

17/624.744

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Mémoire de Master

Présenté à l'Université de Guelma

Faculté des Sciences et de l'Ingénierie

Département de : Génie Civil & Hydraulique

Spécialité : Génie civil

Option : Conception et Calcul des Constructions (3c)

Par : Dahmane Meriem & Mouadna Loubna

Thème : Les Bétons Autoplaçants (BAP)

Sous la direction de : **Dr. BENMARCE ABDELAZIZ**

Juin 2012





بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



Remerciements

Nous voudrions remercier, notre encadreur :

Le Docteur **A.BENMARCE**

qui a été toujours disponible et surtout pour ses qualités scientifiques et humaines qui nous ont permis de finir notre mémoire dans les meilleures conditions. Qu'il trouve ici l'expression de toute notre reconnaissance.

Mes remerciements s'adressent de même à tous ceux qui nous ont aidés au cours de ces cinq ans et à l'ensemble des enseignants du département de génie civil.

Nous remercions aussi toutes les personnes qui ont pu, de près ou de loin, contribuer à l'aboutissement de notre travail et surtout le doctorant Mehdi BENZAID. Merci pour vos conseils.

Pour terminer, nous tenons à remercier nos parents ainsi que nos frères et sœurs pour nous avoir soutenues, encouragées et supportées durant ces années. Nous leur dédions ce mémoire.

Dédicace

Je dédie ce modeste travail à mes très chers parents Hamid et Aicha à qui me sera difficile d'exprimer ma reconnaissance, ma profonde gratitude pour l'éducation qu'ils m'ont prodiguée pour tous les sacrifices et les conseils, à mon égard pour le sens du devoir qu'ils m'ont enseigné depuis le jeune âge ; à mon père ma source du bonheur que j'aime beaucoup, à ma mère mon exemple dans la vie. Je leur dédie ce mémoire avec l'espoir d'acquérir le minimum de leurs qualités humaines.

Au symbole de la joie de notre maison, à mes sœurs : Chaima, Khawla, Nadjat et surtout Wafa que j'aime très fort.

Et très particulièrement à SAFWANE

A tous mes amis : Meriem, Ridha, Radia, Nahla

Habiba, Amira.

Et ma grande très chère sœur Assia et ma tante Nassima.

Et tous ceux qui nous ont aidés de près ou de loin.

Loubna

Dédicace

Je dédie ce travail à mes chers parents Hamid et Ouarda, ainsi que mes frères et sœurs : Foued, Abdeldjalil, Fadia et Leila qui m'ont beaucoup soutenue et encouragée, et tout particulièrement à ma belle RIMES.

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

A tous les amis, collègues : Ridha, Mounira, Imen et toutes les personnes qui m'ont aidée à réaliser ce travail de près ou de loin.

Et je finis par Loubna et Hamza

Meriem

Résumé

L'utilisation des bétons autoplaçants (BAP) est en augmentation croissante au cours des trois dernières décennies, car ils offrent de nombreux avantages environnementaux, technologiques et économiques. Les BAP ont été utilisés dans de nombreux bâtiments dans les pays développés, toutefois, l'utilisation de ces bétons est encore très limitée dans de nombreux pays sous développés en raison des conditions particulières et des additifs nécessaires à sa production. La recherche présentée dans cette thèse de Master, est une revue de la littérature des bétons autoplaçants. La formulation spécifique de ces bétons (grand volume de pâte, mélange d'additions minérales importantes, rapport Gravier /Sable, près de 1, exigences liées à leur mise en œuvre) peut changer leur comportement mécanique à l'état durci, par rapport au béton vibré traditionnel. Compte tenu du manque de références sur le comportement des BAP à des températures élevées, d'autres études disponibles dans la littérature indiquent que les BAP ont une bonne performance vis-à-vis du feu.

Summary

The use of compacting concrete (SCC) has been on the increase during the last three decades, since it offers numerous environmental, technological, and economical advantages. SCC have been used in many buildings in developed countries, however, the use of USS is still very limited in many countries because of the special conditions and additives needed for its production. The research presented in this MSc thesis, is a literature review of self-compacting concrete (SCC). The specific formulation of these concretes (large volume of paste, high mineral additions in the mix, Gravel/Sand ratio near to 1, and other requirements related to their implementation may change their mechanical behavior in the hardened state, compared with traditional vibrated concrete. Given the lack of references on the behavior of SCC at high temperatures, further studies should be made to answer such questions. The few studies available in the literature reported that SCC has a good performance when subjected to fire.

ملخص

استخدام الخرسانة ذاتية الدمك (BAP) في تزايد خلال العقود الثلاثة الماضية لأنه يقدم العديد من الفوائد البيئية، والمزايا التكنولوجية، والاقتصادية. وقد استخدمت الخرسانة ذاتية الدمك في العديد من المباني في الدول المتقدمة، و مع ذلك ، فإن استخدام الخرسانة ذاتية الدمك لا تزال محدودة جدا في العديد من البلدان بسبب الظروف الخاصة و الإضافات اللازمة لإنتاجها.

أن البحث المقدم في هذه الأطروحة ماجيستر، هو استعراض أدنى للخرسانة ذاتية الدمك.

صياغة محددة لهذه الخرسانة (كمية كبيرة من العجينة و قد تكون الإضافات المعدنية ارتفاع في نسبة خليط الحصى / الرمل ، قرابة إلى 1 ، و غيرها من المتطلبات المتعلقة بتنفيذها) ، تغيير سلوكهم الميكانيكية في حالة التصلب ، مقارنة مع الخرسانة التقليدية نظرا لعدم وجود إشارات على السواك الخرسانة ذاتية الدمك في درجات الحرارة العالية، ينبغي بدل المزيد من الدراسات للإجابة عن الأسئلة من هذا القبيل . و الدراسات القليلة المتوفرة في الأدب و ذكرت أن الخرسانة ذاتية الدمك لديه أداء جيد عندما يتعرض للنار.

Liste des figures et tableaux

Figure 1.1 Composition d'un béton ordinaire (BO) et d'un BAP.....	05
Figure 1.2 Les cendres volantes.....	15
Figure 1.3 Action des superplastifiants - Défloculation des grains de ciment	17
Figure 1.4 Mécanismes d'actions du fluidifiant «Suspension d'eau et de grains de ciment ».....	18
Figure 1.5 Les utilisations des superplastifiants.....	18
Figure 1.6 Mode d'action des superplastifiants « Défloculation des grains de ciment ».....	19
Figure 1.7 Relation entre la capacité de remplissage et l'affaissement du béton.....	21
Figure 1.8 Représentation du cas de ségrégation statique dans un volume de béton.....	22
Figure 1.9 Appareillage Expérimental utilisé par Sidky, Legrand et Barrioulet.....	23
Figure 1.10 Cylindre d'échantillonnage pour la détermination de La résistance à la ségrégation.....	23
Figure 2.1 Notion d'excès de pâte: la pâte remplit la porosité(1) et écarte les granulats(2).....	28
Figure 2.2 Le principe de (Okamura et coll. 1993)	31
Figure 2.3 Méthode de formulation de Sakata et coll.....	32
Figure 2.4 Essai d'entonnoir utilisé pour mesurer le temps d'écoulement du béton.....	34
Figure 2.5 Essai d'entonnoir.....	34
Figure 2.6 Cône pour mesurer l'étalement des mortiers.....	35
Figure 2.7 Courbes pour détermination du volume minimal de pâte.....	35
Figure 2.8 Essai d'étalement au cône d'Abrams (slump flow).....	30
Figure 2.9: Essai à la L-Box.....	41
Figure 2.10 Appareil et dimensions de la boîte.....	41
Figure 2.11 Essais d'écoulement à travers des armatures L-Box.....	42
Figure 2.12 Essai du tube en U.....	42
Figure 2.13 Essai de stabilité au tamis.....	43
Figure 2.14 Essai de ressuage.....	44
Figure 2.15 Variation des résistances mécaniques en compression de BAP en fonction de la composition du liant, d'après Hayakawa et al (1993)	46
Figure 2.16 Description du milieu poreux avec les trois phases.....	48

Figure 2.17 Représentation schématique d'un solide poreux.....	49
Figure 2.18 Coefficient de perméabilité à l'oxygène de trois BAP (SCC) et deux bétons vibrés correspondants.....	52
Figure 2.19 Comparaison des coefficients de diffusion des ions chlore entre BAP et bétons vibrés.....	54
Figure 2.20 Résultats d'absorption d'eau par capillarité de trois BAP (SCC) Et deux bétons vibrés.....	56
Figure 2.21 Élément préfabriqué en BAP à hautes résistances.....	59
Figure 3.1 la résistance de compression à chaud	64
Figure 3.2 Propriétés relatives de béton avant/après l'élévation de température	66
Figure 3.3 Variation de la résistance avec la température.	67
Figure 3.4 Courbes de la variation de la résistance en compression selon DTU et Eurocode 2.....	68
Figure 3.5 Evolution de la résistance à la traction en fonction de la température	69
Figure 3.6 Résistance en traction d'un BO en fonction de T	69
Figure 3.7 Variations de la masse volumique de différents types de bétons en fonction de la température.	70
Figure 3.8 Densité apparente des bétons en fonction du traitement thermique.....	71
Figure 3.9 Perte de masse durant l'échauffement et vitesse de perte de masse en fonction de la température	71
Figure 3.10 Variation de poids en fonction de la température.....	72
Figure 3.11 Perte en masse des éprouvettes par rapport à l'état initial, en fonction de la température de conditionnement.....	73
Figure 3.12 Expansion thermique de pâte de ciment	75
Figure 3.13 Dilatation thermique de ciment, d'agrégat et de béton	77
Figure 3.14 Fissure dans le béton à différente température.....	79
Figure 3.15 Gradient thermique dans une éprouvette cylindrique	81
Figure 3.16 Variation de la résistance à la compression avec la température	82
Figure 3.17 Perte de masse de deux types de granulats (calcaire et siliceux) d'après Harmathy et Allen 73.....	83
Figure 3.18 Résistance à la compression par rapport à la résistance initiale.....	83
Figure 3.19 Perte de masse des bétons de différents types granulats en fonction de la température D'après Schneider	84

Figure 3.20 Vue de blocs en béton haute résistance exposés pendant deux heures à un feu d'hydrocarbures	86
Figure 3.21 Evolution de la résistance à la flexion avec la température des BO (M) et des BO avec 1% de fibre (MF)	87
Tableau 1.1 Résultat de la compilation de l'analyse chimique de la fumée de silice produite à l'usine SKW, Canada.....	12
Tableau 2.1 Absorption d'eau par immersion et par capillarité de sept BAP (SCC) et d'un béton vibré (TC).....	56

Sommaire

Résumé	i
Abstract	ii
ملخص	iii
Liste des figures	iv
Liste des tableaux	v
Introduction générale.....	01

Chapitre I

Etude bibliographique du BAP

1.1 Introduction	01
1.2 Historique des BAP	04
1.3 Définition	05
1.4 Avantages du BAP	07
1.5 Inconvénients du BAP	07
1.6 Modes de formulations des BAP	08
1.7 Les constituants du BAP	09
1.7.1 Généralité.....	09
1.7.2 Les ciments.....	09
1.7.3 L'eau de gâchage.....	10
1.7.4 Les granulats.....	10
1.7.5 Les ajouts minéraux.....	11
1.7.5.1 Les fumées de silice.....	11
1.7.5.2 Les cendres volantes.....	13
1.7.5.3 Le laitier.....	15
1.7.5.4 Filler calcaire.....	16
1.7.6 Les adjuvants.....	16
1.7.6.1 Les superplastifiants.....	16
A) Mécanismes d'action.....	17
B) Mode d'action.....	18

1.7.6.2 L'agent colloïdal.....	19
1.7.7Autres additions inertes.....	20
1.8 Les principales propriétés du BAP.....	20
1.8.1 La capacité de remplissage.....	20
1.8.2 La résistance à la ségrégation.....	22
1.9 Conclusion	24

Chapitre II

Formulations et Caractérisation du BAP à l'état frais et durci

2.1 Introduction.....	25
2.2 Formulation des BAP.....	25
2.2.1 Pratique actuelle de la formulation des BAP.....	26
2.2.2 Les techniques de formulation.....	26
2.2.2.1 Approche basé sur l'optimisation des mortiers.....	27
2.2.2.2 Approche basée sur l'optimisation du volume de pâte.....	27
2.2.2.3 Approche basée sur l'optimisation du squelette granulaire.....	28
2.2.2.4 Approche basée sur un plan d'expérience.....	29
2.3 Méthodes de formulation des BAP.....	30
2.3.1 Méthode d'Okamura et Ozawa.....	31
2.3.2 Méthode de Sakata.....	32
2.3.3 Méthode Japonaise.....	34
2.3.4 Méthode Suédoise.....	35
2.3.5 Méthode Française(LCPC).....	36
2.4 Caractérisation du BAP à l'état frais.....	37
2.4.1 Fluidité.....	38
2.4.1.1 Mobilité en milieu non confiné (Essai d'étalement).....	38
2.4.2 Homogénéité.....	38
2.4.2.1 Ségrégation dynamique.....	40
A) Mobilité en milieu confiné (essai à la L-Box).....	40
B) Essai en U.....	42
2.4.2.2 Ségrégation statique.....	43
A) Essai de stabilité au tamis.....	43

2.5 Propriétés du béton durci	44
2.5.1 Résistance mécanique.....	45
2.5.1.1 Résistance à la compression.....	46
2.5.1.2 Résistance à la traction.....	47
2.6 Propriétés physico-chimique	47
2.6.1 Caractéristiques de la structure poreuse.....	47
2.6.1.1 Introduction.....	47
2.6.1.2 La structure poreuse du béton.....	48
2.6.2 Propriétés physico-chimique et durabilité.....	50
2.6.2.1 Perméabilité aux gaz.....	50
A) Généralités.....	50
B) Etudes relatives aux BAP.....	51
2.6.2.2 Diffusion des ions ohlore.....	52
A) Généralités.....	52
B) Etudes relatives aux BAP.....	53
2.6.2.3 Absorption capillaire.....	54
A) Généralités.....	54
2.7 Mise en œuvre	56
2.7.1 Domaines d'emploi	58
2.8 Conclusion	59

Chapitre III

Comportement des BAP vis-à-vis du feu

3.1 Introduction	62
3.2 Propriétés mécaniques	62
3.2.1 Résistance à chaud.....	62
3.2.1.1 Résistance en compression à chaud.....	63
3.2.1.2 Résistance en traction.....	64
3.2.1.3 Module d'élasticité.....	65
3.2.1.4 Comportement contrainte déformation.....	65
3.2.2 Résistances résiduelles.....	65

3.2.2 Résistances résiduelles.....	65
3.2.2.1 Effet de refroidissement.....	65
3.2.2.2 Résistance à la compression.....	67
3.2.2.3 Résistance en traction.....	68
3.3 Propriétés physiques.....	69
3.3.1 Densité apparente.....	70
3.3.2 Perte de masse.....	71
3.4 Propriétés thermiques.....	73
3.4.1 Conductivité thermique.....	73
3.4.2 Chaleur spécifique.....	74
3.4.3 Diffusivité thermique.....	74
3.4.4 Déformation thermique.....	74
3.5 Microstructure.....	76
3.5.1 Déshydratation de pâte de ciment.....	76
3.5.2 Transformation des liaisons pâte granulat.....	76
3.5.3 Porosité.....	78
3.5.4 Fissuration.....	78
3.5.5 Eclatement du béton.....	79
3.6 Paramètres influent le comportement de béton.....	80
3.6.1 Vitesse de chauffage et de refroidissement.....	80
3.6.2 Nature des granulats.....	82
3.6.2.1 granulats calcaires.....	84
3.6.2.2 granulats siliceux.....	84
3.6.3 Nature de ciment et des ajouts.....	85
3.6.4 Fibres.....	85
3.7 Conclusion.....	87

Chapitre IV

Conclusion.....	89
Références bibliographiques	

INTRODUCTION

Introduction

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

Depuis sa découverte et pendant de nombreuses décennies, ce matériau n'avait que peu évolué mais, à partir des années 1970-1980, d'importantes avancées ont été réalisées qui lui ont permis de diversifier les utilisations auxquelles il était jusque-là destiné. Ainsi, les études menées sur ses constituants granulaires ont conduit à améliorer ses propriétés existantes, en particulier avec les bétons à hautes performances (BHP). D'autres familles de béton, relatives à certaines applications, ont vu ensuite le jour comme les bétons à très hautes performances (BTHP), les bétons de fibres (BFM) et les bétons de poudre réactive (BPR). [1]

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

aux ouvrages d'art). Ceci confirme l'existence des BAP en tant que bétons de structure à part entière.

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

Cette mise en place, sous le seul effet de la gravité, nécessite une très grande fluidité du matériau mais il est aussi indispensable que le béton conserve une stabilité satisfaisante et une parfaite homogénéité. Ces deux propriétés contradictoires sont obtenues par l'ajout et le dosage adéquat de superplastifiant et de fines on l'emploi d'un agent de viscosité [1].

Notre mémoire a été organisé de la manière suivante :

Le chapitre I est consacré à une étude bibliographique dans laquelle la présentation des propriétés de ce nouveau ~~au~~ matériau.

Le chapitre II est consacré à la formulation~~s~~ et caractérisation du BAP, les méthodes de formulation~~s~~, les essais de caractérisation, les propriétés rhéologiques à l'état frais et durci, les propriétés mécaniques et physico-chimique.

Le chapitre III est consacré à la présentation des essais réalisés, permettant de tester~~v~~ le comportement mécanique résiduel des bétons soumis à des élévations de température, expérimentaux obtenus sont présentés et discutés dans ce chapitre, nous présentons les

résultats de la résistance à la compression, la résistance à la traction par flexion ainsi que la perte de masse.

Enfin au **chapitre IV**, nous terminerons notre mémoire par une conclusion générale.

CHAPITRE 1 Etude bibliographique du BAP

Sommaire

1.1 Introduction.....	04
1.2 Historique des BAP.....	04
1.3 Définition.....	05
1.4 Avantages du BAP.....	07
1.5 Inconvénients du BAP.....	07
1.6 Modes de formulations des BAP.....	08
1.7 Les constituants du BAP.....	09
1.8 Les principales propriétés du BAP.....	20
1.9 Conclusion	24

Etude bibliographique du BAP

1.1 Introduction

Beaucoup des structures actuelles se caractérisent par la complexité de leur architecture (formes variables et courbures multiples), ainsi que par une forte concentration en armatures, ce qui rend souvent difficile l'utilisation des bétons de plasticité conventionnelle. Afin d'adapter les bétons à ces ouvrages, des recherches ont été menées au cours des dernières années dans le but de développer des formulations de bétons se caractérisant par une haute ouvrabilité, tout en étant stables (ségrégation, ressuage et tassement faible), avec de bonnes caractéristiques mécaniques et de la durabilité.

