours 76% de la résistance en 28jours. Plus le rapport (a/c) est petit plus on remarque une précipitation de développement de résistance au cours de temps.

6.3.1.2 Influence de la température :

La figure 6.4 montre que la température a une influence notable sur le comportement des bétons pour les différents modes de cure adoptés.



(a)

(b)

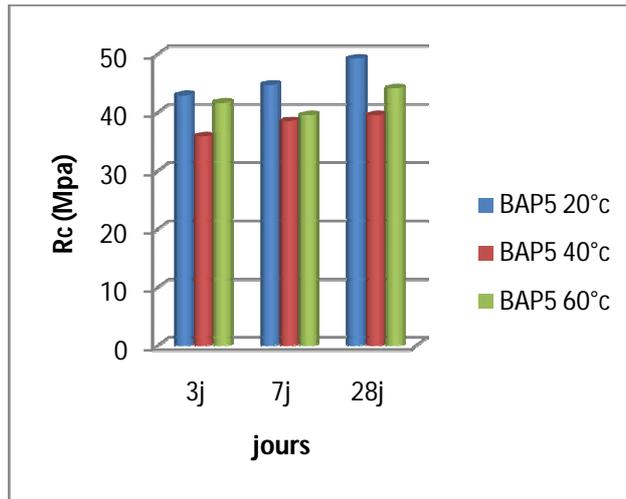


Figure 6.4 : la résistance en compression (c) des BAP (a :BAP3, b :BAP4, c :BAP5)

La cinétique de l'hydratation est un phénomène thermoactif. Plus la température est élevée, plus la réaction est rapide. Ainsi, l'augmentation de la température de cure permet d'obtenir des résistances aux jeunes âges plus importantes. Par contre, des températures trop élevées peuvent modifier la structure des hydrates et dégrader les résistances après 7 jours [Neville 96]. Verbeck et Helmuth (68) cité [Assié 04] suggèrent que le taux initial élevé d'hydratation ne permet pas une diffusion des produits d'hydratations loin des particules anhydres de ciment, ni une précipitation uniforme dans la porosité. La pâte de ciment obtenue est donc plus poreuse et moins résistante pour les échéances plus importantes.

a. Influence de paramètres de composition :

La résistance en fonction de la température par rapport à son équivalente à 20°C varie significativement avec la hausse de la température, confirmant ainsi l'influence majeure de la température sur l'évolution de la résistance voir figure 6.5.

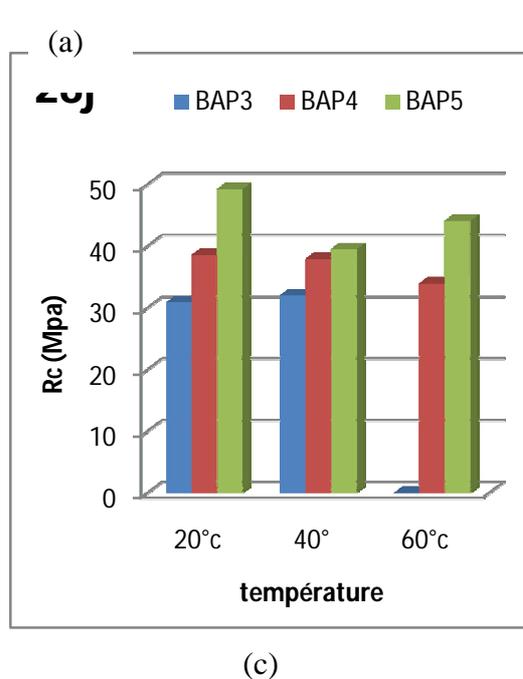
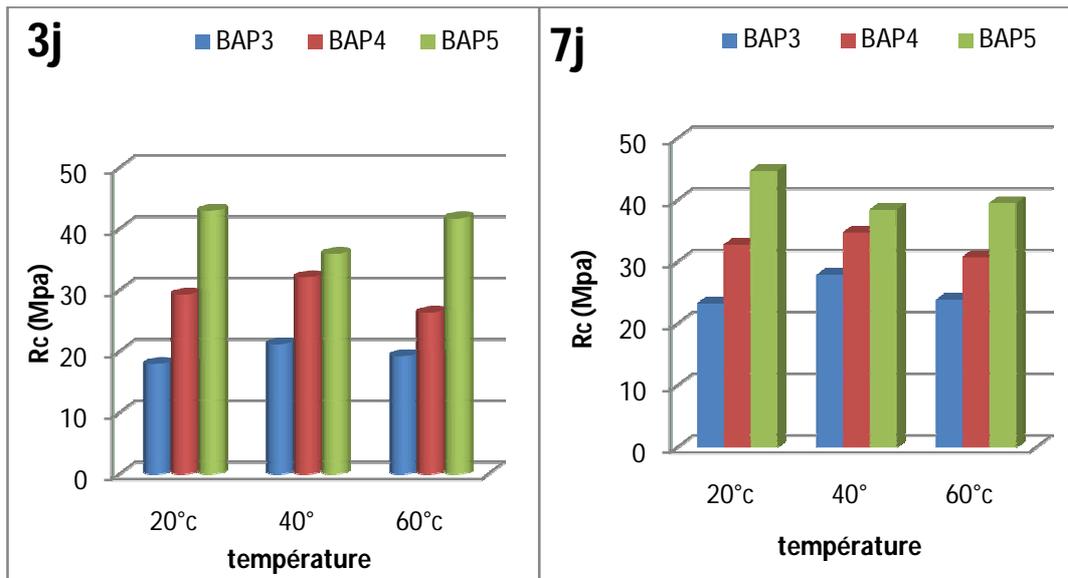


Figure 6.5 : résistance en comp_{ression} en fonction de la température et de l'âge (a :3j, b :7j, c :28j).

La diminution du rapport a/c de 0.73 à 0.33 ne modifie pas l'allure des courbes de résistances en compression mais on remarque un changement d'amplitudes. Par contre la diminution du a/c jusqu'à 0.12 engendre une modification dans le comportement des bétons. Entre 20°C et 40°C, le BAP3 et BAP4 présentent une augmentation des amplitudes des résistances 18.2% et 9.6% respectivement à 3 jours, tandis que celles du BAP5 diminuent de 16% au même âge. Cependant entre 40°C et 60°C, ces amplitudes de résistance diminuent de 11% et 15% respectivement pour BAP3 et BAP4, et augmentent pour le BAP5 de 13%.

b. Influence de l'âge :

Les taux de perte et d'élévation de résistance varient entre 1% et 20% pour les bétons testés. Les résultats obtenus pour les bétons subissant un traitement thermique sont similaires à 3 et 7 jours. L'augmentation de la résistance ; pour le BAP3 ; atteint 18% à 3 jours et atteint 20% à 7 jours tandis que son augmentation à 28 jours est de 3%. La diminution des résistances du BAP3 enregistrée à 60°C est de 11%, 18% et 6% à des échéances de 3 jours, 7 jours et 28 jours respectivement.

6.3.2 RESISTANCE DE LA TRACTION PAR FLEXION :

6.3.2.1. Sans choc thermique :

a. Influence de paramètres de composition :

Selon les formulations, cette résistance mécanique a été déterminée à différentes échéances par la moyenne des résistances d'une série de trois échantillons prismatiques 7x7x28 cm rectifiés.

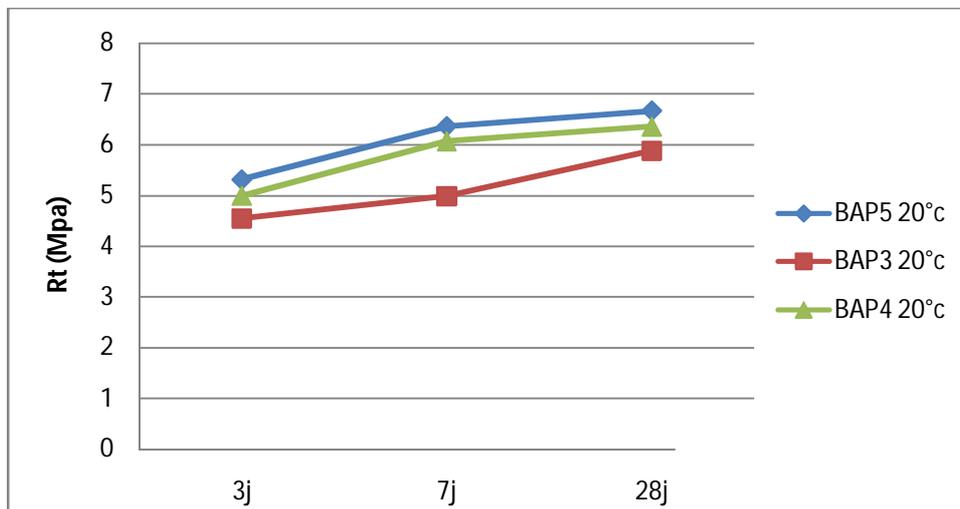


Figure 6.6 : évolution de la résistance de la traction par flexion en fonction du rapport C/L

On peut noter sur la figure 6.6, que les résistances, entre les deux formulations des BAP avec $C/L=0.75$ et 0.89 , ont des comportements contigus avec une petite différence de grandeur. Le BAP5 donne des résistances supérieures à celles des BAP4 et BAP3. Comme les résistances en compression, les résistances en traction par flexion diminuent quand on remplace une quantité de ciment par les fillers calcaires.

c. L'influence de l'âge du béton :

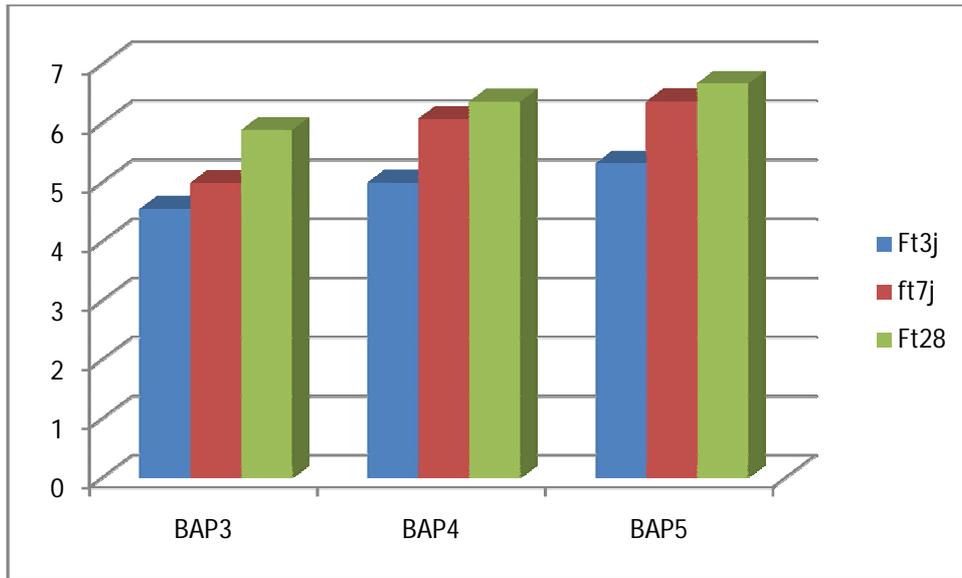
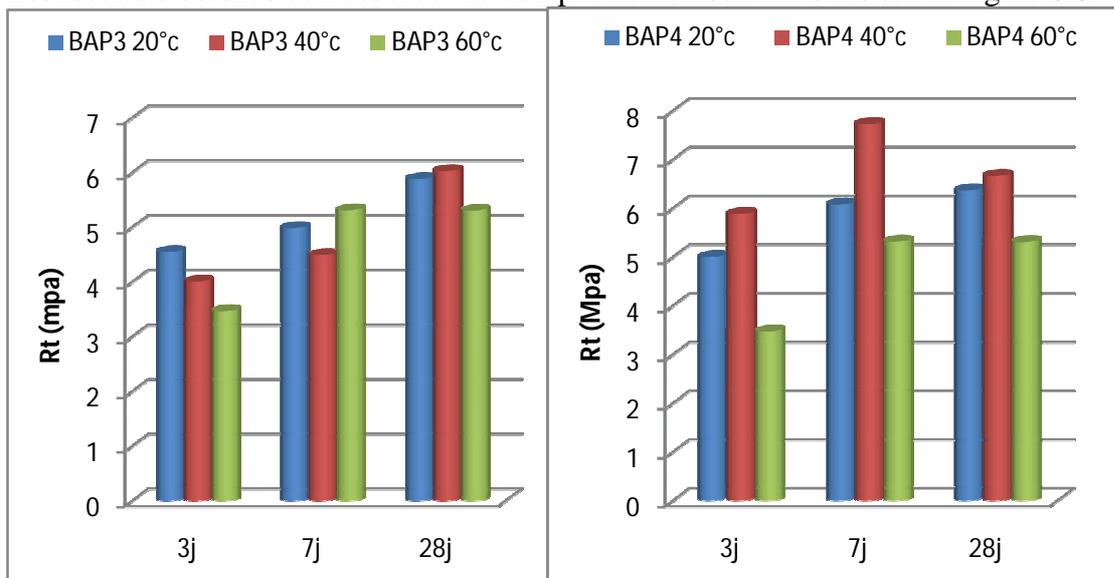


Figure 6.7 : résistance en traction en fonction de l'âge

La figure indique une évolution progressive de la résistance de traction par flexion au cours du temps. Les résultats obtenus montrent qu'à une échéance de 3 jours, les résistances atteignent de 77.38%, 78.46% et 79.76% de la résistance à 28 jours pour les BAP3, BAP4, BAP5 respectivement. On remarque une précipitation de développement de la résistance à 7 jours pour les BAP4 et BAP5 d'où ils accèdent les 95.44% et 95.35% de leur résistance à 28 jours tandis que le BAP3 atteint 84.86%.

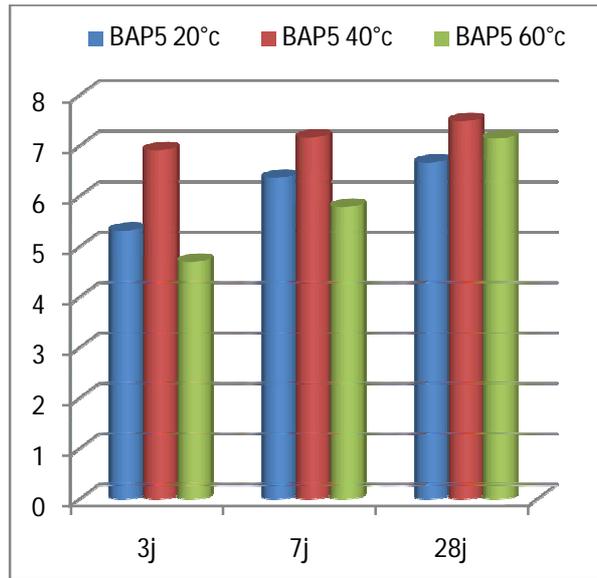
6.3.2.2 Influence de la température :

Les résultats obtenus de l'essai de traction par flexion sont illustrés sur la figure 6.8.



