

Université Mohamed Boudiaf - M'sila

FACULTÉ DE TECHNOLOGIE

DEPARTEMENT DE GÉNIE CIVIL



Numéro de série :

Numéro d'inscription : DGC/01/14

Thèse

Présentée pour l'obtention du diplôme de

DOCTORAT SCIENCES

Spécialité: Génie Civil

Option: Matériaux

THEME

Formulation et caractérisation d'un béton
autoplaçant fibré à base de matériaux locaux
exposé aux hautes températures.

Présentée Par

DJEBRI Noura

Soutenue le : 13/ 05/ 2018

Devant le jury composé de:

<u>Nom & Prénom</u>	<u>Grade</u>	<u>Etablissement</u>	<u>Qualité</u>
Mr. BENCHEIKH Mohamed	Professeur	Uni. de M'sila	Président
Mr. RAHMOUNI Zine El Abidine	Professeur	Uni. de M'sila	Encadreur
Mr. BOUDAOUD Zine Eddine	Professeur	Uni. de Oum El Bouaghi	Examineur
M ^{me} BENAMARA Dalila	MCA	Uni. de Djelfa	Examineur
Mr. KHEMISSA Mohamed	Professeur	Uni. de M'sila	Invité

Année Universitaire : **2017/2018**

Remerciements

الحمد لله الذي بنعمته تتم الصالحات

Je voudrais tout d'abord exprimer ma gratitude envers tous les membres de mon jury pour l'honneur qu'ils m'ont fait en acceptant de juger ce travail : Monsieur Bencheikh Mohamed Professeur à l'Université de M'sila, que je remercie d'avoir accepté de présider mon jury de thèse; Monsieur Boudaoud Zine Eddine et Madame Benamara Dalila, respectivement professeur à l'Université de Oum El Bouaghi et Maître de conférences à l'Université de Djelfa pour avoir accepté d'être les examinateurs de cette thèse, Monsieur Khemissa Mohamed Professeur à l'Université de M'sila d'avoir accepté d'être membre dans mon jury de thèse, sa présence est un grand honneur pour moi. Je remercie également Monsieur Bellagraa Larbi, Maître de conférences à l'Université de M'sila, pour son aide précieuse et ses encouragements durant l'accomplissement de ce travail.

Je remercie mon directeur de thèse, Monsieur Rahmouni Zine El Abidine, professeur à l'Université de M'sila, pour avoir été encadrant de ces travaux. Je lui adresse mes remerciements les plus sincères pour m'avoir guidé, conseillé, encouragé, supporté durant toute la durée de la préparation de ma thèse, pour m'avoir appris à faire de la recherche et à travailler en groupe, je remercie beaucoup.

J'exprime ma gratitude à l'ensemble du personnel technique et administratif de l'Université de M'sila pour leur disponibilité, gentillesse et à tous ceux qui ont indirectement participé à l'élaboration de cette thèse.

Finalement, je remercie ma famille pour leur soutien permanent et je leur en suis infiniment reconnaissante, mon très cher père, qui m'a supporté toute ma vie, que Dieu le garde pour nous, mon mari qui a été toujours à mes côtés, mes enfants ma sœur Anfal et mon frère Samir.

Je dédie cet ouvrage à la mémoire de ma mère que je n'ai jamais oubliée et qui est toujours dans mon cœur que Dieu ait son âme.

Résumé :

Les bétons autoplaçants sont caractérisés par leur fluidité élevée de sorte qu'ils puissent être mis en application sans vibration. En effet, leur composition avec un volume de pâte supérieur à celui des bétons ordinaires augmente leur sensibilité à la fissuration.

Pour améliorer quelques propriétés mécaniques des bétons autoplaçants, des fibres sont incorporées. Et en situation d'incendie, le béton autoplaçant peut présenter une instabilité thermique au-delà d'une certaine température.

Le but de ce travail de recherche est d'étudier l'influence de l'introduction des fibres sur le comportement des bétons autoplaçants à l'état frais et à l'état durci et d'améliorer la compréhension du comportement de ces bétons sous des températures élevées du point de vue caractéristiques mécaniques. La résistance en compression, la résistance en traction par flexion, les pertes de poids, la porosité avant et après le chauffage sont analysées.

Les résultats trouvés confirment qu'à haute température l'introduction des fibres mène à l'amélioration des propriétés mécaniques des bétons autoplaçants.

Mots clés : Béton autoplaçant, Fibres, Propriétés rhéologiques, Propriétés mécaniques, Haute température.

Abstract:

The self-compacting concretes (SCC's) are characterized by their high fluidity so that they could be placed without any vibration. Indeed, their composition with a volume of pulp greater than that of ordinary concrete increases their sensitivity to cracking.

To improve some mechanical properties of self-compacting concrete fibers are incorporated. And in a fire situation, self-compacting concrete may exhibit thermal instability beyond a certain temperature.

The aim of this research is to study the influence of the introduction of fibers on the behavior of self-compacting concretes in fresh and hardened state and to improve the understanding of the behavior of these concretes under high temperatures from a mechanical point of view. The compressive strength, the flexural tensile strength, the weight loss and the porosity before and after heating are analyzed.

The results found confirm that at high temperature the introduction of fibers leads to the improvement of the mechanical properties of self-compacting concretes.

Key words: Self- compacting concrete, Fibers, Rheological properties, Mechanical properties, High temperature.

ملخص :

تتميز خواص الخرسانة ذاتية التوضع (BAP) بسيولتها العالية بحيث يمكن صبها بدون حاجة لأي اهتزاز. في الواقع، تكوينها مع حجم عجينة أكبر من تلك في الخرسانة العادية يزيد من الحساسية للتصدع.

لتحسين بعض الخواص الميكانيكية للخرسانة ذاتية التوضع أدرجت الألياف في تركيبها. وفي حالة الحريق، قد تظهر الخرسانة ذاتية التوضع عدم استقرار حراري عند تجاوز درجة حرارة معينة.

الهدف من هذا البحث هو دراسة تأثير إضافة الألياف على سلوك الخرسانة ذاتية التوضع في الحالة السائلة والحالة الصلبة ولتحسين فهم سلوك هذه الخرسانة تحت درجات حرارة مرتفعة من وجهة نظر ميكانيكية. فتم تحليل قوة الانضغاط، وقوة الشد، وفقدان الوزن والمسامية قبل وبعد التسخين.

أكدت النتائج المتحصل عليها أن إضافة الألياف في درجة حرارة عالية تؤدي إلى تحسين الخواص الميكانيكية للخرسانة ذاتية التوضع.

الكلمات المفتاحية : الخرسانة ذاتية التوضع، الألياف، الخصائص الريولوجية، الخواص الميكانيكية، درجة الحرارة العالية.

SOMMAIRE

Liste des tableaux

Liste des figures

Notations

Introduction Générale.....1

Partie I

Synthèse bibliographique

CHAPITRE I

Notions générales sur le béton autoplaçant

I.1 Introduction	4
I.2 Concept du béton autoplaçant.....	4
I.3 Propriétés des BAP.....	5
I.4. Cahier des charges d'un béton autoplaçant	6
I.5 Les avantages des bétons autoplaçants	7
I.6. Influence des paramètres de formulation sur les propriétés à l'état frais	7
I.6.1 Rôle des adjuvants.....	7
I.6.2. Volume de pâte élève.....	10
I.6.3. Volume de gravillons.....	10
I.6.4. Influence des additions minérales.....	10
I.7. Les constituants du BAP	12

I.7.1. Le ciment.....	12
I.7.2. Les granulats.....	12
I.7.3. L'eau.....	13
I.7.4. Les fines minérales.....	13
I.7.5. Les agents de viscosité.....	15
I.7.6. Les superplastifiants.....	15
I.8. Formulation des bétons autoplaçants.....	16
I.8.1. Aspect empirique de la formulation des BAP	17
I.8.1.1 Approche basée sur l'optimisation des mortiers.....	18
I.8.1.2. Approche basée sur l'optimisation du volume de pâte.....	18
I.8.1.3 Approche basée sur l'optimisation du squelette granulaire.....	19
I.9. Propriétés du béton autoplaçant à l'état frais.....	19
I.9.1. Mobilité en milieu non confiné.....	20
I.9.2. Mobilité en milieu confiné.....	21
I.9.3. Stabilité.....	22
I.10. Propriétés du béton autoplaçant à l'état durci.....	23
I.10.1. Résistance à la compression.....	24
I.10.2. Résistance à la traction.....	25
I.10.3. Module d'élasticité.....	25
I.11 Bétons autoplaçant avec fillers de marbre.....	27

CHAPITRE II

Les bétons autoplaçants fibrés

II.1. Introduction.....	29
II.2. Les bétons renforcés de fibres.....	29
II.3. Mécanismes de fonctionnement des fibres dans le béton.....	30
II.4. Les fibres.....	31
II.4.1. Types et caractéristiques.....	31
II.4.2 Critère de choix du type de fibres.....	33
II.4.3.Rôle des fibres.....	35
II.4.4 Durabilité des bétons de fibres.....	37
II.4.5 Utilisation et influence de deux ou plusieurs types de fibres.....	38
II.4.6 Les avantages du béton de fibres.....	39
II.5 Bétons autoplaçants fibrés.....	40
II.6.Composition des BAPF.....	41
II.7. Formulation des BAPF.....	41
II.8. Comportement mécanique des BAPF.....	41
II.9. Influence des fibres sur les propriétés rhéologiques des BAP.....	43
II.10. Orientation et distribution des fibres.....	44

CHAPITRE III

L'effet de la température sur les BAP fibrés

III.1.Introduction.....	46
III.2 Evolutions des propriétés du béton soumis à des températures élevées.....	47
III.2.1 Evolution de la matrice cimentaire.....	47
III.2.2 Evolution des granulats.....	47
III.2.3 Evolution des propriétés physiques.....	48
III.2.4. Evolution des propriétés mécaniques du béton.....	52

PARTIE II

Étude expérimentale

CHAPITRE IV

Caractérisation des matériaux et procédures expérimentales

IV.1 Introduction.....	58
IV.2 Matériaux.....	58
IV.2.1 Le ciment.....	59
IV.2.2 Caractéristiques du sable utilisé.....	61
IV.2.3 Caractéristique du gravier utilisé.....	64
IV.2.4. Les Adjuvants.....	67
IV.2.5. Le filler utilisé (Poudre de marbre).....	69
IV.2.6. Fibres métalliques.....	70
IV.2.7 La fibre de verre.....	71
IV.2.8. L'eau de gâchage.....	72

IV.3 Techniques expérimentales.....	73
IV.3.1 Introduction.....	73
IV.3.2. Formulation du béton autoplaçant.....	73
IV.3.3 Essais de caractérisations du béton autoplaçant à l'état frais.....	76
IV.3.4 Essais de caractérisations du béton autoplaçant à l'état durci.....	82

CHAPITRE V

Résultats et Discussion

V.1 Introduction.....	85
V.2 Présentation des résultats.....	85
V.2.1 État frais.....	85
V.2. 2 État durci.....	100
V.2. 3 L'effet des températures élevées.....	105
Conclusion générale.....	115
Références bibliographiques.....	118

Tables des matières

Annexes

Liste des publications et communications

Liste des tableaux

Tableau I.1 Classes d'étalement.....	21
Tableau II.1 Récapitulatif des différents types de fibres.....	32
Tableau II.2 Caractéristiques mécaniques et physiques des fibres les plus utilisées.....	32
Tableau IV.1 Masse volumique apparente de ciment.....	59
Tableau IV.2 Masse volumique absolue de ciment.....	59
Tableau IV.3 Caractéristiques physiques du ciment CEM II 42,5.....	60
Tableau IV.4 Les compositions chimiques du CEM II 42,5.....	60
Tableau IV.5 Les compositions minéralogiques du CEM II 42,5.....	60
Tableau IV.6 Analyse granulométrique du sable.....	61
Tableau IV.7 La masse volumique absolue de sable.....	61
Tableau IV.8 La masse volumique apparente à l'état lâche.....	62
Tableau IV.9 La masse volumique apparente à l'état compact du sable.....	62
Tableau IV.10 Porosité, compacité et indice des vides.....	62
Tableau IV.11 Équivalent de sable.....	62
Tableau IV.12 Teneur en eau de sable.....	63
Tableau IV.13 Degré d'absorption d'eau (sable).....	63
Tableau IV.14 Les Caractéristiques chimiques du sable	63
Tableau IV.15 Analyse granulométrique du gravier 3/8.....	64
Tableau IV.16 Analyse granulométrique du gravier 8/16.....	64
Tableau IV.17 Masse volumique apparente du gravier.....	65
Tableau IV.18 La masse volumique absolue du gravier.....	65
Tableau IV.19 Porosité, compacité et l'indice des vides.....	65
Tableau IV.20 Teneur en eau des graviers.....	66
Tableau IV.21 Caractéristiques mécaniques du gravier utilisé.....	66
Tableau IV.22 Classification des roches en fonction du coefficient L_A	66
Tableau IV.23 Analyse chimique du gravier.....	67
Tableau IV.24 Caractéristiques physiques du SP 40.....	68
Tableau IV.25 Caractéristiques physiques de la poudre de marbre.....	69
Tableau IV.26 Composition chimique de la poudre de marbre.....	69
Tableau IV.27 Composition minéralogique de la poudre de marbre.....	69

Tableau IV.28 Caractéristiques technique de FIBERTEK A.....	71
Tableau IV.29 Caractéristiques technique de Fil d’attache	71
Tableau IV.30 Caractéristiques physiques de la fibre de verre	71
Tableau IV.31 Caractéristiques chimiques de la fibre de verre.....	72
Tableau IV.32 Caractéristiques chimiques d’eau.....	72
Tableau IV.33 Composition d'un mètre cube de béton autoplaçant	74
Tableau V.1 Les différents mélanges (BAP) en fonction de PM %.....	86
Tableau .V. 2 Les différents mélanges (BAP) en fonction le dosage en fibres.....	91

Liste des Figures

Figure I.1 Aspect à l'état frais d'un BO plastique et d'un BAP.....	5
Figure I.2 Action des super plastifiants - Défloculation des grains de ciment.....	8
Figure I.3 Influence de la qualité du super plastifiant sur l'étalement et la viscosité d'un béton...	8
Figure I.4 Evolution de Slump Flow en fonction du temps.....	15
Figure I.5 Notion d'excès de pâte : la pâte remplit la porosité (1) et écarte les granulats (2).....	18
Figure I.6 Mesure de l'étalement des BAP.....	20
Figure I.7 Essai de la boîte en L.....	22
Figure I.8 Essai de stabilité au tamis.....	23
Figure I.9 Evolution de la résistance mécanique d'un BAP.....	25
Figure I.10 Comparaison des modules élastiques théoriques de BAP et de bétons vibrés avec leurs valeurs expérimentales.....	26
Figure I.11 Evaluation du module du béton en fonction de sa résistance, d'après le modèle réglementaire et un modèle d'homogénéisation.....	27
Figure II.1 Différentes formes géométriques de fibres métalliques.....	34
Figure II.2 Illustration de l'apport du renfort par des fibres	35
Figure II.3 Principe de couturât d'une fissure.....	36
Figure II.4 Différents facteurs influant sur le comportement mécanique d'un béton renforcé de fibres.....	36
Figure II.5 Processus de couture : a) Influence des fibres courtes dans le processus de couture des microfissures, b) Influence des fibres longues dans le processus de couture des macros-fissures.....	39
Figure II.6 Effets des fibres sur l'étalement des BAP.....	43
Figure II.7 L'évolution de l'étalement en fonction du facteur de fibre.....	44
Figure III.1 Illustrations de dégradations d'ouvrages en béton suite à un incendie.....	46
Figure III.2 Pertes de masse des bétons déterminées durant le chauffage de 20°C à 600°C à la vitesse de 1°C/min. Les points indiquent la valeur de la teneur en eau obtenu par séchage à 105°C	49
Figure III.3 Evolution de la porosité de différents bétons en fonction de la température	50
Figure III.4 Porosité à l'eau et au mercure (MIP).....	51
Figure III.5 Evolution de la perméabilité intrinsèque avec la température de mortiers et de bétons ordinaires (MO, BO) et hautes performances (MHP, BHP).....	52

Figure III.6 Evolution de la résistance résiduelle relative à la compression de bétons de fibres métalliques, de polypropylène et de cocktail de fibres métalliques et polypropylène.....	53
Figure III.7 Différents résultats de la résistance à la traction résiduelle relative	55
Figure III.8 Module d'élasticité statique résiduel en fonction de température.....	56
Figure III.9 Evolution de module d'élasticité relatif résiduel en fonction de la température.....	57
Figure IV.1 Analyse granulométrique des granulats sable et graviers.....	67
Figure IV.2 Evolution la résistance à la compression d'un béton adjuvanté avec SP 40.....	68
Figure IV.3 Poudre du marbre utilisé.....	69
Figure IV.4 Fibres métalliques utilisés.....	70
Figure IV.5 Fibres de verre.....	72
Figure IV.6 Le four utilisé pour la montée en température.....	76
Figure IV.7 Essai au cône d'Abrams.....	77
Figure IV.8 Essai d'étalement au cône.....	78
Figure IV.9 Essai au tamis.....	78
Figure IV.10 Stabilité au tamis.....	79
Figure IV.11 Essai de boîte L.....	81
Figure IV.12 Boîte en L.....	81
Figure IV.13 Essai de porosité à l'eau.....	84
Figure V.1 Le taux de remplissage en fonction de la qualité des bétons (BAP).....	87
Figure V.2 L'étalement en fonction de la qualité des bétons (BAP).....	88
Figure V.3 L'indice de ségrégation en fonction du type de béton (BAP).....	89
Figure V.4 La masse volumique en fonction du type de béton (BAP).....	90
Figure V. 5 L'étalement en fonction de type de béton.....	93
Figure V. 6 La boîte en « L » en fonction de type de béton.....	94
Figure V. 7 Stabilité au tamis en fonction de type de béton.....	95
Figure V.8 La masse volumique en fonction du type de béton (BAP).....	96
Figure V.9 L'Etalement en fonction du type de béton.....	97
Figure V. 10 La boîte en « L » en fonction du type de béton.....	97
Figure V. 11 Stabilité au tamis en fonction du type de béton.....	98
Figure V.12 La masse volumique en fonction du type de béton (BAP).....	99
Figure V. 13 La résistance à la compression en fonction du type de béton (BAP).....	100
Figure V. 14 La résistance à la traction en fonction du type de béton (BAP).....	101

Figure V. 15 La porosité en fonction du type de béton (BAP).....	102
Figure V. 16 Evolution de la résistance à la compression des BAP en fonction de durée de conservation.....	102
Figure V. 17 Evolution de la résistance à la traction par flexion des BAP en fonction de durée de conservation.....	103
Figure V. 18 Evolution de la résistance à la compression des BAP en fonction de durée de conservation.....	104
Figure V. 19 Evolution de la résistance à la traction par flexion des BAP en fonction de durée de conservation.....	105
Figure V. 20 Évolution de la résistance à la compression des BAP en fonction des températures.....	106
Figure V. 21 Évolution de la résistance à la traction par flexion des BAP en fonction des températures.....	108
Figure V. 22 Évolution de module d'élasticité des BAP en fonction des températures.....	109
Figure V. 23 Évolution de la porosité des BAP en fonction des températures.....	109
Figure V. 24 Évolution de la perte de masse des BAP en fonction des températures.....	110
Figure V. 25 La résistance a la compression des différents types de béton en fonction de température.....	111
Figure V. 26 La résistance à la traction en fonction de température.....	112
Figure V. 27 La porosité des différents bétons en fonction de température.....	113

Notations

BAP : Béton autoplaçant

AFGC : Association française de génie civil

BHP : Béton à Hautes Performances

MHP : Mortier à Hautes Performances

BO : Béton ordinaire

MO : Mortier ordinaire

BV : Béton vibré

BTHP : Béton à Très Hautes Performances

BCR : Béton compacté à roulon.

BPE : Béton prêts à l'emploi.

AFGC : Association française de génie civil.

MIP : La porosité mesurée par intrusion de mercure.

CaO : Chaux libre

CaCO₃ : Carbonate de Calcium ou Calcaire

Ca(OH)₂ : Portlandite

CO₂ : Dioxyde de Carbone

C-S-H : Silicate de Calcium hydrate

E/C : Rapport massique Eau sur Ciment

E/L : Rapport massique Eau sur Liant (Ciment + additions minérales)

FC : Fillers Calcaires

E : Module d'élasticité

fc : Résistance mécanique moyenne à la compression

ft : Résistance mécanique moyenne à la traction

S : Sable

G : Gravier

E : Eau

SP : Super plastifiant

FM : Fibre métallique

P_{eau} : Porosité à l'eau

A (%) : Taux d'absorption.

C : Ciment.

C(%) : Compacité.

CPJ : Ciment portant composé

PM : Poudres de marbres

$D_{\max}$: Diamètre maximal du gros granulat.

E/C : Rapport eau sur ciment.

E_d : Module d'élasticité dynamique.