Ces bétons désignent des bétons très fluides, homogènes et stables, mis en place sans vibration. Leur compaction s'effectue par le seul effet gravitaire et ils confèrent à la structure une qualité au moins équivalente à celle correspondante aux bétons classiques mis en œuvre par vibration d'où le qualificatif d'« autoplaçant » ou d'« auto-nivelant ». On parle de béton auto-nivelant (BAN) pour les dalles et toutes les parois horizontales et de béton autoplaçant (BAP) pour les murs et toutes les parois verticales. [3]

1.2 Historique des BAP

Les (BAP) ont été développés en 1988 par le professeur *Okamura* de l'université de Kochi au Japon. La première utilisation pratique intervient deux années plus tard (1982) pour la construction d'un pont. A la fin des années 90 on vit apparaître les premières applications en Suède, en France, aux pays bas et en Suisse. Depuis son utilisation ne cesse de croître.

De nombreuses études actuelles ont pour objectif de trouver la bonne formulation des BAP, obtenue par l'ajout d'un superplastifiant dont l'excès peut entraîner la ségrégation. Cette dernière peut être évitée par l'ajout d'un agent de viscosité et l'introduction d'un volume de fine nettement supérieur à celui d'un béton ordinaire. [3]

1.3 Définition → 925

Les BAP se distinguent des bétons ordinaires principalement par leurs propriétés à l'état frais, qui sont le résultat d'une formulation spécifique. Cette dernière doit pouvoir concilier deux propriétés a priori contradictoires : une très grande fluidité et une bonne résistance à la ségrégation (stabilité). L'Association Française de Génie-Civil définit dans ses recommandations provisoires les BAP comme des bétons « très fluides, homogènes et stable » [4]

Le béton autoplaçant est un béton capable de se mettre en place dans les coffrages les plus complexes et très encombrés uniquement sous l'effet de la pesanteur. Ainsi, ce type de béton ne requiert aucun moyen de vibration pour consolider le mélange avec comme résultat un produit très homogène [5].

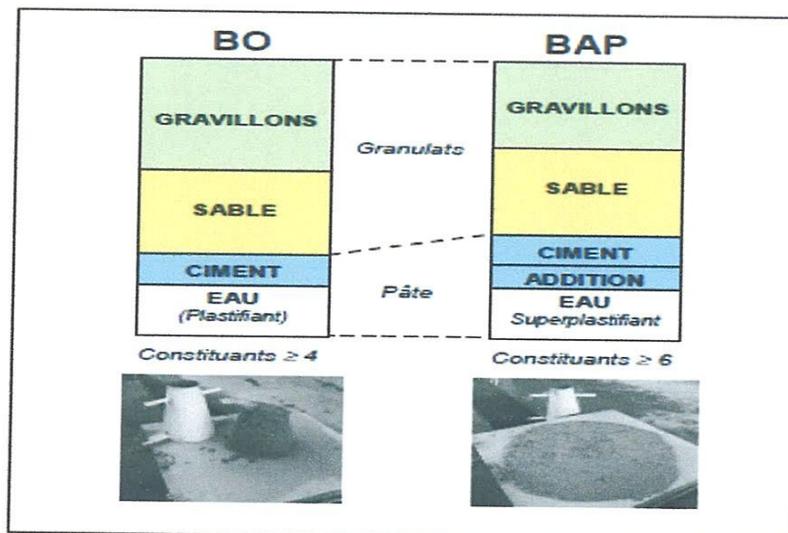


Figure 1.1 Composition d'un béton ordinaire (BO) et d'un BAP [6]

Selon les constituants on trouve une différence entre le béton ordinaire (BO) et le (BAP) contient 6 ou 7 composants dont le **ciment**, l'**eau**, le **sable**, les **gravillons**, une **addition** (filler calcaire), un **superplastifiant** et/ou un **agent de viscosité**. [6]



Une bonne stabilité liée, entre autres, à la viscosité du mortier et de son seuil de cisaillement nécessite soit l'ajout d'un agent de viscosité afin d'améliorer la cohésion de l'ensemble, soit d'augmenter la teneur en matière cimentaire et de réduire la teneur en eau libre. Aussi une bonne stabilité est liée à une optimisation de la compacité granulaire. Or l'augmentation de la teneur en liant n'est pas sans conséquence sur la durabilité, vu le dégagement de la chaleur et le risque de nuire à la capacité de remplissage [7].

Les BAP se distinguent des bétons ordinaires notamment par leurs propriétés à l'état frais.

Ces propriétés se caractérisent principalement par:

- une mobilité en milieu non confiné (décrite par l'essai d'étalement).
- une mobilité en milieu confiné (décrite par la boîte en U).
- une stabilité (c'est-à-dire une résistance à la ségrégation et au ressuage).

Afin de pouvoir répondre à ces caractéristiques, la composition d'un BAP doit être soigneusement mise au point. [8].

1.4 Avantages du BAP

- une mobilité en milieu non confiné (décrite par l'essai d'étalement).
- une mobilité en milieu confiné (décrite par la boîte en U).
- une stabilité (c'est-à-dire une résistance à la ségrégation et au ressuage).

x

Afin de pouvoir répondre à ces caractéristiques, la composition d'un BAP doit être soigneusement mise au point. [8].

1.4 Avantages du BAP

- Diminution du bruit (pour la mise en place traditionnelle par vibration, nous avons recours à des compresseurs qui fonctionnent avec des bruits sonores très élevés qui portent préjudice aux ouvriers et aux riverains).
- Rendements améliorés et exécution plus rapide.
- Liberté accrue des formes de coffrage.
- Facilité de bétonnage d'éléments exigus.
- Qualité accrue des surfaces de béton.
- Facilité de bétonnage d'élément avec une armature dense ou importante (gain de temps sur les bétonnages).
- Remplissage de parties difficilement accessibles. [9]

1.5 Inconvénients du BAP

- Augmentation du coût des matières premières, par la présence des nouveaux adjuvants, et des différentes additions minérales.
- Compatibilité des matériaux.
- Etanchéité des coffrages. [10]

1.6 Modes de formulations des BAP

Formuler un béton, c'est trouver un arrangement des divers constituants répondant à un cahier des charges donné. Dans les cas courants, le cahier des charges concerne la résistance à la compression à 28 jours et la consistance, c'est-à-dire l'affaissement au cône d'Abrams.

Pour des chantiers plus spécifiques, d'autres propriétés peuvent être demandées, comme par exemple, une prise retardée, une résistance élevée au jeune âge, ou un dégagement de chaleur minimal. La solution trouvée doit si possible être optimale, ce qui signifie bien souvent avoir le plus faible prix de revient.

← p 25

Pour formuler les bétons ordinaires, la méthode la plus utilisée dans l'industrie est celle dite de Dreux-Gorisse. Elle propose différents abaques pour estimer les dosages en eau et en ciment permettant d'obtenir la résistance et l'affaissement souhaités. Elle se distingue également par une méthode originale pour proportionner les granulats, qui consiste à caler la courbe granulométrique du mélange sables/ gravillon sur une courbe de référence.

← p 25

La mise au point d'une formule de BAP est beaucoup plus complexe, parce que, d'abord, les constituants sont à la norme minimale 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 de 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. [10] ??

1.7 Les constituants du BAP

1.7.1 Généralité

Le béton est un matériau hétérogène dont les caractéristiques physico-chimiques et mécaniques des divers constituants sont différentes. Composé essentiellement de granulats (gravier, sable et filler), de ciment, d'eau de gâchage et d'adjuvants pour améliorer ou acquérir certaines caractéristiques ou propriétés pour faire face à des situations bien définies. Chacun de ses composants joue un rôle bien précis dans le mélange.

1.7.2 Les ciments

Le ciment est un liant hydraulique, c'est-à-dire une matière minérale finement moulue qui, mélangée avec l'eau, forme une pâte qui fait prise et durcit à la suite du processus d'hydratation et qui, après durcissement, conserve sa résistance et sa stabilité même sous l'eau. Le durcissement de la pâte de ciment est principalement dû à l'hydratation des silicates de calcium. Dans les ciments, les aluminates peuvent également intervenir dans le processus de durcissement. La somme des proportions de l'oxyde de calcium (CaO) et du dioxyde de silicium (SiO₂) réactifs doit être d'au moins 50 % en masse. Le ciment est constitué principalement de clinker Portland (K) qui est un matériau hydraulique. Il est obtenu à partir de la cuisson à haute température, supérieure à 1450°C, d'un mélange approprié de calcaire et d'argile en proportion moyenne de 80 et 20% [11]

Les silicates et aluminates hydrauliques formés lors de cette cuisson (clinkérisation) sont :

- Le silicate tricalcique, C₃S.
- Le silicate bi -calcique, C₂S.
- L'aluminate tricalcique, C₃A.

Le ciment peut être constitué aussi de laitier de haut fourneau (S), de pouzzolane naturelle (Z), de cendres volantes siliceuses (V) ou calciques (W), de fumée de silice (D), de calcaire (L),

de schistes calcinés (T), de constituants secondaires, de sulfate de calcium (gypse, hélihydrates, anhydrite) et d'additifs [12].

1.7.3 L'eau de gâchage

L'eau est un ingrédient essentiel du béton. Il joue deux fonctions principales : confère au béton sa maniabilité à l'état frais (propriétés rhéologiques) et assure l'hydratation des grains de ciment pour une prise et un durcissement. La quantité d'eau utilisée ou plus précisément le rapport eau/ciment a une forte influence sur la porosité du béton, sa perméabilité, les résistances mécaniques, la durabilité, la microstructure, la cinétique d'hydratation, etc. L'eau de gâchage peut avoir plusieurs origines, mais seule l'eau potable est présumée conforme aux exigences aux normes en vigueur. Les autres comme l'eau récupérée de la fabrication de bétons, les eaux d'origine souterraine, les eaux de rejet industriel, l'eau de mer et les eaux saumâtres, doivent être soumises à des essais de contrôle préliminaire (essais chimiques, physiques, etc.). [13]

1.7.4 Les granulats

C'est l'ensemble des grains de dimensions comprises entre 0 et 125mm. Les granulats peuvent être d'origine naturelle (sable et graviers de mer et de rivières), artificiels (argile expansée) ou issue du recyclage de déchets de l'industrie (laitier de haut fourneaux).

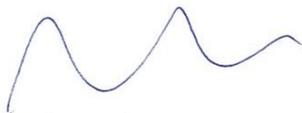
Ils constituent l'ossature du béton et occupent 70 à 80 % environ du volume d'un béton. Ils sont en principe inertes mais peuvent, dans certains cas, favoriser certaines réactions d'hydratation de certains minéraux du clinker c'est l'exemple des silicates tricalciques C3S en présence de filler d'origine calcaire.

Les particules de fumée de silice étant vitreuse et fines, elles permettent de remplir les pores les plus fins de l'empilement des grains de ciment.

D'après P-C. Aitcin [7]. La fumée de silice peut plastifier les bétons à faible rapport E/L, en chassant l'eau qui se trouve entre les particules de ciment.



L'utilisation de la fumée de silice exige inévitablement l'introduction d'un superplastifiant lors du malaxage du béton pour défloculer les grains de ciment et les particules de fumée de silice d'une part, et garder la même maniabilité que les bétons ordinaires d'autre part, car l'utilisation de la fumée de silice a pour effet d'augmenter la demande en eau, à cause de l'ancrage de ses particules entre elles



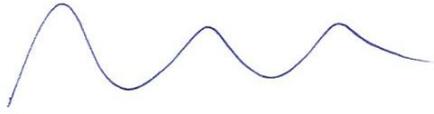
1.7.5.2 Les cendres volantes

Les cendres volantes sont conformes à la norme EN 450. Ce sont des produits pulvérulents de grande finesse résultant de la combustion, en centrale thermique, de minéraux solides.

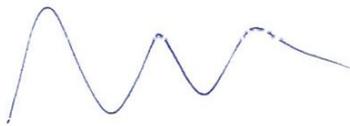


C'est un matériau inorganique fin qui a des propriétés pouzzolanique, à long terme. La cendre volante silico-alumineuse (classe F) est principalement vitreuse. Elle peut contenir des phases cristallisées comme le quartz, Pouzzolanique, elle met du temps à réagir. Sa combinaison avec la chaux libérée par l'hydratation du ciment commence à 28 jours. Ainsi, l'ajout de cendre volante réduit le risque de fissuration due à l'élévation de température lors de l'hydratation du ciment.

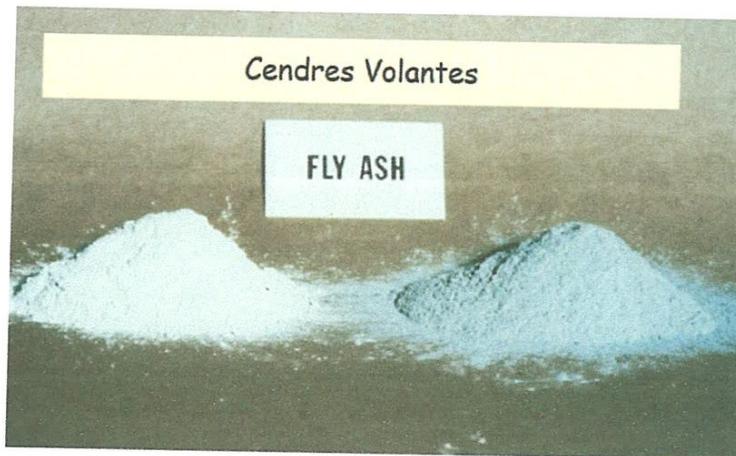
Plusieurs recherches ont montré que l'usage de cendre volante dans les BAP s'améliore les propriétés rhéologiques et donc réduit le dosage en superplastifiant utile à l'obtention d'un étalement similaire à celui d'un BAP sans ajouts.



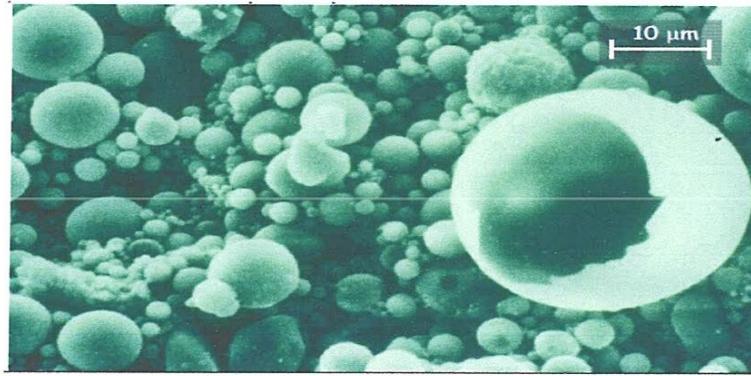
Lee et al. [15] rapportent que le remplacement de 30% de ciment par de la cendre volante résulte en d'excellentes ouvrabilités et fluidités. Certains auteurs ont montré que la quantité de remplacement du ciment ne doit pas excéder 30% pour la cendre volante. Dans les années 80 au Canada, CANMET a conçu un béton incorporant 55-60% de cendre volante ultra fine en complément du ciment, de la classe F d'Alberta et qui développait d'excellentes propriétés mécaniques et de durabilité.



L'augmentation du pourcentage en cendre volante n'influence pas significativement la correction du ressuage.



a) Particules de cendre volante avec la même finesse de ciment



b) microstructure des particules des cendres volantes

Figure 1.2 Les cendres volantes

1.7.5.3 Le laitier

Le remplacement d'une partie du ciment par des laitiers de hauts fourneaux permet globalement de réduire le seuil et la viscosité des pâtes de ciment. Shi Montre par exemple que les laitiers de hauts fourneaux absorbent le superplastifiant. Il est donc possible que la demande en superplastifiant soit plus importante pour obtenir une même fluidité ou valeur de seuil. [16]

Le groupe de laitier granulé comprend deux types:

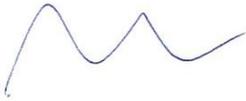
A) type G

Laitier de haut fourneau granulé broyé. Il s'agit du matériau vitreux granuleux qui se forme quand du laitier de haut fourneau fondu est brusquement refroidi. En absence d'activateur, ce type de laitier possède peu de propriétés hydrauliques cimentaires;

B) type H

Liant hydraulique cimentaire. Liant de haut fourneau granulé broyé satisfaisant aux exigences du type G et à celles de la norme CSA A363. On produit ce type de laitier de haut fourneau granulé qui possède par lui-même une certaine activité hydraulique.

L'utilisation de ces deux agents, en remplacement, réduit la quantité de chaleur qui s'accumule dans une structure de béton en raison de leur chaleur d'hydratation moins élevée que celle du ciment Portland; la chaleur d'hydratation de certaines pouzzolanes correspond à seulement 40% de celle du ciment. Ceci est particulièrement avantageux dans le cas où le coulis ne devrait pas chauffer [17]

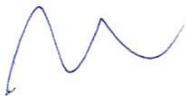


1.7.5.4 Filler calcaire

Les fillers calcaires sont des produits secs finement divisés obtenus par broyage industriel des roches calcaires, dont les caractéristiques sont définies par la norme NF P18 – 305. Parmi ces caractéristiques, deux sont particulièrement significatives :

- Une teneur minimale en carbonates totaux (calcaire + dolomite) ainsi qu'une teneur minimale en carbonate de calcium CaCO_3 ,
- Une valeur minimale de l'indice d'activité.

Les dimensions des particules de fillers s'étendent de quelques μm à quelques dizaines de μm , déterminées en utilisant la granulométrie lazer. [18]



1.7.6 Les adjuvants

1.7.6.1 Les superplastifiants

Les superplastifiants^{sont} sont des produits organiques qui, ajoutés à de faibles proportions (de 0,2 à 2 % environ) au béton frais permettent d'en modifier les propriétés rhéologiques durant une période plus ou moins longue.

L'apparition des BAP est fortement liée aux progrès réalisés dans le domaine des adjuvants et plus particulièrement celui des superplastifiants (SP). 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. 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 [16.19]

L'ajout d'un superplastifiant permet ainsi d'augmenter significativement la fluidité des BAP que ce soit du point de vue de leur étalement ou du point de vue de leur seuil d'écoulement. La figure suivante montre par exemple que l'étalement augmente très fortement à partir d'un certain dosage en superplastifiant. [16.19]

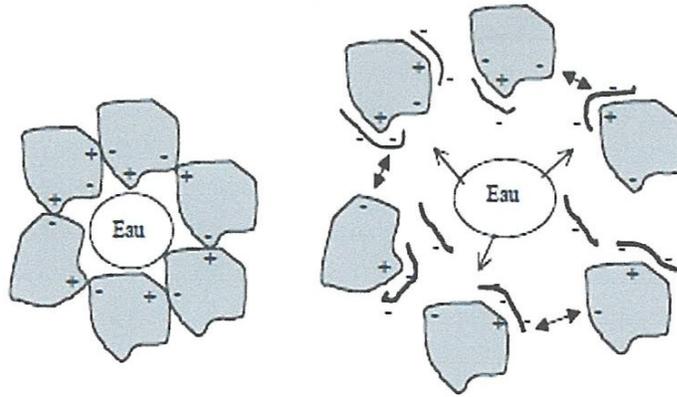


Figure 1.3 Action des superplastifiants - Déflocculation des grains de ciment [16]

A) Mécanismes d'action

Plusieurs mécanismes d'adsorption régissant le mode d'action des dispersants sont possibles:

1-les superplastifiants s'adsorbent sur la surface des particules et changent ainsi leurs propriétés inter faciales dans les suspensions la charge des particules devient très négative et les particules n'ont plus tendance à s'agglomérer.