(a)

(b)



(c)

Figure 6.8 : évolution de la résistance en traction par flexion en fonction de la température(a :BAP3, b :BAP4, c :BAP5)

L'évolution de la résistance du BAP4 et BAP5 est similaire dans les échéances de l'essai en fonction de la température. On observe une augmentation de la résistance à 40°C, puis une diminution à 60°C par rapport aux éprouvettes testées à 20°C pour les deux BAP. Le BAP3 présente un comportement différent, on remarque une diminution successive de résistance à 3 jours, une diminution de résistance à 40° et une augmentation à 60°C à l'âge de 7 jours.

a. Influence des paramètres de composition :

Les éprouvettes confectionnées avec $a/c=0.73$ subissant un traitement thermique présentent une diminution de la résistance en traction par flexion de 12% de leur résistance initiale (témoin) ; à 40°C comme à 60°C à 3 jours, mais à des échéances plus grandes elles présentent un comportement différent. Une augmentation variant entre 2% et 27% est exhibée à 40°C en diminuant a/c à 0.33 et 0.12, d'un autre côté une diminution de résistance est observée entre 40°C et 60°C varie de 5% à 23%.

b. Influence de l'âge :

On remarque que la perte et le gain de résistance sont très influencés par l'âge de l'essai de traction par flexion. Les trois bétons exhibent une perte de résistance à 3 jours et 7 jours très significative par rapport à celle à 28 jours (en moyenne presque le double).

6.3.3 MODULE D'ELASTICITE :

6.3.3.1 sans traitement thermique :

a. Influence de paramètres de composition :

Lorsque les proportions granulaires sont identiques, le module d'élasticité dépend essentiellement des proportions de ciment. D'après le tableau 6.2, Le module d'élasticité augmente avec l'augmentation de dosage de ciment. L'accroissement de dosage de fillers calcaires de sa part influence négativement l'évolution du module d'élasticité.

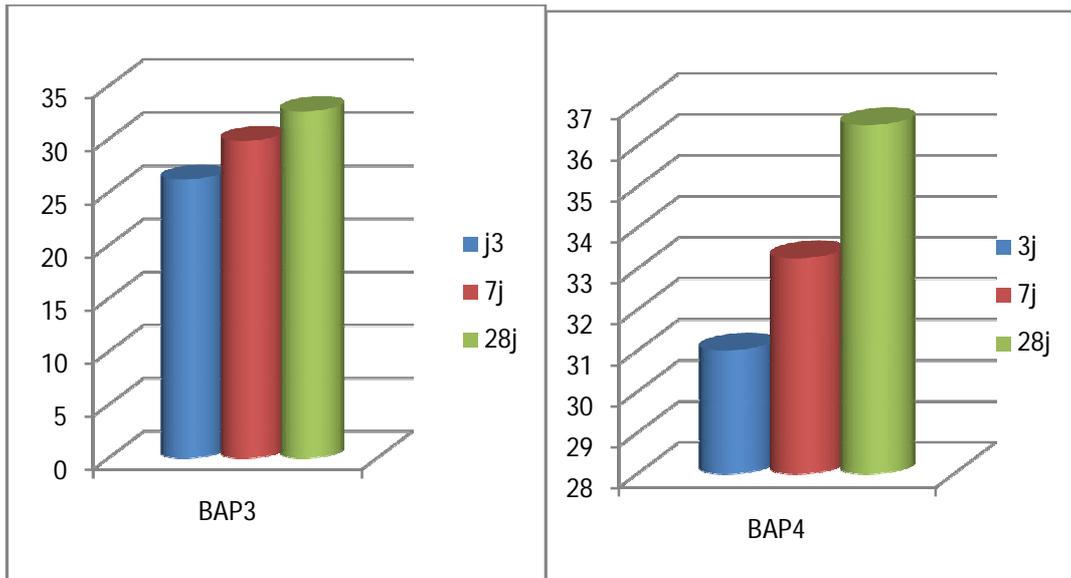
	3j		7j		28j	
	exp	BAEL	exp	BAEL	exp	BAEL
BAP300	26.17	28,75	29.81	31.43	32.6	34.51
BAP400	31	33,87	33.25	35.19	36.5	37.16
BAP500	35	38,5	36.37	39.04	42	40.31

Tableau 6.2 : résultats de module d'élasticité des BAP(Gpa)

Si on compare nos résultats avec le BAEL, la détermination du coefficient k défini par l'équation $E(t) = k (Rc(t))^{1/3}$; pour les mélanges testés dans cette étude ; donne des valeurs contiguës (en moyenne, $k = 10$ pour les BAP). Dans le règlement, k est pris égale à 11 ; Le règlement BAEL fournit des modules d'élasticité proches de ceux évalués expérimentalement.

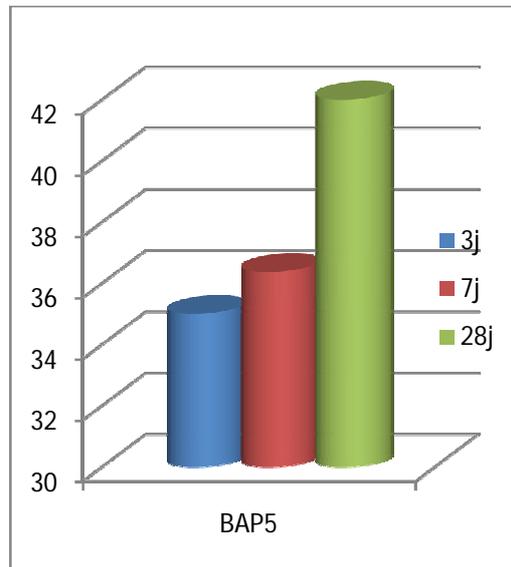
c. Influence de l'âge du béton :

Le module d'élasticité des bétons testés présente une augmentation proportionnelle avec le temps. On remarque un développement de 80.27% ; 84.93% ; 83.33% de la valeur du module d'élasticité à 28 jours pour les BAP3, BAP4, BAP5 respectivement en trois jours. Une autre élévation du module d'élasticité est observée à 7 jours, d'où les bétons autoplaçants atteignent 97.57% pour le BAP3, 91.09% pour BAP4 et 88.97% pour le BAP5.



(a)

(b)

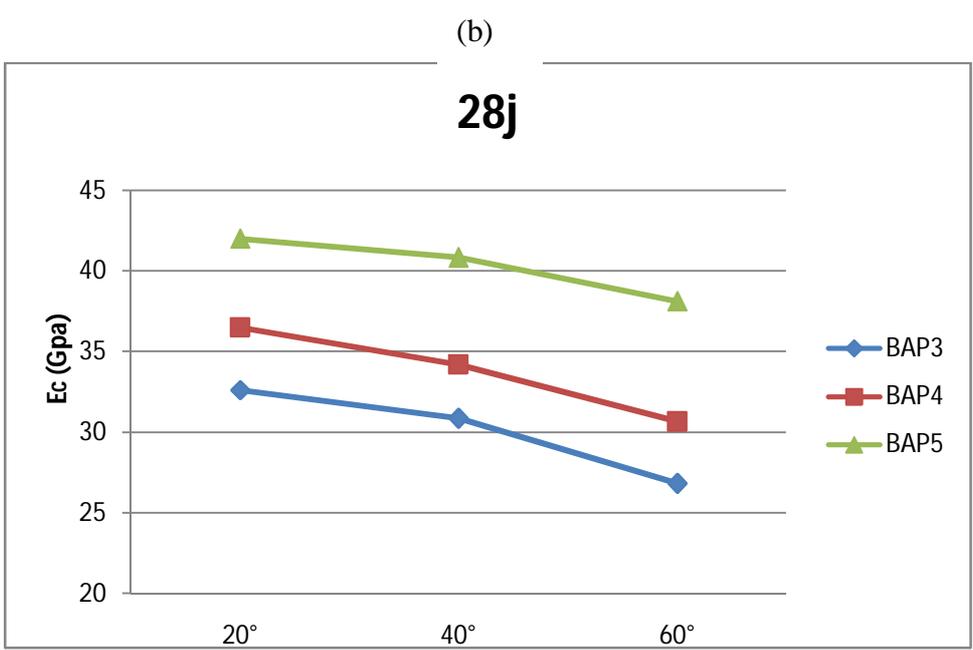
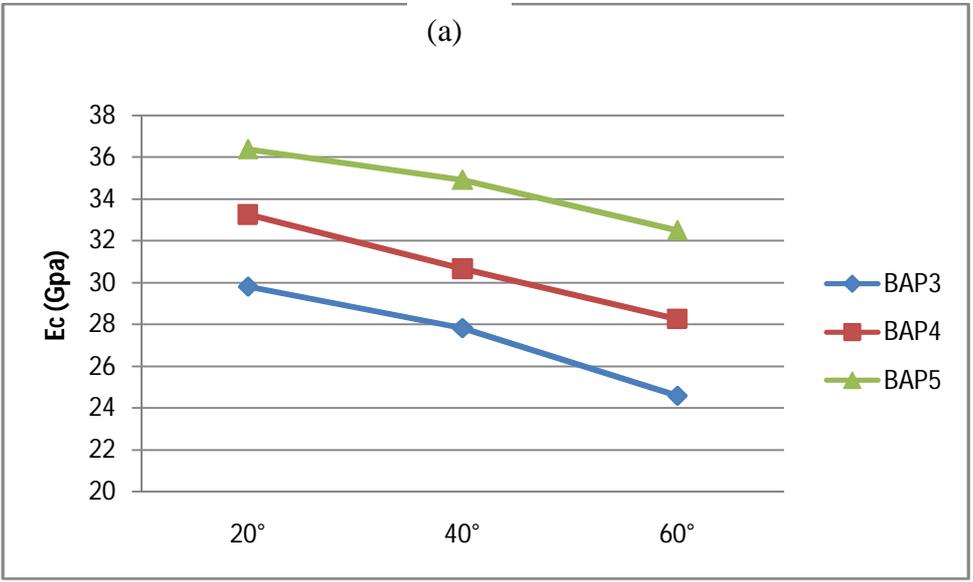
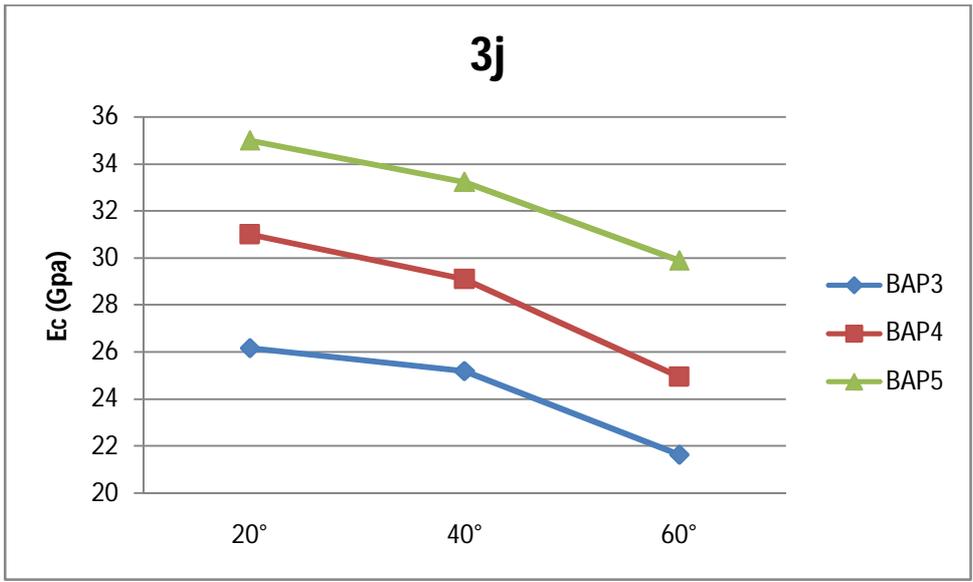


(c)

Figure 6.9 : variation du module d'élasticité en fonction du temps(a :BAP3, b :BAP4, c :BAP5)

6.3.3.2 avec traitement thermique :

L'évolution du module d'élasticité en fonction de la température pour les trois échéances d'essais est présentée sur la figure 6.10.



(c)

Figure 6.10 : évolution de module d'élasticité en fonction de la température (a :3j, b :7j, c :28j).

a. *Influence de paramètres de composition :*

Les trois bétons testés présentent une diminution continue, ils présentent un taux de réduction de 10% ; de la valeur initiale à 20°C ; à 40°C pour atteindre 20% pour les bétons subissant un traitement thermique à 60°C. La comparaison des évolutions des trois BAP a montré que leur tendance générale est presque similaire, à savoir une diminution du module d'élasticité moins importante à 40° pour le BAP5.

Les module d'élasticité des éprouvettes conservées à 20 °C sont toujours supérieurs à ceux des éprouvettes recevant un étuvage, et ceci quel que soit la température du mûrissement.

Les résultats de [Stegmaier 05] sur des bétons autoplaçants suivent une évolution similaire à nos résultats, à savoir une diminution du module d'élasticité, à la suite d'un mûrissement sous température, de 20 à 60 °C. Stegmaier montre que la diminution est significative pour les bétons avec un rapport E/C élevé.

b. *Influence de l'âge :*

L'âge n'a pas de grande influence sur le comportement des bétons autoplaçants quel que soit la température de murissement.

6.4 VARIATIONS DIMENSIONNELLES ET PONDERALES

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

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

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

6.4.1 AVANT CHOC THERMIQUE :

6.4.1.1 Variations dimensionnelles :

L'ordre de grandeur du retrait total mesuré dans notre recherche (retrait à 3 mois compris entre 400 et 660 $\mu\text{m}/\text{m}$) est proche de celui des données citées dans la littérature.

Turcry [Turcry 04] précise que les deux types de béton testés, ont un retrait total (à 3 mois) comparable et compris entre 450 et 600 $\mu\text{m}/\text{m}$ pour les BAP.

Les BAP testés par Persson [Persson 99] présentent un retrait total (à 3 mois) voisin de 660 $\mu\text{m}/\text{m}$.

a. Influence des paramètres de composition :

D'après la figure 6.11, la cinétique du retrait est la même pour les trois BAP. Une précipitation de rétraction dans les 20 premiers jours figure pour les trois bétons puis on remarque une diminution de la vitesse d'évolution du retrait dans les jours qui suivent.

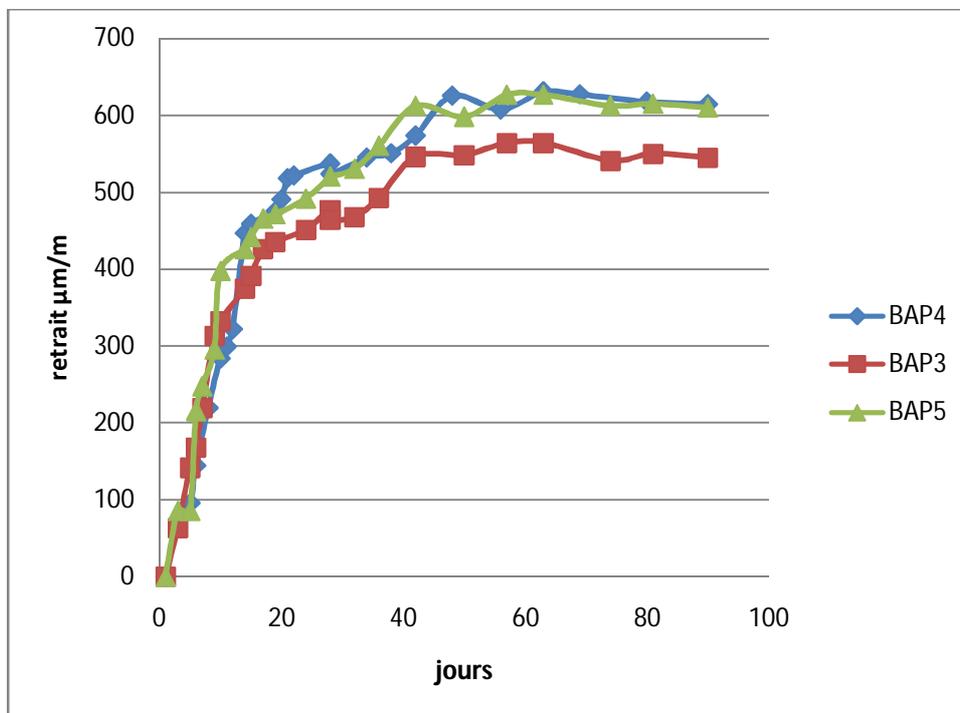


Figure 6.11 : retrait des trois bétons avec différents rapport C/L en mode ambiant.