$e_L(\%)$: Indice des vides à l'état lâche.

E_{sp} : Equivalent de sable par piston.

E_{sv} : Equivalent de sable visuel.

G : Gravier.

L_A : Coefficient de Los Angeles.

M_F : Module de finesse du sable.

$P(\%)$: Porosité.

S : Sable.

γ : Masse volumique absolue.

γ_c : Masse volumique à l'état compacte.

γ_L : Masse volumique à l'état lâche.

ρ_{app} : Masse volumique apparent.

Introduction Générale

Introduction générale

Les bétons autoplaçants BAP (SCC, Self Compacting Concrete) ont été développés dans les années 80 par des chercheurs de l'université de Tokyo au Japon. Leur objectif était d'augmenter la cadence de travail en réduisant l'effectif du personnel sur le chantier et le temps de mise en œuvre.[Cité par **1**]

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 vibrations des BAP engendre une diminution sensible des nuisances sonores ainsi que de la pénibilité du travail, et la réduction des délais et des coûts globaux de production. Sa fluidité permet également de couler des milieux fortement ferraillés ou à géométrie complexe. [**2**]

Les BAP se développent aujourd'hui un peu partout dans le monde. Les données disponibles à leur sujet commencent par conséquent à affluer dans la littérature. L'un des intérêts de notre travail est justement de les ramener à l'échelon national, tout en prenant en compte les spécificités des matériaux locaux, comme l'emploi des fillers comme addition au BAP ou comme substitue de ciment qui pourrait constituer une alternative écologique et économique intéressant, permettant d'élargir le champ d'emploi de la poudre de marbre et l'élimination des décharges encombrantes et polluantes en déchets. Alors l'intérêt de la valorisation des sous-produits industriels et déchets ménagers, est justifié par leurs abondances en quantités importantes, sans l'existence de circuit de récupération, de recyclage et de valorisation.

L'objectif d'obtenir un béton autoplaçant plus résistant en flexion et en traction fait l'objet de nombreuses recherches, la voie la plus évoquée dans la littérature pour pallier cette faiblesse de comportement en traction consiste en l'ajout de fibres dans la formulation du béton. Ces dernières jouent un rôle de renforcement qui compense la fragilité du béton par couture de la microfissuration et de macro fissuration. Les fibres avec la capacité de contrôler les fissures jouant le rôle d'absorbeurs d'énergie. Dans la plupart des cas, les bétons autoplaçants (BAP) renforcés de fibres, contiennent seulement un type de fibre. L'utilisation de deux types de fibres ou plus avec des dimensions différentes peut potentiellement non

seulement améliorer les propriétés intrinsèques du béton autoplaçant, mais peut aussi contribuer à un gain conséquent de fibres.

Sélection des meilleurs matériaux et ajout de fibres pour que le BAP reste robuste et durable pendant une longue période. Et dans une approche sécuritaire de la construction, les structures en béton doivent être conçues de façon à résister à une éventuelle montée en température. En particulier, des études ont montré que durant une élévation importante de température (comme lors d'un incendie), le béton ordinaire, pouvait présenter des risques importants d'instabilités thermiques (phénomène d'éclatement). [3]

Ce travail de thèse a pour objectif d'une part d'améliorer la compréhension du comportement des bétons autoplaçants fibrés exposés à hautes températures et d'autre part de caractériser et comprendre l'influence des fibres de verre et fibres métalliques sur le comportement du béton autoplaçant à l'état frais (l'étalement, boîte en L, stabilité au tamis) et durci (les essais de compression, traction par flexion, la perte de masse, et la porosité) exposés à différentes températures 20°C, 200°C, 400 °C et 600°C.

Cette thèse s'organise en cinq chapitres:

Le premier et le deuxième chapitre présentent l'état de l'art des BAP et BAPF (BAP Fibré) d'un point de vue général. Les informations présentées relatent plusieurs aspects concernant la caractérisation des propriétés intrinsèques aux BAP et des résultats nécessaires à l'évaluation des résultats obtenus dans nos essais expérimentaux. Les particularités de la composition des BAP et des BAPF et leur caractérisation à l'état frais (essais spécifiques) sont ainsi abordées puis des travaux publiés sont cités dans les domaines des propriétés mécaniques.

Le troisième chapitre présente une étude bibliographique détaillée sur les formes d'instabilité thermique que peut présenter le béton chauffé. Ensuite, les évolutions des propriétés physiques et mécaniques avec la température du béton sans fibre sont comparées à celles des bétons fibrés.

Le quatrième chapitre est destiné à la caractérisation des matériaux utilisés, dont nous présentons les caractéristiques chimiques, physiques, et mécaniques (Ciment, filler,

superplastifiants, fibres, sable et gravier) et à l'étude expérimentale, dans laquelle nous présentons les matériaux et le matériel utilisé dans notre travail.

Le cinquième chapitre est consacré aux résultats et analyses obtenus lors de cette étude. Ainsi que les propriétés mécaniques et physiques d'un BAP et BAPF en prenant en compte l'effet de la haute température.

Les conclusions générales clôturent cette thèse en synthétisant les principaux résultats obtenus dans les différents chapitres lors de cette étude.

Les perspectives de recherche présentées pourront faire l'objet d'études complémentaires pour apporter de nouvelles informations concernant ces nouveaux matériaux du génie civil à base de matériaux locaux.

1^{ère} Partie

Synthèse Bibliographique

CHAPITRE I

Notions générales sur le béton autoplaçant

Chapitre I

Notions générales sur le béton autoplaçant

I.1. Introduction

Les bétons autoplaçants (BAP, ou SCC, en anglais, pour self-compacting concrete) ont été utilisés pour la première fois au Japon vers la fin des années 1980 afin d'améliorer la rentabilité de la construction, d'assurer constamment une mise en place correcte avec un béton de qualité et de diminuer les nuisances sonores. [Cité par 3].

Ces bétons se développent maintenant et semblent être amenés à remplacer, à terme, les bétons vibrés classiques dans de nombreuses applications. Ils présentent en effet des intérêts à la fois techniques et économiques : absence de nuisances sonores en milieu urbain, possibilité de bétonner des zones fortement ferraillées ou à géométrie complexe et obtention d'une meilleure qualité du béton d'une part, diminution du temps de personnel lors de la mise en place et réduction des coûts des processus industriels, d'autre part.

Cette partie présente un aperçu détaillé sur le béton autoplaçant en tant que nouveau matériau. Il expose d'abord leur concept ainsi que leur formulation, ce chapitre fait une synthèse sur la description des constituants entrant dans la fabrication des BAP et les caractéristiques à l'état frais et durci.

I.2. Concept du béton autoplaçant :

L'utilisation de béton très fluide, ne nécessitant pas d'apport d'énergie extérieure pour le serrage, est apparue comme une solution possible à ce problème [5]. C'est ainsi qu'est né le concept des bétons autocompactants ("self-compacting concrete", traduit par béton autoplaçant ou béton autonivelant). Outre leur facilité de mise en œuvre, de tels bétons présentent aussi l'intérêt de réduire le temps de travail sur le chantier.

Les bétons autoplaçants (BAP) se distinguent donc des bétons dits ordinaires (BO), ou bétons vibrés, par leurs propriétés à l'état frais [6, 7]. Ils sont capables de s'écouler sous leur propre poids, quel que soit le confinement du milieu, et restent homogènes au cours de l'écoulement (absence de ségrégation dynamique) et une fois en place (absence de ségrégation statique). Pour acquérir ses propriétés, les BAP sont formulés différemment des BO. Dans leur cas, la pâte, définie comme le mélange du ciment, de l'eau et d'une addition, est privilégiée au

détriment des gravillons (figure I.1). En général, les BAP possèdent un même dosage en ciment et en eau que les BO, ainsi qu'un volume de sable assez proche. C'est donc principalement l'ajout d'une addition qui sert de substitut aux gravillons. Les proportions exactes de chaque constituant dépendent bien sûr de la méthode de formulation choisie [16].

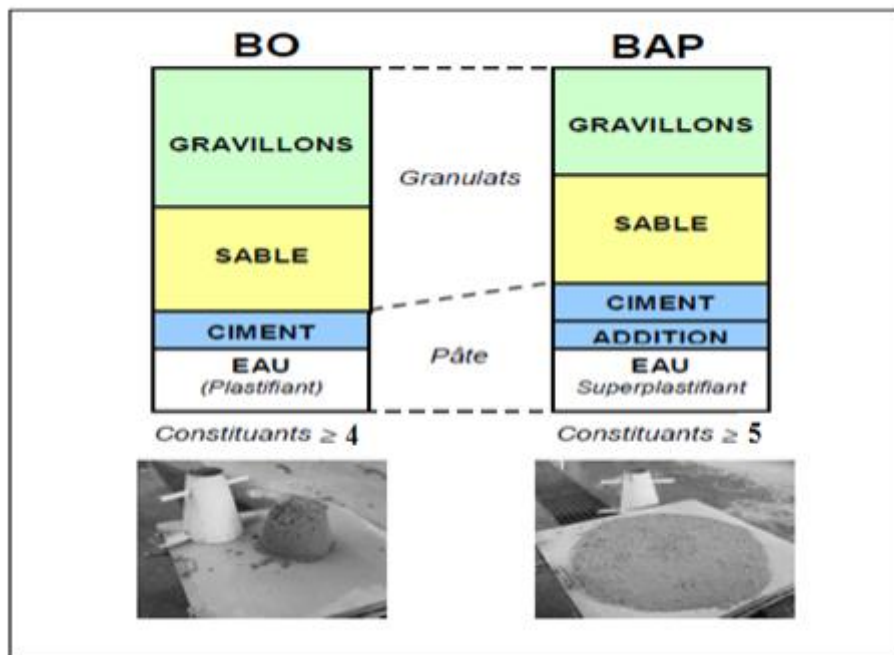


Figure I.1 Aspect à l'état frais d'un BO plastique et d'un BAP [5].

I.3. Propriétés des BAP

- Les bétons autoplaçants (BAP) sont des bétons très fluides, qui se mettent en place sans vibration.
- Lors du coulage dans un coffrage, le serrage d'un BAP est assuré sous le simple effet de la gravité.
- Grâce à leur formulation, ils offrent des caractéristiques exceptionnelles d'écoulement et de remplissage des coffrages tout en résistant parfaitement à la ségrégation.
- Homogènes et stables, ils présentent des résistances et une durabilité analogues à celles des bétons traditionnels dont ils se différencient par leurs propriétés à l'état frais.
- La fluidité du BAP permet sa mise en place aisée par pompage.

L'atout essentiel des BAP, la mise en œuvre sans vibration génère toute une chaîne d'avantages

- Réduction des délais;
- Amélioration de la productivité;
- Réduction des matériels de levage;
- Qualité des parements accrue;
- Bétonnage aisé de pièces de très grandes hauteurs ou très armées;
- Réduction considérable de la pénibilité pour les ouvriers.

Les BAP sont formulés de manière à obtenir le compromis optimal entre fluidité et résistance à la ségrégation et au ressuage. Ils offrent une plus grande qualité esthétique des parements. [18]

I.4. Cahier des charges d'un béton autoplaçant :

La spécificité des BAP réside dans leur comportement à l'état frais. En effet ce type de béton doit se caractériser par une grande ouvrabilité et une grande déformabilité tout en restant stable. Ces propriétés contribuent à assurer des structures durables et de qualité.

Le cahier des charges suivant décrit les propriétés rhéologiques exigées pour un BAP:

- Un BAP doit s'écouler naturellement sous son poids propre (avec un débit suffisant), c'est-à-dire avoir un étalement et une vitesse d'étalement important;
- Un BAP doit aussi pouvoir remplir, sans vibration, des zones confinées et une grande fluidité du béton peut ne pas être suffisante pour cela. En effet, lors de son écoulement au droit d'un obstacle, les gravillons cisailent le mortier et ont tendance à entrer en contact les uns avec les autres si ce dernier ne résiste pas suffisamment au cisaillement ainsi, des arches peuvent se former et interrompre l'écoulement par colmatage. Pour éviter ceci, il est nécessaire qu'un BAP ait une bonne résistance à la ségrégation en phase d'écoulement en zone confinée;
- Un BAP doit présenter une bonne résistance à la ségrégation statique jusqu'à la prise du béton, pour des raisons évidentes d'homogénéité de ses propriétés mécaniques;

De plus, le ressuage d'un BAP ne doit pas être trop fort car ceci peut générer une chute d'adhérence des armatures en partie supérieure des levées, par rapport à celles situées en zones inférieures lors du coulage, ainsi que l'apparition de fissures. [6]

I.5. Les avantages des bétons autoplaçants :

Les BAP entraînent de nombreux avantages, on cite :

a) Avantages techniques :

- Facilité et rapidité de la mise en œuvre du béton
- Réalisation d'éléments de forme complexe
- Bétonnage en milieux fortement ferraillés

b) Avantages économiques :

- Réduction du coût de main-d'œuvre et du temps de bétonnage
- Absence de systèmes de vibration réduisant ainsi les coûts et les nuisances sonores dans et au voisinage du chantier.

c) Avantages écologiques :

- Valorisation des déchets de construction (récupération de ces déchets au niveau des chantiers, industries, carrières, stations de concassage).
- Diminution de la quantité de CO₂ émise par l'industrie cimentaire (due à la réduction de la quantité de ciment nécessaire au BAP) [17], [19].

I.6. Influence des paramètres de formulation sur les propriétés à l'état frais :

I.6.1 Rôle des adjuvants :

➤ Utilisation de super plastifiant :

L'apparition des bétons autoplaçants et des bétons à Hautes performances (BHP) est fortement liée aux progrès réalisés dans le domaine des adjuvants et plus particulièrement celui des superplastifiants (SP) [20, 21]. L'action principale des superplastifiants est de défloculer les grains de ciment. Une action de répulsion électrostatique agit 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 piégée par les floccs est de nouveau disponible pour la maniabilité du béton (**Figure I.2**). Il est alors possible de mettre en œuvre des bétons très fluides, avec des rapports E/C faibles [22].

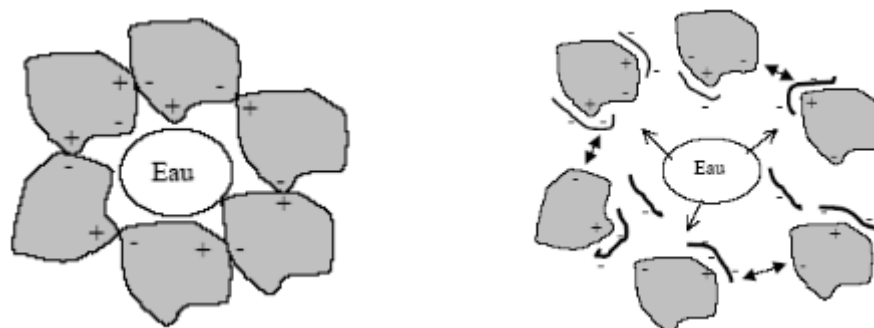


Figure I.2 Action des super plastifiants - Défloculation des grains de ciment [23, 24]

L'ajout d'un superplastifiant aide à augmenter la fluidité. La **figure I.3** montre par exemple que l'étalement augmente très fortement à partir d'un certain dosage en superplastifiant [25].

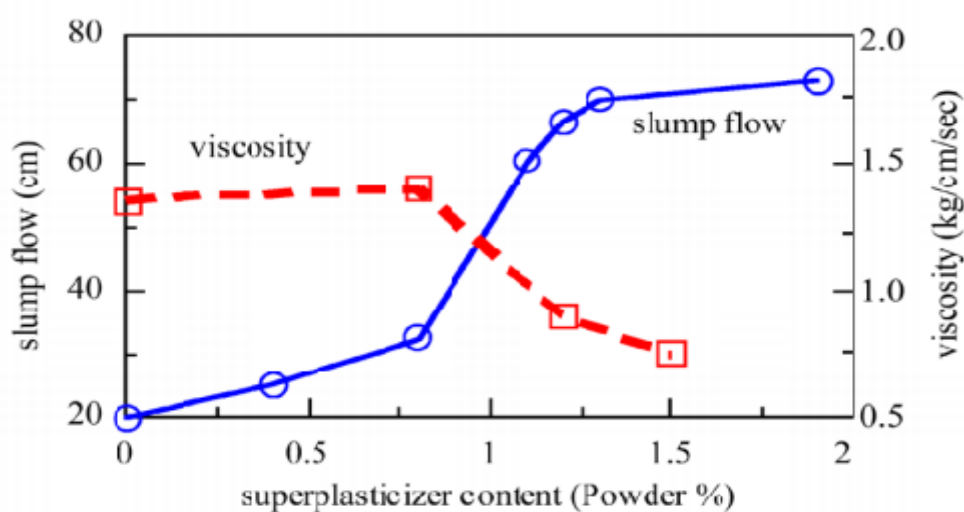


Figure I.3 Influence de la qualité du super plastifiant sur l'étalement et la viscosité d'un béton [25]

Flatt et Houst [27] définissent l'action des super plastifiants en trois mécanismes :

- Une partie est adsorbée,
- Une partie est consommée par les réactions avec les hydrates,
- Une partie, en excès, reste en solution.

Ces auteurs [27] montrent qu'une couche de gel ou de monosulfo-aluminate (AFm) peut se former autour du ciment ce qui augmente la surface que doit recouvrir le superplastifiant pour disperser les grains. Donc, plus le ciment est réactif plus la quantité de polymère à ajouter sera importante.

Sugamata et al [28] ont étudié l'influence de différents superplastifiants et de leurs dosages sur le maintien rhéologique dans le temps d'un mortier. Leurs résultats montrent que l'augmentation du dosage de superplastifiants n'a plus d'influence sur la fluidité du mortier à partir d'une certaine valeur.

Cette caractéristique est maintenant bien connue. Il s'agit du dosage à saturation, c'est-à-dire le dosage au-dessus duquel l'adjuvant ne permet plus de modifier de façon significative la fluidité du mélange. Actuellement, les superplastifiants sont donc utilisés à un dosage proche du dosage à saturation. Différents auteurs [28, 29, 30, 31] ont montrés que le moment d'introduction du superplastifiant lors du malaxage joue un rôle sur le dosage à saturation. Si l'introduction est retardée, le dosage à saturation est plus faible. Il est obtenu pour une plus faible quantité de superplastifiant. Ceci est en accord avec ce que nous avons vu, car si l'hydratation du ciment est amorcée alors la consommation du superplastifiant par les hydrates sera moins importante [10]. Ainsi, le fait de retarder son introduction, permet au superplastifiant d'être plus efficace et d'obtenir des mélanges plus fluides que s'il avait été introduit en début de malaxage.

Les BAP contiennent des superplastifiants permettant d'obtenir la fluidité souhaitée. Toutefois un dosage trop élevé (proche ou supérieur au dosage de saturation [32]) peut augmenter la sensibilité du béton à des variations de teneur en eau vis-à-vis du problème de la ségrégation et du ressuage. Il est possible d'utiliser un plastifiant en synergie avec un superplastifiant.

➤ Utilisation éventuelle d'un agent de viscosité :

L'ajout d'un superplastifiant ayant pour effet d'augmenter l'ouvrabilité du béton mais également de réduire sa viscosité, afin de minimiser ce dernier point, les BAP contiennent souvent des agents de viscosité. Ce sont généralement des dérivés cellulosiques, des polysaccharides ou des suspensions colloïdales, qui interagissent avec l'eau et augmentent la viscosité de celle-ci. Ces produits, comme les fines, ont pour rôle d'empêcher le ressuage et de limiter les risques de ségrégation des granulats en rendant la pâte plus épaisse.

L'utilisation de ces produits semble se justifier dans le cas des bétons ayant des rapports eau/liant élevés car les fines ne sont pas toujours suffisantes pour fixer l'eau dans le béton.

I.6.2. Volume de pâte élève :

Les frottements entre granulats sont sources de limitations vis-à-vis de l'étalement et de la capacité au remplissage des bétons. Afin de permettre une bonne déformabilité des BAP et un remplissage correct des coffrages, un volume important de pâte doit être maintenu. Son rôle est de couvrir la surface des granulats afin de diminuer les frictions entre les particules et favoriser la dispersion des granulats [33], son volume dans les BAP est donc élevé (330 à 400l/m³). [7]

I.6.3. Volume de gravillons :

Il est possible d'utiliser des granulats concassés ou roulés pour la formulation des BAP.

Toutefois, comme les gravillons sont à l'origine du blocage du béton en zone confinée, il faut en limiter le volume. D'un autre côté, la présence de gravillons permet d'augmenter la compacité du squelette granulaire du béton et donc de limiter la quantité de liant nécessaire pour obtenir l'ouvrabilité et la résistance souhaitées. En général, ces considérations conduisent à adopter un rapport gravillon/sable de l'ordre de 1 dans les BAP. [7]

Tous ces paramètres de formulations conduisent à des compositions différentes des BV. Les BAP présentent à la fois une grande fluidité, l'utilisation de superplastifiants ainsi qu'un volume de pâte importante.

I.6.4. Influence des additions minérales.