2-les polymères adsorbés à la surface peuvent empêcher le rapprochement des particules entre elles par encombrement stérique surtout si les chaînes polymériques sont suffisamment longues.

3-l'absorption d'une couche de polymère peut agir comme lubrifiant en permettant un meilleur glissement des particules, les unes par rapport aux autres. Les suspensions peuvent ainsi s'écouler plus aisément et elles deviennent plus maniables [20]

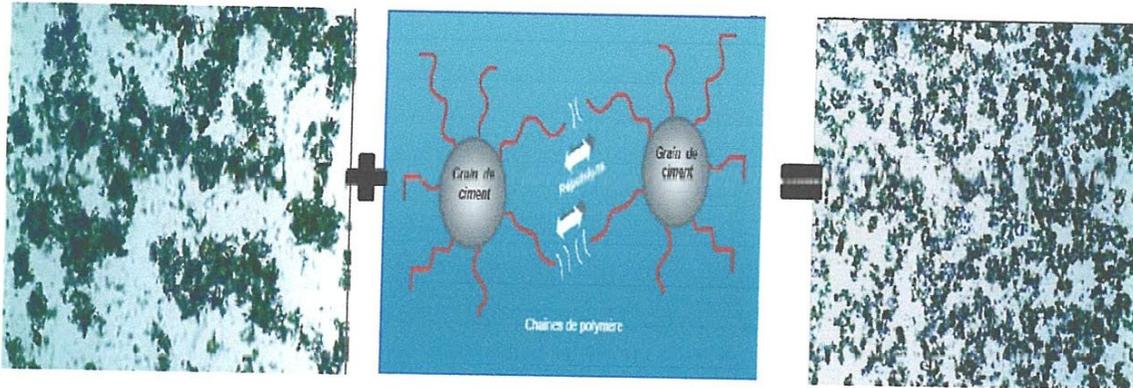


Figure 1.4 Mécanismes d'actions du fluidifiant «Suspension d'eau et de grains de ciment [20].

B) Mode d'action

L'utilisation de superplastifiant dont l'action est schématisée sur la figure 1.2 permet de concilier la diminution de la teneur en eau et la fluidité du béton tout en conservant de bonnes performances mécaniques du matériau.

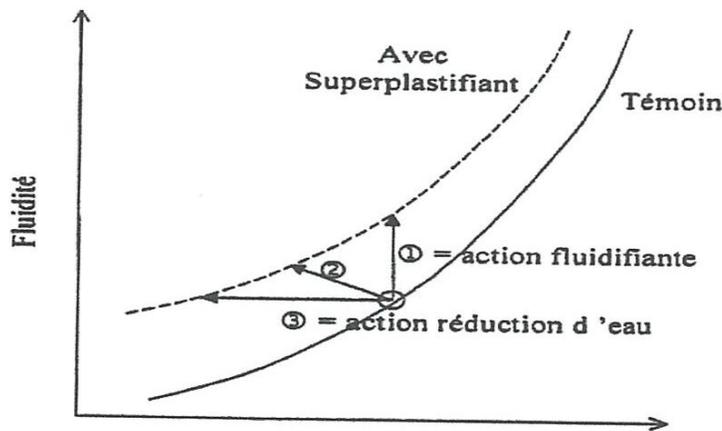


Figure 1.5 Les utilisations des superplastifiants

- ❖ modification de l'ouvrabilité du béton frais, conséquence notamment de la défloculation des grains de ciment ; modification de la cinétique de la prise et/ou du durcissement ;
- ❖ modification d'autres propriétés particulières.

L'eau initialement piégée entre les floccs est de nouveau disponible pour l'hydratation ou pour fluidifier le mélange. Il devient donc possible de fabriquer des bétons très fluides, même avec moins d'eau qu'il n'en faut pour hydrater le ciment, donc de fabriquer des bétons à faible rapport E/C, faciles à mettre en place, On peut observer l'effet d'un fluidifiant et la défloculation des grains de ciments sur les deux micrographies suivantes. [21]

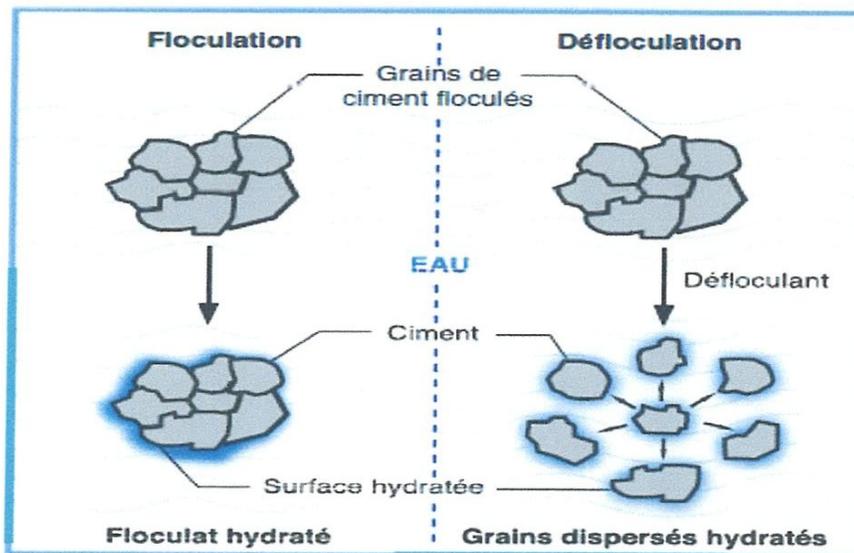


Figure 1.6 Mode d'action des superplastifiants « Défloculation des grains de ciment »

1.7.6.2 L'agent colloïdal

Généralement les superplastifiants, par leur rôle de fluidifiant diminuent la viscosité du béton frais ce qui le rend moins stable vis-à-vis de la ségrégation, c'est pour cela que les agents de viscosité sont utilisés.

Ces produits sont des hypocycloïdes extraits dans les produits naturels qui ont pour rôle d'empêcher le ressuage et de limiter les risques de ségrégation en rendant la pâte plus épaisse.

Les produits les plus utilisés pour la formulation des BAP sont :

Les dérivés cellulosiques : "hydroxy propyl méthyle cellulose" (HPMC), "Hodroxyethyl cellulose" (HEC), "carboxy méthyle cellulose" (CMC)

Les polymères issus de la biotechnologie, qui sont des polysaccharides obtenus par fermentation (gomme de Xanthane de welan, bio polymère p3)

Les agents colloïdaux améliorent la viscosité et diminuent la ségrégation et le ressuage dans les bétons, par contre ils augmentent la demande en eau du mélange et nécessitent leur utilisation en présence de superplastifiants.

Les types les plus utilisés sont des dérivés de cellulose et de polysaccharides de source microbienne. [5].

1.7.7 Autres additions inertes

En plus des additions minérales indispensables caractérisant la composition de la pâte de ciment du BAP, les additions inertes suivantes sont aussi parfois utilisées

- les pigments pour la coloration d'éléments architectoniques
- les fibres d'acier comme armature constructive
- les fibres de polyéthylène (fibres PE) pour améliorer la résistance au feu les fibres de Polypropylène (fibres PP) pour empêcher les fissures de retrait plastique.

1.8 Les principales propriétés du BAP

1.8.1 La capacité de remplissage

La capacité de remplissage caractérise la maniabilité et la fluidité du béton. Elle dépend de deux facteurs : la déformabilité et la résistance à la ségrégation.



(Ozawa et al. 1991) ont montré l'existence d'une relation entre la capacité de remplissage et l'affaissement du béton. Pour de faibles valeurs de l'affaissement, l'écoulement aurait tendance à s'arrêter à cause d'une augmentation de la friction entre les particules du béton. Pour des valeurs d'affaissement plus élevées, les granulats peuvent au contraire se séparer plus facilement du mortier et l'écoulement peut être bloqué par la formation de ponts de granulats reposant sur les obstacles pouvant produire de la ségrégation. Pour avoir une capacité de remplissage maximale, une déformabilité maximale et une ségrégation minimale sont requises. La Figure 1.7 ci-dessous montre la relation entre les différentes caractéristiques du BAP par (Ozawa et al. 1991). [22]

La déformabilité dépend uniquement de l'eau libre, non retenue chimiquement ou physiquement, par les particules fines (ciments, ajouts minéraux) ou le sable (Ozawa et al. 1991).

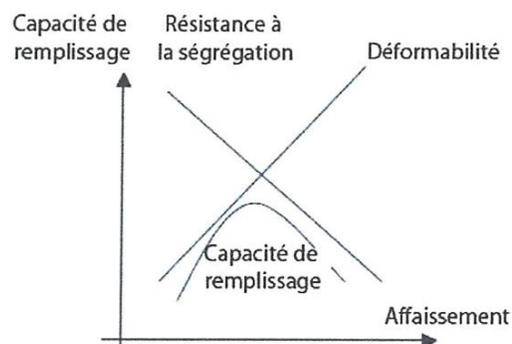
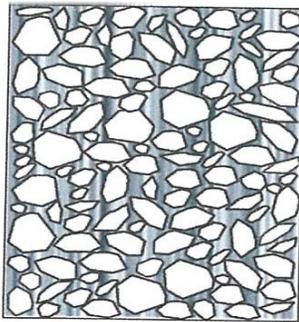


Figure I.7 Relation entre la capacité de remplissage et l'affaissement du béton

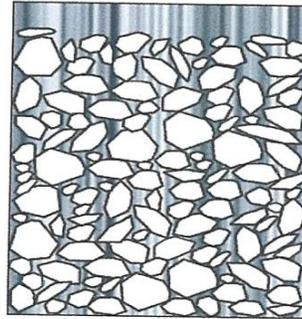
(Ozawa et al. 1991). [22]

1.8.2 La résistance à la ségrégation

Le Béton autoplaçant « BAP » est un nouveau type de béton pouvant remplir tous les coins et recoins d'un coffrage sans apport extérieur d'énergie. Afin d'assurer une telle propriété, le BAP doit présenter une grande fluidité, une bonne **résistance à la ségrégation** et ne devrait présenter aucune forme de blocage au niveau des mailles d'armature. Une bonne résistance à la ségrégation se traduit par une distribution régulière des gros granulats dans toutes les parties de l'élément et à tous les niveaux. En d'autres termes, le béton ne doit subir aucune forme de ségrégation horizontale et verticale.



Distribution régulière des gros granulats dans la masse du béton.



Tassement des gros granulats de la surface. Ségrégation Statique.

Figure 1.8 Représentation du cas de ségrégation statique dans un volume de béton

La ségrégation horizontale est causée par l'écoulement du matériau sur des distances plus ou moins importantes. Elle est aussi amplifiée par les éventuels blocages des gros granulats au voisinage des mailles d'armatures. La ségrégation verticale (Figure 1.7), appelée aussi ségrégation statique, elle est souvent causée par la décantation des gros granulats au fond du volume du béton due à une mauvaise formulation de la pâte.

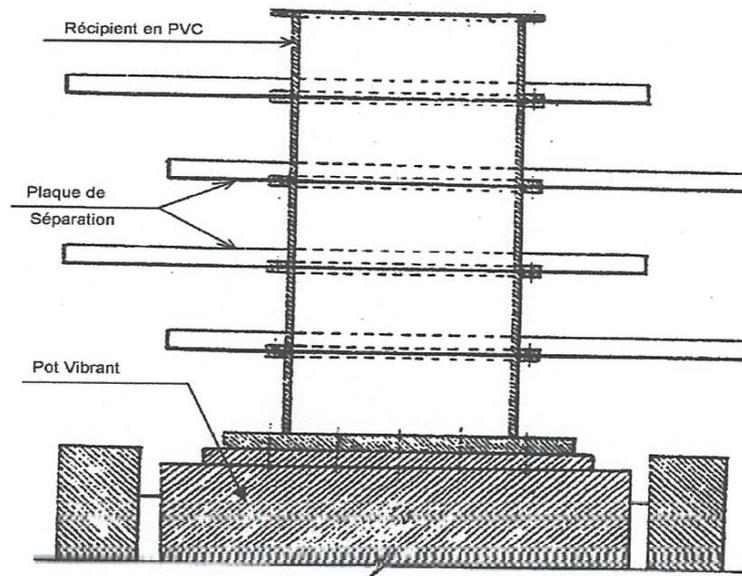


Figure 1.9 Appareillage Expérimental utilisé par Sidky, Legrand et Barrioulet.

On retrouve aussi la méthode japonaise du cylindre qui est analogue à la méthode de Sidky sauf que le récipient est un cylindre de 500 mm de haut par 200 mm de diamètre (Figure 1.10). Le résultat est exprimé par le rapport de la masse des granulats dans la partie supérieure A sur la masse des granulats dans la partie inférieure B. [18]

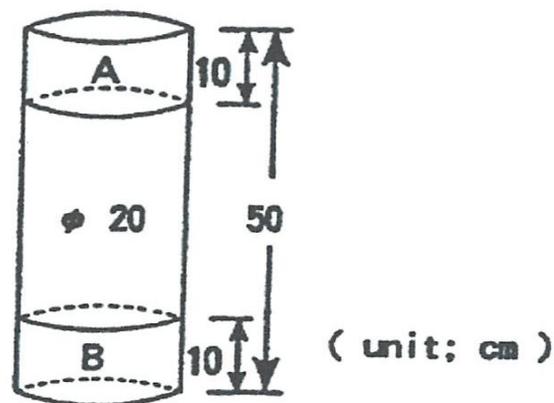


Figure 1.10 Cylindre d'échantillonnage pour la détermination de la résistance à la ségrégation.

Parmi les essais développés pour la caractérisation de la résistance à la ségrégation, on retrouve l'essai de stabilité au tamis, recommandé par l'Association Française du Génie Civil

AFGC. C'est un essai qui consiste à remplir un seau de 10 litres de béton, attendre 15 minutes, puis verser sur un tamis de 5 mm d'ouverture une quantité d'environ 4,8 kg. Enregistrer, après 2 minutes, la quantité de laitance passant par les mailles du tamis. Le rapport de la laitance passée sur la masse de l'échantillon initial offre une grandeur caractérisant la tendance à la ségrégation des BAP.

1.9 Conclusion

La lecture de la littérature nous a permis de se familiariser avec le BAP qui présente de nombreux avantages tels que la mécanisation de la production, de l'exécution sur chantier, l'amélioration des conditions environnementales,...etc. Ces avantages doivent faire du BAP le matériau d'avenir dans le bâtiment et les travaux publics.

Le BAP est un matériau qui doit présenter deux aspects, le premier étant la fluidité qui le rend facile à utiliser dans les milieux confinés sans apport des vibrations et le deuxième constitue l'homogénéité qui lui permet de résister à la ségrégation et au ressuage. Ces deux aspects sont rendus possibles en introduisant dans les formulations des adjuvants (superplastifiant, entraîneurs d'air, agents de viscosité...) et des additions minérales (fumée de silice, fillers calcaires...).

CHAPITRE 2 Formulation et caractérisation du BAP à l'état frais et durci

Sommaire

2.1 Introduction.....	25
2.2 Formulation des BAP.....	25
2.3 Méthodes de formulation des BAP.....	30
2.4 Caractérisation du BAP à l'état frais.....	37
2.5 Propriétés du béton durci.....	44
2.6 Propriétés physico-chimique.....	47
2.7 Mise en œuvre.....	56
2.8 Conclusion.....	59

Formulation et caractérisation du BAP à l'état frais et durci

2.1 Introduction

Les BAP se distinguent des bétons ordinaires principalement par leurs propriétés à l'état frais, qui sont le résultat d'une formulation spécifique. Cette dernière doit pouvoir concilier deux propriétés a priori contradictoires: une très grande fluidité et une bonne résistance à la ségrégation (stabilité).

L'association Française de Génie civil définit dans ses recommandations provisoires les BAP comme des bétons «très fluides, homogènes et stables».



2.2 Formulation des BAP

Pour formuler les bétons ordinaires, la méthode la plus utilisée dans l'industrie est celle dite de Dreux-Gorisse elle propose différents abaques pour estimer les dosages en eau et en ciment permettant d'obtenir la résistance et l'affaissement souhaités. Elle se distingue également par une méthode originale pour proportionner les granulats, qui consiste à caler la courbe granulométrique du mélange sable/gravillons sur une courbe de référence.

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. En fin, et surtout, les propriétés des BAP sont Contradictoires; un béton riche d'une pâte fluide et très sensible à la ségrégation. [23] ? ?

2.2.1 Pratique actuelle de la formulation des BAP

La plupart des formules de BAP sont conçues actuellement de manière empirique. La Méthode de Dreux-Gorisse n'est en effet pas adaptée, car elle ne prend en compte ni les adjuvants ni les additions, la formulation se fait donc sur la base de l'expérience acquise ces dernières années. Par chance, le cahier des charge de BAP est très souvent réduit à sa plus simple expression, puisqu'il ne concerne que les propriétés à l'état frais. En fait, le client majoritaire des fabricants de béton prêt à l'emploi, est l'industrie du bâtiment, on utilise principalement des bétons de 25 à 35MPa, or par expérience, on sait que ces résistances dites «ordinaires» sont facilement atteintes par les BAP (d'autant plus que leurs rapports L/C sont proches de ceux des BO qu'ils doivent remplacer) en outre, l'aspect économique n'est pas encore le critère prédominant de la formulation; les dosages en superplastifiant et en fines ne sont donc pas limités, il est vrai, paradoxalement, que l'utilisation des agents de viscosité n'est pas très diffusée, justement à cause de leur coût.

Avec l'expérience acquise ces dernières années, certains ordres de grandeurs pour les proportions des constituants sont maintenant connus et utilisés:

- Le volume de gravillons est limité en prenant un rapport G/S (masse de gravillons sur masse de sable) proche de 1.
- Le volume de pâte varie entre 330 et 400 l/m³.
- Le dosage en superplastifiant est proche de son dosage à saturation.

La formulation se fait donc par tâtonnement sur la base de ces plages. Après la conception sur le papier, la formule ne peut être optimisée et vérifiée que par des essais effectués la plupart du temps directement sur béton [3].

2.2.2 Les techniques de formulation

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

2.2.2.1 Approche basée sur l'optimisation des mortiers

Okamura [10], Le concepteur des BAP propose de 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 superplastifiant, pour un liant donné (rapport massique ajoutant au mortier un volume de gravillons limité, de manière sécuritaire, à la moitié de leur compacité ciment sur addition fixé).

A la suite d'une optimisation identique du mortier, Ouchi et al proposent de doser les gravillons en cherchant expérimentalement leur volume limite à un blocage ce volume est évalué en comparant l'écoulement du mortier dans un entonnoir avec et sans gravillons. La formulation d'un BAP par le biais de son mortier trouve sa justification dans quelques publications [Billberg 30] et [Jacobs31] montrent à cet effet que la rhéologie d'un béton se corrèle bien avec celle son mortier.