Le béton autoplaçant contenant le dosage le plus élevé de fillers calcaires présente un retrait plus faible que les deux autres bétons [Boukni 10]. D'après Van cité par [Assié 04], les fillers calcaires peuvent avoir un effet positif en limitant le retrait des BAP, s'il est utilisé avec une finesse et une proportion adéquates. Cependant, la prépondérance de cet effet n'est pas toujours affirmée [Hasni 99], malgré que le BAP5 contient moins de fillers que le BAP4, les deux bétons exhibent un retrait similaire.

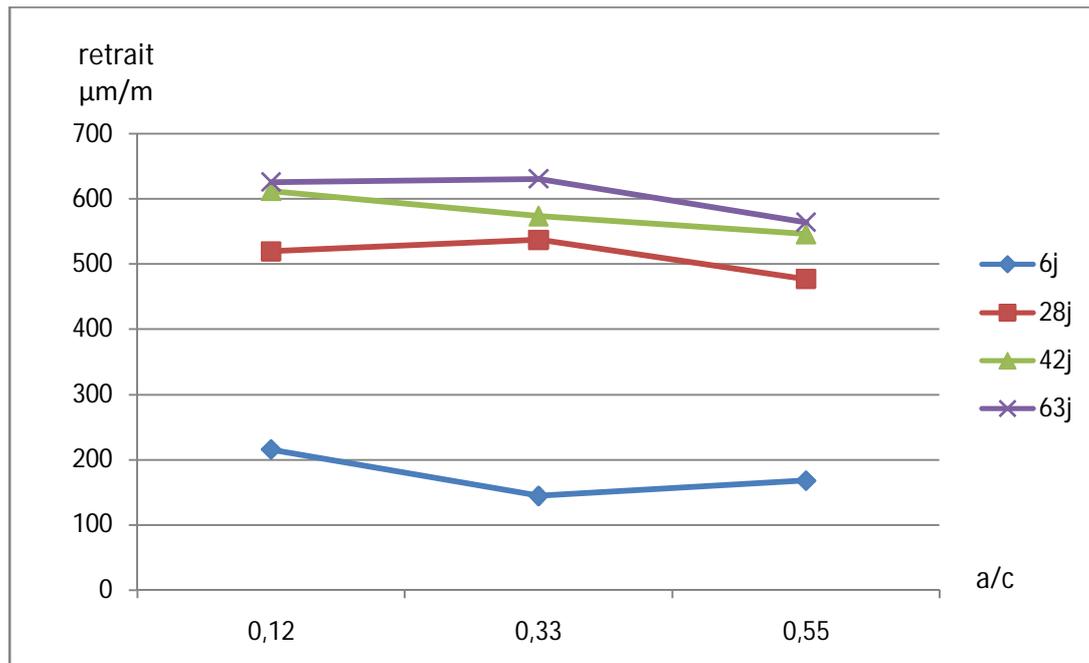


Figure 6.12 : Influence du rapport a/c sur le retrait.

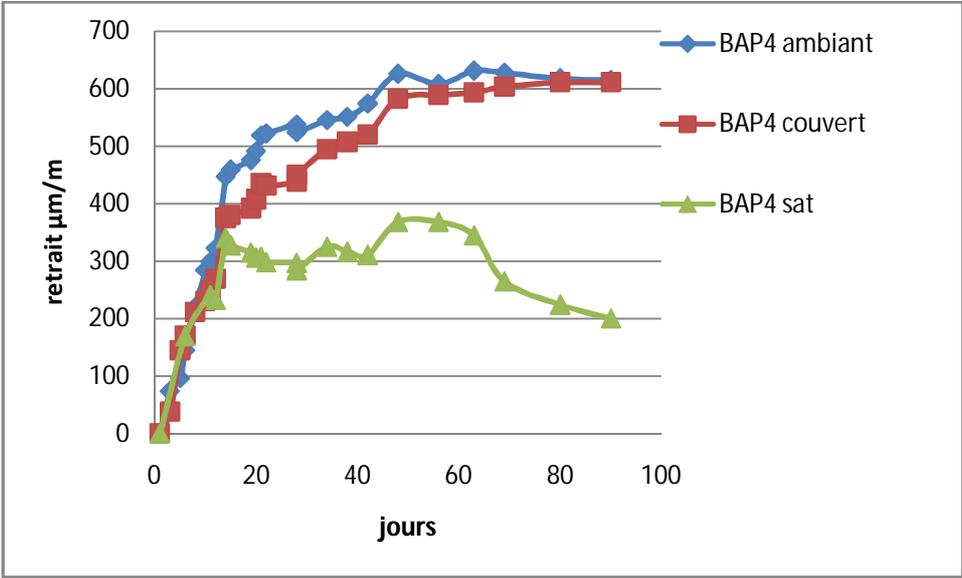
La figure 6.12 montre l'évolution du retrait des bétons autoplaçants testés en fonction du rapport (addition/ciment) à différents échéances. En premiers temps le béton avec le rapport a/c égale à 0.33 montre un retrait plus petit, contrairement après 28 jours il donne le retrait le plus élevé.

b. Influence de mode de conservation :

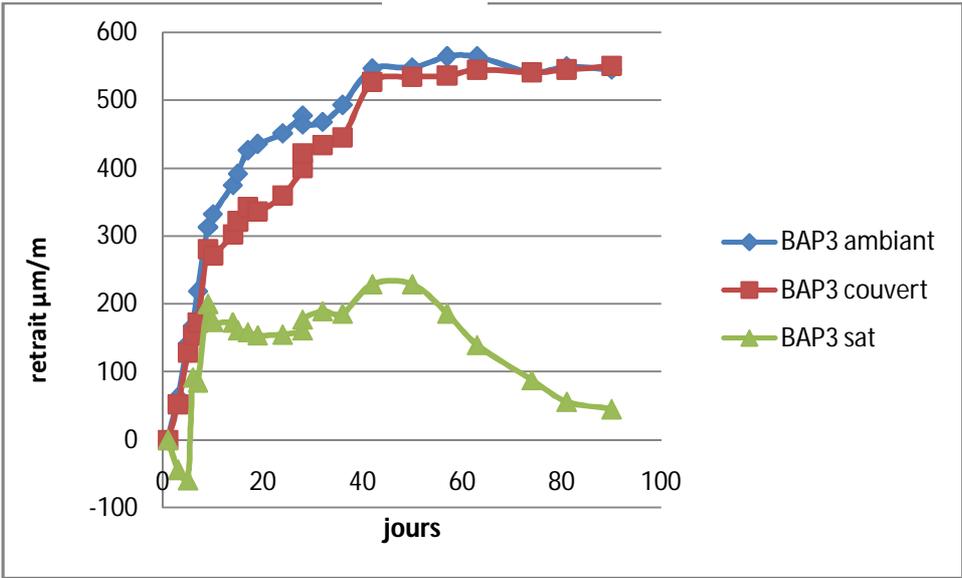
Les variations dimensionnelles des prismes munis de plots ont également été mesurées durant la phase de maturation à l'air libre, en milieu couvert et sous eau sont présentées sur la figure 6.13.

Un retrait est constaté quel que soit le matériau et quel que soit le mode de conservation. Le retrait à l'air libre est supérieur à celui en mode couvert cela est dû à l'exposition des surfaces des éprouvettes en milieu ambiant. Ce qui aide à l'échange hydrique entre le béton et l'ambiance. Sous l'eau, ce retrait est lié à l'autodessiccation du béton en cours d'hydratation. [Brue 09] a expliqué ce phénomène : L'eau présente dans la microstructure est progressivement consommée par la réaction d'hydratation. Du fait de la très faible perméabilité, l'eau environnante ne peut pas combler cette consommation immédiatement. S'en suit donc une cavitation et un équilibre air/eau/solide se met en place, conduisant à une pression capillaire dans le fluide (pression négative). Comme le système est à contrainte macroscopique nulle (on néglige le poids propre), le solide est mis en compression isotrope pour équilibrer la dépression capillaire. Cette compression se traduit à l'échelle

macroscopique par un retrait dit d'autodessiccation, menant à des déformations pour une bonne part irréversibles.



(a)



(b)

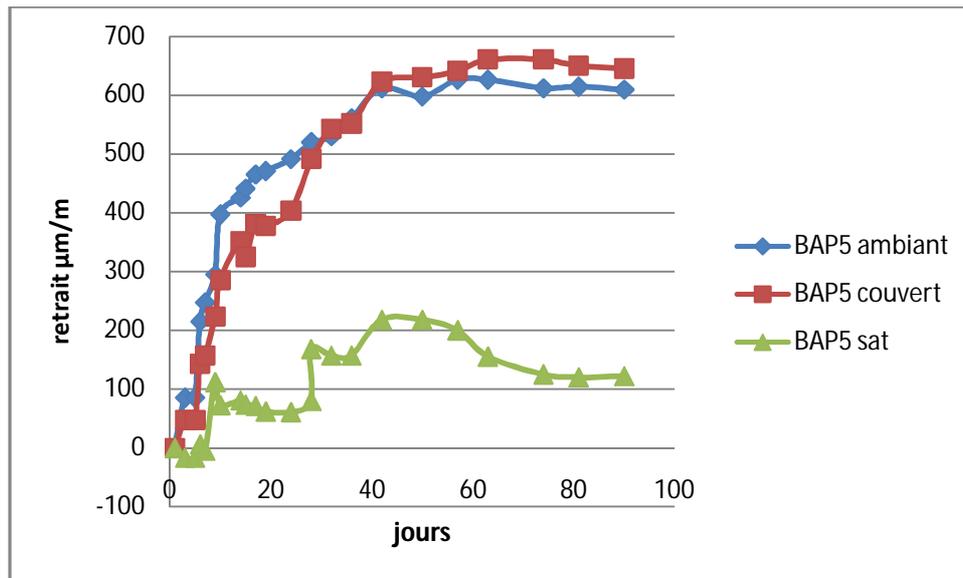


Figure 6.13: variation dimensionnelle ϵ (c) selon le mode de conservation(a :BAP3, b :BAP4, c :BAP5)

Après 50 jours, on remarque une diminution significative du retrait des éprouvettes conservées dans l'eau, donc d'après [Brue 09], la resaturation progressive annule la dépression capillaire qui a engendrée l'autodissiccation. Malgré cela, le retrait macroscopique reste important (de 200 $\mu\text{m/m}$ pour les deux bétons BAP3 et BAP5, à 300 $\mu\text{m/m}$ pour le BAP4).

6.4.1.2 Variations pondérales :

a. Influence des paramètres de composition :

La figure 6.14 regroupe les résultats obtenus de la mesure de la perte en poids. On constate deux phases essentielles dans l'évolution de la perte en poids. Dans la première phase, une grande quantité d'eau perdue varie de 2.5% à 4.5% en fonction du rapport (a/c). Dans la deuxième phase, une stabilisation des courbes apparaît d'où on remarque une progression très lente de la perte en poids.

La perte en poids est une fonction croissante du (a/c). Lors de l'hydratation, les pores de la pâte sont remplis petit à petit par les hydrates. Si on remplace une partie du ciment par une addition, la quantité d'hydrates formés diminue. Par conséquent, la taille des pores doit augmenter avec le rapport a/c. Par ailleurs, les échanges d'humidité sont fonction de la taille des pores connectés au milieu extérieur[Turcry 04]. En théorie, les échanges doivent

également augmenter avec le rapport a/c. l'évolution de la perte en poids dans ce sens : la quantité d'eau évaporée est fonction du rapport a/c.

D'autre part, Dans le cas des faibles rapports a/c, ou encore les faibles E/C, l'humidité relative des pores chute rapidement, parce que l'eau capillaire est vite consommée par les réactions d'hydratation [Loukili 96 cité par Turcry 04]. Or la diffusivité décroît avec la teneur en eau. Vis à vis de l'hydratation, la diffusivité doit donc diminuer avec le rapport a/c.

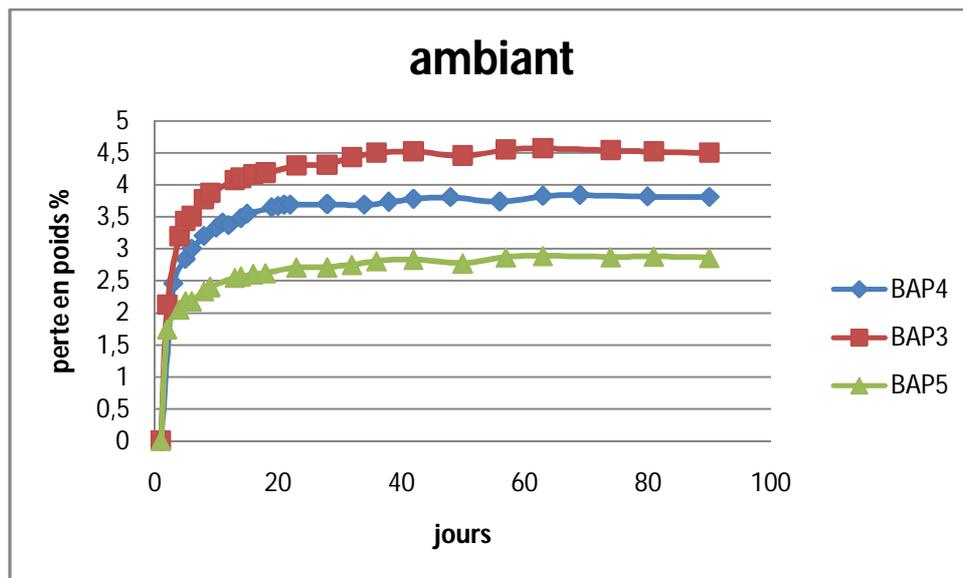
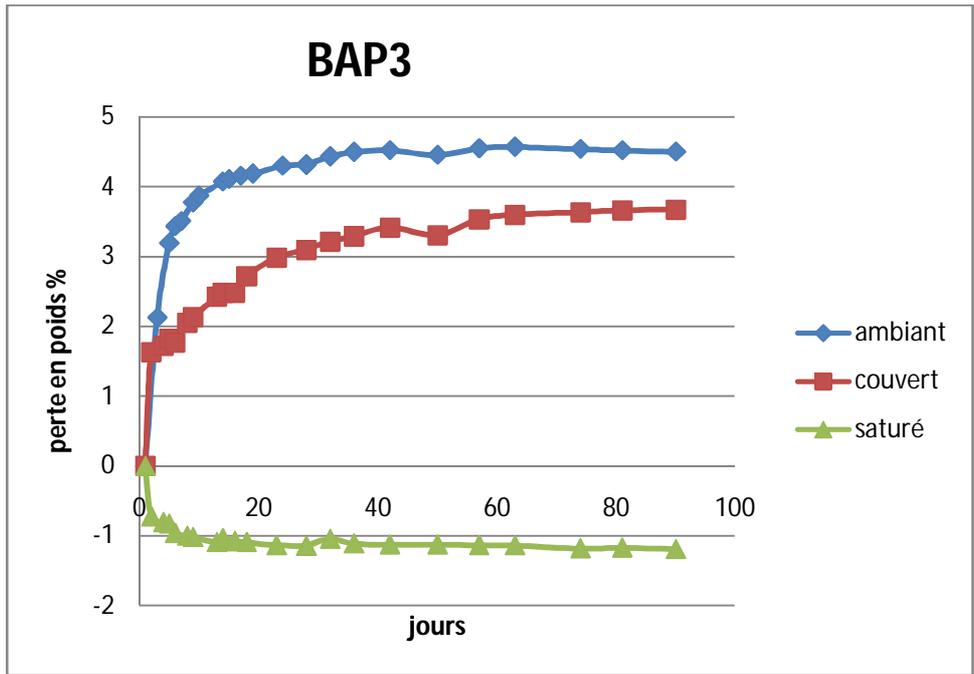