Nombreuses sont les études qui ont pour objectif de trouver une bonne formulation des bétons autoplaçants (BAP) en utilisant divers ajouts minéraux. Parmi ces études on cite :

- Necira B a effectuait des essais sur des bétons autoplaçants confectionnés avec trois types d'ajouts minéraux (Fillers calcaires FC, Pouzzolane naturelle PZ et le laitier du haut fourneau LT). Il a conclu que l'introduction des ajouts minéraux tels que (FC, PZ et LT) améliore considérablement les propriétés rhéologiques des BAP et que les résistances à la compression sont inversement proportionnelles au pourcentage d'ajout minéral. Il a conclu aussi que le BAP contenant le laitier du haut fourneau donne des résistances à la compression plus élevées que les BAP contenant les fillers calcaires ou les pouzzolanes naturelles [8].

• Samara M. a étudié la possibilité d'utiliser les sédiments des cours d'eau comme un filler dans la composition du béton autoplaçant. Il a effectué des essais sur deux types de béton autoplaçant, le premier est à base de fillers calcaires et le deuxième à base de sédiments. Il a observé une perte de maniabilité sur bétons et mortiers à l'état frais, cette perte est due au pouvoir d'absorption d'eau des sédiments liée à la porosité inter-granulaire des sédiments traités. Les résistances à la compression sont similaires aux résistances données par les bétons à base de fillers calcaires [9].

• Ayed K. a élaboré à partir d'une même formulation de base, trois BAP de même classe de résistance incorporant chacun un type de fines locales d'Algérie, à savoir des fines siliceuses provenant des déchets de sable siliceux servant à la fabrication du verre, des fines pouzzolaniques naturelles et des fines calcaires. L'analyse comparative des résultats a permis de mettre en évidence l'influence du type d'addition minérale sur le comportement à long terme des BAP [10].

• El Hilali A. traite dans son étude l'influence des fillers calcaires sur les propriétés des bétons autoplaçants à l'état frais. Toutes les compositions ont été fabriquées avec une teneur en eau fixe, un même rapport eau/ciment, un rapport G/S=1 et un dosage en superplastifiant différent. La teneur en fines est constante avec trois types de fillers calcaires différents. Les résultats conduits sur les BAP frais montrent que l'ajout de fillers ayant une grande surface de Blaine améliore la fluidité du BAP particulièrement en milieu confiné, sa résistance à la ségrégation. De même, il apparaît que la finesse des fillers influe sur la demande en superplastifiant de façon significative [11].

• Bouhamou N et al ont montré que l'incorporation des fines calcaires influe sur le comportement du béton autoplaçant à l'état frais à base de matériaux locaux notamment le sable de mer et le sable de carrière. Les résultats obtenus offrent de belles perspectives pour optimiser les BAP. La présence d'une quantité importante de filler calcaire comme addition dans les BAP peut également avoir une action positive sur leurs compacités et par conséquent sur leurs résistances mécaniques [12].

• Haddad O et al ont travaillé sur des mortiers issus des formules de BAP, ces mortiers sont obtenus en faisant varier le dosage en addition de fillers calcaires (15%, 30%, 50%). Les résultats montrent que l'addition d'un pourcentage différent en fillers n'a pas une influence significative sur l'âge du début et fin de prise. Concernant les résistances mécaniques en

compression, ils ont conclu qu'elles sont inversement proportionnelles au volume de fillers introduit et donc au rapport E/C [13].

- Mébrouki A a étudié l'influence de l'ajout des fillers calcaires locaux d'Algérie (carrière de Kristel d'Oran) sur la pâte autoplacante. Les pâtes de ciment ont été confectionnées à partir des combinaisons entre constituant de base (ciment, filler calcaire, eau et superplastifiant). La pâte est élaborée par ajout de suspensions solides provenant du ciment et du filler. Il a constaté que l'incorporation d'une quantité importante de fines calcaires influe sur le comportement du béton autoplacant (pâte sèche ou très ferme). L'ajout de filler dans la pâte de ciment conduit à une diminution de la valeur d'étalement de la pâte et en contrepartie le filler améliore l'écoulement de la pâte [14].

I.7. Les constituants du BAP :

La formulation d'un BAP repose sur un arrangement de divers constituants qui doivent répondre à des normes spécifiques qui seront détaillées ci-dessous.

I.7.1. Le ciment :

En principe tous les ciments conformes à la norme NF EN 197-1 conviennent pour la fabrication des BAP. Le choix correct du type de ciment est normalement imposé par les conditions spécifiques de chaque application.

I.7.2. Les granulats :

Les granulats roulés et concassés peuvent être utilisés pour la composition des BAP à condition qu'ils soient conformes à la norme EN 12620 et qu'ils répondent aux exigences de la durabilité imposées par la norme EN 206-1. Afin de limiter le risque de blocage, le diamètre maximal des granulats doit donc être réduit par rapport à celui d'un béton traditionnel. D'après l'AFGC [34], le diamètre maximal des gravillons est compris entre 10 et 20 mm. Les gravillons augmentent la compacité granulaire du squelette ce qui permet de limiter la quantité de liant nécessaire pour obtenir les caractéristiques rhéologiques et mécaniques souhaitées [35] et sur cette base, l'AFGC préconise d'utiliser un rapport gravillon/sable (G/S) de l'ordre de 1. Dans une analyse des principaux travaux concernant la formulation, menée sur plus de 68 bétons utilisés pour 51 applications industrielles, Domone [36] a mis en évidence que les gravillons utilisés sont généralement concassés et que leur diamètre maximal n'excède guère 20 mm.

Pour faciliter l'écoulement du mélange, la confection d'un bon béton autoplaçant utilise généralement des granulats roulés de rivières et un apport de fines (par exemple des fillers calcaires) plus importants.

Le risque de blocage dans un milieu fortement ferraillé augmente lorsque le D_{max} augmente. Ainsi, le D_{max} des granulats doit être compris entre 10 et 20 mm. [37]

I.7.3. L'eau :

La quantité de l'eau joue un rôle primordial sur la qualité finale : les impuretés contenues dans l'eau peuvent influencer la prise du ciment ou la résistance du béton. Elles peuvent aussi provoquer des taches à la surface du béton ou même favoriser la corrosion des armatures. Pour ces raisons, la qualité de l'eau de gâchage ou celle utilisée pour le mûrissement doit être contrôlée.[38] L'eau de gâchage doit être propre et ne doit pas contenir de matière en suspension au-delà des tolérances réglementaires suivantes:

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

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

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

La pâte doit assurer une mobilité suffisante mais doit aussi inhiber tout risque de ségrégation et de ressuage. Un BAP sera dès lors composé d'une quantité de fines élevée et d'une quantité d'eau relativement faible (le rapport eau/ciment rarement supérieur à 0,55 voire 0,50). La fluidité souhaitée sera obtenue par l'utilisation de super plastifiants. [39]

I.7.4.Les fines minérales :

Les fillers sont des matériaux fins dont les plus gros grains ne dépassent pas 80 micromètres. Ce mot provient de l'anglais «to fill» signifiant «remplir».

Le plus souvent, il s'agit de roche calcaire ou silice -calcaires broyés, mais le terme filler peut être plus général, la norme française définit les fillers de la façon suivante :(NA EN 933-3, 2002).

«Produit obtenu par le broyage fin ou par pulvérisation de certaines roches (calcaire basalte, laitier, bentonite, cendres volantes, ...) Naturelles ou non, agissent principalement, grâce à une granulométrie appropriée, par leurs propriétés physiques sur certaines qualités du ciment (accroissement de maniabilité, diminution de perméabilité et de capillarité, réduction de fissuration,etc.).Les fillers sont inertes, s'ils n'ont aucune action chimique sur le ciment en présence d'eau, ils sont inactifs. [40]

Rôle des fillers

Les fillers ajoutés au ciment ou au béton jouent plusieurs rôles, à savoir :

- Ils complètent la granulométrie du béton.
- Ils améliorent l'ouvrabilité du béton.
- Ils participent à l'augmentation de la rétention d'eau.
- Ils bouchent la capillarité jouant le rôle d'hydrofuge.
- Ils modifient la cohésion de la pâte interstitielle et accroissent son pouvoir de lubrification.[40]

Les BAP contiennent une grande quantité de fines (de l'ordre de 500 kg/m^3 [34]) pour limiter les risques de ressuage et de ségrégation. Ces fines, proviennent du ciment, des additions minérales et des granulats, et jouent un rôle très important sur les caractéristiques des BAP en fonction de leur taille, leur forme et leur composition chimique [41].Compte tenu de leur grande surface de Blaine, ces petites particules accélèrent la nucléation des hydrates [42, 43]. Elles comblent également les vides entre les grains de ciment et réduisent par conséquent la demande en eau ainsi qu'elles augmentent la compacité du béton [44]. Le liant est un composé binaire, voire ternaire et le choix des additions et de leur dosage est déterminé par le critère de la durabilité et les paramètres de la fluidité [33]. Parmi les différentes additions citées dans la littérature (cendres volantes, laitier de hauts fourneaux, fumées de silice et filler calcaire), le filler calcaire est le plus fréquemment rencontré car il est inerte chimiquement et disponible en abondance aussi bien en tant que sous-produit qu'en tant que matière primaire naturelle. Zhu et Gibbs [45] ont étudié l'influence de deux types de fillers (craie et calcaire) sur les propriétés des bétons autoplaçants. Les résultats montrent que, d'une part, la finesse semble avoir peu d'effet sur l'étalement et la demande en superplastifiants, mais entraîne de manière significative une augmentation de la résistance à jeune âge. D'autre part, quelque soit le type de filler utilise l'augmentation du dosage en filler conduit à un dosage en superplastifiant plus faible pour un

étalement donné. El-Hilali [41] a évalué l'influence des fillers sur l'ouvrabilité des bétons autoplacants. Pour un étalement donné, il a trouvé que l'augmentation de la surface de Blaine conduit à une diminution du dosage en SP. De même, l'ouvrabilité diminue au cours du temps d'une manière significative quand la surface de Blaine est faible (**figure I.4**).

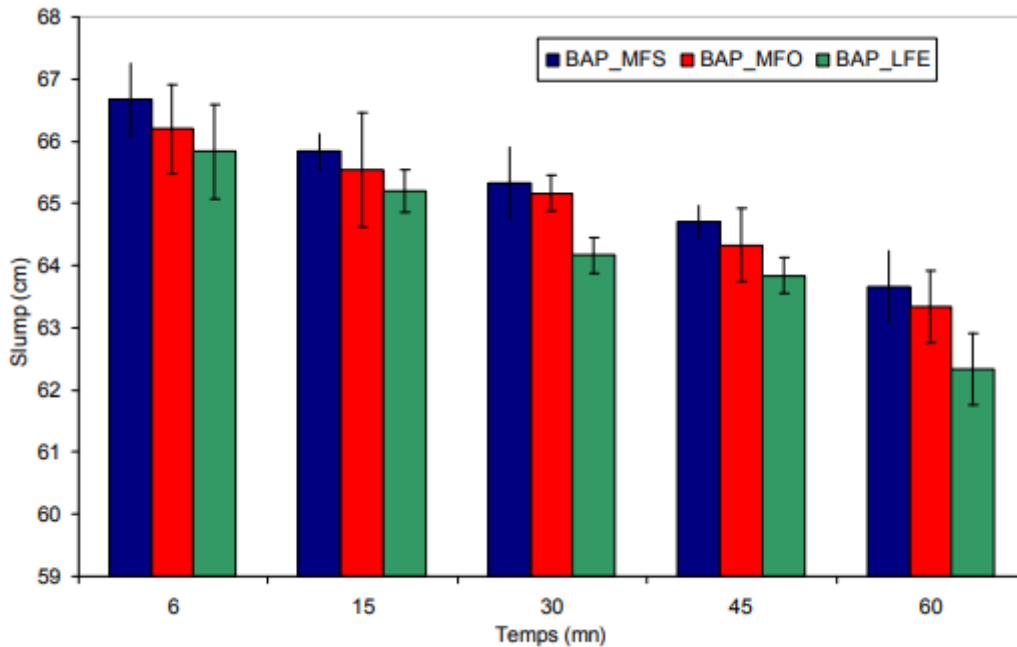


Figure I.4 Evolution de Slump Flow en fonction du temps [41].

I.7.5. Les agents de viscosité :

Les agents de viscosité permettent de réduire la viscosité des BAP et de les rendre moins sensibles aux problèmes de ressuage et de ségrégation [15]. Ces adjuvants sont souvent des dérivés cellulotiques, de polysaccharides ou de suspensions colloïdales. Leur emploi est particulièrement justifié dans les compositions de BAP avec un rapport $E/L_{\text{équivalent}}$ élevé (supérieur à 0.4) pour améliorer la capacité de rétention d'eau dans la pâte [41, 33]. L'incorporation d'un agent de viscosité a pour effet d'assurer une meilleure stabilité du BAP et de le rendre moins sensible aux variations de teneur en eau des granulats [15] mais génère un surcout et engendre une action opposée à celle des superplastifiants ce qui requiert la sélection d'un couple agent de viscosité -superplastifiants compatibles.

I.7.6. Les superplastifiants :

Les superplastifiants sont des polymères à chaînes macromoléculaires très longues. Ils interagissent avec les particules de la poudre (ciment + additions fines) au contact de l'eau en

s'adsorbant à leur surface. Les particules sont dispersées par la combinaison d'effets de répulsions électrostatiques et stériques [46]. L'eau initialement piégée entre les floccs est de nouveau disponible pour l'hydratation ou pour fluidifier le mélange.

I.8. Formulation des bétons autoplaçants :

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.

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. Enfin, et surtout, les propriétés des BAP sont contradictoires; un béton riche d'une pâte fluide est très sensible à la ségrégation. [15]

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.

En outre, l'aspect économique n'est pas encore le critère prédominant de la formulation ; les dosages en superplastifiant et en fines ne sont donc pas bornés. Il est vrai, paradoxalement, que l'utilisation des agents de viscosité n'est pas très diffusée, justement à cause de leur coût. [15]

I.8.1.Aspect empirique de la formulation des BAP :

Plusieurs approches de formulation des BAP ont été élaborées à travers le monde pour répondre aux exigences d'ouvrabilité de ce type de béton.

Deux grandes familles prévalent actuellement :

- ✓ La première concerne des formulations fortement dosées en ciment et contenant une proportion d'eau réduite. La quantité de ciment très importante (450 à 600 kg/m³) est nécessaire pour augmenter le volume de pâte afin d'améliorer la déformabilité du mortier. Ce volume important de pâte limite par conséquent les interactions intergranulats (dont la quantité est parallèlement diminuée) et l'utilisation d'adjuvants tels que les superplastifiants et les agents de viscosité permettent d'en contrôler la fluidité et la viscosité. Cette approche de formulation conduit toutefois à des bétons de hautes performances mécaniques, onéreux et mal adaptés à des ouvrages courants [47, 48] ;
- ✓ Une deuxième famille de formulations repose sur le remplacement d'une partie du ciment par des fines minérales [49]. Ces additions, comme les fillers calcaires par exemple, permettent d'obtenir un squelette granulaire plus compact et plus homogène. La quantité d'adjuvant nécessaire à l'obtention d'une fluidité et d'une viscosité données est alors diminuée. Leur utilisation conduit également à conserver des résistances mécaniques et des chaleurs d'hydratation raisonnables.

Lors de la présentation des principales caractéristiques des BAP, nous avons mis en évidence l'influence des différents constituants et établissons certains critères permettant d'obtenir les propriétés visées. Les gammes de valeurs généralement employées sont issues des recommandations provisoires de l'AFGC et présentées ci-dessous :

- Une quantité de pâte élevée (de l'ordre de 40% du volume total) ;
- Une quantité de fines élevée (de l'ordre de 500 kg/m³) ;
- Utilisation d'un superplastifiant (à un dosage proche du dosage à saturation) ;
- Un faible volume de gravillons (rapport G/S de l'ordre de 1) ;
- Un diamètre maximal réduit ;
- Éventuellement utilisation d'un agent de viscosité.

Les auteurs [47, 49] s'accordent sur le fait qu'il n'existe pas de méthode de formulation unique car les matériaux employés et leurs qualités diffèrent selon les régions ou les pays.

I.8.1.1 Approche basée sur l'optimisation des mortiers :

Okamura et Ozawa sont les précurseurs en matière de formulation des BAP. Les caractéristiques requises sont une capacité de déformation élevée de la pâte et du mortier, ainsi qu'une résistance à la ségrégation lors de l'écoulement en milieu confiné. Leur méthode de formulation se base sur les critères suivants [3] :

- Une quantité de gravillons limitée ;
- Un rapport eau/poudre faible ;
- Utilisation d'un superplastifiant.

Les quantités de gravillons et de sable sont fixées de manière à obtenir facilement les caractéristiques des BAP en n'ajustant que le rapport eau/poudre et le dosage en superplastifiant. Ainsi, la quantité de gravillons est limitée à 50% de leur compacité (qui est le rapport entre le volume de grains sur le volume total du système grains + vides) afin de minimiser les risques de blocage. Il semblerait que ce rapport soit sécuritaire [49, 50]. La quantité de sable est par ailleurs limitée à 40% du volume du mortier. Les propriétés de la pâte (rapport eau/poudre et quantité de superplastifiant) sont ensuite optimisées et caractérisées à l'aide d'essais sur mortiers.

I.8.1.2. Approche basée sur l'optimisation du volume de pâte :

Le béton est considéré ici comme un mélange biphasique, avec une phase solide, les granulats, et une phase liquide, la pâte, dans le cas d'un BAP, la pâte joue un rôle prédominant. Oh [51] introduisent la notion d'excès de pâte schématisée sur la figure I.5, la formulation consiste à déterminer la quantité de pâte en excès optimale pour fluidifier le BAP et limiter les problèmes de blocage.

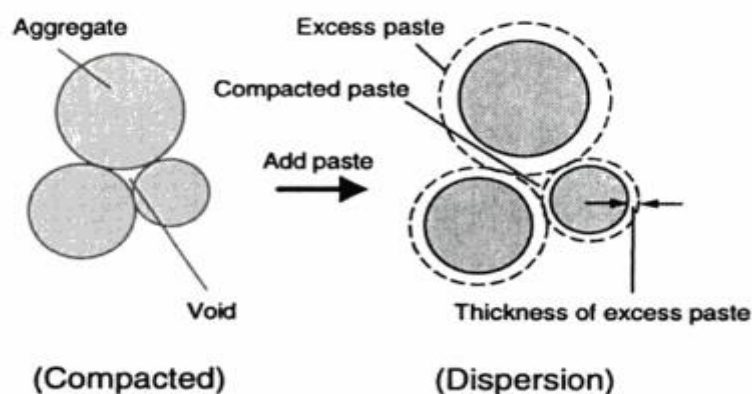


Figure I.5 Notion d'excès de pâte : la pâte remplit la porosité (1) et écarte les granulats (2). [51]

Oh et al [51] 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.

I.8.1.3 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.

Lorsque la phase interstitielle est occupée par l'eau de gâchage, plus cette quantité d'eau qui écarte les grains est importante, plus la suspension est fluide. À quantité d'eau constante, si on minimise la porosité de l'empilement de grains, on maximise en conséquence le volume d'eau disponible pour fluidifier le mélange. Cet exemple simple nous montre donc le lien entre compacité et rhéologie.

De Larrard et Sedran ont développé un modèle décrivant mathématiquement un empilement, à partir des caractéristiques des grains qui le composent (forme, granulométrie). Le modèle permet le calcul de la compacité du béton et d'un indice représentatif de son degré de serrage. À l'aide de ces variables sont modélisés la viscosité et le seuil de cisaillement du béton [52, 53].

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

I.9. Propriétés du béton autoplaçant à l'état frais :

Pour évaluer les propriétés et les qualités à l'état frais d'un béton autoplaçant, plusieurs types d'essais normalisés et non normalisés ont été proposés. Certains évaluent la consistance et la déformabilité, tandis que d'autres s'intéressent aux mesures de la stabilité du béton.

Les essais qui seront présentés sont celles proposées par l'AFGC, qui servent actuellement de référence à défaut d'être normalisées. Les résultats de ces essais permettent de donner une vision qualitative pour les BAP.

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

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

I.9.1. Mobilité en milieu non confiné :

I.9.1.1Etalement [NF EN 12350-8] :

L'essai s'effectue comme un essai d'affaissement au cône d'Abrams (figure I-10). Cependant, l'affaissement étant toujours supérieur à 25 cm, on mesure, en plus, 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 d'une galette de 50 cm de diamètre. L'essai au cône d'Abrams donne une indication sur le seuil de cisaillement du béton et sa capacité à s'auto-compacter en milieu non confiné. Une observation visuelle permet également de constater si une ségrégation horizontale a lieu ou non. En effet, l'essai au cône d'Abrams ne donne qu'une image partielle du comportement rhéologique du béton [7].



Figure I.6 Mesure de l'étalement des BAP.

La norme NF EN 206-9 prévoit une répartition des BAP en trois classes (Tableau I-1).