2.2.2.2 Approche basée sur l'optimisation du volume de pâte

Le béton est considéré ici comme un mélange bi-phasique, 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 28], introduisent la notion d'excès de pâte schématisée sur la figure 2.1. La formulation consiste à déterminer la quantité de pâte en excès optimale pour fluidifier le BAP et limiter les problèmes de blocage.

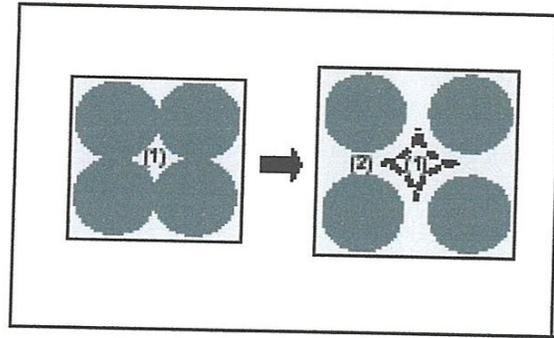


Figure 2.1 Notion d'excès de pâte: la pâte remplit la porosité(1) et écarte les granulats(2)

[Oh et al 28] 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.

Il existe une approche similaire du dosage de la pâte mise au point par [Tangtermsirikul, 27]. [Peterson 26] et [Bui25]. cette fois deux critères, calés aussi expérimentalement sont proposés un volume de pâte minimal vis-à-vis de la fluidité, est un volume de pâte minimal vis-à-vis du blocage. La notion d'excès de pâte a également été proposée par, [Chanvillard et al 29] dans une méthode de formulation des bétons de sable.

2.2.2.3 Approche basée sur l'optimisation du squelette granulaire

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

méthode de formulation. Cette approche fournit surtout un support pour corriger une formule ne répondant pas, par exemple, aux critères de l'AFGC [18].

Les bétons autoplaçants sont des bétons relativement nouveaux en France. L'AFGC a mis en place des techniques pour les caractériser à l'état frais, qui sont répandues rapidement dans la profession du BPE. Il reste que, pour l'heure, il n'existe pas pour les BAP de méthode de formulation généralisée, comme peut l'être la méthode Dreux-Gorisse pour les bétons ordinaires.

2.3 Méthodes de formulation des BAP

Les méthodes de formulation des BAP proposées dans la littérature sont issues d'une ou de plusieurs des approches vues dans paragraphe 2.2 et sont toutes basées sur les constats suivants:

- Lors de l'écoulement en milieu confiné, ce sont les gros gravillons qui sont les plus sensibles aux phénomènes de blocage. Le formulateur devra donc chercher à en diminuer le volume tout en gardant à l'esprit qu'un minimum de gravillons est nécessaire pour minimiser la demande en pâte, à étalement constant.
- Afin d'obtenir une ouvrabilité suffisante, la pâte doit être suffisamment fluide. Cette fluidité peut être obtenue en jouant sur le rapport eau sur liant ou sur le dosage en superplastifiant. Une augmentation de la teneur en eau conduit à une chute de la résistance mécanique qui peut être incompatible avec le cahier des charges mais diminue également la viscosité de la pâte. Ceci augmente les risques de ségrégation des gravillons et donc le blocage. Au contraire, une variation du dosage en superplastifiant a peu d'influence sur la viscosité mais un sur dosage peut entraîner des problèmes de ressuage.

Le formulateur doit donc établir un équilibre entre le rapport eau sur liant et le dosage en superplastifiant pour avoir une pâte fluide mais qui reste suffisamment visqueuse et homogène. Il

peut également utiliser un agent de viscosité pour limiter les problèmes de ressuage et de ségrégation.

2.3.1 Méthode d'Okamura et Ozawa

La méthode suggérée par Okamura et Ozawa est présentée sur la figure 2.2. La quantité de granulat fin (S_c) est fixée 40% du volume de mortier M . Dans ce contexte on doit noter que les particules de diamètre supérieur à $90 \mu\text{m}$ sont considérées comme sables et toutes les autres qui sont inférieures à $90 \mu\text{m}$ sont considérées comme poudre. Ce pourcentage ne dépend pas du type de sable mais plutôt de la quantité de la pâte. Le rapport E/L et le dosage en superplastifiant sont choisis en fonction de l'étalement et du temps d'écoulement de l'entonnoir désirés.

Une valeur minimum d'étalement pour le mortier de 245 mm est suggérée pour un rapport E/L supérieur à 0.3 et de 300 mm pour un rapport E/L inférieur à 0.3.

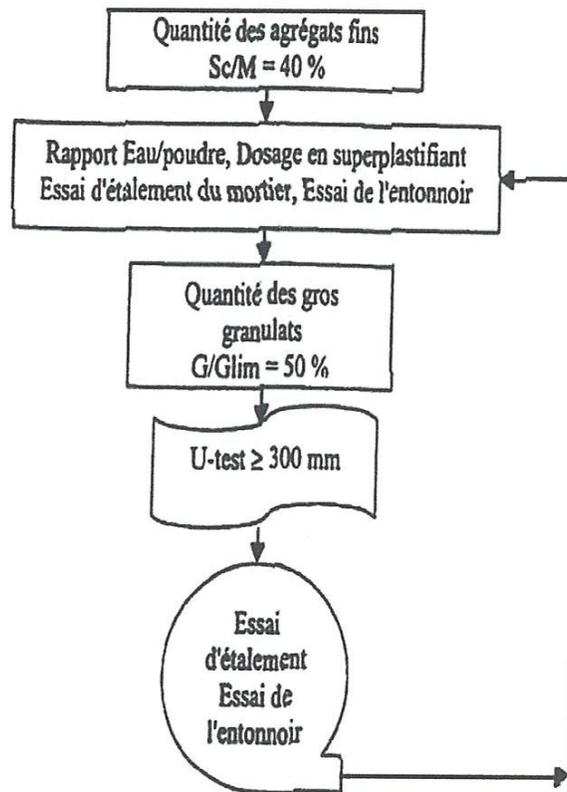


Figure 2.2 Le principe de (Okamura et coll. 1993) [26]

A partir d'une certaine quantité de gros granulats, on assiste un phénomène de blocage dû à augmentation de la friction entre les gros granulats. Cette limite est plus reliée au pourcentage du volume des gros granulats par rapport au volume total des particules solides.

Okamura et Ozawa ont trouvé que ce volume était environ 50% de la masse volumique apparente des gros granulats.

Si la granulométrie des gros granulats est très bonne, cette limite peut être augmentée.

Si le résultat de l'essai U est supérieur à 300 mm, le béton est accepté, sinon on doit ajuster le rapport U/L et le dosage en superplastifiant [33].

2.3.2 Méthode de Sakata

Un résumé de la méthode de formulation des bétons autoplaçants, développée par Sakata et Coll. (1995) est présenté sur la figure 2.3

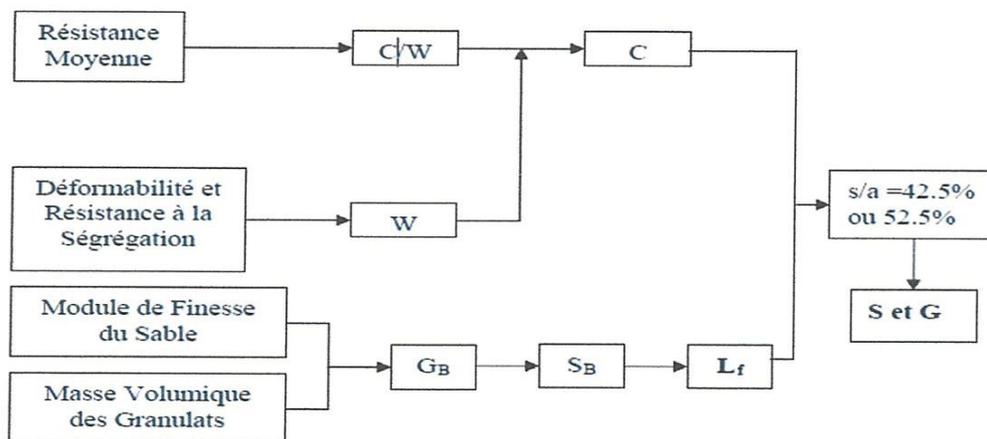


Figure 2.3 Méthode de formulation de Sakata et coll

Cette méthode a été proposée suite aux travaux réalisés sur des BAP à base des matériaux suivants:

- ❖ Ciment portland ordinaire.

- ❖ Filler calcaire d'une densité de 2.73 et de 3000cm²/g de surface spécifique (Blaine).
- ❖ Superplastifiant de type condensé de poly naphtalène sulfonât.

On commence par fixer les quantités de superplastifiant et d'agents colloïdaux à laide. Des abaques développés à partir des résultats expérimentaux [Sakata et coll. 1995]

Une des caractéristiques de base de cette méthode est que la quantité totale des granulats est constante.

À partir de la relation suivante, on peut déterminer le rapport E/C en fixant une valeur pour la résistance en compression à 28jours.

$$\frac{E}{C} = \frac{19.2}{f'_{\square} \cdot 5.8}$$

Les abaques permettent de trouver la quantité d'eau efficace, selon la consistance désirée pour le béton. À partir de cette quantité, on peut déduire la quantité de ciment nécessaire. Pour atteindre le niveau désiré de fluidité, on ajuste la teneur en superplastifiant qui est reliée à la nature du sable et au mode de malaxage. Nous permet de déterminer le dosage en agent colloïdal qui est fonction du rapport sable/ granulats, du rapport E/C et de la teneur en eau il reste à déterminer la quantité de filler calcaire utilisée pour remplacer une Partie des granulats pour cela, il faut trouver les quantités de base de sable SB et de gros granulats Ge.

La quantité de base de gros granulats est déterminée en multipliant la masse volumique sèche par le coefficient correspondant au module de finesse du sable.une fois le volume des gros granulats, de ciment, d'eau et d'air (environ 2 %) déterminé, on déduire le volume du sable. en multipliant le volume de sable par sa densité, on obtient SB.

La quantité de filler calcaire est le résultat de la multiplication de sa densité par 0.2.

Il s'agit enfin de trouver le rapport granulat (gros granulat et granulat fin) qui sera égal à 42.5% ou 52.5% selon le type de béton désiré.

Si on compare cette méthode avec celle d'Okamura et Ozawa, on constate que le principe de laisser la

quantité de granulats constante est appliqué.

2.3.3 Méthode Japonaise

La méthode de formulation des BAP est la suivante:

La teneur volumique en gravillon du béton est fixée à 50 % du volume de solide. Selon les auteurs [39], ce pourcentage permet de prévenir le risque si le mortier est correctement formulé.

- Pour assurer une bonne ouvrabilité, le volume de sable est fixé à 40% du volume total du mortier. L'estimation de la pâte s'effectue sur un mortier dont la teneur volumique en sable est égale à 40% ces mortiers sont caractérisés par deux essais:
- Un essai d'étalement au cône
- Un essai d'écoulement à l'entonnoir

Les auteurs en deux grandeurs:

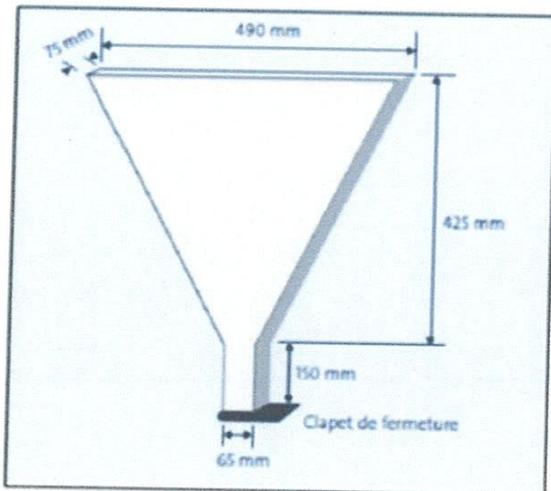


Figure 2.4 Essai d'entonnoir utilisé pour mesurer le temps d'écoulement du béton

Figure 2.5 Essai d'entonnoir

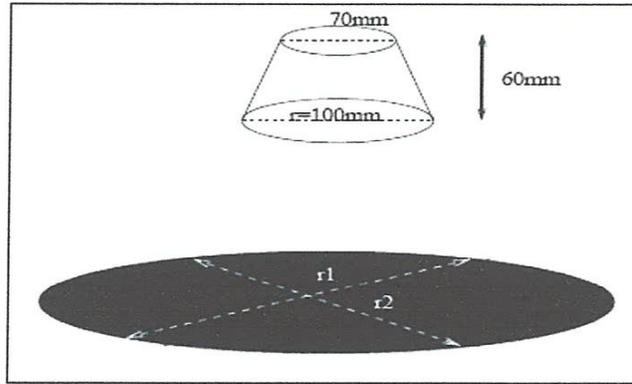


Figure 2.6 Cône pour mesurer l'étalement des mortiers

2.3.4 Méthode Suédoise

Peterson et al Cité par [81] ont repris l'approche précédente (celle de Tangtermsirikul et Van) et l'ont intégré dans le processus de formulation suivant :

Ils mesurent par ailleurs la compacité du mélange sable plus gravillon pour déterminer la quantité minimale de pâte nécessaire pour remplir les vides entre granulats. La figure 2.6 présente les résultats ou les auteurs ont déterminé la relation entre le volume de pâte et le rapport S_a (gravillon/granulats) pour différents espacements entre armatures.

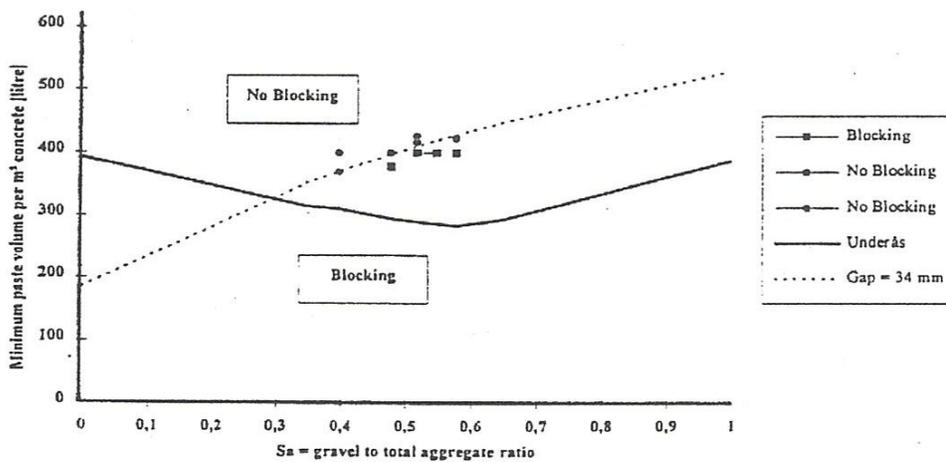


Figure 2.7 Courbes pour détermination du volume minimal de pâte

La courbe en gras détermine la quantité de pâte minimale pour remplir la porosité entre les granulats. La courbe en pointillés détermine le volume de pâte minimal pour éviter le blocage.

Il faut toutefois noter que cette valeur est une valeur par défaut puisque le volume de pâte doit être supérieur au volume de pâte indiqué sur la courbe en gras pour écarter les granulats et avoir un étalement suffisant du béton. Les auteurs ne donnent pas de précision à ce propos et c'est une lacune de la méthode de formulation.

La composition de la pâte est déterminée, d'une part, par la résistance visée qui impose le rapport eau sur liant, et d'autre part, à l'aide de mesures rhéologiques sur le Mortier dont on a enlevé les grains de dimensions supérieures à 250 μm .

L'optimisation du mortier vise à réduire le seuil de cisaillement tout en ayant une viscosité suffisante en jouant sur la nature des liants, le dosage en eau et en superplastifiant. Les bétons ainsi formulés sont ajustés comme dans la méthode de formulation d'Okamura et Ozawa. Ceci est, d'ailleurs, en accord avec l'approche adoptée par les chercheurs de l'université de Tokyo (Okamura et Ozawa ainsi que Ouchi et al). [27].

2.3.5 Méthode Française (LCPC)

Des chercheurs ont proposé une première méthode de formulation des BAP qui a été développée à partir d'un modèle de suspension solide. Ce modèle est un modèle analytique, permettant un calcul théorique de la compacité d'un mélange granulaire.



T. SEDRAN, F. DE LARRARD, F. HOURST et C. CONTAMINES, [28] chercheurs au Laboratoire central des ponts et chaussées « LCPC, Paris » ont présenté une nouvelle Méthode

rationnelle pour la formulation des BAP. Cette méthode est basée sur les concepts qui seront présentés ci-après :

- Le modèle de suspension solide. ce modèle est un modèle analytique, permettant un calcul théorique de la compacité d'un mélange granulaire à partir des caractéristiques des constituants (compacités propres), des proportions du mélange de la distribution granulaire.
- Le rhéomètre au BT rhéomètre.

La méthode en question n'est applicable qu'aux BAP sans agent de viscosité.

2.4 Caractérisation du BAP à l'état frais

Il n'existe pas d'essai standard, ni de critère bien défini pour s'assurer qu'un béton est effectivement autoplaçant. En effet, le comportement spécifique de BAP à l'état frais rend quasi inadaptes la plupart des essais classiques sur les bétons traditionnels:

Les essais au maniabilimètre ne sont pas possibles en l'absence de vibration et l'essai classique d'affaissement au cône d'Abrams est inopérant l'affaissement étant ici «total». C'est pourquoi les chercheurs et les industriels ont développé toute une série d'essais plus ou moins complémentaires, mais dont l'interprétation reste bien souvent subjective et dépendant de l'opérateur [37].

Dans la suite de ce paragraphe, seront présentés les essais proposés par l'AFGC qui servent actuellement de référence à défaut d'être normalisés. Les résultats de ces essais Permettent de donner une vision qualitative pour les BAP.

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

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

2.4.1 Fluidité

La fluidité caractérise la capacité du béton à s'écouler sous son propre poids avec un débit suffisant. Elle est abordée dans cette pour un écoulement sans obstacle.

2.4.1.1 Mobilité en milieu non confiné (Essai d'étalement)

L'essai d'étalement s'est imposé comme l'essai le plus facile à réaliser, il permet de mesurer la consistance d'un béton cet essai s'effectue comme un essai d'affaissement au cône d'Abrams figure 2.8. cependant l'affaissement étant toujours supérieur à 25 cm, on mesure le diamètre moyen (moyenne sur deux diamètres orthogonaux) de la galette de béton Obtenue au bout d'une minute, ainsi que le temps nécessaire à l'obtention du diamètre d'une galette de 50 cm de diamètre. Cette dernière valeur donne une indication sur la viscosité du matériau.

Une observation permet également de constater si une ségrégation horizontale a lieu ou non. Cet essai réalisable sur chantier ne nécessite qu'un petit échantillon, de béton.

Une valeur de 60 à 75 cm est en général visée pour obtenir un BAP.