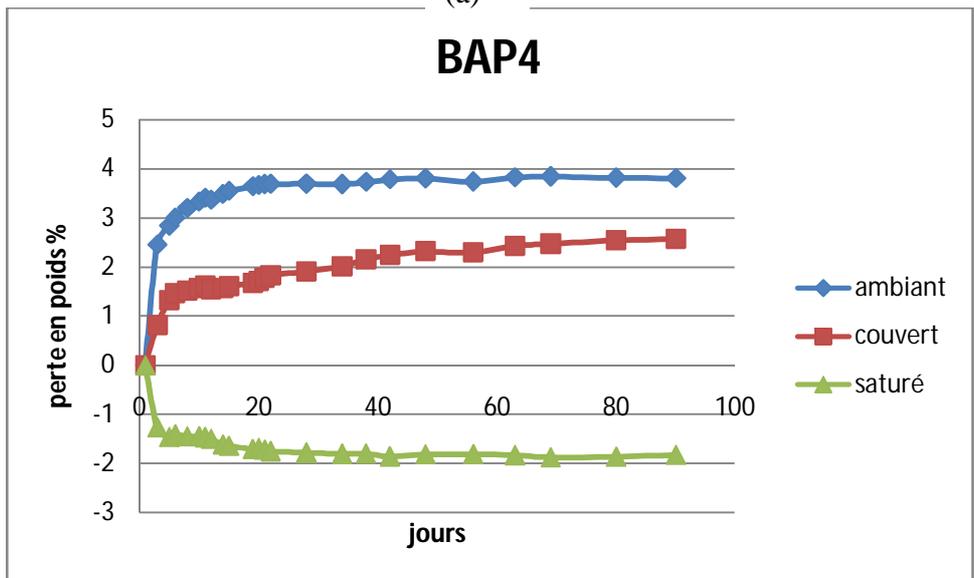
Figure 6.14 : perte en poids des BAP conservés à l'air libre

b. Influence de mode de conservation :

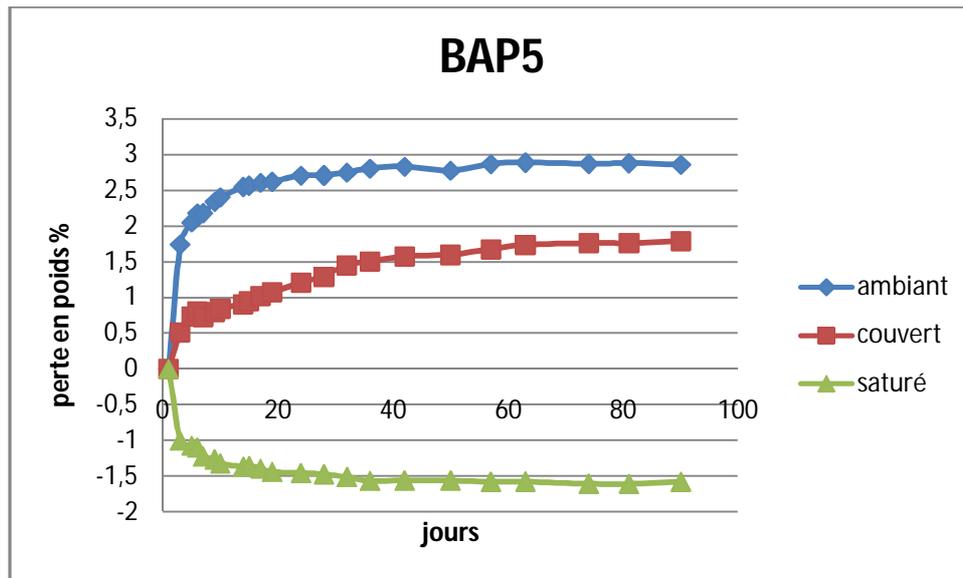
La figure 6.15 présente les résultats relatifs à l'évolution de la perte en poids en fonction du temps pour les bétons testés et conservés à l'air libre, en mode couvert et en milieu saturé. On observe une augmentation de la pente initiale des courbes à mesure que le mode de conservation change du milieu couvert au milieu ambiant. On constate également en milieu saturé une absorption d'eau malgré que les éprouvettes conservées à l'eau, aient montrées un retrait pas un gonflement. Durant la première phase on constate sur les courbes que l'évolution de la perte en poids ralentit très fortement, quel que soit le mode de conservation considéré. A partir de ce ralentissement, les courbes « s'aplatissent ».



(a)



(b)



(c)

Figure 6.15 : perte en poids en différent mode de conservation(a :BAP3, b :BAP4, c :BAP5).

La valeur de la perte en poids mesurée en mode couvert est inférieure à celle obtenue à l'air libre. Cette diminution d'amplitude est probablement due à l'absence d'échange hydrique avec l'ambiance pour le milieu couvert.

6.4.1.3 Relation retrait perte en poids :

Dans la littérature les courbes retrait perte en poids présentent trois phases. La troisième phase n'apparaît pas dans nos courbes, donc les courbes du retrait en fonction de la perte en poids obtenues dans cette étude présentent seulement deux phases (figure 6.16).

-Lors de la première phase, la perte de masse n'engendre quasiment pas de retrait. Cette phase, courte dans le temps, est associée à l'évaporation de l'eau des pores les plus larges à la périphérie de l'éprouvette [Khelidj 98]. Granger [Turcry 04] montre au contraire qu'il y a une fissuration de la peau due au gradient d'humidité très intense entre la surface et le cœur du béton. Cette fissuration diminue considérablement l'amplitude du retrait mesuré.

-Lors de la deuxième phase, le retrait évolue linéairement avec la perte de masse. Le retrait est la réponse du squelette à un départ d'eau ; il dépend des propriétés mécaniques du béton, mais aussi des propriétés de transfert. Le gradient d'humidité, et le retrait, deviennent uniformes dans la section de l'éprouvette. Son raccourcissement a tendance à refermer les fissures créées pendant la première phase [Turcry 04].

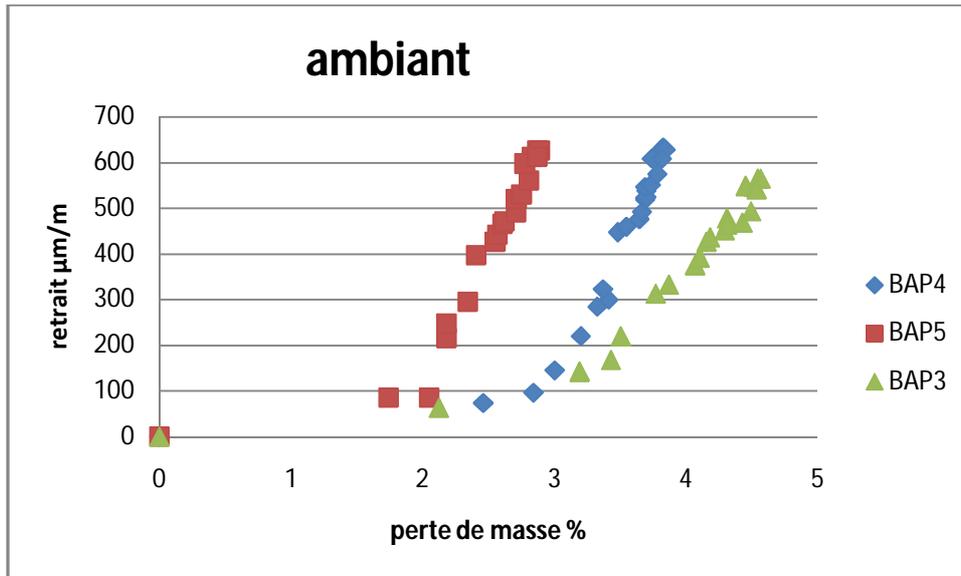


Figure 6.16 : évolution de retrait en fonction de perte en poids.

On remarque sur la figure 6.16, que la perte de masse nécessaire pour amorcer le retrait augmente avec le rapport a/c. De plus, au cours de la deuxième phase, le développement du retrait est beaucoup plus progressif pour les BAP avec additions minimales. La taille des pores influe certainement sur la diffusion d'humidité ; mais, en contrepartie, la réaction du béton à un départ d'eau est aussi modifiée. La pression capillaire (ou de disjonction) dépend en fait du rayon des pores. En définitive, l'un des effets du rapport a/c est sans doute de changer la courbe de développement des pressions hydriques en fonction du degré de saturation [Benboudjema 02].

La perte de masse est plus élevée au jeune âge chez les bétons contenant une teneur d'addition élevée. Il est possible donc que la diffusivité diminue plus rapidement lorsque le rapport a/c augmente.

6.4.2 CHOC THERMIQUE :

6.4.2.1 Variations dimensionnelles :

Comme la plupart des matériaux, le béton subit une déformation thermique, lorsqu'il est soumis à un changement de température. Donc les bétons testés soumis à une température de 150°C ont subits une dilatation instantanée variant selon les paramètres de composition et le mode de conservation (voir figure 6.17). 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.

Les granulats sont les principaux constituants volumétriques du béton. Ils occupent entre 63 et 75% du volume total. Leur dilatation thermique jusqu' à 600 °C est le paramètre dominant de la déformation totale d'après Diederichs et al [Diederichs 92]. D'autre part la pâte de ciment durcie se dilate dans la plage de températures allant jusqu'à 150°C (Jumpannen, 1989, Khoury 1995, Kosiorek 1994) cité par [Gaweska 04].

a. Influence de mode de conservation :

Le changement du mode de conservation n'a pas un effet significatif sur la dilatation thermique instantanée des bétons autoplaçants soumis à un chauffage à 150°C.

	Mode ambiant	Mode couvert	Mode saturé
BAP3	403.57	403.57	474.99
BAP4	271.43	242.86	232.14
BAP5	617.85	571.42	582.15

Tableau 6.3 : la dilatation instantanée des bétons.

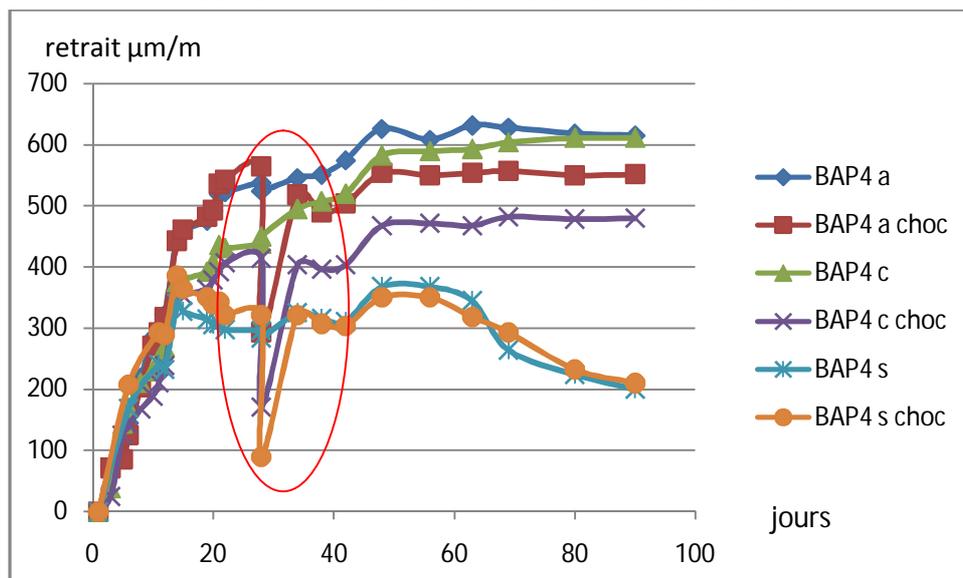


Figure 6.17 : changement volumétrique lors d'un choc thermique des bétons.

b. Influence de paramètres de composition :

Le tableau 6.3 regroupe les résultats obtenus pour les bétons autoplaçants. On remarque que le rapport C/L a un grand effet sur la dilatation thermique due au chauffage des bétons à une température de 150°C. Une différence de dilatation atteint 50% entre les deux bétons ayant une différence de dosage de ciment de 200kg/m³.

Les bétons autoplaçants testés renferment un squelette granulaire identique en termes de nature ou en termes de dosage. Donc la dilatation dépend du dosage de ciment. Le remplacement d'une partie de ciment par les fillers diminue la valeur de la dilatation

instantanée, d'un autre côté, le BAP3 ($a/c=0.73$) présente une dilatation supérieure à celle du BAP4 ($a/c= 0.33$). Ce qui nous amène à dire que l'augmentation du rapport a/c diminue l'amplitude de dilation instantanée des bétons subissant un choc thermique à 150°C pour une substitution de ciment par le filler d'environ de 30%, l'augmentation du dosage de fillers calcaires ($a/c=0.73$) indique un effet négatif.

6.4.2.2 Variations pondérales :

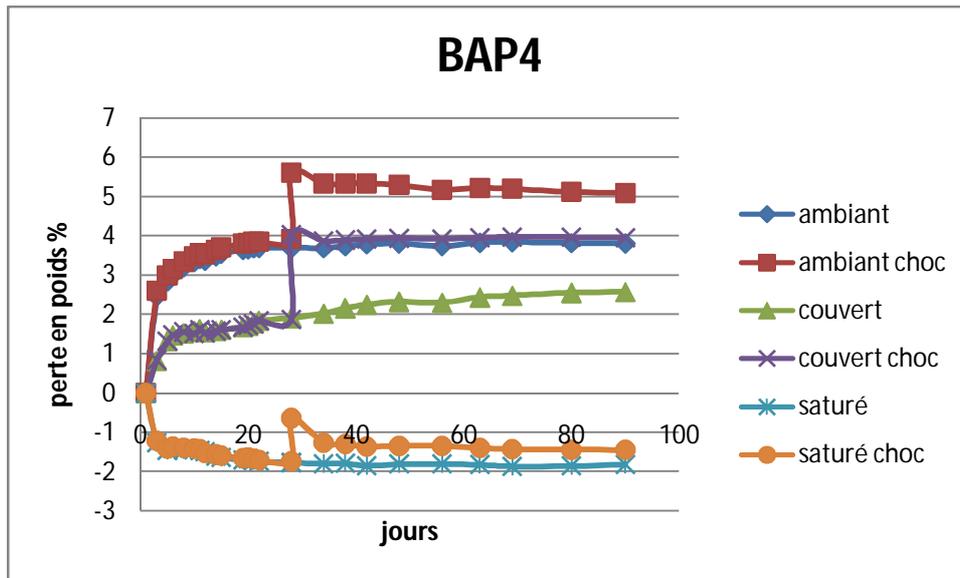


Figure 6.19 : pic de perte en poids lors de choc thermique

a. Influence du mode de conservation :

Sur le tableau 6.4, on observe la perte en poids en phase transitoire, c'est-à-dire durant le choc thermique. Contrairement aux variations dimensionnelles, les pertes en poids sont influencées par le mode de conservation. Les éprouvettes ayant subi une conservation en mode couvert exhibent une perte en poids supérieure que les deux autres modes de conservation. Exception pour le mélange BAP4 où la perte en poids en mode saturé est plus grande qu'en mode couvert ainsi qu'en mode ambiant.