Tableau. I.1 Classes d'étalement [7].

Classe	Etalement en mm
SF1	550 à 650
SF2	660 à 750
SF3	760 à 850

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

- Un ressuage peut être détecté si de l'eau est présente en grande quantité sur les bords de la galette,
- En traçant à la truelle des lignes dans la « galette », on peut vérifier si le béton se referme bien, ce qui est synonyme de bon comportement,
- La fluidité du béton peut être évaluée en mesurant les temps de passage du béton aux diamètres 50 et 60 cm durant un écoulement au cône;
- Une forme bombée de la « galette » traduit un effet de voute, ce qui peut nuire à l'homogénéité du béton.

Toutes ces indications sont plus ou moins subjectives mais aident le formulateur expérimenté à effectuer certaines corrections en vue d'obtenir un béton qui correspond plus à ses attentes.

I.9.2. Mobilité en milieu confiné

I.9.2.1. Essai de la boîte en L (L-BOX TEST) :

Cet essai est destiné à tester la faciliter l'écoulement du matériau en milieu confiné. On remplit la partie verticale de la boîte en L de béton, on mesure la différence de la hauteur dans les parties verticales et horizontales et on exprime le résultat en termes de taux de remplissage H_2/H_1 comme il est montré dans la figure I.7.

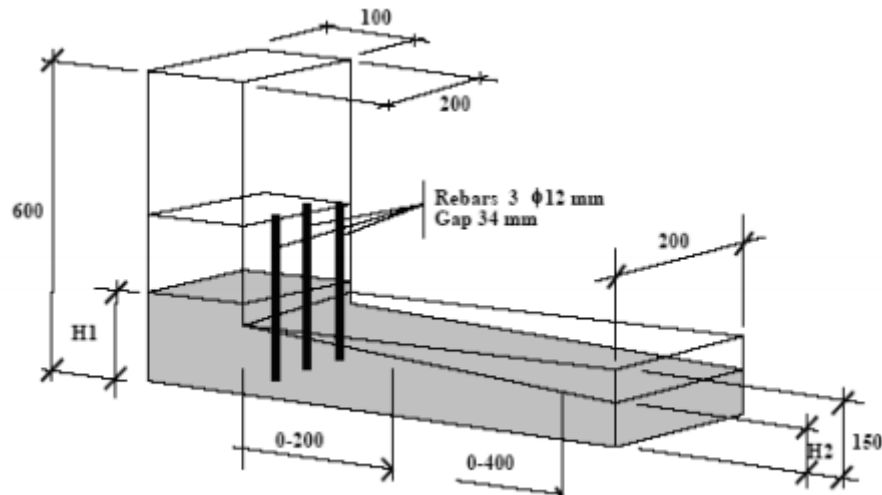


Figure I.7 Essai de la boîte en L. [7]

Pour un BAP, cette dernière doit être la plus faible possible. Selon les recommandations de l'AFGC (Association Française du Génie Civil), le taux de remplissage doit être supérieur à 0.8. Notons que les distances entre les barres d'acier représentent un ferrailage très dense (100 à 350 kg/m³) pour des ouvrages de génie civil avec un espace libre entre barres d'au moins 60 mm. Pour des applications moins ferrillées, il est possible d'alléger la grille de ferrailage en ne plaçant que deux barres avec un espace libre de 58 mm. En cas de blocage des gravillons, il convient de diminuer la teneur en granulats d'une part, et d'augmenter le volume de pâte en maintenant le rapport Eau/Liant constant d'autre part.

I.9.3.Stabilité :

Si les capacités de remplissage et de passage sont primordiales pour l'aspect autoplaçant du béton, il faut en revanche que ce béton soit suffisamment homogène et stable pour que les propriétés du béton durci soient conformes aux attentes, il faut donc que la ségrégation et/ou le ressuage soient faibles aussi bien en phase dynamique que statique, un essai et deux observations permettent d'apprécier la stabilité [7].

I.9.3.1. Stabilité au tamis [NF EN 12350-11] :

Appelé aussi essai de caractérisation de la ségrégation des bétons autoplaçants, il vise à qualifier les bétons autoplaçants vis-à-vis du risque de ségrégation (**Figure I. 8**). Il peut être utilisé en phase d'étude de formulation d'un béton autoplaçant en laboratoire, ou pour le contrôle de réception de la stabilité du béton livré sur le chantier. [7]

Cet essai complète les essais permettant d'apprécier la mobilité, en milieu confiné ou non, en caractérisant la stabilité. Il consiste à évaluer le pourcentage en masse de laitance (**P** laitance) d'un échantillon de béton ($4,8 \pm 0,2$ kg) passant à travers un tamis de 5 mm. Les critères d'acceptabilité d'une formulation d'un béton autoplaçant sont divisés en trois classes : [7]

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

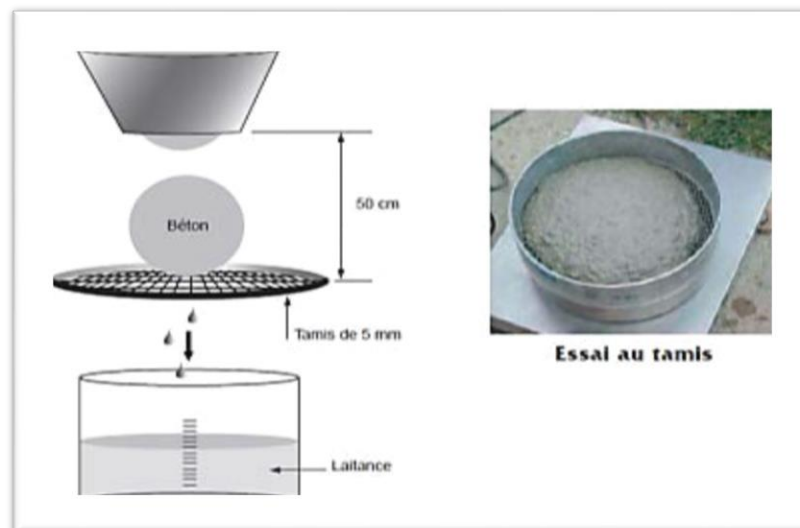


Figure I.8 Essai de stabilité au tamis.[7]

I.10. Propriétés du béton autoplaçant à l'état durci :

De nombreux travaux ont montré que les déformations des bétons sont sensibles à la proportion des granulats qui entrent dans leur composition [54, 55]. De manière plus précise, pour expliquer ce fait, on peut imaginer le béton comme un matériau composite à deux phases, composé d'une matrice (la pâte durcie, et d'inclusions) et les granulats. Les propriétés du composite (module, fluage, retrait) sont alors en fonction des caractéristiques élastiques de chaque phase, de leur proportion, de leur fluage et de leur retrait. Les BAP sont donc susceptibles d'être plus déformables que les bétons traditionnels, à cause de la plus forte quantité de pâte.

Le rapport entre résistances en traction et en compression des BAP est a priori peu différent des bétons traditionnels. Toutefois, il est conseillé, lorsque la résistance en traction présente une importance particulière, d'effectuer des mesures au niveau des essais de qualification de la formulation. L'adhérence des BAP aux armatures est similaire à celle des bétons ordinaires. Dans certaines configurations (nappes supérieures des pièces épaisses), la meilleure stabilité des BAP vis-à-vis du ressuage élimine les défauts rencontrés avec certains bétons ordinaires et peut améliorer l'enrobage des armatures.

La durabilité en général est relative aux paramètres de composition en terme de compacité et de nature chimique du liant (et de la nature minéralogique pour l'alcali réaction).

Les parements obtenus avec les BAP sont potentiellement meilleurs qu'avec des bétons ordinaires en particulier pour ce qui concerne les défauts liés à l'étanchéité des coffrages et à la vibration.

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

I.10.1. Résistance à la compression :

Les BAP se caractérisent par un 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 [36].

L'utilisation de fillers dans une formulation de béton génère une accélération de sa résistance mécanique aux jeunes âges[55]. 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 sur la résistance mécanique jusqu'à 28 jours puis deviennent moins significatifs par la suite.

Les travaux de Gibbs et al [56] ont montré que la résistance à 7j est plus élevée pour les BAP que celle de BV de référence, en raison de la présence de poudres de calcaire qui accélère l'hydratation et la résistance à la compression au jeune âge.

Zhu et al 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 le fait que la poudre à pierre à chaux accélère l'hydratation de ciment et augmente la résistance aux jeunes âges.[45]

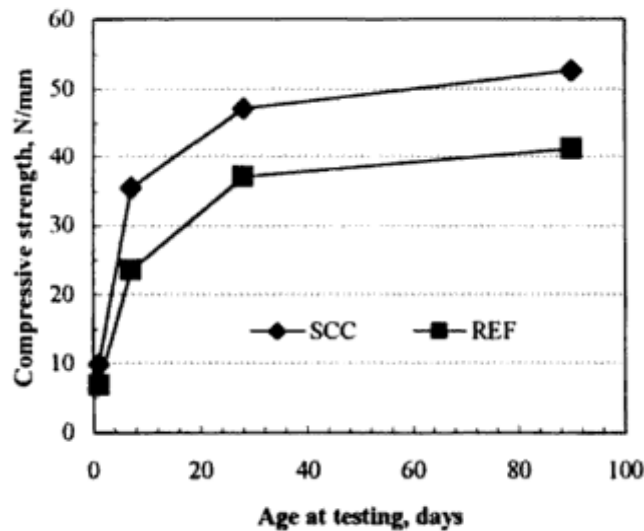


Figure I.9 Evolution de la résistance mécanique d'un BAP (SCC) et d'un BV (de référence) correspondant [56]

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

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

I.10.2. Résistance à la traction :

Gibbs et al ont constaté qu'il n'y a aucune différence entre la résistance à la traction des BAP et celle des bétons référence. Par contre, ont montré que la résistance à la traction est plus grande que la résistance des bétons références. En comparant des mélanges de BAP ont le même E/C on trouve que le type et la finesse de poudre affectent peu la résistance en traction.[56]

I.10.3. Module d'élasticité :

Les différents matériaux de BAP peuvent montrer un différent comportement de relation contrainte-déformation si les BAP contiennent une baisse quantité de gros granulats on se réfère

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

Or, si ceci est vrai dans certains cas à la précision des mesures près [58, 59] (voir figure I.10), d'autres auteurs indiquent que les modules des BAP sont plus faibles que ceux des bétons vibrés [34, 57], ce comportement est dû à la petite dimension de grains de BAP et la quantité élevée de pâte de ciment.

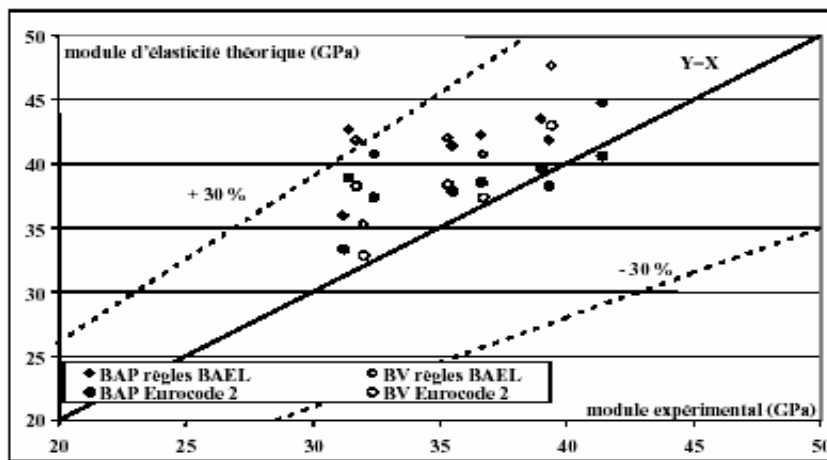


Figure I.10 Comparaison des modules élastiques théoriques de BAP et de bétons vibrés avec leurs valeurs expérimentales. [58, 59]

En effet, dans un béton formulé avec des granulats classiques, le module de la matrice (6000-25000 MPa) est environ de 3 à 15 fois plus faible que celui des granulats E_g (60000 à 100000 MPa). À partir d'un calcul prenant en compte le volume respectif des différentes phases (pâte, granulats), les modules résultants peuvent être comparés aux prévisions réglementaires [55] (figure I.11).

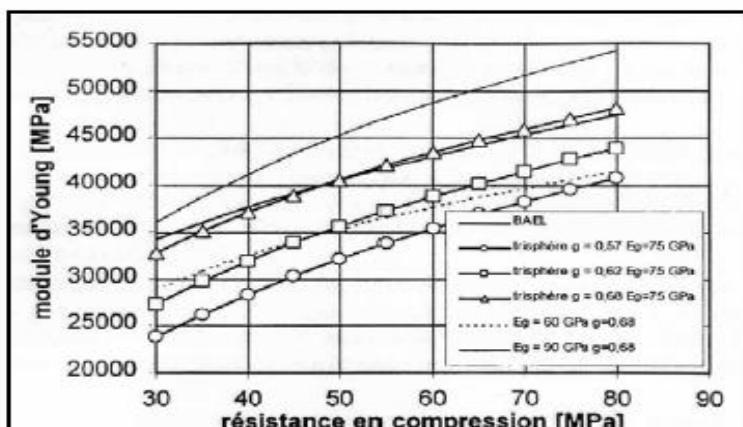


Figure I.11 Evaluation du module du béton en fonction de sa résistance, d'après le modèle réglementaire et un modèle d'homogénéisation.[55]

I.11 Bétons autoplaçant avec fillers de marbre

Dans cette partie une revue bibliographique est donnée sur l'utilisation des fillers de marbre comme addition minérale pour la confection des bétons en général et le cas des bétons autoplaçants en particulier.

Au cours des dernières années, un intérêt particulier est accordé à l'utilisation de remplissage par des fillers de marbre (MF) dans la matrice du béton qui proviennent des déchets d'industrie manufacturière de marbre. Ces produits sont présents aujourd'hui avec une quantité considérable sous forme de déchets inertes. La technique des bétons autoplaçants (BAP) accorde une grande importance pour réutiliser ces déchets [60], [61]. Topcu et al [62] ont rapporté qu'un effet positif a été remarqué avec une teneur en poudre de marbre jusqu'à 200 kg/m^3 , ceci a mené aux propriétés des BAP à l'état frais des qualités acceptables en termes d'ouvrabilité et aussi une amélioration des propriétés du béton à l'état durci. Cependant, les dosages justes au-dessus de cette quantité montrent une diminution de la réponse mécanique.

Il est révélé que des mélanges de BAP contenant des fillers de marbre (MF) combiné avec 2 % de superplastifiant présentaient une augmentation de la résistance à un rapport E/C donné en comparaison avec un béton conventionnel [60]. Une étude récente menée par Belaidi et al [63] conclue que; de bonnes caractéristiques sont obtenues si les fillers de marbre sont utilisés comme addition dans le cas des bétons (BAP) à l'état frais. Mais, contrairement la réponse mécanique

est diminuée par la combinaison de la poudre de marbre avec la pouzzolane pour ce type de béton à des dosages élevés.

Conclusion

Cette partie de synthèse bibliographique a été menée pour faire le point sur les connaissances relatives à la formulation des BAP, par rapport à celle des bétons traditionnels.

Le béton autoplaçant est un béton qui se compacte de lui-même par effet gravitaire, sans aucun apport d'énergie de compactage (par exemple vibration, damage). Un béton est qualifié d'autoplaçant lorsque ces trois critères sont vérifiés (La mobilité en milieu non confiné; la mobilité en milieu confiné; la stabilité). Ainsi, un grand nombre de tests empiriques sont développés pour caractériser le béton vis-à-vis des propriétés d'ouvrabilité.

L'étape de formulation consiste une proportion optimale et bien précise des différents constituants dans le but d'obtenir les meilleures caractéristiques du béton.

CHAPITRE : II

Les bétons autoplaçants fibrés

Chapitre II

Les bétons autoplaçants fibrés

II.1. Introduction

L'objectif de rendre le béton plus résistant en flexion et en traction suscite encore l'attention de nombreuses recherches. Une des voies explorées dans les années 1980/90 a été de travailler sur l'accroissement de la résistance à la compression du béton [66]. Après cette période la piste la plus évoquée dans la littérature pour pallier cette faiblesse de comportement en traction consiste en l'ajout de fibres métalliques dans la formulation du béton. Ces dernières jouent un rôle de renforcement qui compense la fragilité du béton par couture de la microfissuration et la macro fissuration. Les fibres ont la capacité ainsi de contrôler l'ouverture des fissures, jouant le rôle d'absorbeurs d'énergie [67]. Elles ont de plus, la capacité de transférer les charges, par leur résistance en traction, dès lors qu'une bonne adhérence fibre/matrice est assurée. Pour autant, l'efficacité de la fibre passe par une maîtrise de son orientation. La connaissance précise que l'orientation des fibres serait un facteur qui assurerait le bon dimensionnement des structures, permettant ainsi l'optimisation de la quantité de fibre à prévoir dans la formulation. Sur ce point, le dimensionnement des bétons renforcés de fibres se fonde sur l'hypothèse d'une répartition des fibres aléatoire en orientation et homogène dans la masse [67].

II.2. Les bétons renforcés de fibres :

Le béton est un matériau de construction composite constitué de granulats agglomérés par un liant. Il est le matériau de prédilection dans le génie civil car il présente de nombreuses caractéristiques avantageuses pour la construction de structures, notamment sa résistance en compression élevée. Néanmoins, il s'agit d'un matériau au comportement fragile sensible à la fissuration qui conduit à la diminution des performances mécaniques à des niveaux de déformation faibles.

Le béton armé permet de compenser cette fragilité. Des barres d'armature dans le béton, en reprenant les efforts à travers la fissure dans les zones tendues, permettent d'augmenter les performances mécaniques à l'échelle de la structure. Une méthode différente consiste à agir non pas au niveau de la structure, mais à l'échelle du matériau. Elle consiste à renforcer le béton par des fibres. Avec un choix approprié du type de fibres, de leur taille ainsi que de leur dosage, il est possible d'inhiber la propagation des premières microfissures. Les fibres, en assurant le

transfert de contraintes à travers la fissure, limitent son ouverture et sa propagation. La localisation de la macro-fissuration est ainsi retardée, limitant ainsi la fragilité du matériau.

Pour des déplacements importants, la localisation de la fissure finit par s'imposer. On se retrouve donc avec un comportement structural dans lequel les fibres confèrent une capacité portante résiduelle relativement importante. [66]

II.3. Mécanismes de fonctionnement des fibres dans le béton

Rossi [67] a décrit le comportement vis-à-vis de la fissuration du béton renforcé de fibres et des structures en béton fibré en fonction de la sollicitation imposée. Dans le cas des efforts de traction, des microfissures apparaissent, suivies de leur connexion et de la formation de macros-fissures, jusqu'à la rupture de la structure. Les fibres peuvent couder les microfissures, et retarder la formation des macros-fissures conférant ainsi une capacité portante résiduelle et une ductilité à l'échelle de la structure.

De plus, l'action des fibres est grandement influencée par leur orientation et le mode d'application des efforts. Dans le cas de fissures provoquées par les efforts en traction, les fissures s'ouvrent selon la direction normale à leurs lèvres et les fibres travaillent en traction.

Dans le cas des fissures provoquées par des efforts de compression, il y a des mouvements tangentiels par rapport aux lèvres des fissures, les fibres sont donc fléchies et travaillent dans des conditions moins favorables (faible rigidité en cisaillement). C'est pourquoi les effets d'un renfort de fibres sont peu visibles en compression pour les bétons de compacité courante.

Les propriétés du béton renforcé de fibres sont le résultat de plusieurs facteurs comme les propriétés de la matrice, la distribution des fibres et les conditions d'interface entre les fibres et le béton. D'après Bentur et Mindess [68], il existe deux stades de comportement lors du chargement d'un béton renforcé de fibres. Au départ, les déformations sont les mêmes pour les fibres et pour la matrice. Le mécanisme de résistance est le transfert des efforts de la pâte aux fibres par des cisaillements qui augmentent linéairement jusqu'au stade de fissuration. Après cet événement, si l'effort de cisaillement demandé est plus grand que la résistance au cisaillement fibre – matrice, le mécanisme de résistance principal devient le frottement, au cours du déchaussement de la fibre.

Durant un essai sur du béton renforcé de fibres, lors du chargement jusqu'au pic, les fibres n'interviennent pas. Durant cette phase, les fibres se déforment comme le béton. À l'approche du pic de résistance, des microfissures se développent jusqu'à la localisation d'une macro-fissure. Les fibres entrent en jeu une fois l'ouverture de cette macro-fissure suffisante.

Elles pontent à ce moment la fissure en transmettant les efforts au béton dans lequel elles sont ancrées. Les efforts résiduels repris diminuent ensuite au fur et à mesure que les fibres se cassent ou se déchaussent en fonction de leur nature et de celle de la matrice qui les enveloppe.