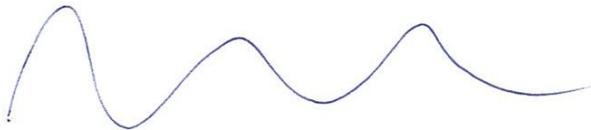


Figure 2.8 Essai d'étalement au cône d'Abrams (slump flow)

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

Un ressuage peut être détecté si de l'eau est présente en grande quantité sur les bords de la galette,

- En traçant à la truelle des lignes dans la galette, on peut vérifier si le béton se referme bien, ce qui est synonyme de bon comportement.
- La fluidité du béton peut être évaluée en mesurant les temps de passage du béton aux diamètres 50 et 60 cm durant un écoulement au cône.
- Une forme bombée de la galette traduit un effet de voute, ce qui peut nuire à l'homogénéité du béton toutes ces indications sont plus ou moins subjectives mais aident le formulateur expérimenté à effectuer certaines corrections en vue d'obtenir un béton qui correspond plus à ses attentes [24].



2.4.2 Homogénéité

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.

S'il y a instabilité c'est à dire une séparation entre les gros granulats et la phase suspendante. Lors de la mise en œuvre dans le coffrage, on parle de ségrégation dynamique. La ségrégation statique peut apparaître une fois que le matériau est en place et jusqu'à la prise.

La ségrégation peut être nuisible aux résistances mécaniques mais également à la Durabilité de la structure. Or elle n'est pas visible sur les parements sauf si elle s'accompagne de

ressuage.

Il est donc nécessaire de s'assurer en amont de la stabilité du BAP et de disposer.

D'essais de vérification avant coulage. Nous allons dans un premier temps nous intéresser au comportement des BAP lors de l'écoulement.



Différents essais de caractérisation seront présentés ainsi que les phénomènes pouvant conduire à une perte d'homogénéité du matériau. Les recommandations en termes de formulation seront abordées. Dans une deuxième partie, nous étudierons plus précisément la ségrégation statique à travers les essais et les études disponibles pour caractériser ce phénomène. L'implication en termes de formulation sera également prise en compte.

2.4.2.1 Ségrégation dynamique

Différents essais sont disponibles pour mettre en évidence la capacité d'un BAP à s'écouler à travers un ferrailage plus ou moins dense.

A-Mobilité en milieu confiné (essai à la L-Box)

L'essai à la L-Box est recommandé par l'AFGC. Il permet de tester la mobilité du béton en milieu confiné et de vérifier que sa mise en place ne sera pas contrariée par des phénomènes de blocage.

Le dispositif d'essai est constitué d'une boîte en forme de L figure 2.9



Figure 2.9 Essai à la L-Box

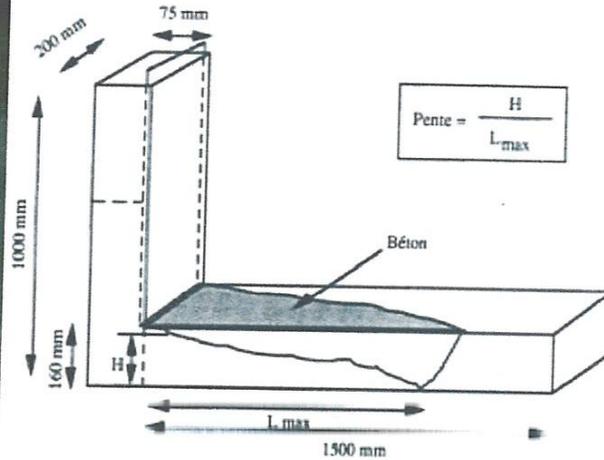


Figure 2.10 Appareil et dimensions

De la boîte

La partie verticale est séparée de la partie horizontale par une trappe.

Des armatures peuvent être intercalées avant la trappe.

L'AFGC recommande l'utilisation de trois barres de 14 mm de diamètre, espacées de 39 mm. Le mode opératoire de l'essai à la L-Box est le suivant la partie verticale du dispositif est remplie de béton (Volume nécessaire de l'ordre de 13 litres).

Après arasement, le matériau est laissé au repos pendant 1 min. la trappe est ensuite soulevée afin de laisser s'écouler le béton à travers le ferrailage. Figure 2.11.

A la fin de l'essai, les hauteurs de béton, de la partie verticale et de l'extrémité de la partie horizontale, sont mesurées

(Respectivement H_1 et H_2). Le rapport H_2/H_1 permet de caractériser la Dénivellation et doit être supérieur à 0,8. un mauvais écoulement du béton à travers le Ferrailage et un amoncellement de granulats au niveau de la grille sont signes d'un problème de blocage ou de ségrégation.



Figure 2.11 Essais d'écoulement à travers des armatures L-Box

B-Essai : en U

Une boîte transparente en forme de U est séparée en son milieu par des barres d'armature (13 mm de diamètre et espacées de 50 mm centre à centre) et d'une part coulissante. Après avoir rempli une coté de la boîte avec du béton frais, on applique une masse sur le béton de manière à créer une pression de 2400 Pa, on fait ensuite coulisser la porte pour laisser le béton.

La hauteur qu'atteindra le béton de l'autre coté des barres d'armatures sera l'indicatif de la capacité de remplissage [Hayakawa et Coll., 1993. Tangtermsirikul et coll. 1987, Okamura et Coll., 1994]

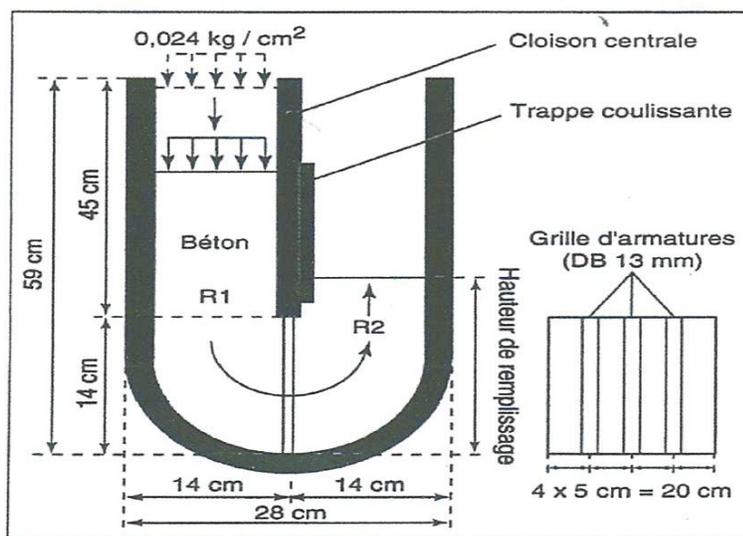


Figure 2.12 Essai du tube en U [24]

2.4.2.2 Ségrégation statique

A-Essai de stabilité au tamis

Cet essai vise à qualifier le risque de ségrégation des BAP. il permet de compléter l'essai de la boîte en L. on prélève un échantillon de 10 litres de béton, après 15 minutes d'attente, on verse sur un tamis d'ouverture 5 mm, une masse de 4.8 kg de béton et on relève la masse de l'échantillon ainsi que celle du fond avec la laitance. [8]



Figure 2.13 Essai de stabilité au tamis. [24]

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

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

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

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

Ces essais permettent d'avoir une vision qualitative des BAP [13].

2.4.2.3 Ressuage

Le ressuage est un type spécial de ségrégation où les particules solides ont un mouvement général inverse à celui du liquide. En fait, pendant la période dormante du béton, les particules solides qui sont plus denses que l'eau sédimentent. L'eau est ainsi chassée vers le haut dans le cas de coffrages imperméables. Au niveau visuel, le ressuage s'observe par une fine pellicule d'eau à la surface du béton. Selon les conditions météorologiques, on assiste à une compétition entre le débit d'eau ressué et le débit d'eau évaporée [21].

Si ce dernier est plus faible, le phénomène de ressuage est visible, sinon, la surface du béton au lieu d'être brillante, devient mate. La quantité d'eau ressuée sera de toute façon égale à la quantité d'eau stagnante ajoutée à celle déjà évaporée.

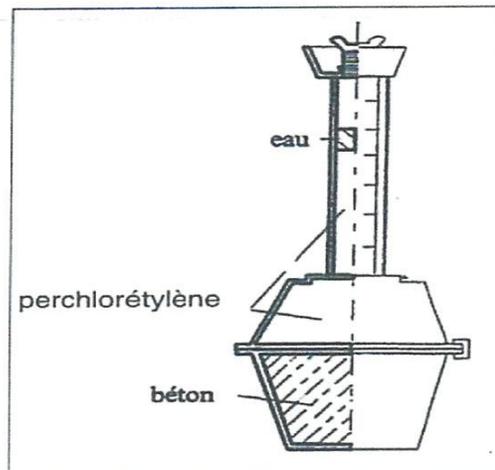


Figure 2.14 Essai de ressuage

2.5 Propriétés du béton durci

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

De nombreux travaux ont montré que les déformations des bétons sont sensibles à la Proportion de granulats qui entre dans leur composition.

Plus précisément, le béton peut être représenté comme une combinaison de deux phases:

La pâte de ciment durcie, ou matrice, et les granulats, ou inclusions.

Les propriétés de ce mélange (module, retrait, fluage) dépendent alors des caractéristiques élastiques respectives de chaque phase, de leur proportion, de leur fluage et de leur retrait.

2.5.1 Résistance mécanique

La caractéristique essentielle du béton durci est la résistance mécanique σ Compression à un âge donné (28 jours).le béton est un matériau travaillant bien en compression, dont la connaissance de ses propriétés mécaniques est indispensable pour le calcul du dimensionnement des ouvrages.

On se préoccupe assez peu de sa durabilité, de son imperméabilité. Très souvent un Béton de résistances mécaniques élevées est durable bien que l'on puisse confectionner avec un ciment très performant un béton sous-dosé, peu étanche, de durabilité limitée, mais possédant cependant les résistances en compression exigées.

On verra que la résistance du béton dépend d'un grand nombre de paramètres le type et le dosage des matériaux utilisés, le degré et la condition de réalisation etc.....

La résistance d'un béton est une notion toute relative et elle dépend de la méthode d'essai utilisée (comprenant la forme des éprouvettes).

La résistance en compression à 28 jours est désignée par f_{c28} .elle se mesure par Compression axiale de cylindres droits de révolution et d'une hauteur double de leur ϕ diamètre. Le cylindre le plus couramment employé est le cylindre de 16 (d=15,96 cm) dont la section est de 200 cm² la normalisation européenne indique comme dimension. Des cylindres d = 16 cm de H=32 cm

Elle varie suivant la taille des éprouvettes essayées. Plus celles-ci sont petites et plus les résistances sont élevées. La résistance sur cylindre d'élanement 2 (par exemple diamètre de 16 cm, hauteur de 32 cm) est plus faible de l'ordre de 20% que la résistance sur cubes de 20 cm.

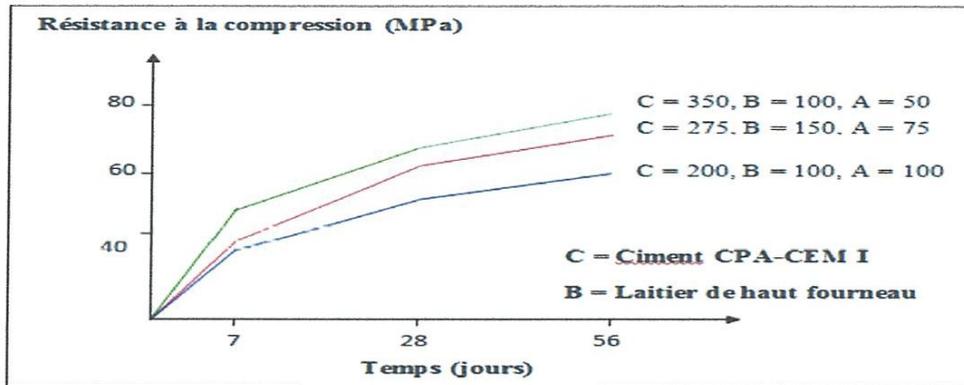


Figure 2.15 Variation des résistances mécaniques en compression de BAP en fonction de la composition du liant, d'après Hayakawa et al (1993) [29].

2.5.1.1 Résistance à la compression

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

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

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

Zhu et al. [42] ont montré que la résistance de BAP utilisant la poudre de pierre à chaux

augmente de 50 à 80% de celle de référence à 7j et de 20 à 40% à 28j. Ils ont expliqué cette augmentation par la poudre à pierre à chaux accélère l'hydratation de ciment et augmente la résistance au jeune âge.

2.5.1.2 Résistance à la traction

La particularité des BAP peut entraîner des variations de résistance. Par exemple, la quantité de fines ou bien le volume de sable peuvent influencer la résistance en traction. On trouve que l'augmentation de la quantité de sable ou/et du volume de fines entraîne une élévation de la résistance en traction.

En effet, 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'aurole de transition sont ordinairement utilisées dans la littérature pour expliquer les variations ou les résultats de résistance à la traction obtenus.

La porosité 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%). [21]

2.6 Propriétés physico-chimiques

2.6.1 Caractéristiques de la structure poreuse

2.6.1.1 Introduction

Un matériau poreux est un cas particulier dans la catégorie très générale des matériaux plutôt que d'un autre matériau et que les phases en présence sont continues en trois dimensions [16].

Une des phases continues constitue la matrice solide supposée indéformable, cette phase définit les frontières d'un certain nombre d'espaces vides appelés pores, cavités, fissures, etc..... espaces, qui forment un réseau plus au moins bien interconnecté.

La microstructure des matériaux poreux peut être décrite en utilisant certains paramètres qui sont la

porosité, la connectivité, la tortuosité.

2.6.1.2 La structure poreuse du béton

Le béton est un matériau composite caractérisé par une microstructure poreuse avec des pores de différentes tailles et de distribution aléatoire.

La structure poreuse et la distribution des pores au sein du béton jouent un rôle très important non seulement sur la résistance mécanique, mais aussi sur les phénomènes de transport et d'interaction avec le milieu extérieur. Cette interaction a lieu à travers les pores interconnectés.

Le réseau poreux est aussi le réceptacle de l'eau liquide, de l'eau en forme de vapeur et de l'air sec Figure 2.16

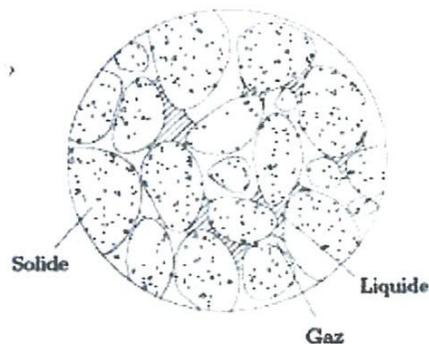


Figure 2.16 Description du milieu poreux avec les trois phases

Pour sa représentation thermodynamique, on conceptualise le milieu poreux en trois Phases solide, liquide et gazeuse dans le cas du béton durci, la matrice représente la phase solide.

Les pores remplis d'air ou d'eau représentent les phases gazeuses ou liquides respectivement. Ces pores peuvent être connectés entre eux ou non.

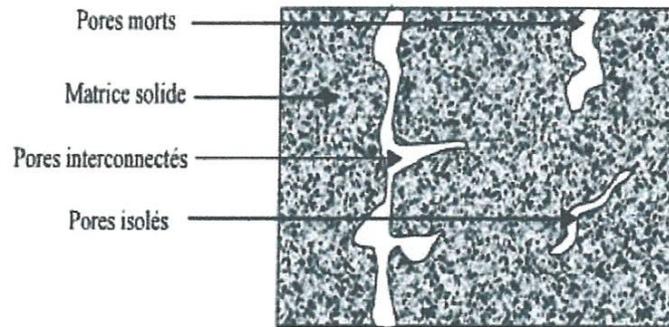


Figure 2.17 Représentation schématique d'un solide poreux [23].

[23] A noté que dans cette représentation on ne fait pas intervenir d'effets d'échelle sur la porosité, alors que la structure poreuse des matériaux cimentaires se décline sur un vaste intervalle de tailles de pores. D'après la figure 2.17, on constate trois groupes de pores :

Les pores interconnectés qui forment un espace continu dans le milieu poreux et participent au transport de matière à travers le matériau.

Les pores aveugles ou bras morts qui sont connectés uniquement par une voie. Ils peuvent donc être accessibles à un fluide extérieur mais ne participent pas au transport.

Les pores isolés qui ne communiquent pas avec le milieu extérieur.

Cette lacune de la représentation microscopique standard pourra être à l'origine de différences entre modèles et expériences.

Les caractéristiques microstructurales des BAP sont principalement influencées par:

- Un volume de pâte élevé,
- la présence d'additions en quantité importante,
- un réseau de bulles d'air plus ou moins dense.

L'influence des additions sur la matrice cimentaire dépend de la taille des particules, de leurs compositions chimiques et minéralogiques.

2.6.2 Propriétés physico-chimiques et durabilité

2.6.2.1 Perméabilité aux gaz

A-Généralités

Les transferts de matière à travers le béton sont de même nature que ceux relatifs à d'autres milieux poreux et peuvent être étudiés à l'aide de différents fluides. Dans le cas de perméabilité, les principaux fluides sont l'eau et le gaz. Cependant, étant donné les interactions possibles entre la matrice cimentaire et l'eau, le passage d'un fluide inerte à l'intérieur du béton semble préférable. Par conséquent, les méthodes et résultats de mesure choisis et rapportés ici sont ceux de la perméabilité aux gaz et plus particulièrement à l'oxygène.

Plusieurs paramètres entrant en jeu lors de l'écoulement d'un gaz à travers un milieu poreux ont une influence sur la perméabilité.

Ainsi, la teneur en eau du béton a un effet marqué sur la majorité de ses propriétés dont la perméabilité aux gaz, qui est très affectée par la quantité d'eau interstitielle. Dans un matériau poreux, le solide et l'eau se comportent plus ou moins de la même manière c'est à dire en bloquant l'écoulement du gaz. Les échantillons sont donc presque imperméables aux gaz quelle que soit leur porosité. Il faut alors drainer l'eau interne, partiellement ou entièrement, avant qu'une mesure de perméabilité aux gaz ne puisse être réalisée d'autre part, plus le rapport E/C est grand, plus la perméabilité est forte et moindre est l'influence d'une variation du taux de saturation sur la perméabilité. L'influence du taux de saturation sur la perméabilité décroît donc avec l'augmentation du rapport E/C.