Perte en poids %	Mode ambiant	Mode couvert	Mode saturé
BAP3	1.70	2	1.36
BAP4	1.79	2.15	2.37
BAP5	1	1.39	1.36

Tableau 6.4 : perte en poids en fonction de mode de conservation

b. Influence de paramètres de composition :

Lors du choc thermique, la variation dimensionnelle instantanée est une fonction décroissante de la perte en poids instantanée vis-à-vis du rapport a/c. Les mélanges présentant une perte en poids instantanée faible, engendrent une dilatation thermique instantanée plus élevée. La perte en poids instantanée due au choc thermique augmente quand a/c diminue de 0.73 à 0.33, cette diminution de perte en poids apparaît quand le rapport a/c atteint 0.12 quel que soit le mode de conservation.

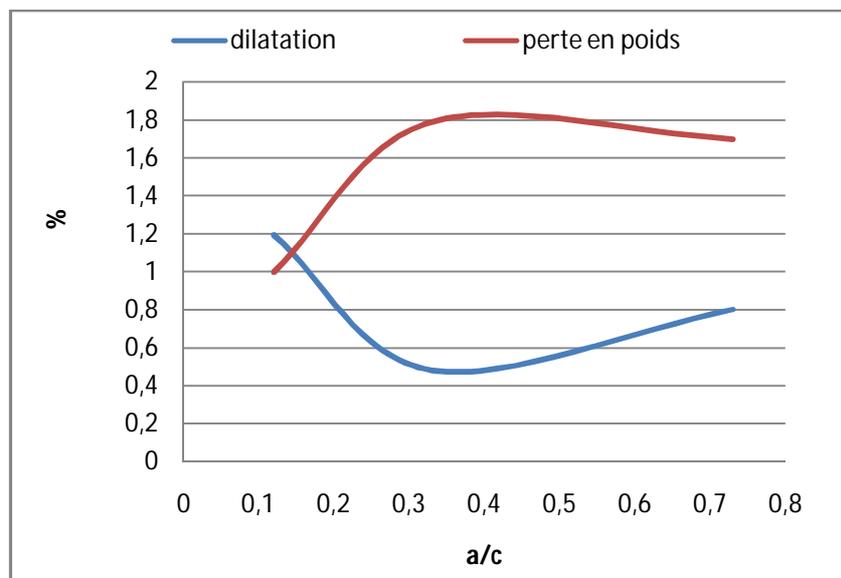


Figure 6.20 : évolution des variations dimensionnelles et pondérales instantanées en fonction du (a/c) en mode ambiant.

6.4.3 APRES CHOC THERMIQUE :

6.4.3.1 Variations dimensionnelles :

a. Influence du mode de conservation :

La figure 6.21 indique que tous les BAP subissent un gonflement pour regagner après 24 heures plus de 90% de la valeur du retrait avant le choc thermique. Les bétons poursuivent leur retrait jusqu'à 45 jours. Puis on remarque une stabilisation de la cinétique pour les modes de conservation à l'air libre et couvert. Les bétons conservés à l'air libre et en mode couvert présentent des retraits supérieurs à ceux conservés dans les mêmes modes correspondants mais ayant subi un choc thermique. Les éprouvettes en milieu saturé, regagnent leurs états initiaux et poursuivent leurs évolutions par gonflement.

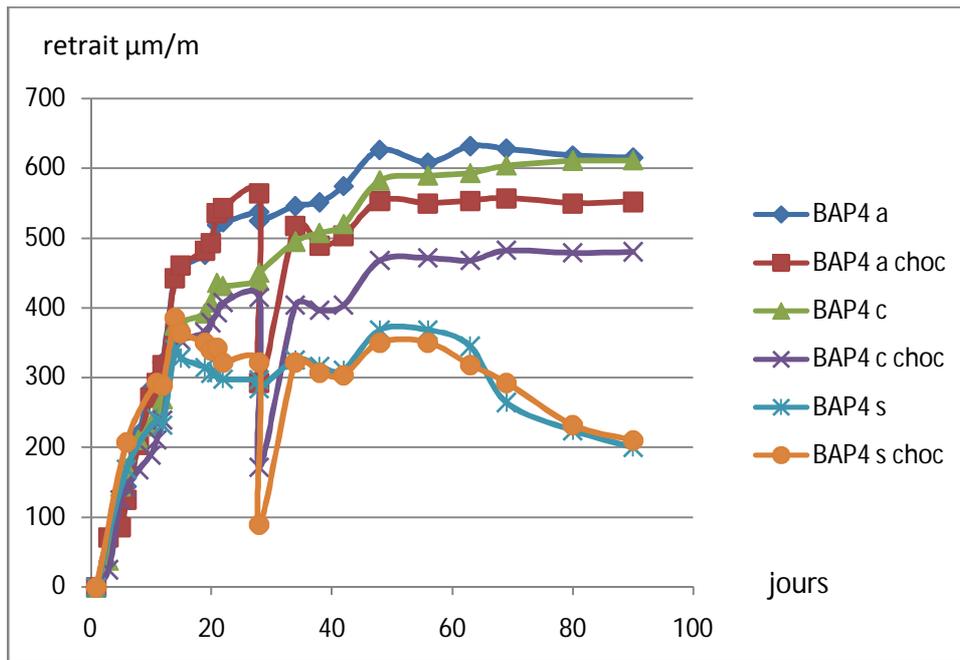


Figure 6.21 : variations dimensionnelles après choc thermique selon les trois modes de conservation

b. Influence de paramètres de composition :

Globalement on remarque dans la figure 6.22, que le choc thermique rend les bétons moins susceptibles à se rétractés. Tous les bétons chauffés à 150°C présentent un retrait inférieur que celui des témoins. L'évolution des variations dimensionnelles sont différentes pour les bétons subissant un choc thermique. A l'inverse des témoins, quand a/c augmente de 0.12 à 0.33 le retrait augmente. Quand a/c augmente de 0.33 à 0.73 le retrait diminue.

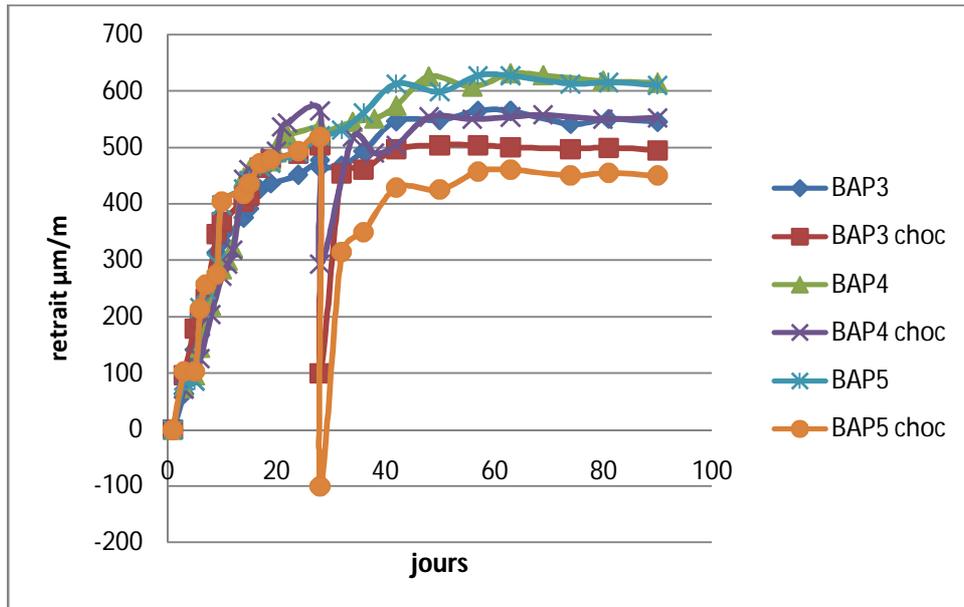


Figure 6.22 : évolution du retrait après choc thermique en mode ambiant.

La figure 6.23 montre le retrait des bétons testés après 28 jours. La phase après choc est présentée séparément, on distingue deux comportements différents :

En premier lieu, l'évolution des variations dimensionnelles des éprouvettes ayant subi un choc thermique est plus prépondérante que les éprouvettes témoins, ce comportement figure dans le cas du BAP5 avec un rapport $a/c = 0.12$. Le BAP5 a repris son évolution après le choc thermique, la différence mentionnée ; entre le retrait des témoins et des éprouvettes soumises au choc thermique ; est de $32.14\mu\text{m/m}$ à 42 jours et arrive à $56.06\mu\text{m/m}$ à 90 jours.

Contrairement, dans le deuxième cas le retrait est supérieur pour les éprouvettes témoins que celles ayant subi un choc thermique, c'est le cas du BAP4 avec $a/c=0.33$ et le BAP3 ($a/c=0.73$).

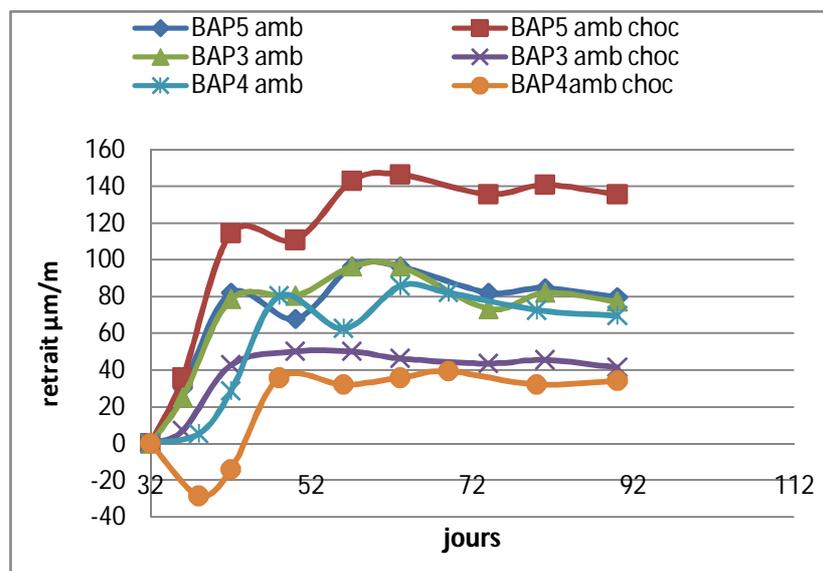
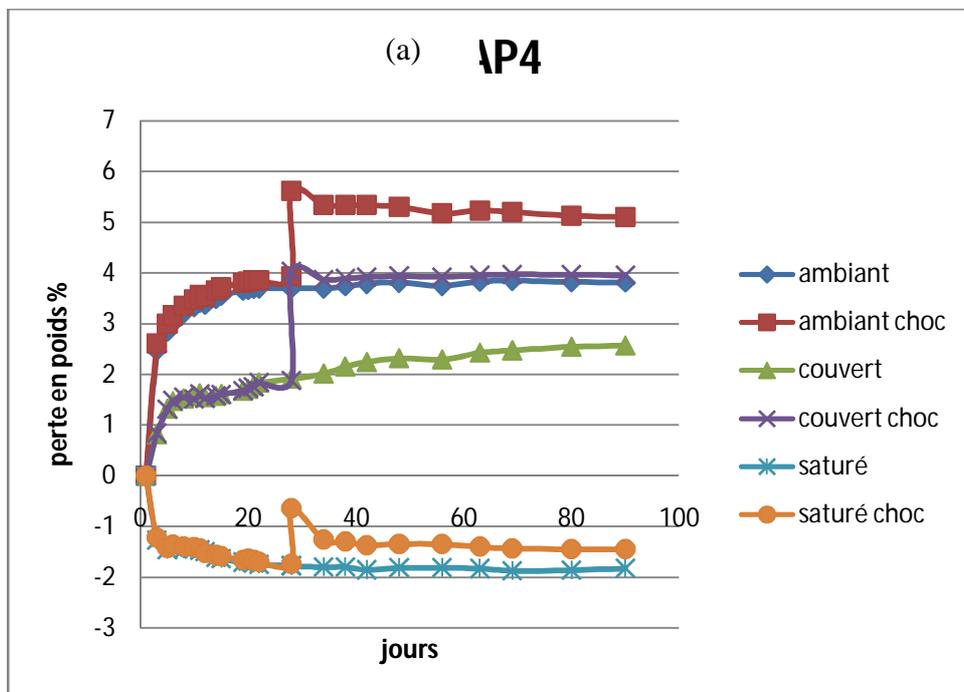
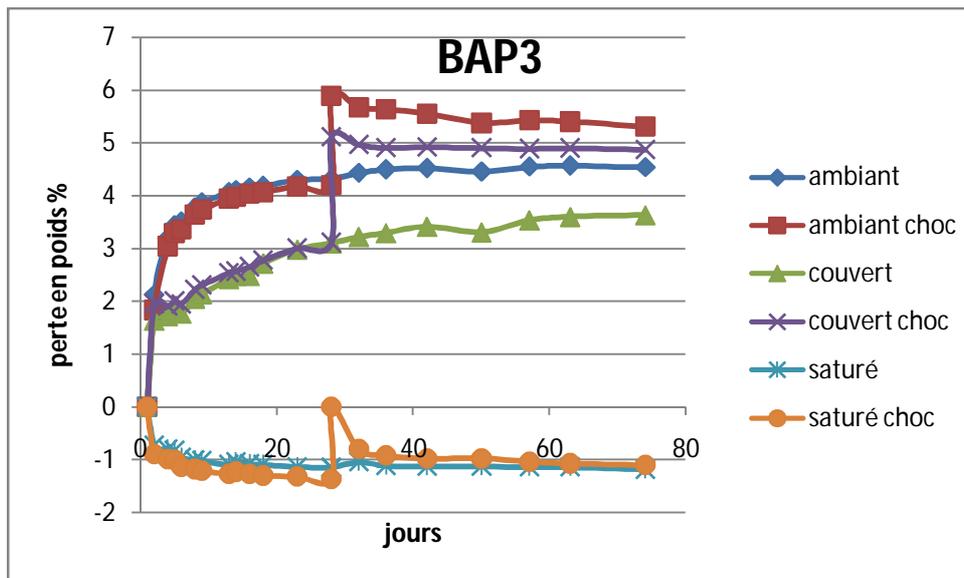


Figure 6.23 : variations dimensionnelles des BAP après choc thermique.