Il est donc nécessaire d'avoir une ouverture de fissure suffisante afin que les fibres soient sollicitées. C'est pour cela que les fibres interviennent peu durant la phase de chargement et de développement des microfissures. De plus, les fibres doivent avoir des dimensions compatibles avec le type de fissures, le niveau de résistance du béton et la taille des granulats.

Pour les microfissures, il est conseillé d'utiliser des fibres courtes et en grande quantité, et pour les macros-fissures, des fibres longues en moins grandes quantité afin d'assurer une bonne ouvrabilité. Dans le cas où la rupture pourrait arriver à l'interface matrice-granulats, il est recommandé d'utiliser des fibres d'une longueur correspondant à 2 à 3 fois le diamètre maximal des granulats de manière à assurer un ancrage suffisant dans la matrice cimentaire [69].

II.4. Les fibres :

II.4.1. Types et caractéristiques :

Les fibres font partie des composants des bétons de fibres métalliques (BFM), elles ne remplacent pas les armatures de structure mais, procurent une ductilité au niveau local, possédant à la fois une élasticité importante, caractérisée par un module d'élasticité élevé et une grande énergie de rupture. Une fois incorporées dans la masse du matériau, elles confèrent à ce dernier, certaines qualités dont il est incapable de les assurer seul.

Les fibres utilisées dans la confection des bétons, sont classées en deux grandes familles, selon leurs caractéristiques chimiques, physiques et mécaniques. Chaque type de fibres présente des caractéristiques et des propriétés qui lui sont propres : dimensions (diamètre, longueur...), formes (lisse, rugueuse, plate, ondulée, crantée...), résistance à la traction et adhérence au béton, qui procurent un comportement mécanique spécifique aux structures renforcées de fibres.

Le choix des fibres dépend de l'usage recherché (pièces minces ou massives, renforcement de pâte pure, de mortier ou de béton, réparation des structures), de leurs propriétés (résistance et module élevés, bonne adhérence), de leur disponibilité et de leur prix [70].

Tableau II.1 Récapitulatif des différents types de fibres

Fibres naturelles		Fibres artificielles	
Végétales	Animales	Minérales	Organiques
Lin	Poil	Laitiers	Polypropylène
Chanvre	Laine	Carbone	Polyamides
Celluloses	Soie	Métaux (acier, fonte)	Polyesters
Sisal		Verres spéciaux	
		Amiante	

Ci-dessous, les caractéristiques mécaniques et physiques des fibres les plus utilisées :

Tableau II.2 Caractéristiques mécaniques et physiques des fibres les plus utilisées [71]

Fibres	Diamètre (μm)	Long (mm)	Densité	R _t Mpa	E 10 ³ MPa	Allongement à la rupture en %	Coef de dilatation (μ/m)	R _{feu} Temp Max C°
Acier	5 -500	20-80	7.8	1000-3000	200	3-4	11	1500
Fonte (ruban)	36x2600 de section	50-60	7.8	2500	140	1	-	1500
Verre	5 -20	40-70	2.6	1500-3000	80	2-3.5	9	800
Polypropylène	10 – 200	25-75	0.9	400-750	5-10	15-25	90	150
Polyster	-	-	1.4	700-850	8	11-13	-	-
Amiante	0.02-20	5	2.5-3.4	3000	8-15	2-3	1	1500
carbone	5 – 9	Variable	1.7-2	2000-3000	250-400	0.5-1.5	-	400-1500
Sisale	10 – 50	1 – 50	1.5	-	130	3	-	-

II.4.2 Critère de choix du type de fibres :

Il existe différents types de fibres dont les caractéristiques chimiques, physiques et mécaniques diffèrent selon leur nature ou leur géométrie.

La nature, la forme, et les propriétés chimiques, physiques, et mécaniques des fibres choisies dépendent de :

- La qualité a conféré à la matrice cimentaire.
- La compatibilité avec les composantes de la matrice « ciment-granulats ».
- Une bonne adhérence avec la matrice cimentaire.
- Conservation de leurs propriétés dans le temps.
- Les fibres couramment utilisées pour la fabrication de bétons renforcés de fibres sont généralement métalliques, synthétiques, de verre ou naturelles. Selon leur utilisation, ses différents types de fibres présentent des avantages ou des inconvénients. Certaines sont affectées par des dégradations chimiques dans les matériaux cimentaires ou présentent un mauvais comportement dans les milieux alcalins (certaines fibres de verre ou fibres naturelles). [66]

Les fibres en amiante utilisées avec le ciment ont prouvé la bonne tenue, et la durabilité du composite dans le temps ; par contre les fibres de verre leur performance mécanique chute par la réaction de ciment sur le verre (effet des alcalins) malgré que ce problème soit solutionné en partie par une mise au point d'un verre à haute teneur en zirconium l'utilisation des fibres de verre est toujours limitée.

Les fibres de nylon et polypropylène sont instables devant l'action des rayons ultraviolets ils doivent être protégés.

La technologie du béton armé a montré que l'acier a une très bonne compatibilité avec le béton :

- Protection par le ciment.
- Bonne adhérence.
- Coefficient de dilatation est presque le même.
- Grande résistance.

Par leurs propriétés et qualités les fibres métalliques sont les plus adaptables et les plus utilisées avec la matrice de béton. [72]

Leur géométrie est très variable (Figure II.1). Les fibres les plus utilisées sont les fibres droites. C'est l'adhérence de ces fibres avec la matrice cimentaire qui diminue la fragilité du béton par amélioration du comportement post fissuration.

Il existe des fibres à crochets. Leurs extrémités recourbées développent un ancrage et dissipent une énergie de fissuration par plastification de la fibre [71] et par frottement à l'interface avec la matrice.

On trouve aussi des fibres ruban, des fibres à tête d'ancrage ou encore des fibres ondulées dont, qualitativement, les modes de fonctionnement sont les mêmes que ceux cités précédemment.

L'avantage des fibres à crochets ou ondulés est qu'elles développent un ancrage supplémentaire en plus de l'adhérence avec la matrice les rendant plus efficaces que les fibres droites. Cependant, ce type de fibres peut engendrer la formation d'oursins durant la fabrication entraînant une répartition non homogène dans le béton. Les fibres droites sont généralement utilisées pour pallier ce problème mais, ne fonctionnant que par adhérence avec la matrice, leur efficacité s'en ressent.

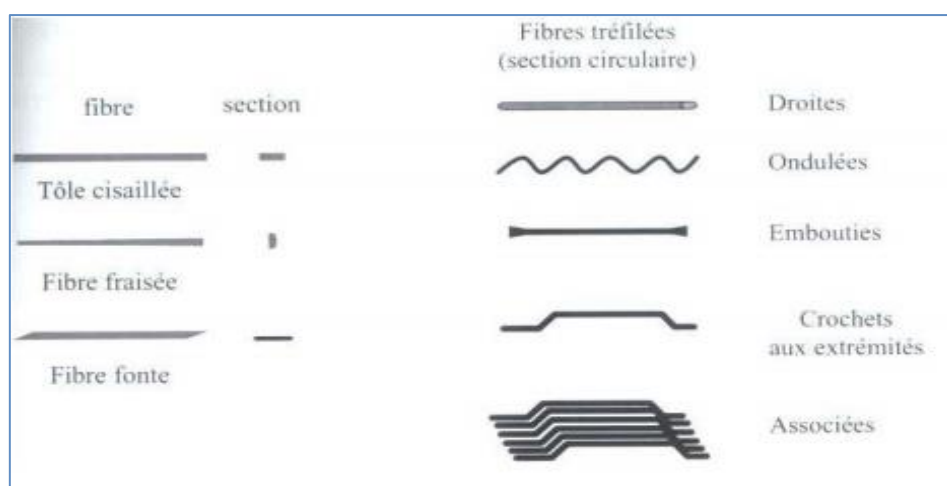


Figure II.1 Différentes formes géométriques de fibres métalliques [66]

L'élancement ou le rapport longueur/diamètre joue un rôle prépondérant dans la maniabilité d'un béton renforcé de fibres (notamment métalliques) [71]. Pour un dosage en fibres donné, plus l'élancement est important, plus la maniabilité du béton diminue.

II.4.3. Rôle des fibres :

Au début, les chercheurs ont essayé, par l'addition de fibres, d'augmenter les caractéristiques mécaniques du béton comme la résistance à la compression et la résistance à la flexion, mais le résultat obtenu était limité. Il n'a été constaté que le rôle principal des fibres dans un matériau cimentaire peut être apprécié sous deux volets :

- Le contrôle de la propagation d'une fissure dans un matériau en état de service en réduisant l'ouverture des fissures, comme schématiquement illustré par la Figure II.2-a.
- La transformation du comportement fragile d'un matériau en un comportement ductile qui accroît la sécurité lors des états de chargement ultimes (Figure II.2-b). [73]

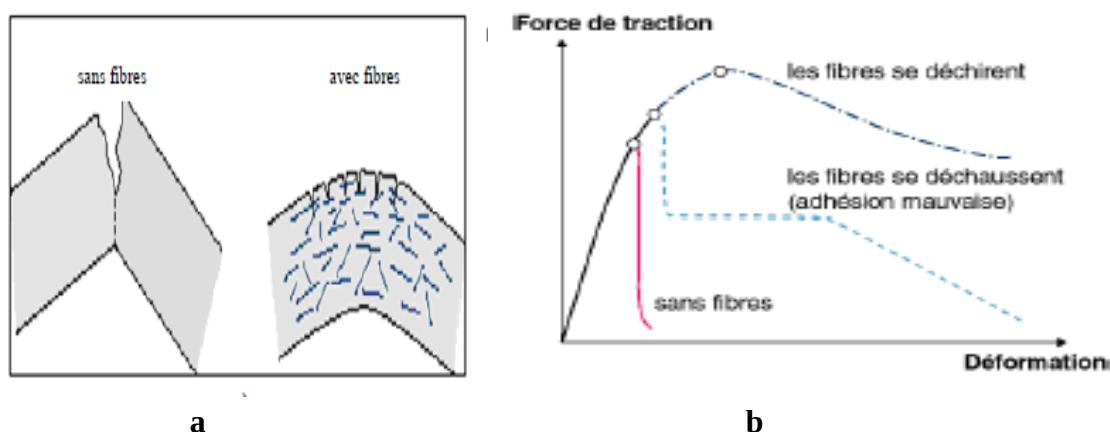


Figure II.2 Illustration de l'apport du renfort par des fibres [73].

Les fibres ont généralement pour rôle de renforcer la structure en s'opposant au développement des fissures et à leur propagation. Selon le type, le dosage et les éléments en béton dans lesquels elles sont insérées, les fibres permettent :

- ❖ L'amélioration de la cohésion du béton frais; par exemple, les fibres rigides changent la structure du squelette granulaire;
- ❖ L'augmentation de la ductilité et le comportement post-fissuration;
- ❖ La réduction de la microfissuration due aux variations dimensionnelles notamment au jeune âge;
- ❖ La réduction de la fissuration d'origine mécanique (chargement extérieur);
- ❖ L'augmentation de la résistance à la traction par flexion;

- ❖ L'amélioration de la tenue au feu et de la résistance aux chocs, à la fatigue, à l'usure, et à l'abrasion. [73]

Le principe de couturât des fissures et limitation de leurs ouvertures est illustré par la (Figure II.3). Les fibres qui traversent la fissure offrent une résistance résiduelle (résistance au-delà de la fissuration). Ces fibres se déforment aux extrémités ancrées qui se redressent graduellement avec l'augmentation du chargement au-delà de la charge de fissuration. [74]

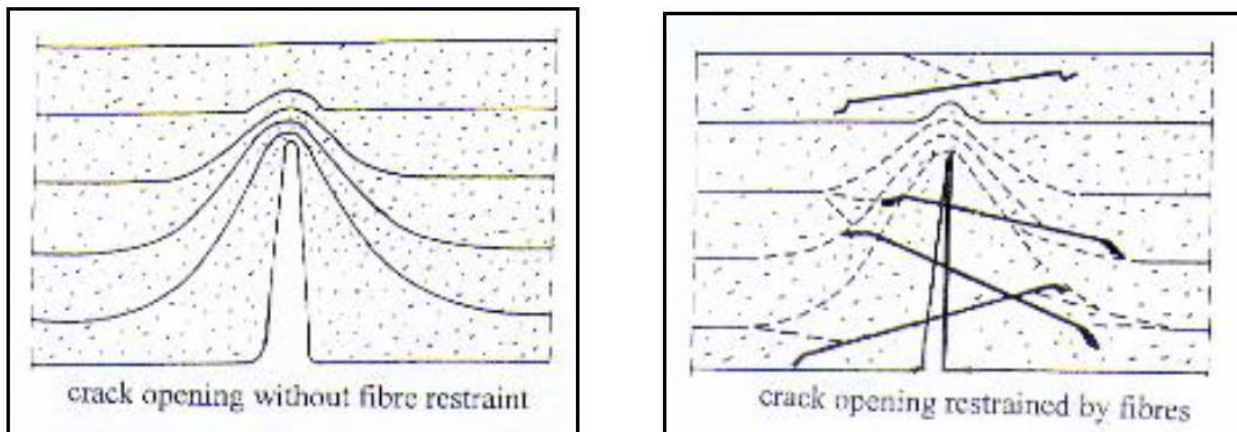


Figure II.3 Principe de couturât d'une fissure [74]

En réalité, les fibres ont des effets sur les performances mécaniques des bétons dans tous les modes de rupture. La Figure II.4 illustre les différents facteurs influant sur le comportement d'un béton renforcé de fibres [73].

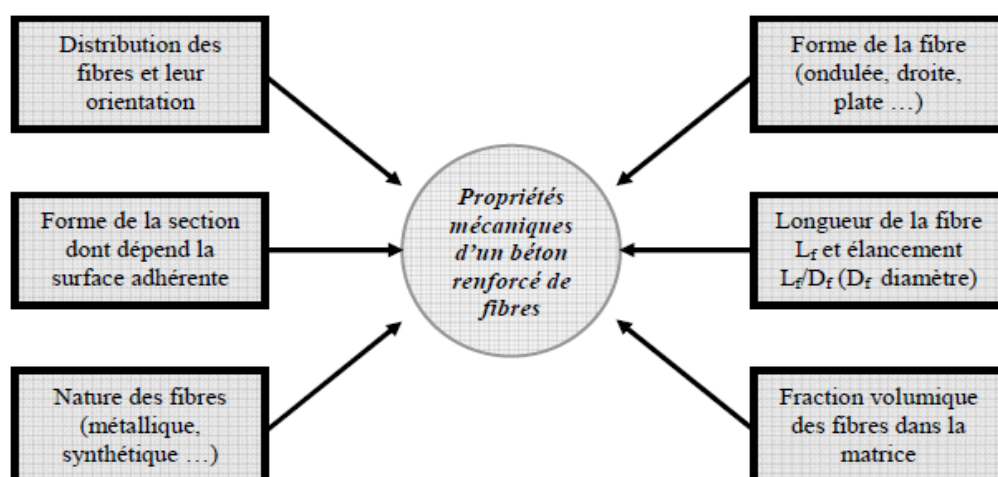


Figure II.4 Différents facteurs influant sur le comportement mécanique d'un béton renforcé de fibres. [73]

On peut donc aisément comprendre qu'il est extrêmement difficile de généraliser l'apport exact des fibres par rapport à un béton ordinaire car le nombre des paramètres influant sur son comportement est considérable.

II.4.4 Durabilité des bétons de fibres :

Quand on parle de durabilité des bétons de fibres, il faut se placer à deux niveaux - deux échelles - : celui du matériau et celui de la structure.

a) Le premier aspect à évoquer concerne bien sûr le problème de la corrosion des fibres (échelle matériau). Pour ce qui concerne les fibres synthétiques, à l'exception de certaines fibres d'aramide, il n'y a pas de problème de durabilité de la fibre dans le béton. Pour ce qui concerne les fibres métalliques, la corrosion des fibres peut bien évidemment survenir.

Le retour d'expérience et la recherche concluent sur deux points :

- La corrosion superficielle des fibres peut provoquer des salissures à la surface des structures exposées;
- La corrosion superficielle des fibres ne génère aucune pathologie, ni perturbation dans le fonctionnement mécanique des structures les utilisant.

Cette corrosion potentielle des fibres métalliques peut être minimisée dans la pratique en :

- Optimisant la formulation du béton fibré;
- Utilisant des coffrages non métalliques ou munis d'une "peau interne" (tissu synthétique, par exemple);
- Utilisant des fibres galvanisées.

b) Le second aspect relatif à la durabilité des bétons fibrés concerne la tenue au feu des structures. Les fibres métalliques n'apportent pas un plus déterminant dans la tenue au feu des structures. Ce que l'on peut simplement souligner est qu'une structure en béton de fibres métalliques se comporte plutôt mieux vis-à-vis du feu qu'une structure en béton armé classique (moins d'éclatements).

Au contraire, certaines fibres synthétiques, notamment les microfibres de polypropylène, ont un effet positif très significatif vis-à-vis de cette problématique.

Cette efficacité constatée est liée à un phénomène très simple : lors d'un feu, les fibres de polypropylène disparaissent (elles ont atteint leur point de fusion) pour laisser la place à un réseau important de fines "canalisations" (capillaires) réparties dans tout le volume de la structure. Ces canalisations servent de vases d'expansion pour la vapeur d'eau sous pression générée par le feu (évaporation de l'eau présente dans le béton). [75]

c) Pour ce qui concerne la durabilité des structures en béton fibré, un dernier point important concerne le maintien dans le temps d'une fonction demandée à une structure donnée. À l'exemple d'un revêtement quelconque en béton fibré à qui on demande d'assurer une fonction d'étanchéité (vis-à-vis des infiltrations d'eau, par exemple). Du fait du fluage des fibres synthétiques, évoqué précédemment, cette fonction, un moment assurée par une structure en béton de fibres synthétiques, peut ne plus l'être quelque temps plus tard.

Il s'agit d'un problème pour lequel les bétons de fibres métalliques ne sont pas concernés.

Enfin, dans le cas d'éléments préfabriqués manportables, ou dans celui des structures susceptibles d'être en contact direct avec les usagers, des problèmes de sécurité peuvent se poser, s'agissant de béton de fibres métalliques. Ce phénomène concerne surtout les bétons de fibres dont les fibres sont de petits diamètres, c'est-à-dire inférieurs ou égaux à 0,25 mm.

En effet, on ne peut jamais garantir à 100 % qu'aucune fibre métallique n'affleurera à la surface de la structure, ce qui peut occasionner des blessures.

Des solutions techniques existent pour pallier cet inconvénient, solutions dont il ne faut pas faire l'impasse.

Ces problèmes de blessure occasionnés par des fibres n'existent pas avec les fibres synthétiques [75].

II.4.5 Utilisation et influence de deux ou plusieurs types de fibres :

Les fibres présentent des caractéristiques, tant géométriques que mécaniques différentes selon leur nature. Chaque type de fibre peut présenter une influence particulière sur le comportement mécanique du béton, ce qui se traduit par des applications spécifiques.

Le choix du type de fibres utilisé est donc fonction du domaine d'utilisation et des performances souhaitées. S'agissant de la nature, la fibre métallique est la plus utilisée. Dans le

cas de l'utilisation de deux types de fibres métalliques dans la même composition, les fibres courtes qui, à même dosage, sont plus nombreuses peuvent être actives en jouant le rôle de couture sur des microfissures qui se développent aux premiers stades du chargement. La résistance à la traction peut se retrouver augmentée. Au fur et à mesure que la charge augmente l'ouverture des fissures augmentées aussi. Ceci cause l'arrachement des fibres courtes, alors que les longues fibres peuvent continuer à transférer les efforts à travers les fissures et ainsi à contribuer à l'augmentation de la résistance résiduelle post-fissuration. Les fibres longues sont donc généralement actives dans l'amélioration de la ductilité [76, 77], (voir Figure II-12 a et b). [73]

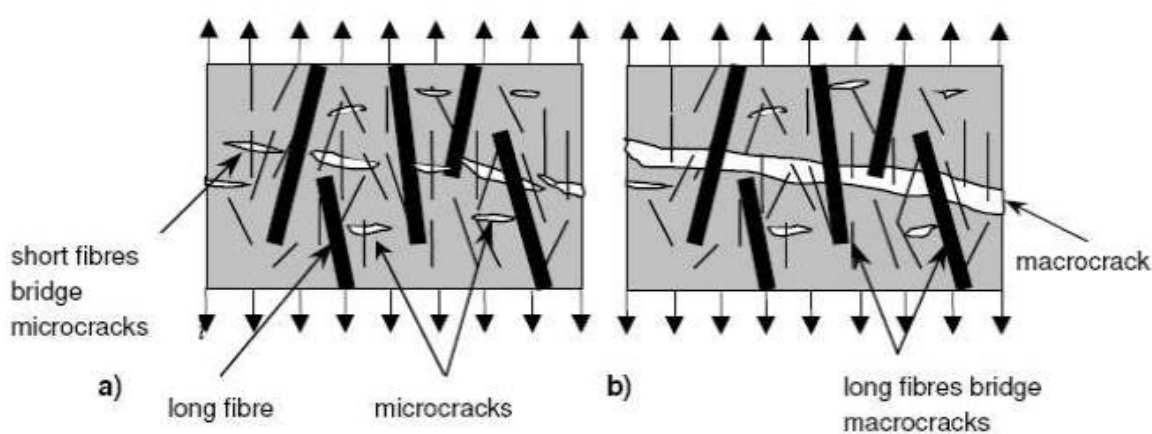


Figure II.5 Processus de couture : a) Influence des fibres courtes dans le processus de couture des microfissures, b) Influence des fibres longues dans le processus de couture des macrofissures. [73]

II.4.6 Les avantages du béton de fibres :

Les avantages de l'utilisation des fibres dans le béton sont présentés selon l'aspect technique et économique.

a) Aspect technique :

L'utilisation d'un béton fibré est avantageuse principalement au niveau du contrôle de la fissuration ainsi que du support de charge, tout dépendamment du type de fibres et du dosage utilisé.