Le deuxième facteur qui influe sur la perméabilité est la pression d'essai. Celle-ci est

inversement proportionnelle au libre parcours moyen. Lorsque celui-ci est bien plus petit que la dimension des pores l'écoulement est laminaire ou turbulent. En revanche, quand le libre parcours moyen est proche du diamètre des pores l'écoulement est alors moléculaire. Mais la perméabilité peut aussi dépendre des caractéristiques propres au matériau, notamment de sa microstructure. En effet, le béton possède une gamme très étendue de taille de pores

La dimension des pores dans le béton est directement liée au rapport E/C de la formulation étudiée. En effet, lorsque le rapport E/C augmente, la porosité devient plus grande et la structure poreuse plus grossière. Les transferts de matières de l'extérieur vers l'intérieur du béton sont alors facilités et la perméabilité du matériau s'amplifie l'importance du rapport E/C sur cette propriété de transfert est à prendre en compte avec une attention toute particulière

B-Etudes relatives aux BAP

Les spécificités de composition des BAP ne semblent pas permettre de tirer un premier commentaire quant à une perméabilité différente de celle des bétons vibrés. Le volume de pâte plus important peut a priori être un handicap pour ces bétons mais l'utilisation d'addition minérale est susceptible d'améliorer cette propriété: la densification de la matrice cimentaire qu'elle engendre peut éventuellement diminuer la perméabilité du béton. Certaines études publiées ont en effet montré que les additions minérales telles que le filler calcaire, donnent aux BAP une microstructure plus dense que les bétons vibrés de même rapport E/C. La porosité de ces BAP, en particulier celle de l'aurole de transition, est significativement plus faible que celle des bétons vibrés d'après ces données, il résulte de ces observations une amélioration des propriétés de transfert mesurées, comme la perméabilité aux gaz par exemple, et une meilleure durabilité de ces bétons

D'autres résultats relatifs à la durabilité des BAP montrent que leur perméabilité à

l'oxygène est moindre que celle des bétons vibrés voir figure 2.18. Les compositions étudiées ont des caractéristiques très proches (quantité de ciment, rapport E/C) et il ressort de ces observations que la diminution de la perméabilité est principalement due à l'utilisation d'additions minérales dans les BAP. L'influence d'autres paramètres distinguant les BAP des bétons vibrés n'a pas clairement été élucidée. le volume de pâte, par exemple n'entre pas dans les éléments de comparaison de la perméabilité de deux types de béton [28].

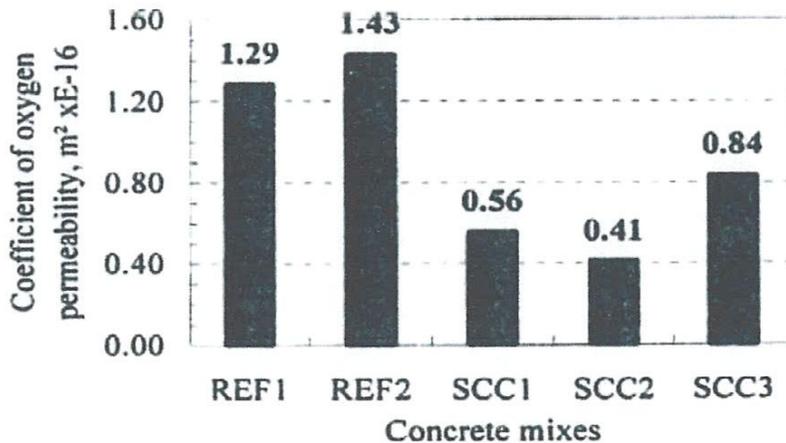


Figure 2.18 Coefficient de perméabilité à l'oxygène de trois BAP (SCC) et deux bétons vibrés correspondants [21]

2.6.2.2 Diffusion des ions chlore

A-Généralités

La diffusion est le résultat d'un transfert de matière, à travers le béton, dû à un gradient de concentration (diffusion moléculaire). Les mouvements de fluides, liquides ou gaz, qui en découlent sont très influencés par le taux de saturation du matériau. Comme pour la perméabilité, l'eau contenue dans les pores ralentit la diffusion des gaz de manière significative. Cette solution interstitielle véhicule également des ions, dont certains sont de nature agressive comme les chlorures et les sulfates. De plus, des interactions chimiques peuvent avoir lieu avec la pâte de ciment à l'intérieur des pores : à la diffusion moléculaire vient se joindre la diffusion ionique. Celle-

ci est plus présente lorsque le matériau est saturé et joue un rôle important dans l'attaque du béton par ces agents agressifs. La diffusion varie elle aussi avec le rapport E/C mais l'influence de ce dernier sur la diffusion est bien moindre que sur la perméabilité

L'agent agressif extérieur dont la diffusion à travers le béton est particulièrement intéressante est celle des ions chlore qui peuvent provenir de diverses sources extérieures (sels fondants, eau de mer, nappe phréatique, eaux industrielles) et pénétrer dans le béton par diffusion (et/ou absorption). Lorsque ceux-ci se retrouvent en quantité suffisante (concentration minimale) dans l'eau interstitielle du béton ils engendrent une diminution du pH. Au voisinage des armatures en acier, cette diminution de pH détruit progressivement la couche protectrice (basique) des armatures Il y a dé-passivation de l'acier et le phénomène de corrosion peut alors commencer. Dans ce cas de figure, la durabilité du béton armé dépend fortement de la résistance du béton à la pénétration de ces agents agressifs (même s'ils ne dégradent pratiquement pas le béton lui-même).

B- Etudes relatives aux BAP

Les différentes comparaisons publiées sur la diffusion des ions chlore entre les BAP et les bétons ne permettent pas d'en déduire une tendance générale. Certains auteurs ont évalué le comportement de bétons autoplaçant, et de bétons vibrés soumis à un essai de migration des ions chlore sous un champ électrique. Malgré un rapport E/C plus faible (0,4 contre 0,5 pour le béton vibré), le BAP s'est avéré moins résistant à la migration des ions chlore.

Les coefficients de diffusion du BAP, calculés à partir de ces essais, sont 2 à 3 fois supérieurs à ceux du béton vibré (31 à 56.10⁻¹² m²/s au lieu de 15 à 18.10⁻¹² m²/s, voir figure 2.19. Selon ces auteurs, ces faibles performances pourraient être attribuées à une mauvaise dispersion de l'addition calcaire.

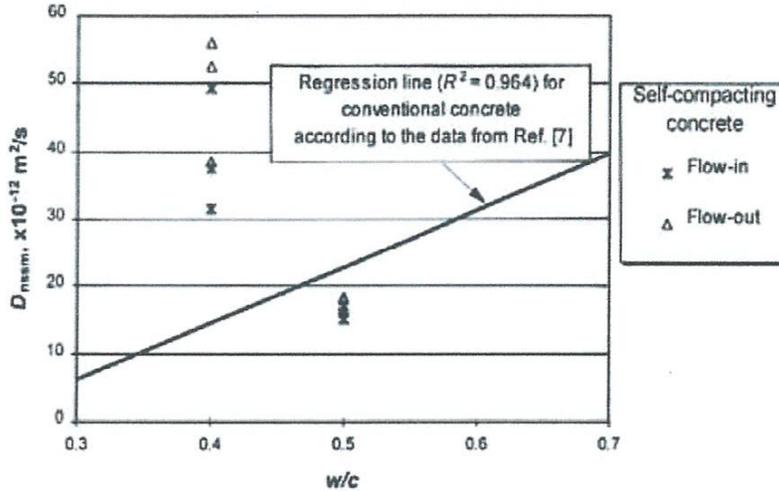


Figure 2.19 Comparaison des coefficients de diffusion des ions chlore entre BAP et bétons vibrés

[23]

2.6.2.3 Absorption capillaire

A-Généralités

Le transfert de liquides dans un matériau poreux dû à des tensions de surface dans les capillaires est appelé l'absorption d'eau. Ce mécanisme de transfert n'est pas seulement lié à la structure poreuse mais aussi à l'humidité relative du béton. L'absorption d'eau à l'intérieur du béton sec est connue pour dépendre de deux paramètres majeurs à savoir la porosité effective du béton et la vitesse d'absorption par remontée capillaire (absorptivité). Etant donné que le remplissage des capillaires et des vides ont lieu en même temps que la montée de l'eau durant l'absorption, seule une combinaison de phénomènes est mesurable et donne une idée de l'absorption d'eau d'un béton.

En pratique, l'absorption se mesure en faisant sécher une éprouvette de béton, à masse constante, puis en l'immergeant dans l'eau et en mesurant l'augmentation de sa masse.

Une autre méthode pour évaluer l'absorption d'eau consiste à mesurer le taux d'absorption d'eau par succion capillaire à l'intérieur d'une éprouvette de béton. Cet essai permet d'exprimer la vitesse d'absorption par remontée capillaire.

L'équation qui régit le mécanisme de l'absorption d'eau est la suivante :

$$i = (C +) S t^{1/2}$$

Avec i le terme concernant la quantité d'eau absorbée (kg/m^2), S l'absorptivité ($\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{s}^{1/2}$) et t le temps écoulé (s). C 'est l'éventuelle valeur initiale observée par certains chercheurs [10].

L'absorptivité est influencée en premier lieu par le rapport E/C d'autre part, plus le taux d'humidité du béton est élevé, plus la valeur mesurée d'absorptivité est faible. Ceci entraîne la nécessité d'un conditionnement préalable des échantillons à tester. L'évaluation du comportement des bétons face à ce troisième mécanisme de transfert permet de compléter et d'approfondir l'analyse des propriétés caractéristiques de leur durabilité.

Comme pour les propriétés de transfert déjà mentionnées (perméabilité et diffusion), la formulation particulière des BAP (volume de pâte plus important, additions minérales) pourrait les entraîner à posséder une absorption d'eau différente de celles des bétons vibrés.

Le tableau suivant dément cette hypothèse. En effet, l'absorption par immersion et par capillarité des BAP est analogue à celle des bétons vibrés correspondants (SCC1 et TC1). Ces deux grandeurs augmentent avec le rapport E/C (SCC4 a un rapport E/C de 0,36 et SCC2-SCC7 de 0,55) par suite de l'augmentation du nombre de pores et de leur taille. L'influence du filler calcaire est bénéfique pour l'absorption capillaire et néanmoins néfaste pour l'absorption par immersion (SCC5 et SCC7).

Mix	Absorption by immersion % of dry mass	Capillary suction after 24 hours	
		Mass increase (g)	Height (mm)
SCC1	4.8	37	25
SCC2	5.0	49	31
SCC3	4.7	23	18
SCC4	4.2	19	17
SCC5	5.1	33	23
SCC6	4.1	25	21
SCC7	6.1	26	29
TC1	4.9	43	44

Tableau 2.1 Absorption d'eau par immersion et par capillarité de sept BAP (SCC) et d'un béton vibré (TC) [21]

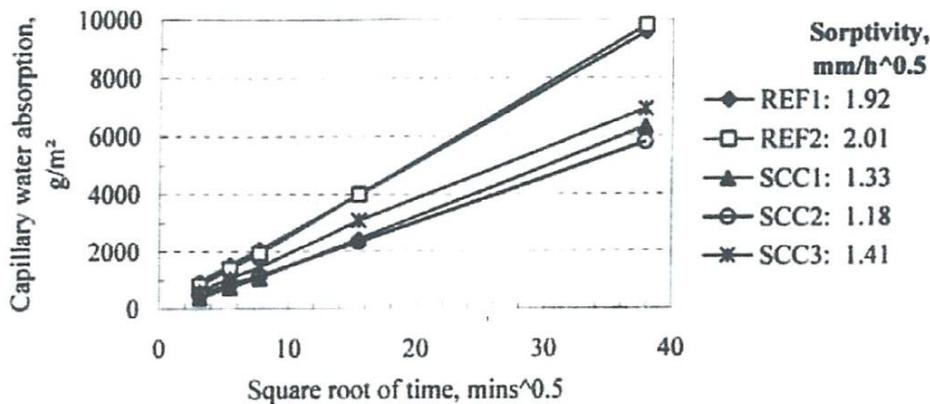


Figure 2.20 Résultats d'absorption d'eau par capillarité de trois BAP (SCC) et deux bétons vibrés [21]

2.7 Mise en œuvre

On peut résumer à trois les modes de mise en place des BAP dans des coffrages.

- ❖ Le premier consiste à déverser le béton par le haut du coffrage. Cette technique traditionnelle, commune aux bétons courants, a plusieurs inconvénients. Tout

d'abord, elle augmente les phénomènes de ségrégation du béton dus à sa chute dans les coffrages. Ensuite, elle favorise la présence de bulles et de taches sur le parement et accentue le lessivage de l'agent de décoffrage utilisé. Il convient donc de réduire le plus possible la hauteur de chute pour améliorer la qualité d'aspect des parements.

- ❖ Le deuxième se fait par l'intermédiaire d'un tube plongeur introduit depuis le haut du coffrage. Cette méthode a pour avantage de limiter les effets de la chute du béton frais dans les coffrages et est utilisée pour les éléments verticaux de grande hauteur.
- ❖ Le troisième correspond à l'injection du béton par le bas de la banche à l'aide d'une pompe. Ce procédé évite la chute du béton, diminue la présence de bulles sur le parement et favorise l'auto-nivellement, mais nécessite une adaptation des banches et la présence d'une pompe (ce qui libère en contrepartie la grue).

Quelle que soit la méthode de mise en œuvre choisie parmi ces trois, la longueur de cheminement horizontal dans les coffrages doit être réduite pour éviter la ségrégation dynamique du béton. Il est recommandé de limiter cette longueur à un maximum de 10 m

Quant à la pression exercée par les BAP sur les coffrages, les données de la littérature en 2001 semblaient se contredire. Dans un souci de sécurité, la poussée du béton frais en pied de coffrage était prise égale à la pression hydrostatique. Depuis, les mesures réalisées sur le site de Guerville dans le cadre du Projet National BAP indiquent que la vitesse de remplissage du coffrage constitue un paramètre majeur dans l'intensité de la poussée sur les coffrages : une vitesse rapide amène à une poussée hydrostatique.

D'autre part, des précautions de mise en œuvre des BAP concernent l'étanchéité des coffrages dont il faut colmater les ouvertures vis-à-vis des pertes éventuelles de laitance (précautions identiques à celles pratiquées pour les bétons fluides classiques).

Enfin, les cures post-bétonnage des BAP sont essentielles pour limiter l'évaporation, étant donné la sensibilité de ces derniers au retrait plastique due à leur faible ressuage [7].

2.7.1 Domaines d'emploi

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

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

Ces domaines comprennent le bâtiment, le génie civil, les tunnels, la préfabrication, et les travaux d'assainissement et de réhabilitation [26].

L'un des avantages majeurs de BAP est de permettre la réalisation de parements de grande qualité. Leur composition, riche en éléments fins, permet d'obtenir une texture de surface plus fine et plus fidèle à la peau coffrant utilisée. Les aspects satinés, lisses ou très structurés^{sont} recherchés.

Les architectes sont alors plus facilement réalisables. Des teintes homogènes et régulières peuvent être obtenues si les conditions de mise en œuvre évoquées précédemment sont respectées, notamment de point de vue de la propreté des coffrages Figure. 2.21



Figure 2.21 Élément préfabriqué en BAP à hautes résistances

2.8 Conclusion

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

CHAPITRE **3** Comportement des BAP vis-à-vis du feu

Sommaire

3.1 Introduction.....	62
3.2 Propriétés mécaniques	62
3.3 Propriétés physiques.....	69
3.4 Propriétés thermiques.....	73
3.5 Microstructure.....	76
3.6 Paramètres influent le comportement de béton.....	80
3.7 Conclusion.....	87

Comportement des BAP vis-à-vis du feu

3.1 Introduction

Chaque année des incendies surviennent dans des tunnels et des installations industriels. Les dommages causés montrent qu'une évaluation précise de la protection contre l'incendie des ouvrages doit être réalisée. L'occurrence de telles situations accidentelles soumet les structures en béton à des élévations de température importantes et rapides. Le béton est un matériau dont le comportement est contrôlé par celui des granulats et par celui de la matrice cimentaire. L'échauffement de béton cause des modifications du point de vue

- ❖ Propriétés mécaniques
- ❖ Propriétés thermiques
- ❖ Microstructure

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

3.2 Propriétés mécaniques

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

3.2.1 Résistance à chaud

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

3.2.1.1 Résistance en compression à chaud

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

- De manière globale, la résistance en compression du béton baisse légèrement de 15-20% de la résistance à la température ambiante causée par le départ d'eau libre contenue dans le béton.
- En dépassant 120°C, on constate une augmentation à la résistance en compression, ceci peut être expliqué par l'augmentation du processus de séchage. Le départ d'eau absorbée provoque accroissement des forces de surface entre les particules de gel de CSH qui assurent la résistance de la pâte de ciment.
- Après 300°C, le béton est complètement sec, on constate une rapide dégradation des propriétés mécaniques du béton. Cette diminution de résistance peut être attribuée à une modification de structure de béton conséquence des différences de coefficient d'expansion thermique des différents constituants.
- Après 400°C, la dégradation du béton peut être liée à la dissociation du $\text{Ca}(\text{OH})_2$.
- Entre 400°C et 600°C, la résistance en compression diminue encore plus rapidement.
- Entre 600°C et 700°C, la vitesse de perte de résistance diminue. [Castillo 90] [49] attribue cela à la calcination des granulats calcaires utilisés qui peut intervenir à partir

de 600°C. A 800°C la résistance du béton chauffé est de l'ordre de 30% de la résistance à température ambiante.

La figure 3.1 montre l'évolution de la résistance à la compression à chaud d'un BAP en le comparant avec les différents codes [48].

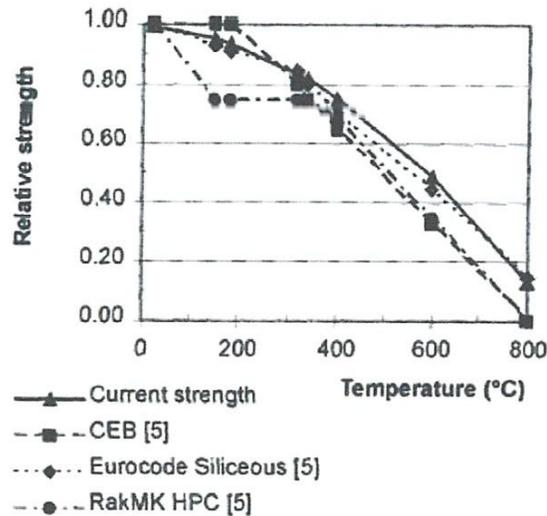


Figure 3.1 la résistance de compression à chaud [48]

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

3.2.1.2 Résistance en traction

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

appel à des essais indirects de type flexion trois points pour identifier le comportement en traction du béton.

Peu de chercheurs se sont intéressés à la résistance en traction de béton à haute température. Des études sont menées par [Noumowe] [50], montrent une sensibilité de la résistance en traction à la température.

3.2.1.3 Module d'élasticité

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

3.2.1.4 Comportement contrainte déformation

L'augmentation de température affecte le comportement contrainte déformation, on peut noter une augmentation de la ductilité du béton, la rupture est précédée de plus significatif pour les BHP.

3.2.2 Résistances résiduelles

3.2.2.1 Effet de refroidissement

Des études ont montré que les éprouvettes subissant un refroidissement présentent des résistances différentes que celles mesurées à chaud, comme le montre la figure 3.2.

Le fait de refroidir le matériau, peut entraîner l'apparition d'une fissuration supplémentaire et une ré-humidification provoquant la réhydratation du gel CSH mais aussi la réaction de la CaO avec l'eau présente dans l'environnement endommageant d'avantage la structure du béton. Après un temps défini qui suit le cycle de chauffe. Il a été rapporté [51] que le béton est capable de récupérer une partie de sa résistance. Ce phénomène d'autoréparation des bétons peut s'expliquer

par la réhydratation des grains de ciment non hydratés présent dans les bétons caractérisés par un rapport E/C très faible [52].