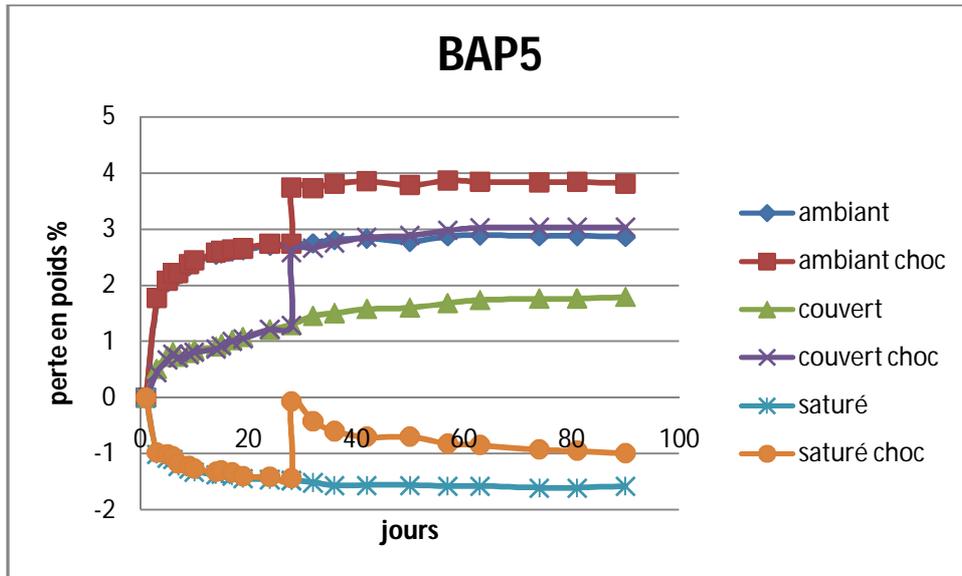
6.4.3.2 Variations pondérales :

a. Influence du mode de conservation :

Quel que soit le mode de conservation, les pertes en poids des bétons sujettes au choc thermique sont plus élevées que celles des bétons témoin. En mode saturé, on remarque un gain du poids pour les trois bétons, les courbes présentées sur la figure 6.24 se rapprochent et se superposent pour le BAP3



(b)



(c)

Figure 6.24 : évolution de perte en poids en fonction du mode de conservation après choc thermique(a :BAP3, b :BAP4, c :BAP5).

b. Influence de paramètres de composition :

Les bétons subissant un choc thermique montrent le même comportement que les bétons témoins, la perte en poids est toujours influencée par le rapport a/c [Boukni 09]. En augmentant a/c la perte en poids augmente. En mode saturé le gain du poids est d'autant plus élevé que a/c augmente.

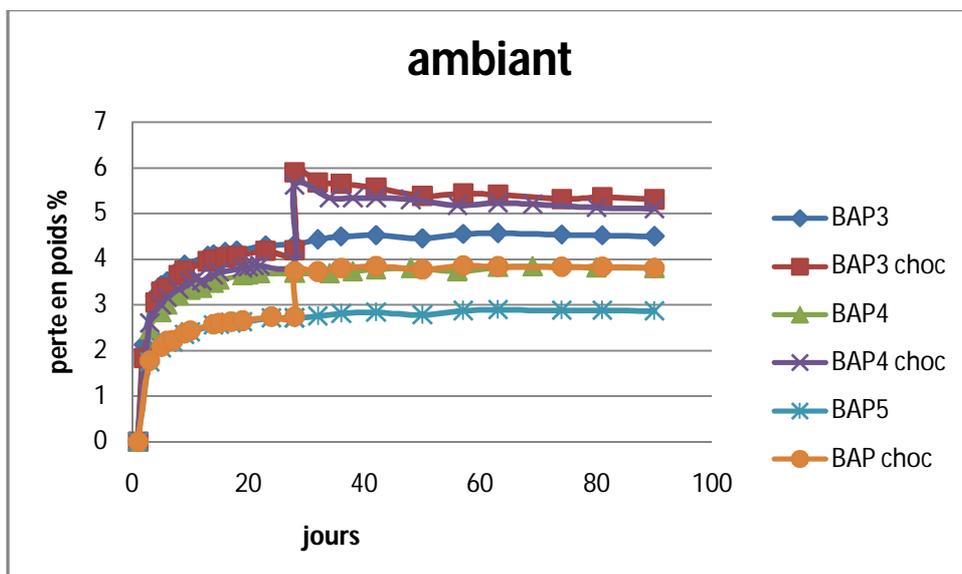


Figure 6.25: perte en poids des bétons testés après choc thermique.

Les courbes de l'évolution de la perte en poids en fonction du temps après le choc thermique, sont regroupées dans la figure 6.26. La première constatation à faire, est la réhumidification des BAP3 ($a/c=0.73$) et BAP4 ($a/c= 0.33$) ayant subi un choc thermique. Une continuité de la perte en poids pour le BAP5 ($a/c= 0.12$) même après le choc thermique.

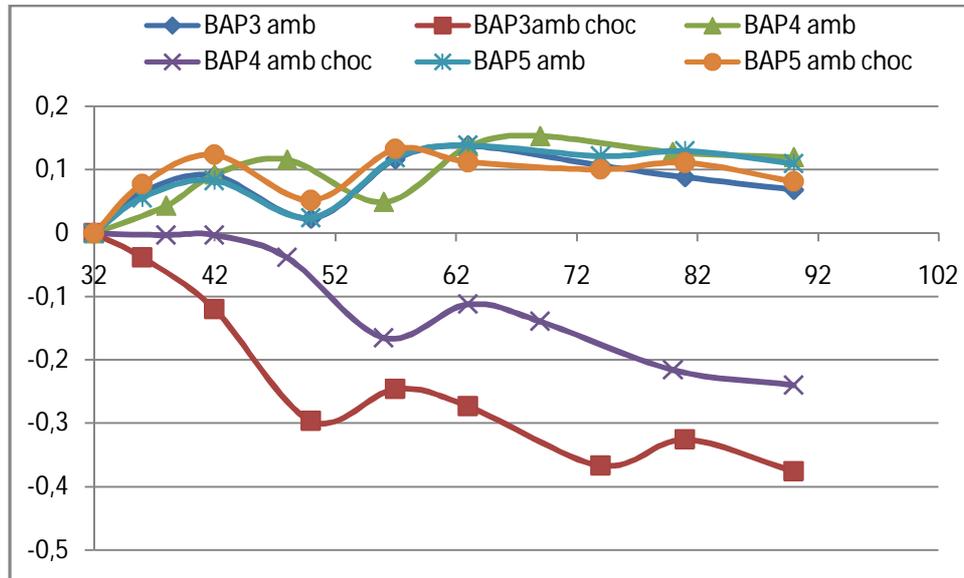
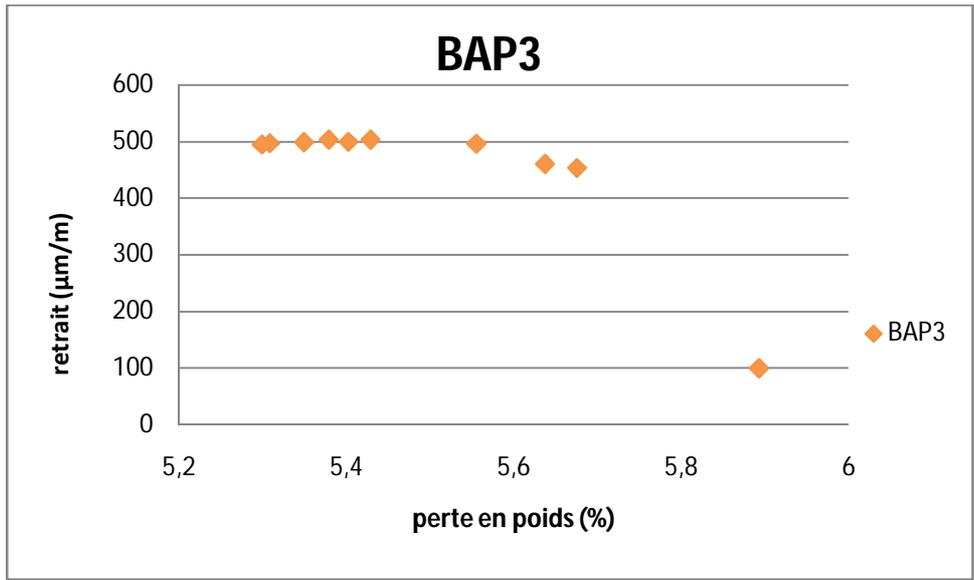


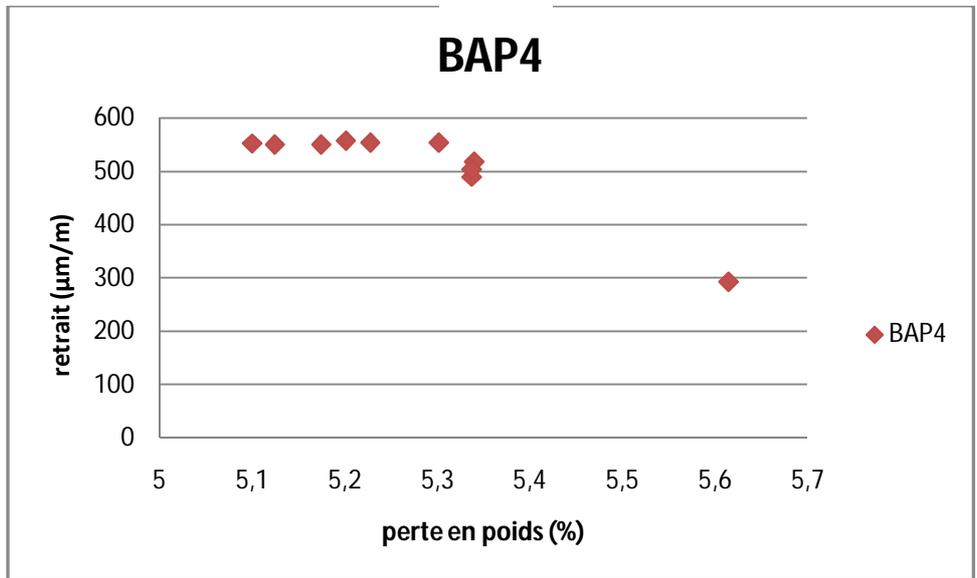
Figure 6.26 : évolution de la perte en poids après choc thermique.

6.4.3.3 Relation retrait/perte en poids :

La relation du retrait/perte en poids des bétons soumis à un choc thermique à 28 jours est présentée dans la figure 6.27. La relation varie avec le coefficient a/c , la même allure est remarquée pour $a/c= 0.73$ et 0.33 mais en diminuant a/c jusqu'au 0.12 le béton montre un comportement différent.



(a)



(b)

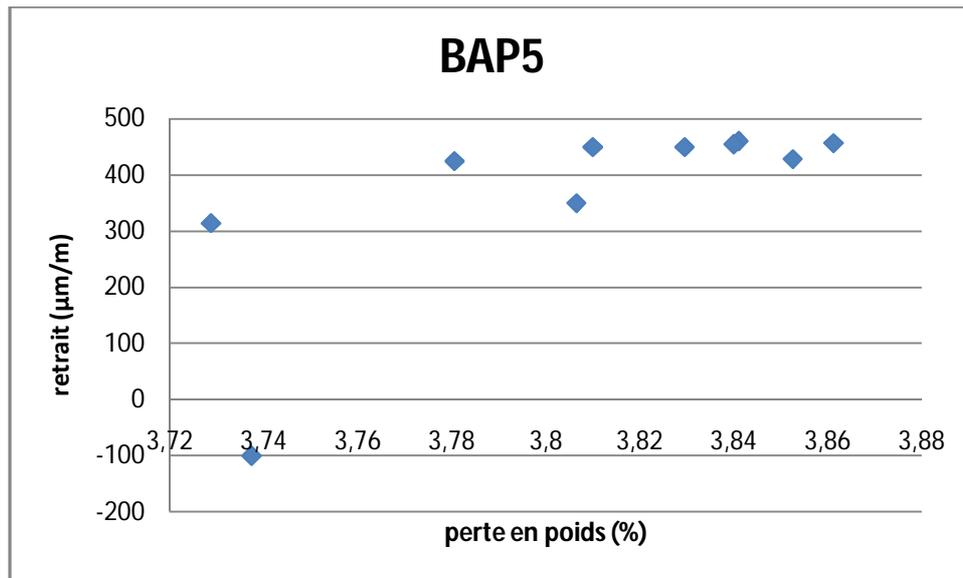


Figure 6.27 : relation retrait perte en po^(c) étions subissant un choc thermique(a :BAP3, b :BAP4, c :BAP5).

Les courbes dans la figure 6.27 dévoilent deux phases remarquables dans la relation retrait/perte en poids des BAP3 et BAP4:

-Lors de la première phase, la perte de masse ne s'accompagne d'aucun retrait. Cette phase coïncide avec la troisième partie décrite dans la littérature où Granger [Turcry 04] a expliqué ce phénomène par le fait que les fissures à la périphérie ne peuvent pas se refermer complètement à cause des frictions des lèvres des fissures l'une sur l'autre.

- lors de la deuxième phase, le retrait évolue à nouveau linéairement avec la perte en poids mais une relation descendante non ascendante.

Mais en parlant du BAP5, le comportement se change. On remarque une dispersion des résultats dans la phase 1. En seconde phase la perte en poids n'engendre pas de retrait.

6.5 PROPRIETES MECANIQUES A HAUTES TEMPERATURES :

6.5.1 RESISTANCE A LA COMPRESSION :

Les valeurs de la résistance résiduelle en compression sont regroupées sur la Figure 6.28. On peut distinguer deux phases successives dans l'évolution de la résistance en compression.

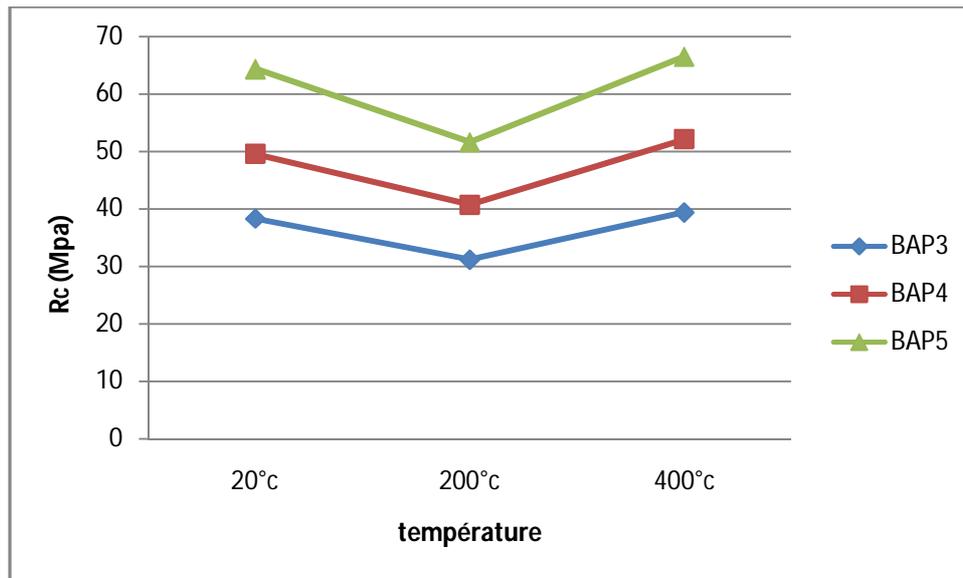


Figure 6.28 : évolution de la résistance de compression en fonction de la température.

La première phase, entre 20 °C et 200 °C nous notons une diminution des résistances d'environ 8 à 20%. D'après [Gaweska 04], cet affaiblissement peut s'expliquer par la dilatation thermique de l'eau ($\alpha_w = 70 \times 10^{-6}$) qui peut entraîner un écartement des feuillettes du gel CSH. L'écartement des feuillettes provoque une diminution des forces d'attraction entre ces feuillettes. En sachant que la rupture en compression est liée au dépassement des contraintes de cisaillement, l'affaiblissement des liaisons entre les hydrates peut provoquer l'apparition de micro-défauts facilitant le glissement. De plus les pressions de la vapeur d'eau qui se créent dans le matériau induisent des contraintes internes non négligeables exercées sur le squelette solide.