Les principaux avantages techniques sont :

- Un renforcement tridimensionnel uniformément distribué à travers le béton,

- Une augmentation de la ténacité grâce au comportement en post fissuration (résistance résiduelle).
- Une énergie d'absorption élevée.
- Une résistance aux impacts élevée.
- Une résistance à la fatigue élevée.
- Une augmentation de la résistance en cisaillement.

b) Aspect économique :

Les principaux avantages économiques des bétons fibrés sont :

- Une réduction des intervenants sur le chantier, ce qui implique une réduction du coût de mise en place et du temps de construction.
- Une optimisation du dimensionnement.

II.5 Bétons autoplaçants fibrés :

II.5.1 Définition:

Malgré les améliorations appréciables obtenues au niveau du comportement mécanique des bétons, l'incorporation des fibres dans le béton reste problématique du point de vue de l'ouvrabilité et de la répartition homogène des fibres. Pour remédier à ces problèmes, l'association des fibres avec le béton autoplaçant (BAP) paraît prometteuse. L'addition des fibres influe directement sur la rhéologie des bétons à l'état frais et donc de manière similaire sur l'ouvrabilité des BAP. Cette influence est fonction du dosage en fibres et de leurs caractéristiques géométriques notamment l'élancement. Ces propriétés ont été mises en évidence par différents essais à l'état frais, par exemple l'essai d'étalement « SLUMP FLOW » et l'essai d'étalement modifié dit « J-RING » qui permet d'évaluer notamment le risque de blocage. Pour bien déterminer l'effet des fibres, ces essais ont également été effectués avec un béton autoplaçant de référence (non fibré).

Les bétons autoplaçants fibrés doivent avoir les mêmes propriétés de base que les BAP non fibrés: étalement maximal, non ségrégation, non ressuage, non blocage etc, et ce malgré l'addition de particules supplémentaires que sont les fines.

II.6.Composition des BAPF :

La composition de mélange du BAP renforcé de fibres est souvent un compromis entre conditions sur l'état frais et durci: une diminution soudaine d'ouvrabilité se produit à un certain contenu de fibre, qui dépend de la composition du mélange et de type de fibre. Les paramètres touchant sur le comportement du béton dans l'état frais ont été variés dans plusieurs études expérimentales pour trouver leur effet sur les caractéristiques principales du BAPF [78].

II.7. Formulation des BAPF :

La conception du mélange est souvent basée sur quelques principes de base: augmenter la teneur en pâte, le dosage en superplastifiant et le contenu des granulats fins à l'allongement et au volume croissant de fibres. Rossi et al [79] ont approché la conception du mélange des matrices de béton autoplaçant renforcé de fibres sur une façon plus systématique: ils ont optimisé le squelette granulaire, le contenu et les caractéristiques de la pâte doivent être tenus en compte pour lier l'ouvrabilité et la composition du mélange. La distribution homogène et l'orientation des fibres sont souvent assurées mais rarement étudiées. La condition sur les caractéristiques principales du BAP demeure la même pour les BAPF; l'obtention des BAPF peut être faite de différents points de: la capacité de remplissage; le comportement de post-fissuration; la classe de résistance à la flexion par fendage et les coûts.

Rossi et Harrouche ont proposé une méthode de conception pour optimiser le squelette granulaire du béton de tissu renforcé qui a été basé sur la méthode Baron-Lesage. Ils ont fait toute prétention: d'abord, le béton le plus réalisable est obtenu au cas où le squelette granulaire serait optimisé. En second lieu, le premier juge varie indépendamment de la nature ou du volume de la pâte de ciment [80].

II.8. Comportement mécanique des BAPF :

Pour améliorer quelques propriétés mécaniques des bétons autoplaçants (résistance à la traction, à la flexion, ductilité...), des fibres sont incorporées. Ce renforcement peut influencer le comportement de ces derniers à l'état frais et durci. Les fibres influent directement sur l'ouverture de la fissure et donc sur la rigidité et la ductilité après fissuration. Au préalable, il convient de définir ce qu'on entend par un béton témoin lorsqu'on cherche à le comparer à un béton de fibres. La démarche généralement adoptée consiste à fabriquer un béton et à le comparer au même béton auquel on a mélangé des fibres.

L'effet des propriétés des fibres qui ont une influence directe sur les propriétés mécaniques des BAPF telle que la flexion et la compression et qui ont fait l'objet de quelques recherches sont résumées ci-après:

II.8.1. Effet du volume des fibres:

Pour les bétons fibrés, le concept de la ductilité est souvent utilisé pour caractériser leur rendement [81]. L'objectif principal de l'utilisation des fibres dans les matériaux composites (béton, mortier...) est l'amélioration du comportement structural en traction.

Khayat et al [82] ont noté une amélioration de la résistance à la flexion de prismes 100×100×350 mm des BAPF par rapport au béton conventionnel.

Mueller [83] GAO et al [84] trouvent que l'une des raisons de l'augmentation de la résistance en flexion est le volume des fibres V_f . Le V_f est le paramètre responsable direct sur le comportement de la matrice BAPF à l'état durci.

Yadegaran et al [85] ont prouvé que l'inclusion de fibres synthétiques de 12 mm de longueur dans les BAP réduit la résistance à la compression à différents âges. Dreux et al [86] ont conclu que les fibres augmentent la résistance à la compression. Sahmaran et al [87] ont constaté que la résistance à la compression augmente avec l'augmentation du volume des fibres surtout dans le cas où les fibres seraient de petite taille. Par contre Banthia et al [88] et ZHANG et al [89] ont observé que l'effet des fibres sur les BAP n'est pas clair ou sensible.

II.8.2. Effet de la longueur des fibres :

Les travaux entrepris par ZHANG et al [89] sur le béton pour les applications de béton projeté contenant 60% de cendres volantes en substitution partielle avec le ciment, ont montré que l'augmentation de la longueur des fibres L_f a conduit à une augmentation de l'indice de ténacité, et par conséquent une augmentation de la résistance résiduelle à 14 jours d'âge. Mais, un résultat inverse inexplicable a été obtenu à 91 jours. Les différents essais ont montré que la résistance à la flexion du béton de fibres est indépendante de L_f [89]. ZHANG et al ont constaté que la charge de la fissure était légèrement influencée par des fibres de polypropylène. DREUX et al [86] ont mentionné que les différents tests ont prouvé une légère augmentation de la résistance à la compression lors de l'utilisation des fibres courtes en raison de leurs meilleures homogénéités dans la matrice béton.

II.8.3. Effet de l'aspect ratio et la forme géométrique :

L'aspect ratio (L_f / D_f) affecte également le comportement en flexion du béton. Cependant, l'influence de ce paramètre sur lui-même dépend du V_f et la géométrie de la fibre. Généralement, pour les bétons ordinaires, la résistance à la flexion augmente avec l'augmentation de (L_f/D_f) [90]. Avec l'utilisation de diverses formes de fibres, il est difficile de séparer l'aspect ratio de la géométrie des fibres. Pour un (L_f / D_f) donné, la ténacité des bétons de fibres varie sensiblement fonction de la géométrie des fibres utilisées [90]. BALAGURU et al [91] ont suggéré pour les bétons ordinaires (30 MPa), que les fibres les plus performantes sont: les fibres à crochets, embouties aux extrémités, ondulées, et les fibres droites. GAO et al [84] ont observé que la ténacité à la flexion augmente avec l'augmentation de la (L_f / D_f). Lou et al [92] ont étudié l'effet de cinq types de fibres d'acier avec différents (L_f / D_f) et V_f sur la résistance à la compression. Les auteurs ont constaté que lorsque l'aspect ratio augmente, la résistance augmente. Des résultats similaires ont été trouvés par GAO et al [84] en utilisant des fibres d'acier dans les bétons légers et à haute résistance.

II.9. Influence des fibres sur les propriétés rhéologiques des BAP :

L'analyse bibliographique montre que l'étalement diminue lorsque la teneur en fibres augmente. Le degré de diminution dépend de la teneur en sable dans la composition de référence. On remarque sur la Figure II.6-a une ovalisation de la galette pour les compositions renforcées de fibres métalliques ayant une grande surface, ce qui indique que l'étalement est contrecarré par les fibres dans une ou plusieurs directions. En outre, pour certaines compositions (voir Figure II.6-b) avec des fibres plus longues, une ségrégation des granulats et des fibres au centre de la galette a été remarquée. La Figure II.6-c illustre l'aspect de la galette dans le cas intermédiaire, provoquant ainsi une ovalisation de la galette et une accumulation des particules au milieu.

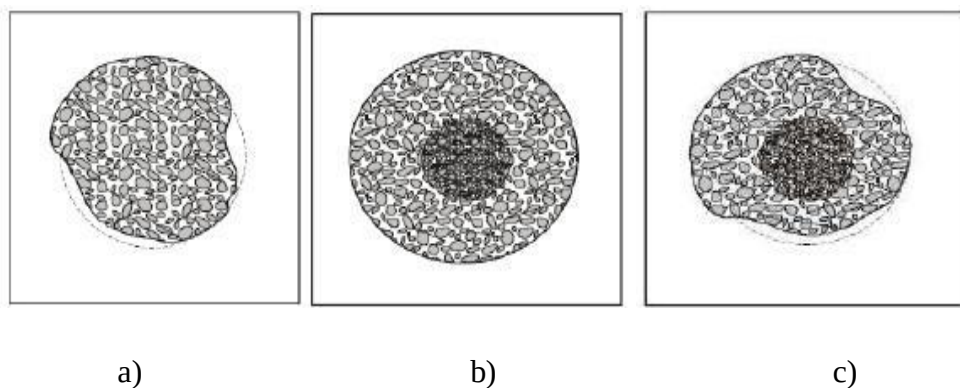


Figure II.6 Effets des fibres sur l'étalement des BAP [93].

Sachant que l'élanement (L_f/D_f) et le dosage en fibres sont les facteurs majeurs influençant l'ouvrabilité, Grünewald et Walravens [93] se sont appuyés sur le facteur fibre défini comme le produit entre la teneur volumique en fibres V_f et l'élanement. La Figure II.7 décrit l'évolution de l'étalement en fonction du facteur de fibres. Aucune différence n'a été observée entre l'étalement mesuré directement après malaxage et 1 heure après malaxage. En revanche, une augmentation du facteur de fibre réduit sensiblement l'étalement.

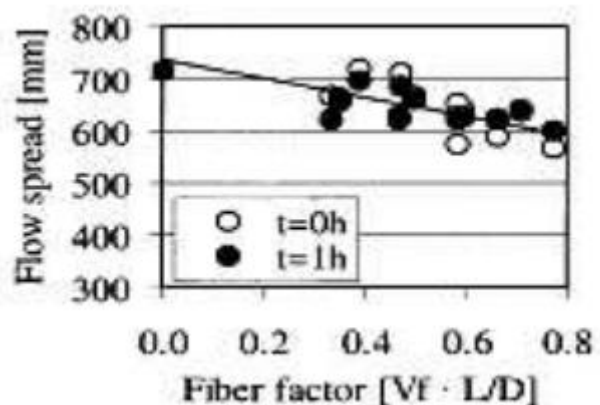


Figure II.7 L'évolution de l'étalement en fonction du facteur de fibre [94].

II.10. Orientation et distribution des fibres :

L'orientation et la distribution des fibres affectent les performances et les caractéristiques des BAP fibrés à l'état durci. Petersson [98] a réalisé une étude sur la distribution des fibres métalliques dans la boîte en L qui a consisté à réaliser des photographies aux rayons X des sections transversales du béton durci. Les conclusions retenues sont que les fibres étaient relativement bien distribuées, bien qu'une légère ségrégation des fibres fût observée par rapport aux gros granulats. Par ailleurs, il a été constaté que la majorité des fibres étaient orientées dans le sens de l'écoulement; cet effet était plus prononcé pour des fibres de plus grandes longueurs [97].

Groth et Nemegeer ont aussi conclu que l'écoulement oriente les fibres. Même si l'écoulement propre aux BAP confère aux fibres une orientation préférentielle, le même auteur est arrivé à la conclusion selon laquelle, aux dosages en fibres courants, l'effet de ce renfort est relativement le même pour un béton vibré ou autoplaçant du moment qu'ils ont la même classe de résistance et le même type et dosage en fibres. Cette conclusion a été tirée en se basant essentiellement sur les performances en flexion [99] cité par [100].

Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons résumé les connaissances sur les bétons autoplaçants fibrés et présentons une idée générale sur la classification et caractéristiques des différents types de fibres utilisés pour les bétons autoplaçants, aussi l'effet des différentes fibres sur les propriétés rhéologiques et le comportement mécanique de ces bétons fibrés.

CHAPITRE : III

*L'effet de la température sur
les bétons autoplacants
fibrés*

Chapitre III

L'effet de la température sur les BAP fibrés

III.1.Introduction :

Ce chapitre présente une analyse des recherches bibliographiques sur l'influence de la température sur les propriétés physiques et mécaniques du béton autoplaçant.

Les incendies majeurs surviennent ces vingt dernières années ont démontré la difficulté d'appréhender le feu. L'incendie en tunnel est le phénomène le plus redouté, les constructions de tunnels sont complexes et nécessitent des coûts d'investissement parfois très importants. Ces dernières années, le risque lié à l'incendie dans les tunnels a augmenté, du fait du trafic routier, qui s'est densifié, notamment par rapport au nombre de poids lourds transportant des produits inflammables.



Incendie du Tunnel du Mont Blanc, en France, durée de 53heures (24 au 26 Mars 1999)

Figure III.1 Illustrations de dégradations d'ouvrages en béton suite à un incendie.[101]

Les sévères sollicitations non seulement mettent en danger la vie des utilisateurs, mais aboutissent souvent à la perte totale des véhicules impliqués et créent des dommages aux aménagements des tunnels. Cela est principalement dû au rayonnement thermique, à l'augmentation de la température et à la dispersion des fumées[102].

Le dégagement de gaz toxiques présente d'une part un risque de santé pour les usagers, d'autre part, la fumée contient des suies qui peuvent provoquer la baisse de visibilité. Selon la durée de l'incendie, les dégâts apparents sur un élément en béton peuvent se présenter sous forme d'un écaillage superficiel, d'une décohésion généralisée du béton (la ruine totale de l'ouvrage), ou bien d'une chute de caractéristiques mécaniques des armatures de surface (perte d'adhérence, éclatement de l'enrobage).

III.2 Evolutions des propriétés du béton soumis à des températures élevées :

III.2.1 Evolution de la matrice cimentaire :

Lorsque le béton est soumis à une augmentation de température, différentes transformations physiques et chimiques se produisent. Ces phénomènes concernent la pâte de ciment et les granulats. [103]

Les principales transformations de la matrice cimentaire lors de la montée en température sont :

- 20-120°C : départ de l'eau libre et adsorbée [104], décomposition de l'ettringite à partir de 60 - 70°C [105]. Premiers signes de décomposition de C-S-H avant 100°C.
- 130-170°C:double réaction endothermique lors de la décomposition du gypse $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$. [106]
- 450-550°C : décomposition de la portlandite (deshydroxylation par déshydratation). [104]
- 600-750°C : décomposition des C-S-H, formation de $\beta\text{-C}_2\text{S}$. [107]
- Décomposition de carbonate de calcium à partir de 600°C.
- 1200°C : début de fusion du béton.

Dans la phase de refroidissement, Alonso et al ont observé une nouvelle formation de la portlandite, ainsi qu'un processus de réhydratation des silicates qui conduit à la formation de nouveaux gels de C-S-H. [108]

III.2.2 Evolution des granulats :

A hautes températures, les granulats se décomposent et subissent des modifications physico-chimiques et minéralogiques significatives qui modifient les caractéristiques microstructurales du matériau. D'après Nguyen, les granulats en contact de la pâte de ciment peuvent être réactifs ou neutres. Les granulats siliceux par exemple sont considérés neutres. Ils

ne réagissent pas avec la pâte de ciment et n'ont pas de liaison importante avec la matrice cimentaire. Les granulats calcaires au contraire présentent de fortes liaisons avec la pâte de ciment et sont considérés comme réactifs [109]. Les granulats de quartzite (siliceux) présentent des caractéristiques relativement stables vis-à-vis du feu. À partir de 573°C une transformation du quartz α en quartz β s'accompagne d'une forte dilatation de 1 % à 5 % [110]. Cette variation de structure cristalline dans les granulats peut provoquer une instabilité thermique lors du chauffage. Les travaux de Mindeguia [111] et de Xing [112] ont montré un éclatement du granulat silex entre 110°C et 450°C. Cet endommagement précoce du silex peut être dû à la présence d'eaux piégée dans les micropores ou d'eau provenant de la deshydroxylation des groupes silanols du quartz cryptocristallin. Les granulats calcaires présentent un comportement thermique stable jusqu'à une température de 600°C. Au-delà de cette température, la décarbonatation de la calcite a lieu : $\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$. Lors du refroidissement, le CaO peut réagir avec l'humidité de l'air pour donner de la Portlandite Ca(OH)_2 . La formation de cette nouvelle Portlandite avec un volume supérieur à celui du granulat initial, crée des nouvelles fissurations dans le béton [103].

III.2.3 Evolution des propriétés physiques :

Les phénomènes entraînés par la variation de température ont des conséquences sur les propriétés de transfert du béton. La perméabilité et la porosité évoluent sous l'effet de la température. Multiples travaux ont démontré l'augmentation de ces deux paramètres après l'exposition du béton à hautes températures [104, 113, 114, 115, 116, 117, 118].

Les interactions entre les propriétés physiques et mécaniques sont évidentes, par exemple, la croissance de la porosité et de la perméabilité induit, dans la majorité des cas, une diminution de résistance mécanique du matériau. [103]

III.2.3.1 Perte de masse :

Lors du chauffage, le béton perd de la masse essentiellement à cause du départ de l'eau libre et liée contenue dans les pores et les hydrates et à la décarbonatation. La Figure III.2 présente l'évolution de la perte de masse de différentes compositions de béton avec et sans fibres de polypropylène au cours du chauffage [115]. Il est important de noter que les limites de température varient suivant les auteurs.