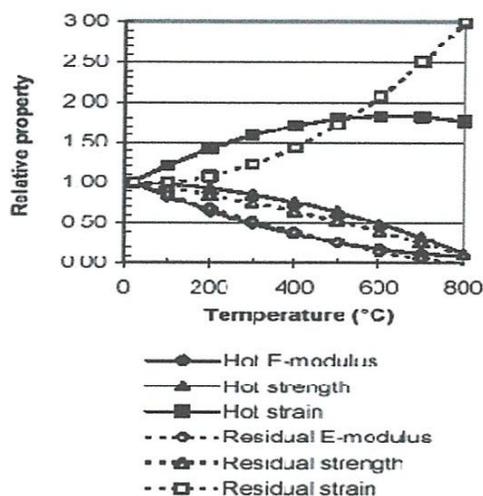


Figure 3.2 Propriétés relatives de béton avant/après l'élévation de température [53]

Des essais sont faits sur des pâtes de ciment portlandite remplacé par de cendre volante (10, 25, 40%), des analyses thermiques différentielles (ADT) ont montré que la cendre volante réduit la quantité de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ dans la pâte suite à des réactions pouzzolanique. Ces essais ont montré que même 10% de cendre élimine la fissuration visible à la surface de béton après refroidissement à l'air pour des éprouvettes chauffées jusqu'à 600°C, ce qui confirme que la fissuration est liée à la présence de chaux dans le béton au refroidissement. Une étude faite par [Metin 06] [54] ; sur les micros béton ordinaire et les micros béton haute performance, refroidis à l'air et avec l'eau a montré que à 200°C, la perte de résistance des micros bétons refroidis à l'air libre est de 7%, tandis que ceux refroidis à l'eau est de 27%.

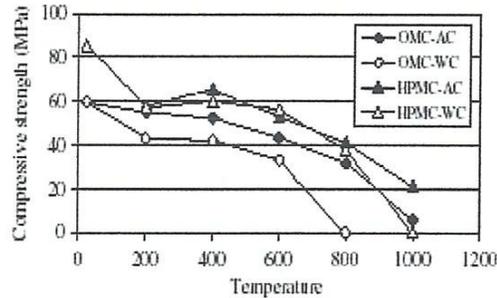


Figure 3.3 Variation de la résistance avec la température [54]

3.2.2.2 Résistance à la compression

Après le refroidissement le béton prend un temps pour regagner son équilibre avec le milieu ambiant, ce qui explique les résultats de nombreux essais réalisés par [Noumowe 03] [55], montrent que les résistances mesurées à chaud sont plus élevées que les résistances résiduelles mesurées juste après le refroidissement. Et il y a encore des variations après le refroidissement puisque l'humidité est réabsorbée dans le béton sec. Ce changement de résistance après refroidissement, qui produit quand le spécimen se rapproche de l'équilibre de son entourage est accompagné par un changement de dimension.

Dans une structure, durant la période immédiatement après un feu, ces changements peuvent causer une redistribution des contraintes et provoquer des dégâts additionnels.

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

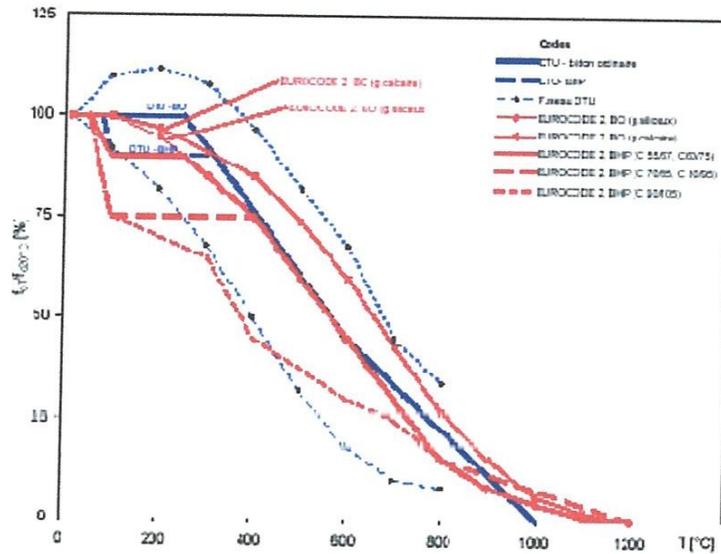


Figure 3.4 Courbes de la variation de la résistance en compression selon DTU et Eurocode 2

3.2.2.3 Résistance en traction

L'évolution de la résistance en traction en fonction de la température n'a pas été étudiée aussi souvent que celle de la résistance en compression. En effet la réalisation de l'essai de traction directe ou de flexion s'avère toujours difficile, compte tenu de la localisation de l'endommagement et du développement d'une microfissure généralement instable, qui mène par la suite à la rupture brutale du matériau. Les travaux réalisés à haute température montrent une chute de cette résistance avec la température. La Figure 3.5 regroupe les résistances résiduelles déterminées en flexion par Malhotra et al. et en traction directe par Noumowe et al [50]. 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.

3.3.1 Densité apparente

A haute température, ce paramètre dépend fortement de la nature des granulats dans le béton. La Figure 3.7 montre les variations de la masse volumique de différents types de bétons en fonction de la température. On observe une diminution quasi-linéaire jusqu'à 800°C, or le béton à granulats calcaires présente une forte diminution de la densité au delà de 800°C. Cette baisse de la masse volumique est liée à deux phénomènes à savoir l'hydratation complémentaire des anhydres et la carbonatation de la portlandite.

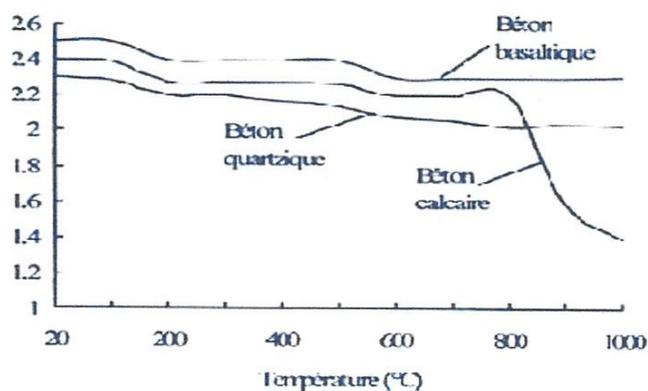


Figure 3.7 Variations de la masse volumique de différents types de bétons en fonction de la température [58]

Les mesures de la densité apparente pour trois bétons BHP et du BO sont représentés sur la Figure 3.8. Elle montre une légère diminution de la densité dans l'étendue des températures entre 100°C et 400°C. Nous remarquons la différence des densités entre BO et BHP à 100°C respectivement 2.28 et 2.43 [g/cm³]. Ces résultats obtenus par Kalifa et al. 1998 sont issus du projet National BHP 2000 [52].

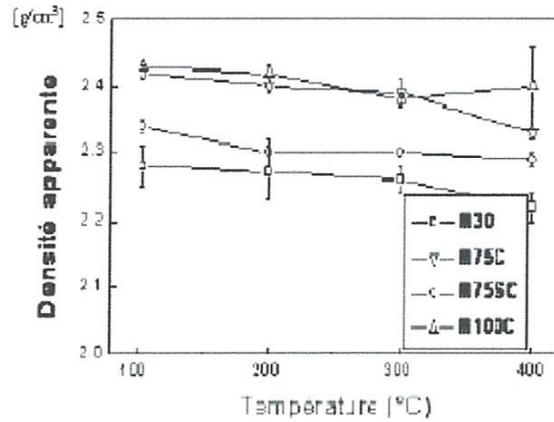


Figure 3.8 Densité apparente des bétons en fonction du traitement thermique [59]

3.3.2 Perte de masse

Durant l'échauffement du béton, sa masse est soumise à une variation due à l'évaporation de l'eau et la déshydratation progressive du gel CSH. Sur la Figure 3.9 nous pouvons observer une courbe caractéristique de la perte de masse durant l'échauffement, ainsi que la courbe de la vitesse de la perte de masse.

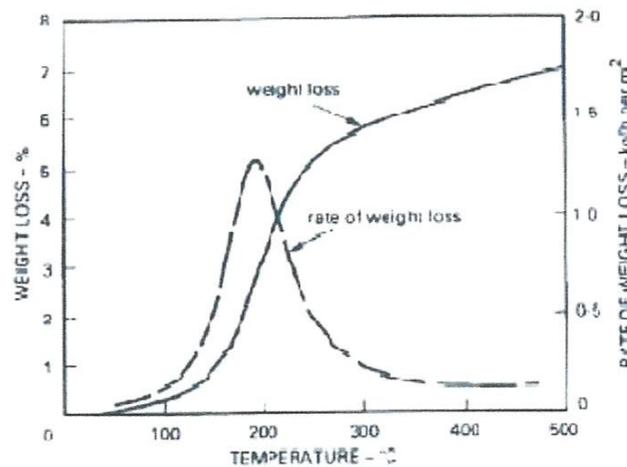


Figure 3.9 Perte de masse durant l'échauffement et vitesse de perte de masse en fonction de la température [60]

La Figure 3.10 montre la courbe expérimentale mesurée par Noumowe [50] de la variation de poids en pourcentage du poids initial des BO et BHP en fonction de la température en surface

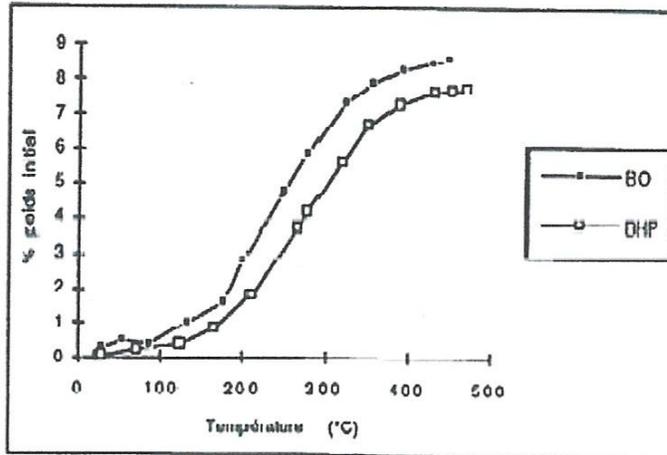


Figure 3.10 Variation de poids en fonction de la température

[Noumowe 95] [50] a remarqué que la variation de poids est très légèrement supérieure à la quantité d'eau initiale dans le béton. Ce qui laisse penser qu'en plus de l'eau, il y a d'autres constituants qui se sont échappés des deux bétons.

De même, la Figure 3.11 montre l'évolution de la perte de masse par rapport à la température mesurée par Kalifa [57]. Les courbes obtenues montrent que la perte de masse du BO est plus faible que la perte de masse d'un BHP [57].

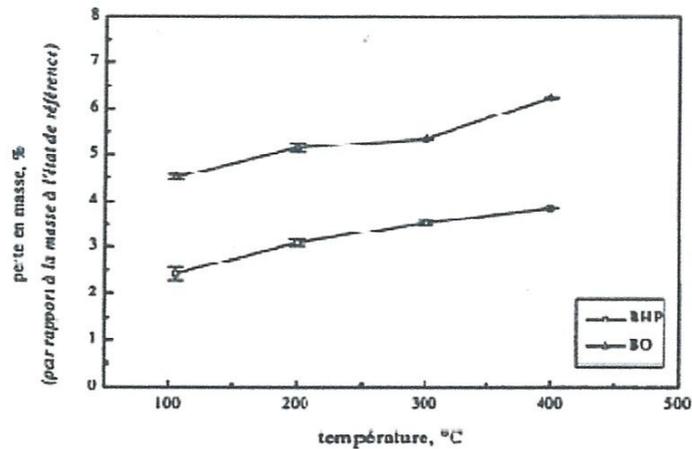


Figure 3.11 Perte en masse des éprouvettes par rapport à l'état initial, en fonction de la température de conditionnement

3.4 Propriétés thermiques

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

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

3.4.1 Conductivité thermique

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

3.4.2 Chaleur spécifique

La chaleur spécifique mesure la quantité d'énergie nécessaire pour faire monter de 1°C la température d'un kilogramme de matériau. Comparativement à la conductivité thermique, les variations de cette propriété avec la température sont moins maîtrisées [61]. Une estimation de la variation de la chaleur spécifique avec la température pour une pâte de ciment est donnée par [62].

D'après [Franssen 87] [63], les bétons humides présentent une capacité calorifique apparente qui est presque deux fois plus élevée que celle des bétons secs.

3.4.3 Diffusivité thermique

La diffusivité thermique représente la vitesse à laquelle la chaleur se propage à l'intérieur d'un matériau. Elle est directement proportionnelle à la conductivité thermique et elle est inversement proportionnelle à la chaleur spécifique et à la masse volumique. [58] [Schneider 88] cité par [64] a souligné l'importante dispersion observée sur les résultats de mesures expérimentales rapportés dans la littérature. L'auteur explique cette dispersion par la difficulté des mesures directes devant être réalisées en régime transitoire, et qui sont très sensibles aux conditions d'essais et au traitement thermique subi par les spécimens testés avant les mesures. On peut toutefois indiquer que la diffusivité thermique décroît progressivement avec la température.

3.4.4 Déformation thermique

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

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

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

La Figure 3.12 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.

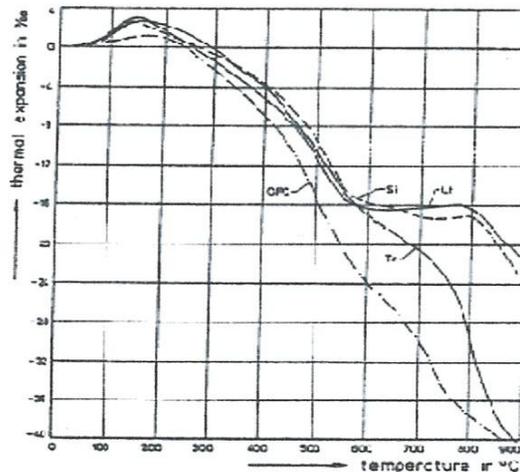


Figure 3.12 Expansion thermique de pâte de ciment [57]

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

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

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

Les granulats silico-calcaire se distinguent 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.

3.5 Microstructure

Lorsque le béton est soumis à des températures élevées une déshydratation de gel de ciment (CSH) et une décarbonatation des granulats s'opère tout au long de chauffage. Ces modifications entraînent une évolution des propriétés thermiques et mécaniques. Elles induisent aussi la création d'eau libre à l'intérieur de béton qui augmente la pression interstitielle.

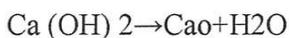
3.5.1 Déshydratation de pâte de ciment

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

- entre 30 et 120 °C, l'eau libre et une partie de l'eau absorbée s'échappent du béton.

L'eau non liée est complètement éliminée

- de 180 à 300 °C, la déshydratation de gel de ciment. L'eau non liée commence à s'échapper du béton
- entre 450 et 550 °C, il y a décomposition de la portlandite en chaux libre



- autour de 570 °C se produit la transformation de quartz- α en quartz- β accompagnée d'un gonflement
- entre 700 et 900 °C, décomposition de carbonate de calcium $\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$

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

3.5.2 Transformation des liaisons pâte granulat

L'interface ciment granulat dans un béton courant appelé auréole de transition est mieux cristallisé, plus poreux et moins résistant à cause d'un excès d'eau. Les hautes températures causent une déshydratation de cette zone (L'interface ciment granulat) qui engendre une détérioration rapide de la liaison entre le mortier et le granulat. Les phénomènes de déshydratation engendrent une détérioration rapide au niveau de cette zone à cause de la dilatation différentielle entre la pâte de ciment (retrait) et les granulats (expansion). Plus le matériau est hétérogène plus la différence entre les coefficients de dilatation thermiques des constituants est importante. Ces coefficients varient en fonction de la température, et dépendent du type granulat et de ciment utilisés [57].

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

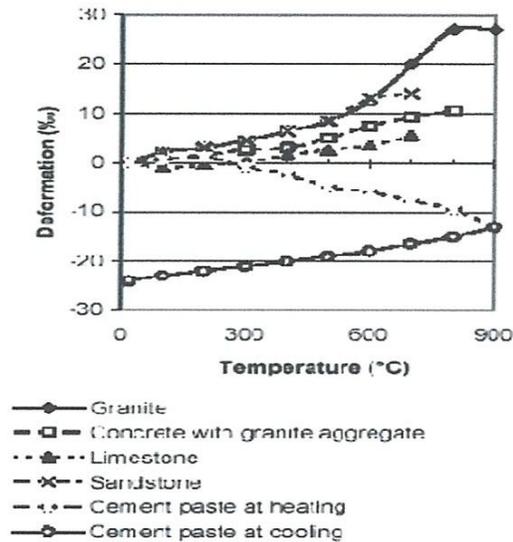


Figure 3.13 Dilatation thermique de ciment, d'agrégat et de béton [53]

3.5.3 Porosité

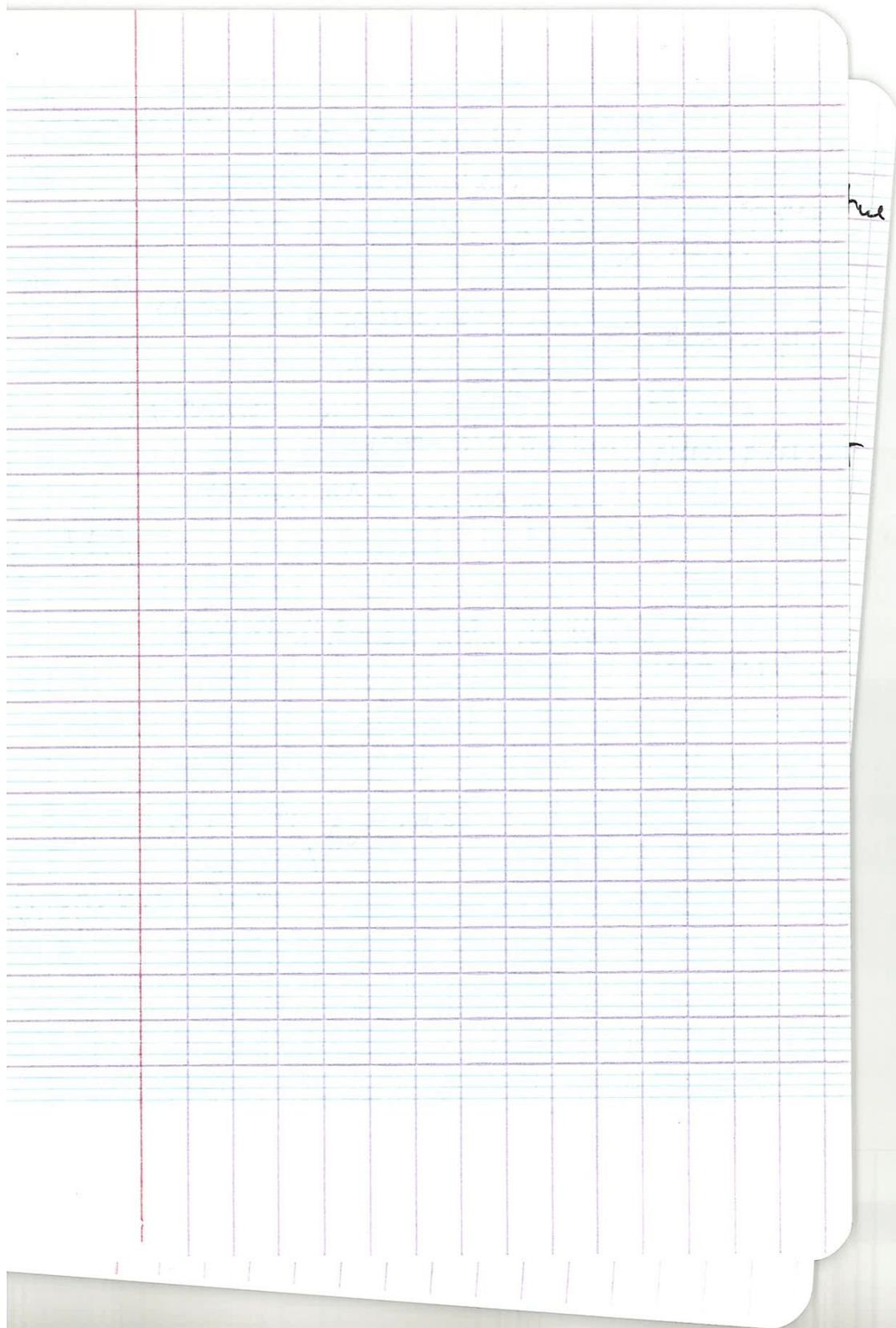
La connaissance de la structure des pores est importante puisqu'elle permet de définir la microstructure et la performance du matériau. Comme la structure de la porosité du béton possède une grande influence sur les propriétés mécaniques (résistance; perméabilité durabilité...) il apparaît clairement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

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

La porosité apparente varie avec le progrès de l'hydratation a rapporté cela avec le progrès de l'hydratation, porosité apparente diminue rapidement parce que le volume de pores de gel est approximativement deux fois le volume du ciment anhydre, de sorte que le gel remplisse graduellement une partie de l'espace rempli d'eau original [61].