Puis, en deuxième phase entre 200°C et 400°C, nous observons une augmentation des valeurs de la résistance par rapport à la valeur plus faible à 200°C. Ceci peut être expliqué par l'augmentation du processus de séchage. Le départ d'eau adsorbée provoque un accroissement des forces de surface entre les particules de gel de CSH qui assurent la résistance de la pâte de ciment.

6.5.2 RESISTANCE A LA TRACTION PAR FLEXION :

La figure 6.25 présente la variation de la résistance résiduelle de la traction par flexion en fonction de la température. Les résistances résiduelles en flexion des bétons testés diminuent de manière continue avec l'élévation de la température. Entre 20 et 200°C, la résistance décroît rapidement. On observe une stabilisation entre 200 et 400°C. Cependant, nous pouvons conclure que l'évolution de la résistance à la traction par flexion en fonction de la température est la même pour tous les bétons étudiés.

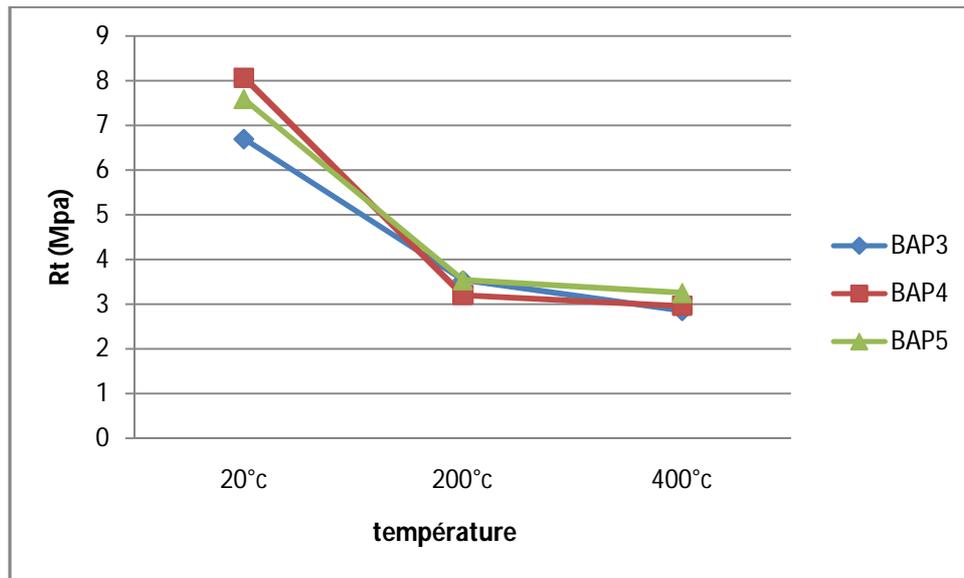


Figure 6.28 : résistance de traction par flexion en fonction de la température

Contrairement aux résistances à la compression, on observe une diminution des résistances à la flexion des BAP testés. Ceci est en accord avec les résultats de [Xu 01] qui montre par des essais de micro-dureté sur des bétons ordinaires que l'auréole de transition est affectée par le chauffage : elle est fragilisée par l'apparition de fissures. De plus, l'auréole est affectée par l'incompatibilité pâte-granulat. Cette incompatibilité induit des contraintes de traction au sein de la pâte et de compression au sein des granulats. Ce comportement opposé engendre une microfissuration au niveau de l'interface et donc, au sein de l'auréole de transition, Blundell 76 cité par [Hana 10]. Il faut ajouter également la déshydratation. Elle entraîne la détérioration des liaisons créées entre les granulats et la pâte de ciment, d'où une microfissuration. Le degré de fissuration a une influence plus importante sur la résistance en traction qu'en compression.

6.6 CONCLUSION :

L'objectif de ce chapitre est de présenter les résultats obtenus. En premier lieu, l'influence du traitement thermique au jeune âge des bétons est exposée. On a présenté l'influence de l'âge et des paramètres de composition sur les propriétés mécaniques (la résistance en traction, en compression et le module d'élasticité). En second lieu, le traitement thermique est effectué à 90 jours en exposant les bétons à un choc thermique à 150°. Les résultats des variations dimensionnelles et pondérales avant et après choc thermique ainsi que la relation retrait/perte en poids sont analysés. Les principaux résultats sont : Le béton autoplaçant contenant le dosage le plus élevé de fillers calcaires présente un retrait plus faible que les deux autres

bétons. Les bétons testés soumis à une température de 150°C ont subits une dilatation instantanée qui varie selon les paramètres de composition et le mode de conservation. Quel que soit le mode de conservation, les pertes en poids des bétons sujettes au choc thermique sont plus grandes que celles des bétons témoins. La relation retrait/perte en poids suit deux phases avant choc et deux phases après choc thermique. Et finalement, les propriétés mécaniques des bétons en fonction des températures allant jusqu'à 400°C font l'objet de la dernière partie. On a distingué deux phases consécutives dans l'évolution de la résistance en compression, une diminution jusqu'à 200°C puis une augmentation apparait de 200°C et 400°C. Une diminution continue est observée pour la résistance en traction avec l'élévation de la température.

Conclusion générale et perspectives :

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

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

Bien que ces avantages soient concrets et que l'intérêt qu'ils suscitent chez les industriels soit grandissant, les BAP demeurent en dessous de l'utilisation qui pourrait en être faite en raison de questions sans réponses posées par de nombreux maîtres d'ouvrage et maîtres d'œuvre. Certaines des inconnues qui les concernent telle que le comportement des BAP dans le climat algérien où la température accède les 40°, ainsi que son comportement vis-à-vis des températures élevées nécessitent donc d'apporter des résultats de recherches qui répondent à ces questions.

Pour répondre à nos objectifs, nous avons commencé par définir les formulations de béton, à partir des matériaux locaux avec un squelette granulaire identique et un dosage de fillers différents (le rapport addition /ciment égale à 0.12, 0.33, 0.73). Les bétons sont formulés à partir de la méthode de [NanSu 01].

Toutes ces formulations ont été ensuite caractérisées à l'aide d'essais spécifiques pour vérifier leurs aptitudes à remplir le cahier des charges imposé pour un BAP à l'état frais : l'écoulement, la ségrégation dynamique et statique et la stabilité, qui se sont révélés corrects pour les trois formulations.

L'étude de comportement des BAP vis-à-vis la température est réalisée en trois parties. La première partie concernant l'évolution des propriétés mécaniques des bétons ayant subi un traitement thermique à jeune âge. Les bétons testés, après démoulage, sont met en étuve pour des températures de 40 et 60° pendant 24h puis laisser à l'air ambiant jusqu'aux échéances de test. Les résultats de la résistance en compression, la résistance en traction par flexion et le module d'élasticité sont analysés. L'influence des températures, de l'âge de l'éprouvette et

des paramètres de composition sur le comportement des bétons est étudiée. Les essais de résistance à la compression ont permis de mettre en évidence que l'augmentation de la température de cure permet d'obtenir des résistances aux jeunes âges plus importantes. Par contre, des températures trop élevées peuvent modifier la structure des hydrates et dégrader les résistances après 7 jours. L'accroissement de dosage de fillers calcaires influence négativement l'évolution du module d'élasticité. Les trois bétons testés présentent une diminution continue du module d'élasticité en fonction de la température.

La deuxième partie est consacrée à l'étude de la variation dimensionnelle et pondérale des bétons autoplaçants soumis à un choc thermique pendant 1 heure à 150° à l'âge de 28 jours. Un suivi continu du retrait et perte du poids, avant et après le choc, est effectué jusqu'à 90 jours. Pendant les trois phases de traitement des résultats, figure l'influence de mode de conservation et les paramètres de la composition. La première phase analyse le retrait et la perte en poids avant le choc thermique, les principaux résultats obtenus : L'ordre de grandeur du retrait total mesuré dans notre recherche (retrait à 3 mois compris entre 400 et 660 $\mu\text{m}/\text{m}$) est proche de celui des données citées dans la littérature. La cinétique de retrait est la même pour les trois BAP. Une précipitation de rétraction dans les 20 premiers jours figure pour les trois bétons puis en remarque une diminution de vitesse d'évolution de retrait dans les jours qui suit. Le béton autoplaçant contenant le dosage le plus élevé de filler calcaire présente un retrait moins que les deux autres bétons. Un retrait est constaté quel que soit le matériau et quel que soit le mode de conservation, sous l'eau, ce retrait est lié à l'autodessiccation du béton en cours d'hydratation. La quantité d'eau évaporée est fonction du rapport a/c. La valeur de la perte en poids mesurée en mode couvert est inférieure à celle obtenue à l'air libre. Cette diminution d'amplitude est probablement due à l'absence d'échange hydrique avec l'ambiance pour le milieu couvert. La deuxième phase traite les résultats durant le choc thermique : les bétons testés soumis à une température de 150°c ont subits une dilatation instantanée varie selon les paramètres de composition et le mode de conservation. Et enfin la troisième phase traite les résultats après le choc thermique. L'étude de la variation dimensionnelle montre que Le choc thermique rend les bétons moins susceptibles à se rétractés. Tous les bétons chauffés à 150°c présentent un retrait inférieur que celui des témoins. En terme de la variation pondérale, les bétons subissent un choc thermique montrent le même comportement que les bétons témoins, la perte en poids est toujours influencée par le rapport a/c. en augmentant a/c la perte en poids augmente. Finalement, la troisième partie de cette thèse étudie les propriétés mécaniques des bétons soumis à des températures élevées

jusqu'à 400°C. Les résultats qu'on a obtenus sont similaires à ceux présentés dans la littérature. L'étude de la résistance à la compression montre deux phases. La première entre 20 °C et 200 °C nous notons une diminution des résistances relatives d'environ 8-20%. La deuxième entre 200°C et 400°C, nous observons une augmentation des valeurs de la résistance par rapport à la valeur plus faible à 200°C. Cette augmentation peut avoir comme origine le départ de l'eau du matériau ré augmentant les forces d'attraction par le rapprochement des feuillets de CSH. Pour la résistance à la traction par flexion Les résistances résiduelles en flexion des bétons testés diminuent de manière continue avec l'élévation de la température. Entre 20 et 200°C, la résistance décroît rapidement. On observe une stabilisation entre 200 et 400°C.

Parmi les perspectives de cette recherche, il est intéressant de mener des études à très hautes températures. De nouvelles études pourront faire suite à ce travail en envisageant de faire varier des paramètres tels que les matériaux constitutifs des formulations et d'estimer leur influence sur les propriétés des BAP à des températures élevées.

Annexe : analyse granulométrique

Analyse granulométrique des granulats utilisés				
Tamis	module	Granulats calcaires concassés		
		0/3		3/15
0,08	20	10		
0,16	23	15,5		
0,25	25	20		
0,315	26	22		
0,5	28	28		
0,63	29	32		
0,8	30	35,5		
1,25	32	45		
2,5	35	75		
4	37	92		
5	38	100		0
6,3	39			12
8	40			37
10	41			76
12,5	42			99
16	43			100
20	44			
25	45			

Analyse granulométrique

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES:

[Anagnostopoulos 09] N. Anagnostopoulos, K. K. Sideris, A. Georgiadis “Mechanical characteristics of self-compacting concretes with different filler materials, exposed to elevated temperatures”, *Materials and Structures* (2009) 42:1393–1405.

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

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

[Alessandra 08] Alessandra Mendes, Jay Sanjayan, Frank Collins “Phase transformations and mechanical strength of OPC/ Slag pastes submitted to high temperatures”, *Materials and Structures* (2008) 41:345–350

[Bakhtiyari 11] S. Bakhtiyari, A. Allahverdi, M. Rais-Ghasemi, B.A. Zarrabi, T. Parhizkar“Self-compacting concrete containing different powders at elevated temperatures – Mechanical properties and changes in the phase composition of the paste”, *ThermochimicaActa* 514 (2011) 74–81.

[Barcelo 01] Barcelo L., « Influence des caractéristiques des ciments sur la structuration et le comportement dimensionnel des matériaux cimentaires au jeune âge, thèse de doctorat »,LMT-ENS de Cachan, Oct.2001.

[Baroghel 94]V. BaroghelBouny, Caractérisation microstructurale et hydrique des pâtes de ciment et des bétons ordinaires et à très hautes performances, thèse de l’Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 1994

[Baron 99]BARON J. et OLLIVIER J.P., « Les Bétons – Bases et données pour leur formulation », éditions Eyrolles, 1999.

[Basheer 05]L. Basheer, P. A. M. Basheer, A. E. Long, Influence of coarse aggregate on the permeation, durability and the microstructure characteristics of ordinary Portland cement concrete, *Construction and Building Materials*, 19, 2005, p 682-690

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

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

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

[Bissonnette 99]Bissonnette B, Pierre P., Pigeon M., “Influence of key parameters on drying shrinkage of cementitious materials”, *Cement and Concrete Research*, 29(10), p. 1655-1662, 1999.

[Boukendakdji 11]OthmaneBoukendakdji, El-HadjKadri , Said Kenai “Effects of granulated blast furnace slag and superplasticizer type on the fresh properties and compressive strength of self-compacting concrete”

[Boukni 09]Boukni B, Benkechkeche G, Houari H « La variation dimensionnelle des bétons autoplaçants après chauffage à une température de 200°C ». Séminaire International sur l’Innovation et Valorisation dans le génie civil 5-7 février 2009 hammamet-Tunisie

[Boukni 10]Boukni B, Houari H:étude de l'influence du rapport ciment /liant (C/L) et de mode de conservation sur le retrait des bétons autoplaçants. Revue de sciences et technologies ST/B, Université Mentouri, Constantine.

[Bostrom 02]L. Bostrom. The performance of some self-compacting concrete when exposed to fire. SP Report, N°23, 2002.

[Brue 09] Flore BRUE, roles de la température et de la composition sur le couplagethermo-hydro- mécanique des bétons, thèse de doctorat, école centrale de Lille2009.

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

[Cano 04]P. F. de J. Cano-Barrita , B. J. Balcom , T. W. Bremner , M. B. MacMillan , and W. S.Langley “Moisture distribution in drying ordinary and high performance concrete cured in a simulated hot dry climate”,Materials and Structures /Matériaux et Constructions, Vol. 37, October 2004, pp 522-531

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

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

[Craeye 10] B. Craeye , G. De Schutter , B. Desmet , J. Vantomme , G. Heirman , L. Vandewalle , O. Cizer , S. Aggoun , E.H. Kadri “Effect of mineral filler type on autogenous shrinkage of self-compacting concrete”, Cement and Concrete Research 40 (2010) 908–913

[Cwirzen 05]Cwirzen A. et Penttala V., “Aggregate–cement paste transition zone properties affecting the salt–frostdamage of high-performance concretes”, *Cement and Concrete Research*, 35 [4], P. 671-679,2005.

[De Larrard 99] De Larrard F., “ Concrete mixture-proportioning - A scientific approach ”, Modern Concrete Technology Series, N°9, E&FN SPON, 1999.

[Dejong 07]MJ.Dejong and FJ. Ulm. “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.

[Diamond 76]Diamond S., Cement paste microstructure: an overview at several levels. Proceeding of theconference of Sheffield on hydraulic cement pastes, cement and concrete Association,8-9 April 1976.