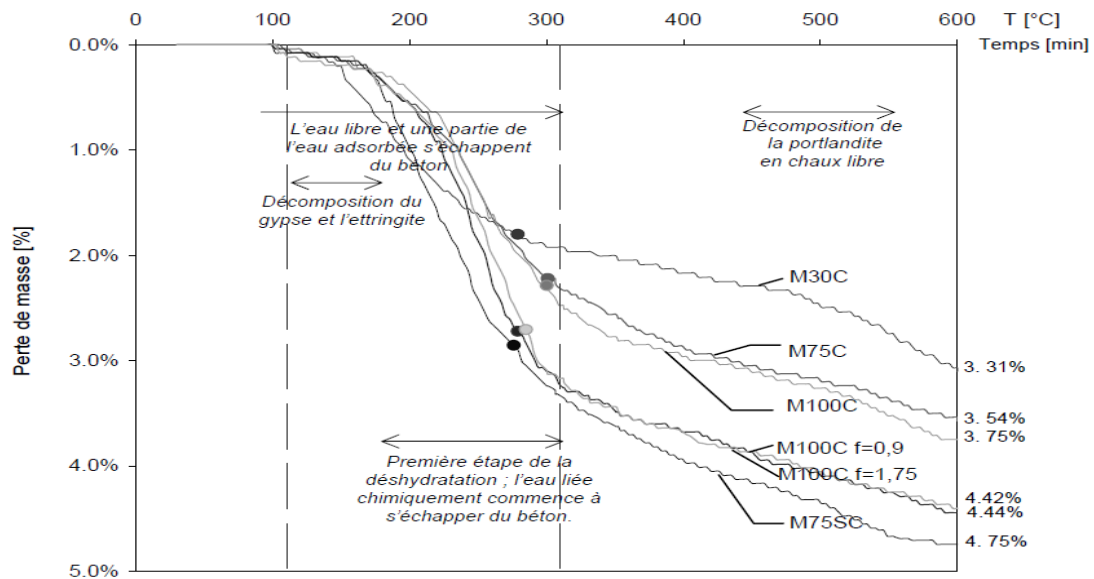


Figure III.2 Pertes de masse des bétons déterminées durant le chauffage de 20°C à 600°C à la vitesse de 1°C/min. Les points indiquent la valeur de la teneur en eau obtenue par séchage à 105°C [115]

III.2.3.2. Porosité :

Différentes études ont été réalisées sur la variation de la porosité de béton en fonction de la température. Les travaux sur les bétons ordinaires, les bétons à hautes performances, les bétons autoplacants ont montré une augmentation progressive de la porosité de ces bétons en cours de l'élévation de la température. La Figure III.3 regroupe les études réalisées par Tsimbrovska [119] et Fares [120] sur l'évolution de la porosité à l'eau en fonction de la température. Les travaux de Tsimbrovska [119] portent sur un BO (36 MPa) et un BHP (110 MPa) soumis à un chauffage à 0,2 °C/min. À la température de 200°C, l'auteur observe une augmentation de 0,9 % et 1,8 % de porosité pour le BO et le BHP respectivement. Fares [120] a testé les bétons autoplacants (BAP) (54 MPa), les bétons vibrés (41 MPa) à un chauffage à 1°C/min jusqu'à 600°C. L'auteur a constaté que la porosité augmente, quel que soit le béton (BO, BHP ou BAP). La décomposition des hydrates induit une faible évolution de la perméabilité qui augmente surtout au-delà de 400°C lorsque l'interface pâte-granulat fissuré sous l'action des déformations thermiques différentielles. [103]

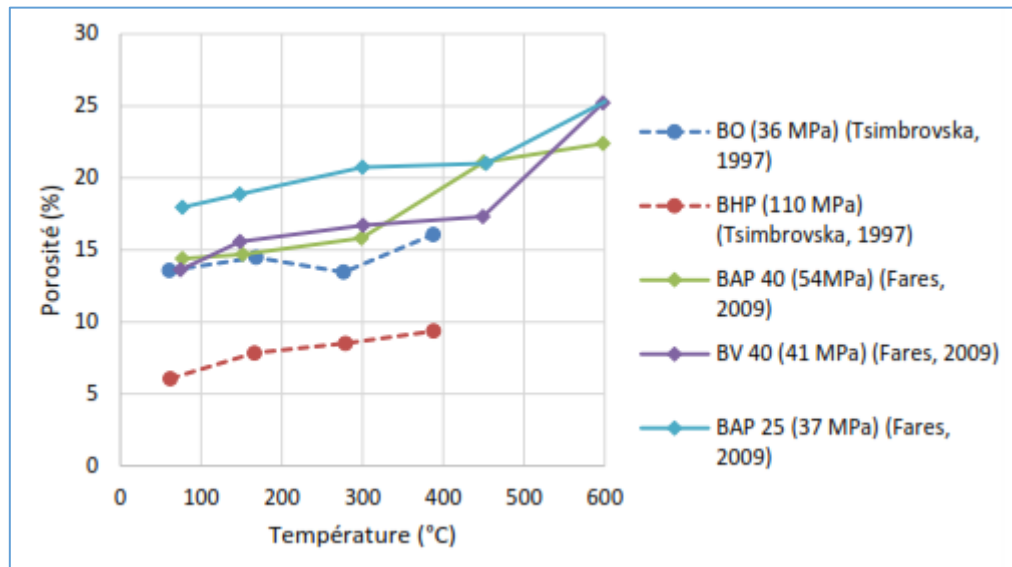


Figure III.3 Evolution de la porosité de différents bétons en fonction de la température [103]

Dans la Synthèse Des Travaux Du Projet National BHP 2000 Sur Les Bétons à Hautes Performances dans les Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées BHP 2000 [121], la porosité des bétons contenant des fibres de polypropylène a été étudiée. Les auteurs constatent une porosité supplémentaire des bétons contenant 1,75 et 3 kg de fibres de polypropylène. Cette porosité est liée aux transformations que subissent les fibres (Figure III.4).

D'autres auteurs [115], [122] ont aussi remarqués que l'addition de fibres de polypropylène favorise une porosité supplémentaire qui évolue avec le dosage en fibres.

Pliya[123] a mené une étude comparative de béton sans fibres (C3 : 70 MPa), de béton contenant 1, 1,5 et 2 kg/m³ de fibres de polypropylène (CP3 -1 : 68 MPa, CP3-1,5 : 86 MPa et CP3-2 : 79 MPa), de béton contenant 30 et 40 kg/m³ de fibres métalliques et de béton de cocktail de fibres de polypropylène et métalliques (CSP3-30x1: 74 MPa, CSP3-30x2: 73 MPa, CSP3-40x1: 80 MPa et CSP3-40x2: 77 MPa). Les résultats de porosité à l'eau après séchage à 60°C et chauffage à 450°C à la vitesse de 1°C/min indiquent que les bétons de fibres métalliques génèrent peu de porosité supplémentaire par rapport aux bétons de référence et contrairement aux bétons de fibres de polypropylène.

Il existe peu de résultats de recherche sur la porosimétrie au mercure des bétons chauffés. Le projet BHP 2000 [121] présente une comparaison de la porosité accessible à l'eau et mesurée par injection de mercure pour différents bétons en fonction de la température (Figure III.4). Les auteurs constatent que la porosité à l'eau évolue très peu avec la température (augmentation de 2,3 % pour le M 30 C et de 0,9 % pour M 100 C entre 105°C et 400°C). Il est intéressant de

noter que les mesures de la porosité à l'eau sont supérieures à celles de la porosité mesurée par intrusion de mercure.

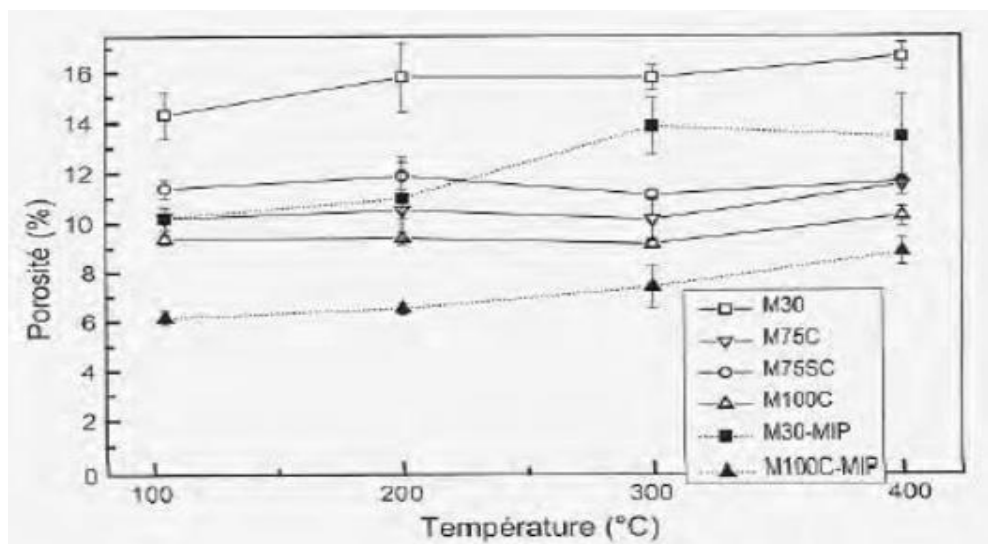


Figure III.4 Porosité à l'eau et au mercure (MIP),[121]

III.2.3.3.Perméabilité au gaz

Les transformations physiques et chimiques, les variations dimensionnelles au sein du béton augmentent la connectivité du réseau poreux et donc la perméabilité. Tsimbrovska [119] a réalisé des essais de perméabilité au gaz sur des mortiers, BO et BHP (Figure III.5). Les résultats obtenus ont mis en évidence que la perméabilité résiduelle au gaz, mesurée après refroidissement, qu'elle soit intrinsèque ou apparente, augmente avec la température (repris de [117]). Cette augmentation est attribuée à l'endommagement de la matrice dû à la déshydratation et à l'augmentation de la taille des pores capillaires.

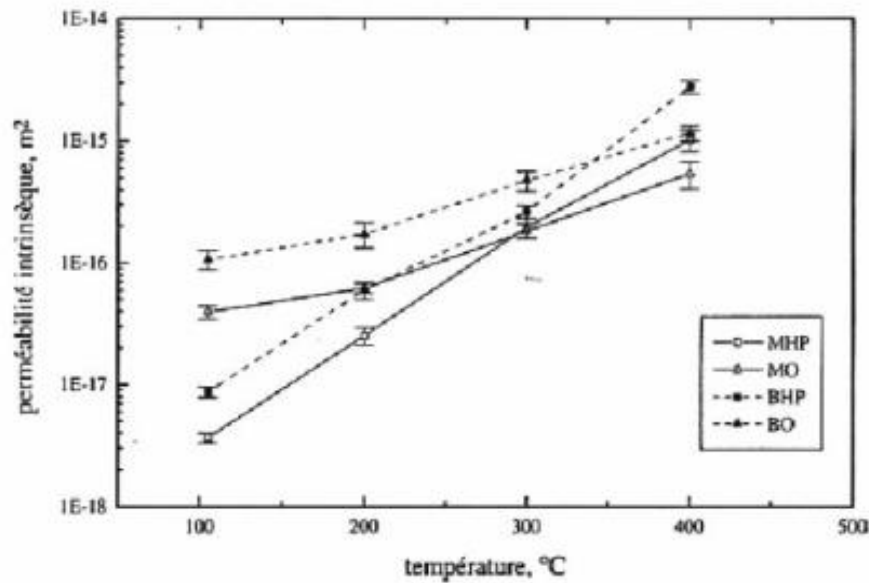


Figure III.5 Evolution de la perméabilité intrinsèque avec la température de mortiers et de bétons ordinaires (MO, BO) et hautes performances (MHP, BHP), [119]

III.2.4. Evolution des propriétés mécaniques du béton :

La sollicitation thermique sur le béton provoque une diminution graduelle des propriétés mécaniques, qu'elles soient mesurées à chaud ou à froid. Les pertes de résistance varient en fonction de la température, de la vitesse de montée en température et du type de béton.

Les principales caractéristiques mécaniques présentées sont la résistance à la compression, la résistance à la traction et le module d'élasticité. [103]

III.2.4.1. Résistance à la compression :

Pour caractériser un béton, il est nécessaire de connaître sa résistance à la compression. Généralement, une baisse de la résistance à la compression est observée au cours du chauffage.

De nombreux essais montrent une diminution de la résistance à la compression du béton entre 20 et 80°C. [124] suppose que cette baisse de résistance résulte de la réduction des forces de cohésion Van der Waals entre les feuillets de CSH qui conduirait à la formation de groupes silanols (Si-OH--HO-Si). Ces groupes présentent des forces de liaison plus faibles que les groupements siloxane (Si-O-Si). Ensuite, à partir de 80°C, le processus de séchage induit la réaction suivante: $\text{Si-OH--HO-Si} \rightarrow \text{Si-O-Si} + \text{H}_2\text{O} \uparrow$ et provoque un accroissement des forces de surface entre les particules de gel de CSH qui assurent la résistance de la pâte de ciment. En

dépassant le seuil de 300°C, le béton ne contient plus d'eau et la résistance baisse progressivement sous l'effet de la température. [124]

Behnood [125] a testé les bétons de fibres de polypropylène avec des dosages de 1 kg/m³; 2 kg/m³; 3 kg/m³ (Figure III.6). Les résultats ont montré une légère amélioration de la résistance à la compression des bétons fibrés par rapport aux bétons de référence. Le dosage de 2 kg/m³ présente les meilleures performances mécaniques de 200 à 600°C. L'auteur préconise le dosage de 2 kg/m³ comme un optimum parmi les trois dosages testés. Les résultats de Khaliq [126] et de Behnood [125] sur les bétons de fibres de polypropylène (1 kg/m³) n'ont pas montré d'amélioration significative de la résistance à la compression avec l'évolution de température.

Il est possible que l'incorporation de fibres de polypropylène génère des porosités supplémentaires lors du traitement thermique du béton et réduise la résistance à la compression. De plus, les fibres métalliques (42 kg/m³) et le cocktail de fibres (42x1 kg/m³) n'ont pas donné d'effet favorable vis-à-vis de la résistance à la compression [126]. [103]

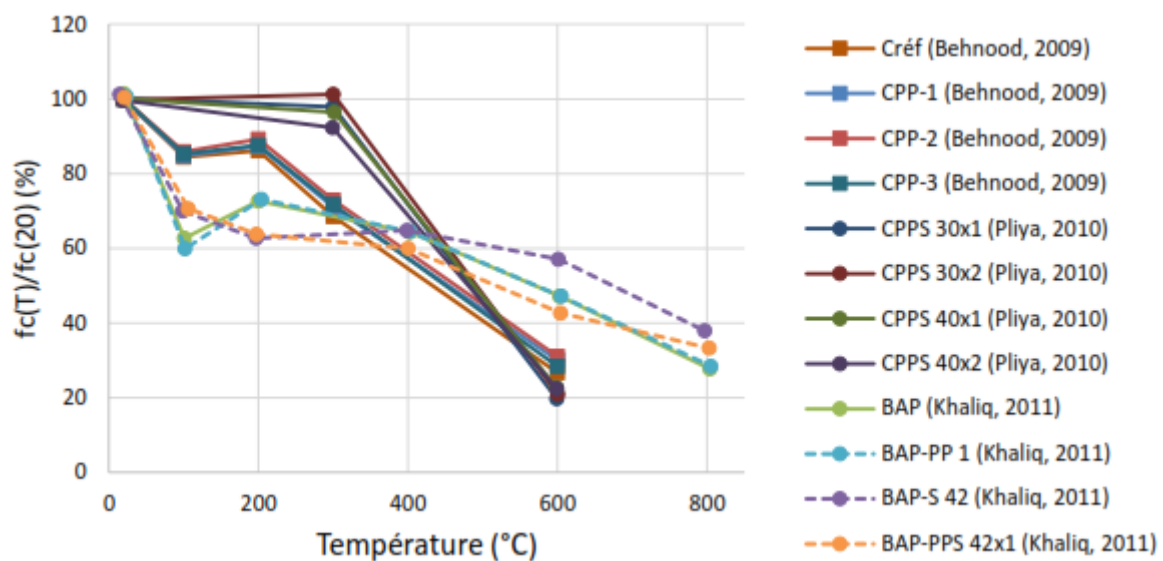


Figure III.6 Evolution de la résistance résiduelle relative à la compression de bétons de fibres métalliques, de polypropylène et de cocktail de fibres métalliques et polypropylène [103].

Les différentes teneurs en fibres de polypropylène et métallique ne changent pas la cinétique de la perte de résistance à la compression (Figure III.6). Il est important de souligner, qu'il ne suffit pas d'additionner le comportement des bétons de fibres de polypropylène et celui des bétons de fibres métalliques aux mêmes dosages afin d'obtenir le comportement à hautes températures des bétons de cocktail de fibres. [123]

III.2.4.2. Résistance à la traction :

Lors des incendies, des microfissurations apparaissent sur les parties sous tension de la structure. Une résistance élevée à la traction permet de limiter les dommages structuraux de l'élément en limitant la propagation des fissurations notamment lorsque le processus d'écaillage est entamé.

Comme dans le cas de la résistance à la compression, les résultats de la littérature affirment que la résistance à la traction résiduelle des bétons diminue sous le traitement thermique. [101]

Chen et al [127] ont testé la résistance à la traction par fendage des bétons à hautes performances (HSC) contenant des fibres de polypropylène (HSC-P), des fibres de carbone (HSC-C), des fibres métalliques (HSC-S) et trois cocktails de fibres métalliques (S), carbone (C) et polypropylène (P) (HSC-C-S, HSC-C-P et HSC-S-P) (Figure III.7). La résistance à la compression des bétons sans fibres à 28 jours était de 82 MPa. Les bétons de fibres de polypropylène (0,6 % en volume) montrent une amélioration de la résistance résiduelle à la traction d'environ 20 % par rapport aux bétons sans fibres pour les températures de 600°C et 800°C. En ce qui concerne les bétons de fibres métalliques, les auteurs trouvent que la fraction volumique de 1 % (78 kg/m³) de fibres métalliques génère une amélioration de 40 % de la résistance résiduelle relative à une température de 400°C. À la température de 800°C, cette amélioration atteint 30 %.

D'après les résultats décrits par Suhaendi [128] les fibres métalliques ont une forte influence sur la résistance à la traction résiduelle. Pour deux compositions de béton contenant un même volume de cocktail de fibres, les auteurs observent une résistance résiduelle relative à la traction de 72 % pour la composition contenant 0,5 % de fibres métalliques et 49 % pour la composition avec 0,25 % de fibres métalliques.

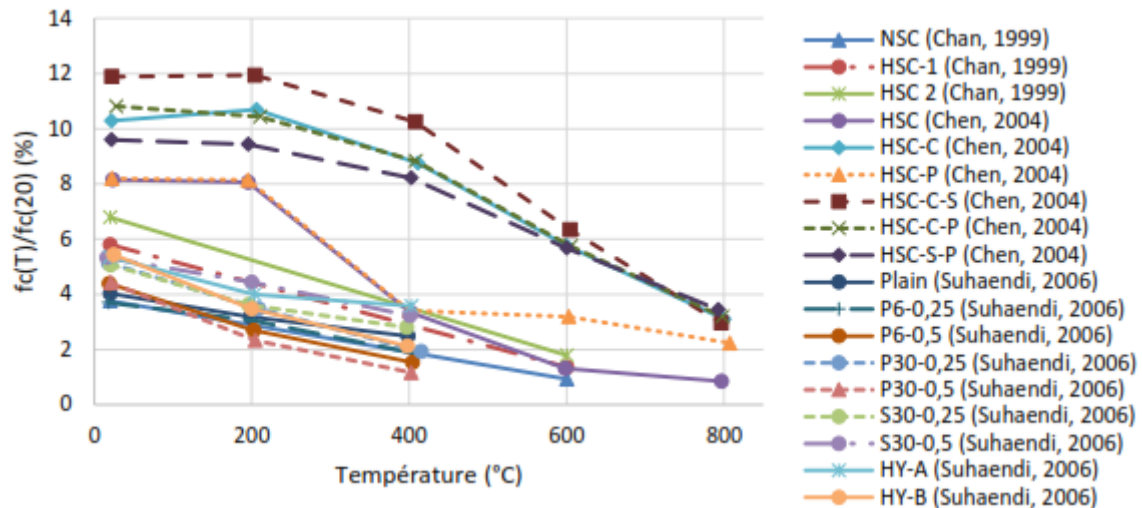


Figure III.7 Différents résultats de la résistance à la traction résiduelle relative [101].

III.2.4.3. Module d'élasticité :

Le module d'élasticité d'un béton dépend de la proportion de granulats et de la matrice cimentaire ainsi que du module d'élasticité de chaque constituant.

L'incidence des fibres métalliques et de polypropylène sur le module résiduel des bétons a été étudiée par plusieurs auteurs. Kanema [129] a noté que le module d'élasticité diminue de manière continue à partir du cycle de 150°C. L'auteur remarque une baisse de plus de 98 % de la rigidité initiale à un chauffage de 600°C. [129]

L'influence de l'ajout de 1 % (78 kg/m³) de fibres métalliques (Figure III.8). Des bétons de résistances à la compression de 39 MPa (M1), 53 MPa (M2) et 99 MPa (M3) ont été chauffés aux paliers de 105°C, 200°C, 300 °C, 400°C, 600°C, 800°C, 1000°C, 1100°C et 1200°C à une vitesse de 5°C/min jusqu'à 600°C puis de 4°C/min au-delà. L'auteur ne distingue pas d'impact important des fibres métalliques avant 400°C et au-delà de 800°C. [130]

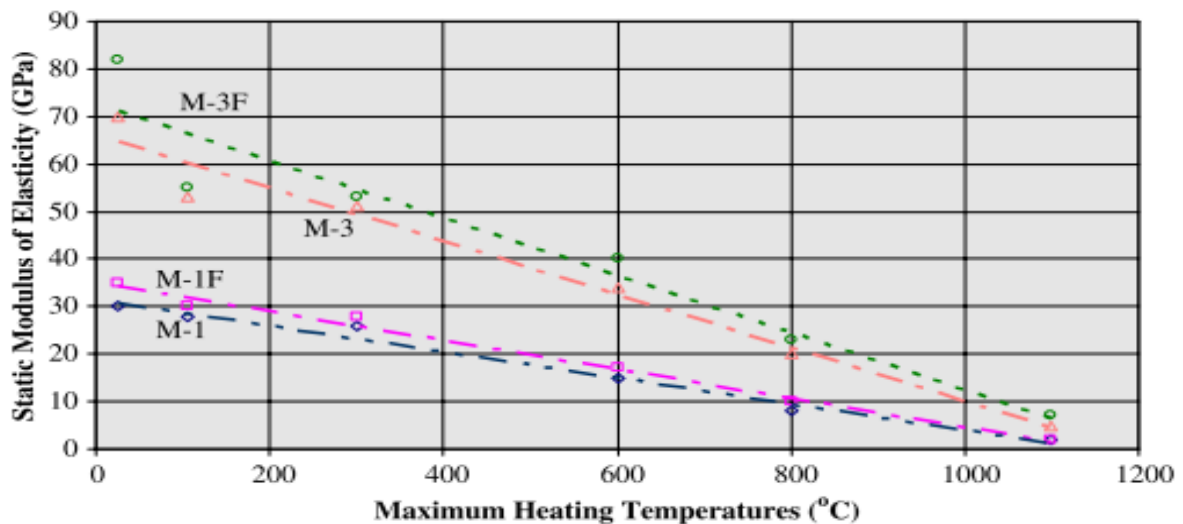


Figure III.8 Module d'élasticité statique résiduel en fonction de température, [130].