3.5.4 Fissuration

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



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

La différence de déformation entre l'agrégat et la pâte de ciment peut initialement induire des petites contraintes de compression dans la pâte de ciment; quand la température augmente, les contraintes de compression diminuent et se changent en de grandes contraintes de traction.

Les contraintes de traction peuvent être assez grandes pour causer des fissures en béton

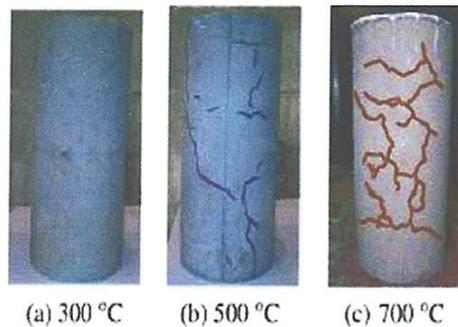


Figure 3.14 Fissure dans le béton à différente température

3.5.5 Eclatement du béton

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

L'éclatement explosif peut réduire sensiblement la capacité portante de la structure et doit être considéré en conservant les structures en béton au feu [65].

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

[Khoury 99][60] a annoncé que le degré d'humidité critique est autour de 2.5% pour le BHP et de 3.5% pour le BO pour donner l'éclatement. L'éclatement est attribué à la montée de la pression interstitielle lors de l'échauffement [Kodur 99] [66]. On croit que le BHP est plus sensible à la montée de la pression en raison de sa faible perméabilité, par rapport au BO. La très forte pression de vapeur d'eau produite lors de l'exposition au feu, ne peut s'échapper à cause de la grande masse volumique et de la faible perméabilité du BHP. Elle atteint la vapeur saturante qui est d'environ 8MPa à 300°C. Cette pression interne est souvent trop forte pour le BHP, dont la résistance à la traction est d'environ 5 MPa.

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

Quelques facteurs sont critiques pour que l'éclatement se produise comme le taux de chauffage et le degré de charge [Benmarce] [67]. Ce qui a été confirmé par d'autres chercheurs [Kodur 99], [Persson 03] [66], [53].

L'éclatement du béton peut être fortement réduit par l'ajout de petites quantités (de l'ordre de 0.1% en volume) de fibres de polypropylène. A température de fusion [Noumowe 03] [55], les fibres de polypropylène créent des canaux permettant à la pression de vapeur de s'échapper du béton empêchant ainsi les petites explosions qui provoquent l'éclatement.

3.6 Paramètres influent le comportement de béton

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

3.6.1 La vitesse de chauffage et de refroidissement

Si la vitesse de chauffage est suffisamment lente, l'eau non liée est complètement éliminée à

Par conséquent, dans ce mémoire, qui a pour but la compréhension de comportement du BAP à haut température et de comparer les BAP aux bétons vibrés de même résistance, nous nous attacherons à confirmer ou infirmer les tendances révélées par les résultats bibliographiques. Pour cela, et avant d'entamer notre sujet, il est nécessaire de caractériser les constituants de béton que nous avons utilisé. Après, la phase de mise au point des formulations, et leurs caractérisations, nous avons étudié la tenue au feu de ces nouveaux bétons (BAP).

???

CHAPITRE 4 Conclusion

Conclusion

Les différents avantages technico-économiques que présente ce nouveau matériau, ont suscité un intérêt grandissant des industriels à travers le monde, aussi bien dans les secteurs de la préfabrication que dans ceux des centraux de béton prêt à l'emploi. D'autre part, le champ d'utilisation des BAP est très varié du point de vue de la résistance mécanique (des bétons ordinaires aux bétons à hautes performances) comme du point de vue des applications visées (des bâtiments aux ouvrages d'art).

Les principaux avantages des BAP cités précédemment, sont liés à leur mise en place qui ne nécessite l'apport d'aucune vibration. Ces avantages sont d'ordre technico-économique mais également social. Ainsi, l'absence de vibration des BAP engendre une diminution sensible des nuisances sonores ainsi que de la pénibilité du travail et une réduction des délais et des coûts globaux de production. Sa fluidité permet également de couler dans des milieux fortement ferraillés ou à géométrie complexe, tout en gardant une stabilité satisfaisante et une parfaite homogénéité. Ces deux propriétés contradictoires sont obtenues par l'ajout et le dosage adéquat de superplastifiant et de fines, on l'emploie d'un agent de viscosité.

L'étude du BAP a été entamée dans ce mémoire en présentant une idée générale sur la caractérisation et la formulation de ce matériau.

Ensuite, on a vu que la majorité des auteurs s'accordent pour dire que le BAP est un matériau qui est difficile à caractériser car il faut une main d'œuvre qualifiée, une caractérisation très surveillée et enfin un respect des protocoles lors des essais.

Finalement, tous les auteurs confirment que le BAP se comporte aussi bien vis-à-vis du feu par rapport au BO.

En perspective, la partie expérimentale de ce mémoire doit être considérée avec différents constituants à base de matériaux locaux afin de tester ces matériaux à l'état frais et à l'état durci et d'évaluer leur durabilité.

- [1] **Stéphan Assié** «Durabilité des BAP».Thèse de doctorat en génie civil, Spécialité: génie civil Université de Toulouse, 29 octobre 2004.
- [2]**Abrams. M** Compressive strength of concrete at. Température to 1600_F.ACI Spécial Publication, SP 25, 1971.
- [3] **Mohammed Rissel Khalifa** «Effet de l'attaque sulfatique externe sur la durabilité des BAP».Thèse de doctorat en génie civil, Spécialité génie civil université de Constantine Algérie. Université de d'Orléans France 20 Juin 2009.
- [4] **Afgc.** BAP Recommandations Provisoires. Page 63, 2000.
- [5] **Khayat.** «Les bétons autonivelants, Les bétons, bases et données pour leur formulation, p 479-483, Eyrolles», 1997.
- [6] **Denis p.** «Optimisation du béton autoplaçant: mise en place en laboratoire Et sur Chantier» Mémoire de master option Mécanique et Ingénierie. Ecole de Saint-Etienne France, 2008.
- [7] **Abid z.** « Formulation et caractérisation des BAP »Thèse de Magistère en Génie Civil Université Houari Boumediene Alger, 06 Juillet2006.
- [8] Net, www.termsscience.fr, 2008.
- [9] **Bethmont S.** «Mécaniques de ségrégation dans les BAP ».Thèse de doctorat option matériaux et structures. Université France 2005.
- [10] **Okamura** «self-Compacting concrète – structural concerte» 3-17, March 2000
- [11] **Khalifa R** «Influence des ciments à base d'ajouts minéraux sur les propriétés mécaniques des mortiers et des bétons».Thèse de Magistère en Génie Civil université Mentouri de Constantine, 11Juillet 2001.
- [12] **Khalifa R** «L'impact des cimenteries sur l'environnement – cas de La cimenterie de Ain-Touta».Mémoire de DEA en Aménagement, Développement et Environnement, université d'Orléans, septembre 2002.
- [13] **Dreux G et Festa J** « Nouveau guide du béton et de ses constituants » 8ème édition, Eyrolles, 1998.
- [14] **Menai Khaled** «Etude de l'Effet d'Ajouts Chimiques et Minéraux sur la Maniabilité, la Stabilité et les Performances des Bétons Autonivelants» Mémoire de Maîtrise ès Sciences Appliquées Spécialité Génie Civil. Université de Sherbrook, CANADA, Septembre 1995.
- [15] **Lee S. H., Kim H. J., Sakai E., and Daimon M.** (2003): Effect of particle Size distribution of flash cement system on the fluidity of cement pastes. Cement and Concrete Research, Volume 33, Issue 5, May, Pages 763-768.
- [16] **Sandrine Bethmont** «Mécanismes des ségrégations dans les BAP ».Thèse de Doctorat, Spécialité Structures et Matériaux L'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 15 Décembre 2005.

- [17] Struers. [Http: //www.struers.com](http://www.struers.com).
- [18] **Mr. Bensebti Salah Eddine** «Formulation et Propriétés des BAP à Base de Matériaux Locaux». Thèse de doctorat en Génie Civil Spécialité Matériaux Université Mentouri Constantin, 02 Juillet 2008.
- [19] **Fares H.** «Propriétés mécaniques et physico-chimiques de BAP exposés À une température élevée». Thèse de doctorat option génie civil. Université de Cergy-Pontoise France, 2009.
- [20] «Mécanisme d'action de superplastifiant sur le ciment»: cat.inst.fr.
- [21] «Cahier des modules de Conférence pour les écoles d'architecture».
www.infociments.fr/publications/batiment/formation/ct-b90g.
- [22] **Joumana Yammine** « Rhéologie des bétons fluides à hautes performances relations entre formulations, propriétés rhéologiques, physico-chimie et propriétés mécaniques». Thèse de doctorat en mécanique, génie mécanique, Spécialité génie civil Université Paris., 2007.
- [23] **Philippe Turcry** « Retrait et fissuration des bétons autoplaçant influence de La formulation ». De Nantes/ 03, Février 2004.
- [24] **Mohammed Rissel Khalifa** «Effet de l'attaque sulfatique externe sur la durabilité des bétons autoplaçant».
- [25] **V.K.BUI and D.Montgomery** "Mixture proportioning method for Self- compacting high performance concrete with minimum paste volume". In Proceedings of the first International RILEM symposium of self compacting concrete RILEM, 1999.
- [26] "**Petersson.P.P.Bilberg and B.K.VAN.**"A model for Self compacting concete". In Proceedings of International RILEM conference on Production methods and workability of concrete RILEM, 1999.
- [27] **Yangtermsirikul.S.and B.K.VAN.**Blocking criteria for aggregate phase of self- compacting high performance concrete In Proceedings of regional symposium on infrastructure development in civil engineering, SC-4, 19-20, December, 1995.
- [28] **OH.S.G.T.Nogusht and F.Tomosawa.**Toward mix desing for theology. of self-compacting concrete Inproceedings of the first International RILEM symposium of self- compacting concrete rilem, 1999.
- [29] **Chanvillard. G.and O.Basuyaux**“ Une méthode De formulation des bétons de sable à maniabilité et résistance fixées “Bulletin des laboratoires des ponts et chaussés, (205):49_63, septembre-octobre 1996.
- [30] **Billberg** “Fine mortar theology in mix design of sic”. In Proceeding of the first International RILEM Symposium of self-compacting concrete RILEM, 1999.

- [31] **Jacobs.F.and F.Hunkler** "Design of self-compacting concrete for durable concrete structure". In proceedings of the first International RILEM Symposium of self-compacting concrete. RILEM, 1999.
- [32] **T.Sedran** « Rhéologie et rhéométrie des bétons Application aux Bétons autonivelants ». Thèse de l'Ecole Nationale des ponts et chaussées, 1999.
- [33] **Baron.J.et Olliverj.P.** «Les Béton-Bases et données Our Leur formulation », éditions Eyrolles, 1996.
- [34] "les bétons autonivelants, les bétons, bases et données pour Leur formulation", p479-483, Eyrolles.
- [35] **Boukni Bariza** «Tenue au feu des bétons Autoplaçants» Mémoire magister en Génie civil Option Mécanique des Structures Université Mentouri Constantine., Décembre 2007.
- [36] **Mohamed Sadok Hadriche** «Modélisation du comportement Du béton autoplaçant, effet de la composition» Université de Sherbrooke Canada, décembre 1998.
- [37] **Ouchi M, Hibino M. and Okamura H**, Effect of super plasticizer on self compacity of fresh concrete, Transportation Research Board 76 annual meeting. Washington, D.C., 12-16, January 1997.
- [38] **Sedran Thierry**, Rhéologie et Rhéométrie du béton. Application aux Bétons Autonivelants. Thèse de Doctorat de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, MARS 1999.
- [39] [Http: www-imdc.insa-Toulouse .fr /etude/these/% pdf](http://www-imdc.insa-Toulouse.fr/etude/these/%pdf).
- [40] **Zhu ET Gibbs**, "Use of different limestone and chalk powders in Self-compacting concrete, Cement and concrete research", vol 35, pp1457-14, 2005.
- [41] **Winching Zhu, John C. Gibbs**, "Use of different limestone and chalk powders in Self-compacting concrete ", Cement and Concrete Research, 2005.
- [42] **Abbes A Carcasses M., Olivier J.P.**, Gas permeability of concrete In relation to its degree of saturation, Materials and structures, vol .32, 1999, pp38.
- [43] **Quenard D., Khalifa .P et PARD** mesure du facteur de formation Et de perméabilité dans des pates de ciment, CSTB, février, Paris, 1999.
- [44] **ZHU W, Quinn J, Bartos P.J.M**, "Transport properties and Durability of Compacting Concrete, Tokyo, Japon, pp. 451-458, 23-25, Octobre 2001.
- [45] **Boel V, AUDENAERT K., DE SCHUTTER G**, "Pore structure of self-compacting concrete", First North American Conference on the Design and Use of Self. Consolidating Concrete, Acbm canter, pp. 837-843, 12-13, November 2002.
- [46] www.sciences-en-ligne.com/./meth Mohr volum.htm.

- [47] **T. Sedran**. Les b'etons autonivelants (BAN) – Synthèse bibliographique. Volume 196 of réf. 3889, pages 53–60. Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées, Mars Avril, 1995.
- [48] **B. Persson**, “Fire resistance of self-compacting concrete”, SCC Materials and Structures / Matériaux et Constructions, Vol. 37, pp 575-584, November 2004.
- [49] **Castillo C, A. J. Durrani**, “effect of transient high temperature on high Strength concrete”, ACI Material Journal, Vol 87 N1, 1990.
- [50] **Noumowe, N.A** « Effet de hautes températures (20°C-600°C) sur le béton. Cas particulier du BHP ». These de Doctorat de l'insa de Lyon, 1995.
- [51] **Khoury, G.A.**”Compressive strength of concrete at high temperatures a Reassessment”. Magazine of Concrete Research, 1992. 44, n° 161, pp 291-309
- [52] **Izabela Gaweska** « Comportement à haute température des bétons à Haute performance évolution des principales propriétés mécaniques » ; l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées et l'Ecole Polytechnique de Cracovie, 2004.
- [53] **Bertil Persson** “Self-compacting concrete at fire temperatures”, land institute of technology, division of building materials, 2003.
- [54] **Metin Husem**, “The effects of high temperature on compressive and flexural Strengths of ordinary and high-performance concrete”, Fire Safety Journal 41, 2006.
- [55] **Noumowe, A** ‘Temperature Distribution and Mechanical Properties of High Strength Silica Fume Concrete at Temperatures up to 200°C’ ACI Materials Journal, July-August, 2003.
- [56] **Noumowe, 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.
- [57] **Abdallah Menou**, « Etude de comportement thermomécanique des bétons à Haute température approche multi échelle de l'endommagement thermique «thèse de L'Université de Pau et des Pays de l'Adour, 2004.
- [58] **Schneider U.** concret at Height température : A general .revieu .fire.safety. Journal, Vol.13 :55-68, 1988
- [59]**P. Kalifa**, FD. Menneteau and D. Quenard. Spelling and pore pressure in hip at high temperatures. Cement and concrete research, Vol. 30:1915{1927, 2000.
- [60] **Khoury, G.A.** “Mechanical behaviour at high temperature”. Final report, Brite Euram III, Hiteco programme BE-95-1158, 1999.
- [61] **Neville A. M**, “ Propriétés des Bétons ”, traduction CRIB, Sherbrooke, Canada, Paris Eyrolles, 2000.
- [62] **T.Z. Harmathy** “Thermal properties of concrete at elevated temperatures”. Journal of mechanics, JMLSA, 5(1) :47–74, 1970.

- [63] **Franssen, J. M.** « Etudes du comportement au feu des structure mixtes acier béton »
Thèse de Doctorat de l'Université de Liège, Belgique, 1987. 267p.
- [64] **Nechnech, W.** « Contribution à l'étude numérique du comportement du béton Et des structures en béton armé soumises à des sollicitations thermiques et mécaniques Couplées Une approche thermo-élasto-plastique en dommageable ». Thèse de génie civil; INSA Lyon Univ. Lyon I, 192p, 2000
- [65] **Hertz KD** "Limits of Spalling of fire exposed concrete". Fire Safety J 2003;38(2):103–16.
- [66] **Kodur** « Tenue au feu des éléments de structure en béton haute résistance », solution constructive no 31, Déc. 1999, Conseil national de recherche Canada
- [67] **Benmarce A & Guenfoud M** « Experimental behaviour of High strength concrete columns in fire ; Magazine of concrete. Research, vol. 12, issue1, p23-33,2005.
- [68] **Kodur, V.K.R.** « Spelling in high strength concrete exposed to fire – Concerns, Causes, critical paramètres and cures », actes du congrès de l'ASCE sur les structures, Philadelphia (PA), 2000.
- [69] **A. Lau, M. Anson** "Effect of High températures on High performance steel fibre reinforced concrete". Cement and Concrete Research 36 (2006) 1698 –1707 .