[Diederichs92] Diederichs U., Jumpanen U-M.andPenttala. V. Behaviour of high temperatures.Espoo 1989. Helsinki University of technology,Department of Structural Engineering, Report 1992. P.723

[Domone 07] P.L. Domone,“A review of the hardened mechanical properties of self-compacting concrete”, Cement & Concrete Composites 29 (2007) 1–12.

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

[Elsharief 03]Elsharief A., Menashi D. et Jan O., “Influence of aggregate size, water cement ratio and age on themicrostructure of the interfacial transition zone”, *Cement and Concrete Research*, 33 [11], P. 1837-1849, 2003.

[Felekoglu 03]BurakFelekoglu, SelcukTurkel, BulentBaradan, “Effect of water/cement ratio on the fresh and hardened properties of self-compacting concrete” .Building and Environment 2003

-
- [Franssen 87]**Franssen, J. M. « Etudes du comportement au feu des structure mixtes acier-béton ». Thèse de Doctorat de l'Université de Liège, Belgique, 1987. 267p.
- [Gaweska 04]**Izabela Gaweska « Comportement à haute température des bétons à haute performance - évolution des principales propriétés mécaniques » thèse de doctorat, l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées et l'Ecole Polytechnique de Cracovie 2004.
- [Gibbs 99]**GIBBS J.C. and ZHU W., “ Strength of hardened self-compacting concrete ”, Proceedings of First International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete (PRO 7), Stockholm, Suède, pp. 199-209, 13-15 septembre 1999.
- [Guneyisi 10]**ErhanGuneyisi, Mehmet Gesoglu, ErdoganOzbay “Strength and drying shrinkage properties of self-compacting concretesincorporating multi-system blended mineral admixtures”, Construction and Building Materials 24 (2010) 1878–1887.
- [Hana 09]** Hanaa Fares, Albert Noumowe, SébastienRemond “Self-consolidating concrete subjected to high temperature Mechanical and physicochemical properties” Cement and Concrete Research 39 (2009) 1230–1238.
- [Hana 10]** HanaaFares « Propriétés mécaniques et physico-chimiques de bétons autoplaçants exposés à une température élevée » thèse de doctorat,Ecole Doctorale Sciences et Ingénierie Université de Cergy-Pontoise 2010.
- [Hansen 86]** Hansen T.C.“Physical structure of hardened cement paste.A classical approach”,Materials and Structures, 19 (114), p. 423-436, (1986).
- [Harmathy70]**T.Z. Harmathy.“Thermal properties of concrete at elevated temperatures”.Journal of mechanics,JMLSA, 5(1) :47–74, 1970.
- [Hasni 99]**.Hasni, « Bétons Autoplaçants », rapport de recherche N° 98-004/98-006, Fédération Française du Batiment 1999.
- [Hertz 03]**Hertz KD. “Limits of spalling of fire exposed concrete”. FireSafety J 2003;38(2):103–16.
- [Houari 93]**Houari H. « Contribution à l'étude du comportement du béton renforcé de fibres métalliques soumis à l'action des charges maintenus et cycliques ». Thèse de doctorat, INSA de Lyon 1993, 244p.
- [Hua 92]**C. HUA. « Analyse et modélisation du retrait d'auto dessiccation de la pâte de ciment ». Thèse de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 1992.
- [Jacobs 99]**F. Jacobs and F. Hunkeler.“Design of self-compacting concrete for durable concrete structure”.In Proceedings of the First International RILEM Symposium of Self-Compacting Concrete.RILEM, 1999.
- [Kanna 98]**Kanna V., Olson R.A., Jennings H.M.“Effect of shrinkage and moisture content onthe physical characteristics of blended cement mortars”,Cement and Concrete Research, 18(10), p. 1467-1477.
- [Khelidj 98]** A. Khelidj, A. Loukili, and G. Bastian. Etude expérimentale du couplage hydro-chimiquedans les bétons en cours de maturation : incidence sur les retraits. Materials and Structures,31 :588_594, 1998.
- [Kim 98]**KIM J.K., LEE C.S.“Prediction of differential drying shrinkage in concrete”, Cement and Concrete Research, 28 (7), p. 985-994.
- [Khoury 92]**KHOURY, G.A. ”Compressive strength of concrete at high temperatures : a reassessment” . Magazine of Concrete Research,1992. 44, n° 161, pp 291-309
- [Khoury 99]**Khoury, G.A.“Mechanical behaviour at high temperature”. Final report ,BriteEuram III, HITECO programme BE-95-1158. 1999.
- [Khoury 85]**GA. Khoury, BN. Grainger, and GPE. Sullivan. Strain of concrete during first heating to 600°C under load. Magazine of concreteresearch, Vol. 37 :195-215, 1985.

-
- [Khoury 83]**, Khoury G.A. ‘Transient thermal creep of nuclear reactors pressure vessel type concretes’. Tesis submitted to the University of London for the degree of PhD. 1983. Vol. 1:pp.1126.Vol.2:pp.418.
- [Lau 06]**A. Lau , M. Anson “Effect of high temperatures on high performance steelfibre reinforced concrete” . Cement and Concrete Research 36 (2006) 1698–1707
- [Leemann 11]** Andreas Leemann ,PietroLura, Roman Loser “Shrinkage and creep of SCC – The influence of paste volume and binder composition”, Construction and Building Materials 25 (2011) 2283–2289
- [Li 01]**LI J., YAO Y., “A study on creep and drying shrinkage of high performance concrete”,Cement and Concrete Research, 31, p. 1203-1206.
- [Liu 08]**X. Liu , G. Ye , G. De Schutter , Y. Yuan, L. Taerwe“On the mechanism of polypropylene fibres in preventing fire spalling in self-compacting and high-performance cement paste”Cement and Concrete Research 38 (2008) 487–499.
- [Luo 00]**X. Luo, W. Sun, and S. Chan. E ect of heating and cooling regimes on residualstrength and microstructure of normal strength and high performance concrete.Cement and Concrete Research, Vol. 30 :379-383, 2000.
- [Ma 07]**B.G. Ma, X.D. Wen, M.Y. Wang, J.J. Yan, X.J. Gao, Drying shrinkage of cementbasedmaterials under conditions of constant temperature and varying humidity, Journal ofChina University of Mining & Technology, 17, 3, 2007, p 428-431
- [Malhotra 89]**VM. Malhotra, HS. Wilson, and KE. Painter. “Performance of gravelstone concreteincorporating silica fume at elevated temperatures”. Proc. of Trondheim conference-Norway, pages 1051-1076, 1989.
- [Menou 04]**Abdellah Menou; « Etude de comportement thermomécanique des bétons à haute température :approche multi echelle de l’endommagement thermique « ;thèse de l’Université de Pau et des Pays de l’Adour 2004.
- [Metin 06]** MetinHusem, “The effects of high temperature on compressive and flexural strengths of ordinary and high-performance concrete”, Fire Safety Journal 41 (2006) 155–163
- [Miao 92]**B. MIAO. « Effets mécaniques dus au retrait de dessiccation du béton ». Thèse de l’Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 1992.
- [Mokarem 05]**D. Mokarem, R. E. Weyers, D. S. Lane, « Development of a shrinkage performance specifications and prediction model analysis for supplemental cementitious material concrete mixtures”, Cement and Concrete Research, 35, 2005, p 918-925
- [MSaad 96]** MSaad, SA. Abo-El-Enein, GB Hanna, and MF.Kotkata.Effects of temperatureson physical and mechanical properties of concrete containing silica fume. Cement and Concrete Research, Vol. 26 :669-675, 1996.
- [MSaad 05]**Y. Msaad. Analyse des mécanismes d’écaillage du béton soumis à des températures élevées. In Thèse de doctorat, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées /Institut Navier. 2005.
- [Neville 98]** Neville, A. and Aitcin, P., ‘High-performance concrete – Anoverview’, *Material.Structure*.31 (206) (1998) 111-117.
- [Neville 00]**NEVILLLE A. M., “ Propriétés des Bétons ”, traduction CRIB, Sherbrooke,Canada, éd. Paris Eyrolles 2000.
- [Noumowe 03]**NOUMOWE, A., ‘Temperature Distribution and Mecanical Properties of High Strength Silica Fume Concrete at Temperatures up to 200°C’ ACI Materials Journal, July-August 2003
- [Noumowe 95]**Noumowé, N.A. « Effet de hautes températures (20°C-600°C) sur le béton. Cas particulier du BHP ». Thèse de Doctorat de l’INSA de Lyon,1995.

-
- [**Noumowé 06**] A. Noumowé, H. Carré, A. Daud, and H. Toutanji. High strength self-compacting concrete exposed to fire test. *Journal of Materials in Civil Engineering*, ASCE, Vol. 18 Issue N°6 :754-758, 2006.
- [**OH 99**]S.G. Oh, T. Nogushi, and F. Tomosawa. "Toward mix design for rhéologie of self-compacting concrete". In *Proceedings of the First International RILEM Symposium of Self-Compacting Concrete*. RILEM, 1999.
- [**Okamura 03**]Okamura et Ouchi, Self-compacting concrete, *Journal of advanced Concrete Technology*, 2003, vol 1, n°1, pp 5-15.
- [**Okamura 00**]H. Okamura, K. Ozawa, and M. Ouchi. "Self-compacting concrete". *Structural Concrete*, (1) :3_17, March 2000.
- [**Ouchi 99**]M. Ouchi and Y. Edamatsu. "A simple evaluation method for interaction between coarse aggregate and mortar particles in self-compacting concrete". In *Proceedings of the First International RILEM Symposium of Self-Compacting Concrete*. RILEM, 1999.
- [**Parra 11**] C. Parra, M. Valcuende, F. Gomez "Splitting tensile strength and modulus of elasticity of self-compacting concrete", *Construction and Building Materials* 25 (2011) 201–207.
- [**Pera 99**] Pera J., Husson S. and Guilhot B., "Influence of finely ground limestone on cement hydration", *Cement and Concrete Composites*, pp. 99-105, 1999.
- [**Phan 01**] L.T. Phan, JR. Lawson, and FL. Davis. "Effects of elevated temperature exposure on heating characteristics, spalling and residual properties of high performance concrete". *Materials and Structures*, Vol. 34 :83{91, 2001.
- [**Phan 03**]L.T. Phan and N.J. Carino. "Code provisions for high strength concrete strength-temperature relationship at elevated temperatures". *Materials and Structures/Matériaux et Constructions*, Vol. 36, March 2003, pp 91-98.
- [**Peng 08**] Gai-Fei Peng, Song-Hua Bian, Zhan-Qi Guo, Jie Zhao, Xin-Lai Peng, Yu-Chuang Jiang "Effect of thermal shock due to rapid cooling on residual mechanical properties of fiber concrete exposed to high temperatures". *Construction and Building Materials* 22 (2008) 948 955
- [**Persson 03**]B. Persson. "Self-compacting concrete at fire temperatures". Lund institute of Technology, Lund University Sweden :216, 2003.
- [**Persson 04**]B. Persson, "Fire resistance of self-compacting concrete", *SCC Materials and structures*, Vol. 37 :575-584, 2004.
- [**Regourd 82**]Regourd M., *L'eau*, dans *Le béton hydraulique*, Presse de l'ENPC, sous la direction de Jacques Baron et Raymond Sauterey, Paris, p. 59-68(1982).
- [**Reinhardt 06**] Reinhardt H-W., Stegmaier, M-S., « Influence of heat curing on the pore structure and compressive strength of self-compacting concrete (SCC) » *Cement and concrete research*, 36, 2006, p. 879-885.
- [**Sahmaran 06**]M. Sahmaran et al. "The effect of chemical admixtures and mineral additives on the properties of self-compacting mortars" . *Cement & Concrete Composites* 28 (2006) 432–440.
- [**Schneider 88**]U. Schneider. *Concrete at high temperature : A general review*. Fire safety Journal, Vol. 13 :55-68, 1988.
- [**Sedran 95**] Sedran T., « Les Bétons Autonivelants », bulletin LCPC 196, réf. 3889, pp. 53-60, mars-avril 1995.
- [**Sedran 99**]T. Sedran. « Rhéologie et rhéométrie des bétons. Application aux bétons autonivellants ». Thèse de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 1999.
- [**Shah 99**] W. Shah, E.A. O'Neill, Z. Guo, Differential scanning study of ordinary Portland Cement, *Cement and Concrete Research* 29 (1999) 1487–1489.

-
- [**Shoukri 10**] Samir N. Shoukry, Gergis W. William, Brian Downie, Mourad Y. Riad “Effect of moisture and temperature on the mechanical properties of concrete” *Construction and Building Materials* (2010).
- [**Stegmaier 05**] Michael Stegmaier, « Traitement thermique des bétons autoplaçants (BAP) » *Otto-Graf-Journal* 167 Vol. 16, (2005) 167-184.
- [**Turcry 04**] Philippe Turcry, « Retrait et Fissuration des Bétons Autoplaçants », Influence de la Formulation. Thèse de l'Ecole Centrale de Nantes et l'Université de Nantes 2004.
- [**Topcu 11**] Ilker Bekir Topcu, Mehmet Ugur Toprak, “Strength estimation of unisothermally cured concretes with matrices”, *Construction and Building Materials* 25 (2011) 1455–1459.
- [**Uysal 11**] Mucteba Uysal, Kemalettin Yilmaz “Effect of mineral admixtures on properties of self-compacting concrete” *Cement & Concrete Composites* 33 (2011) 771–776.
- [**Uysal 12**] Mucteba Uysal, Harun Tanyildizi “Estimation of compressive strength of self compacting concrete containing polypropylene fiber and mineral additives exposed to high temperature using artificial neural network” *Construction and Building Materials* 27 (2012) 404–414.
- [**Verbeck 68**] VERBECK G., HELMUTH R., “ Structures and physical properties of cement paste ”, 5th International Symposium on the Chemistry of Cement, Japon, Vol. 3, pp. 1-32, 1968.
- [**Volz 81**] Volz CK, Tucker RL, Burns NH, Lew HS. Maturity effects on concrete strength. *Cement and Concrete Research* 1981;11(1):41–50.
- [**Xi 94**] Xi Y., Bažant Z.P., Molina L., Jennings H.M. “Moisture diffusion in cementitious materials : moisture capacity and diffusivity”, *Advanced Cement Based Materials*, 1, p. 258-266.
- [**Xu01**] Y. Xu, YL. Wong, and M. Poon, CS. and Anson. Impact of high temperature on PFA concrete. *Cement and Concrete Research*, Vol. 31 :1065–1073, 2001.
- [**Ye 07**] G. Ye, X. Liu, G. De Schutter, L. Taerwe, P. Vandeveld. “Phase distribution and microstructural changes of self-compacting cement paste at elevated temperature”. *Cement and concrete research*, 37 (2007) 978-987.
- [**Yen 99**] Yen et al., *Flow behaviour of high strength high-performance concrete*, cement and concrete composites, 1999, vol 21, pp 413-424.
- [**Yurtdas 03**] I. Yurtdas, Couplage comportement mécanique et dessiccation des matériaux à matrice cimentaire: étude expérimentale sur mortiers, thèse de l'Université des Sciences et Technologie de Lille, 2003.
- [**Zhi 11**] Zhi Xing, Anne-Lise Beaucour, Ronan Hebert, Albert Noumowe, Béatrice Ledesert Influence of the nature of aggregates on the behaviour of concrete subjected to elevated temperature. *Cement and Concrete Research* 41 (2011) 392–402.
- [**Zhu 05**] Wenzhong Zhu, John C. Gibbs, “Use of different limestone and chalk powders in self-compacting concrete”, *Cement and Concrete Research* 35 (2005) 1457– 1462.