Sideris et al [121] ont mesuré les modules d'élasticité résiduels sur différents bétons. La Figure III.9 présente une évolution de module d'élasticité relatif de bétons ordinaires (NSC) et de béton à hautes performances (HPC1 et HPC2), de béton contenant des fibres métalliques (SFR) et de bétons avec ajout de fibres de polypropylène (PFR) en fonction de la température. Le dosage de fibres métalliques et de fibres de polypropylène est de 40 kg/m^3 et 5 kg/m^3 respectivement. La teneur en eau des éprouvettes varie de 3 % à 4 %.

Les résultats des essais à hautes températures (la vitesse de chauffage est de $5^\circ\text{C}/\text{min}$, le palier est de 1h) ont montré que les bétons à hautes performances sont plus sensibles à l'écaillage que les bétons ordinaires. L'addition des fibres métalliques ne ralentit pas la perte de module. Au contraire, après 500°C , les fibres métalliques ne semblent présenter aucun apport supplémentaire à la résistance du béton. L'effet négatif des fibres de polypropylène sur l'évolution des propriétés mécaniques du béton, notamment le module d'élasticité, est remarqué par les auteurs.

La diminution linéaire des modules d'élasticité est observée jusqu'à 300°C . Seuls les bétons de fibres de polypropylène n'ont pas subi l'écaillage. [103]

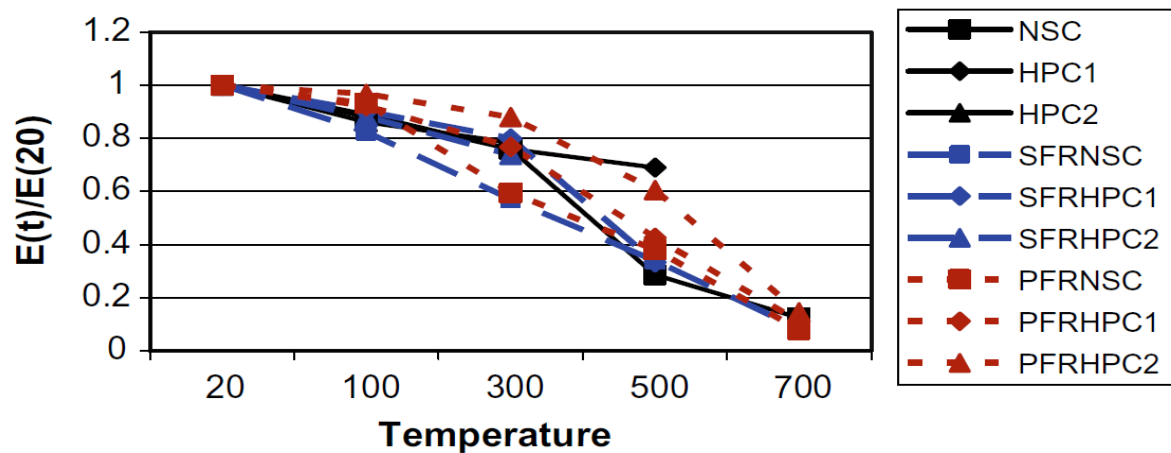


Figure III.9 Evolution de module d'élasticité relatif résiduel en fonction de la température, [Sideris et al. 2009], [131].

Conclusion :

D'après cette étude bibliographique, nous remarquons que les propriétés mécaniques (résistance à la compression, résistance à la traction, module d'élasticité) des bétons autoplaçants fibrés sont fortement influencées par les températures élevées, cette influence est remarquée aussi sur l'évolution de la matrice cimentaire (C-S-H) et sur les granulats des bétons.

2^{ème} Partie

Étude expérimentale

CHAPITRE : IV

*Caractérisation des
matériaux et procédures
expérimentales*

Chapitre IV

Caractérisation des matériaux et procédures expérimentales

IV.1 Introduction

Dans cette partie, on s'intéresse à la présentation des matériaux et des méthodes utilisées pour réaliser les différents essais expérimentaux de notre programme de recherche.

La caractérisation des matériaux de construction tels que la matrice cimentaire nécessite la connaissance de la nature de ses composants. Par ailleurs, la détermination des dosages optimaux, ainsi que l'illustration de certaines interprétations ne pourraient être possibles que si les différents constituant sont bien caractérisés, c'est l'objet de ce chapitre.

Les essais ont été réalisés au laboratoire de génie civil de l'Université de M'sila.

IV.2 Matériaux

Les matériaux utilisés dans cette campagne expérimentale font partie d'une gamme de constituants disponibles localement (contexte algérien), leurs caractéristiques sont étudiées expérimentalement aux laboratoires.

- Le sable d'origine siliceux provenant d'Oued Maiter de Boussaâda «M'sila ».
- Deux fractions de gravier concassé (3/8,8/16) d'origine calcaire de la région de BBA.
- Ciment CPJ42.5 provenant de la cimenterie Lafarge de Hammam Dalâa «M'sila».
- L'adjuvant le MEDAPLAST SP 40 de la société Granitex, Alger.
- L'ajout: le filler (farine de marbre de fraction 0,08mm).
- L'eau de gâchage et de conservation: eau potable du laboratoire.
- Les fibres métalliques commercialisées par la société TEKNACHEM, Sétif.
- Fibres métalliques: fils d'attache.
- Les fibres de verre: Déchets de la fabrication des systèmes de canalisations armée de fibres de verre (PRV) par la société MAGHREB PIPE Industries de M'Sila.

IV.2.1 Le ciment (NA EN 196 -1)

Le ciment utilisé pour l'ensemble des compositions est un ciment portland composé (CPJ) obtenu par le mélange finement broyé de clinker et d'ajouts (gypse et calcaire) conforme à la norme algérienne NA 442, provenant de la cimenterie de M'sila du groupe LAFARGE, il est commercialisé comme étant un CPJ-CEM II/B 42,5.

IV.2.1.1 Caractéristiques physiques et chimiques du ciment

- **La masse volumique apparente**

La masse volumique apparente du ciment est donnée par le rapport: $\rho_{capp} = (M_2 - M_1)/V$

Les résultats obtenus sont regroupés dans le tableau suivant:

Tableau IV.1 Masse volumique apparente de ciment.

	V (litres)	M1 (kg)	M2 (kg)	ρ_{capp} (kg/l)	ρ_{acapp} moy (kg/l)
1	1l	0.300	1.410	1.11	1.103
2	1l	0.300	1.400	1.1	
3	1l	0.300	1.400	1.1	

- **La masse volumique absolue**

La masse volumique absolue est exprimée comme suit : $\rho_{cab} = M/V$ (kg/l)

Les résultats sont listés dans le tableau suivant :

Tableau IV.2 Masse volumique absolue de ciment.

	M (g)	V (ml)	ρ_{cab} (kg/l)	ρ_{cab} moy (kg/l)
1	80	260	3.07	3.1
2	80	255	3.13	
3	80	258	3.10	

La résistance réelle du ciment se calcule on fait des essais de compression jusqu'à la rupture sur des éprouvettes de mortier normalisé après 28 jours de durcissement.

$R_c = 42.5$ MPa (pour le ciment CEMII/B de HAMMAM DALAA)

Tableau IV.3 Caractéristiques physiques du ciment CEM II 42,5

Consistance normale	25,2 %
Début de prise (Dp)	155 mn
Masse spécifique	3,1 g/cm ³
Surface spécifique (SSB)	3995 cm ² /g
Fin de prise (Fp)	280 mn

IV.2.1.2 : Caractéristiques chimiques du ciment utilisé CEM II 42,5**Tableau IV.4** Les compositions chimiques du CEM II 42,5

Elément	<i>SiO₂</i>	<i>Al₂O₃</i>	<i>Fe₂O₃</i>	<i>CaO</i>	<i>MgO</i>	<i>SO₃</i>	<i>Na₂O</i>	<i>K₂O</i>
%	16.2	04.49	2.92	57.84	1.68	2.67	0.09	0.65

La composition chimique est établie par le laboratoire de la cimenterie Lafarge de M'sila

IV.2.1.3 Les caractéristiques minéralogiques du ciment :

Selon la méthode de bogue, la composition minéralogique de ciment CEM II 42,5 donnée :

Tableau IV.5 Les compositions minéralogiques du CEM II 42,5

Minéraux	<i>C₃S</i>	<i>C₂S</i>	<i>C₃A</i>	<i>C₄AF</i>
%	58 -64	12 - 18	6 - 8	10 - 12

IV.2.2 Caractéristiques du sable utilisé :

IV.2.2.1. Essai d'analyse granulométrique (NF P18-650) :

Tableau IV.6 Analyse granulométrique du sable

Tamis (mm)	Refus partiel (g)	Refus cumulés		Tamisats cumulés (%)
		(g)	(%)	
5.00	1	1	0.05	99.95
2.50	68	69	3.446	96.554
1.25	129	198	9.89	90.11
0.63	110	308	15.38	84.62
0.315	30	616	30.76	69.24
0.16	1099	1715	85.66	14.34
0.08	276	1991	99.45	0.55
Fond	9	2000	100	0

➤ **Module de finesse M_f (NF P 18-304) :**

$M_f = 1.45$. Le sable utilisé est considéré comme un sable très fin.

IV.2.2.2 Caractéristiques physiques du sable utilisé :

- **Masse spécifique (absolue) (ρ): NF P 18-555**

Résultats obtenus :

Tableau IV.7 La masse volumique absolue de sable

Essais	M (g)	V_e (ml)	V(ml)	ρ (g/cm ³)
01	300	200	320	2.5
02	300	200	322	
03	300	200	318	

- **Masse volumique apparente : NF P 18-555**

A- Masse volumique à l'état lâche :

$$\gamma_{app} = M_2 / V_R \quad (V_R: \text{Volume de récipient})$$

Tableau IV.8 La masse volumique apparente à l'état lâche

Essais	M_1 (g)	M_2 (g)	$\gamma_{app}(g/cm^3)$	$\gamma_{app} (g/cm^3)$
01	115	1377	1.53	1.54
02	115	1393	1.55	
03	115	1386	1.54	

B- Masse volumique à l'état compact :

$$\gamma_c = M_2/V_r$$

M_1 : La masse de récipient vide

V_r : volume du récipient

M_2 : La masse de récipient plus le sable

Tableau IV.9 La masse volumique apparente à l'état compact du sable

Essais	M_1 (g)	M_2 (g)	$\gamma_c(g/cm^3)$	$\gamma_{c moy} (g/cm^3)$
01	115	1496	1.662	1.662
02	115	1497	1.663	
03	115	1495	1.661	

- Porosité et compacité et indice des vides : NF P 554**

Tableau IV.10 Porosité, compacité et indice des vides

Porosité P (%)		Compacité C (%)		L'indice des vides E	
Lâche	Compact	Lâche	Compact	Lâche	Compact
33.52	38.40	66.48	61.6	0.504	0.623

- Equivalent de sable : NF 18-598**

Tableau IV.11 Équivalent de sable

Essais	$h_1(cm)$	$h_2(cm)$	E.S.V (%)	$h'_2(cm)$	E.S.P(%)
01	12.6	09.00	71.65	08.50	69.23
02	12.7	09.20		08.95	
03	12.8	09.10		08.90	

$$(E.S.V)_{moy} = 71.65 \%$$

$$(E.S.P)_{moy} = 69.23 \%$$

C'est un sable légèrement argileux de propriété admissible pour des bétons de qualité courante quand on ne craint pas particulièrement le retrait.

- **Teneur en eau (W): NF P 18-555**

Les résultats sont comme suit :

Tableau IV.12 Teneur en eau de sable

Essais	$M_h(g)$	$M_s(g)$	$W(\%)$	$W_{moy}(\%)$
01	500	497.6	0.48	0.40
02	500	498	0.40	
03	500	498.3	0.34	

Degré d'absorption d'eau A:

Tableau IV.13 Degré d'absorption d'eau (sable)

Essais	$m_1(g)$	$m_2(g)$	$A(\%)$	$A_{moy}(\%)$
01	400	407	01.75	01.83
02	400	408	02	
03	400	407	01.75	

IV.2.2.3.Caractéristiques chimiques du sable :

La composition chimique de (Oued Maitre) est établie, à la cimenterie Lafarge (M'sila). Elle est donnée au tableau IV.14 :

Tableau IV.14 Les Caractéristiques chimiques du sable

Eléments	Symboles	Teneur en (%)
Silice	SiO ₂	94.36
Chaux	CaO	0.95
Oxyde de ferrique	Fe ₂ O ₃	1.27
Alumine	Al ₂ O ₃	0.99
Oxyde de magnésium	MgO	0.17
Perte de feu	P. A. F	1.35
Sulfate	SO ₃	0.04
Oxyde de potassium	K ₂ O	0.31

IV.2.3 Caractéristique du gravier utilisé :

IV.2.3.1. Origine du gravier utilisé :

Le gravier utilisé pour la confection du béton est obtenu par concassage de la roche par Cossider. Les fractions des graviers utilisés sont: Fraction 3/8 et Fraction 8/16

IV.2.3.2. Analyse granulométrique :

Tableau IV.15 Analyse granulométrique du gravier 3/8

Tamis (mm)	Refus partiel	Refus cumulés		Tamisât cumulés
	(g)	(g)	(%)	(%)
08.00	2	2	0.1	99.9
06.30	149	151	7.55	92.45
05.00	447	598	29.9	70.1
04.00	644	1242	62.1	37.9
03.15	477	1719	85.95	14.05
02.50	167	1886	94.3	5.7
Fond	113	1999	99.95	0.05

Tableau IV.16 Analyse granulométrique du gravier 8/16

Tamis (mm)	Refus partiel	Refus cumulés		Tamisât cumulés
	(g)	(g)	(%)	(%)
16.00	44	44	1.467	98.533
12.50	819	863	28.767	71.233
10.00	1676	2539	84.633	15.367
08.00	370	2909	96.967	3.033
06.30	84	2993	99.767	0.233
05.00	2	2995	99.833	0.167
Fond	3	2998	99.934	0.066

IV.2.3.3. Les caractéristiques physiques des graviers utilisés :

- Masse volumique apparente : NF P 18-554

$$\gamma = (M_2 - M_1)/V$$

Ou :

V : volume du récipient

M₂ : poids de l'ensemble (granulat + récipient)

M₁ : poids de récipient

Tableau IV.17 Masse volumique apparente du gravier

Gravier	Essais	M ₁ (g)	M ₂ (g)	γ (kg/l)	γ_{app} (kg/l)
3/8 V=7L	01	2.091	12.650	1.508	1.52
	02	2.091	12.762	1.524	
	03	2.091	12.777	1.526	
8/16 V=10L	01	3.466	17.565	1.409	1.41
	02	3.466	17.650	1.418	
	03	3.466	17.545	1.408	

- **Masse volumique absolue :**

Tableau IV.18 La masse volumique absolue du gravier

Gravier	Essais	M (g)	V _e (cm)	V (cm)	ρ (g/cm ³)	ρ_{moy} (g/cm ³)
3/8	01	400	300	455	2.58	2.58
	02	400	300	456	2.57	
	03	400	300	454	2.59	
8/16	01	400	400	555	2.58	2.58
	02	400	400	554	2.59	
	03	400	400	556	2.57	

- **Compacité, porosité et l'indice de vide : NF P 18-554**

Tableau IV.19 Porosité, compacité et l'indice des vides

Fraction du gravier	Porosité P(%)	Compacité C(%)	L'indice de vide E
3/8	41.13	58.87	0.696
8/16	37.33	62.67	0.596

- **Teneur en eau du gravier :**

Tableau IV.20 Teneur en eau des graviers

Gravier	M _h (g)	M _g (g)	W(%)	W _{moy} (%)
3/8	500	498	0.4	0.46
	500	497	0.6	
	500	498	0.4	
8/16	500	497	0.6	0.73
	500	496	0.8	
	500	496	0.8	

IV.2.3.4 Les caractéristiques mécaniques des graviers utilisés :

- **Essai Los Angeles L_A (NF P 18-573) :**

Le but de cet essai est de mesurer la résistance à la fragmentation d'un échantillon de granulat.

Tableau IV.21 Caractéristiques mécaniques du gravier utilisé

Gravier	Masse initiale M (kg)	Masse m (kg)	Coeff de Los Angeles L _A (%)
3/8	5	1.379	27.58
8/16	5	0.956	19.12

Classification: Un tableau de classification a été déjà tracé. Il permet de classer les roches en fonction du coefficient Los Angeles.

Tableau IV.22 Classification des roches en fonction du coefficient L_A

Coefficient L _A	Nature de los Angeles L _A
<20	Très dure
20 à 25	Dure
25 à 30	Assez dure
30 à 40	Mis dure
40 à 50	Tendre
<50	Très tendre

Commentaire :

Le gravier (3/8) : C'est un gravier assez dur.

Le gravier (8/16) : c'est un gravier très dur.

IV.2.3.5 Caractéristiques chimiques des graviers utilisés :

La composition chimique du gravier de carrière Cossider est établie, à la cimenterie Lafarge de M'sila.

Tableau IV.23 Analyse chimique du gravier

Eléments	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	Fe ₂ O ₃	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O
Teneur en (%)	40.65	08.87	40.56	03.25	03.65	0.79	0.65	0.01

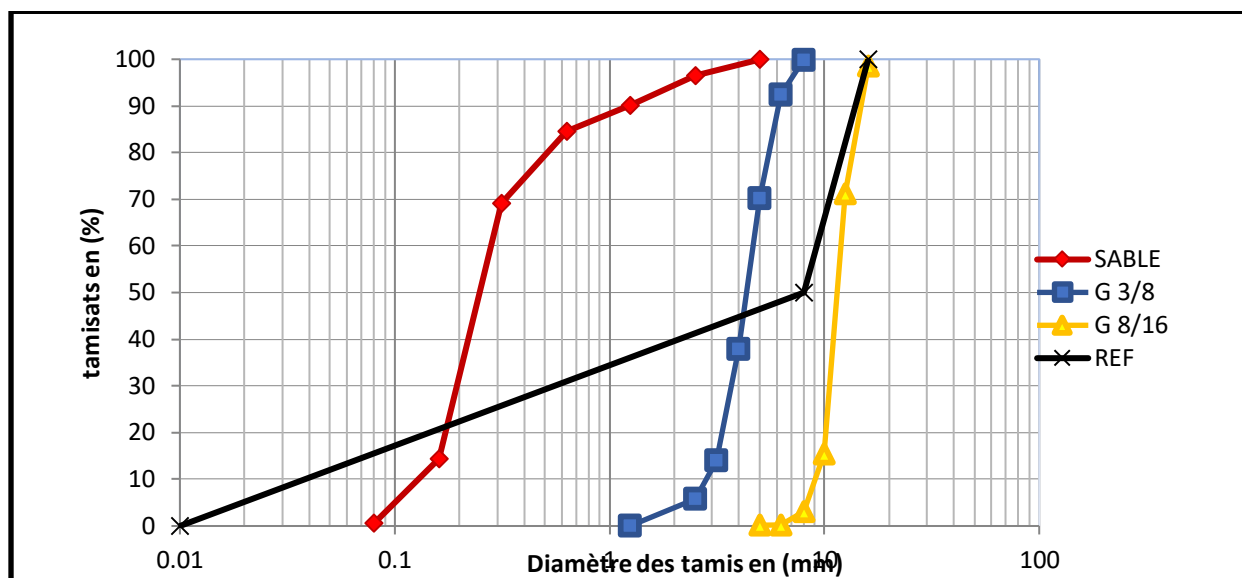


Figure IV.1 Analyse granulométrique des granulats sable et graviers.

IV.2.4 Les Adjuvants :

Les adjuvants sont des produits incorporés au moment du malaxage du béton à un dosage inférieur à 5% en masse du poids de ciment pour modifier ou améliorer les propriétés du mélange à l'état frais et ou du durci, (norme EN 934-2).

Dans notre sujet de recherche, nous avons utilisé un type des adjuvants fabriqués par la société Granitex, Alger, à savoir : MEDAPLAST SP 40.

IV.2.4.1. Le MEDAPLAST SP 40:

- **Description :**

D'après la fiche technique (Annexe), le MEDAPLAST SP 40 est un superplastifiant haut réducteur d'eau permettant d'obtenir des bétons et mortiers de très haute qualité, en plus

de sa fonction principale de superplastifiant, il permet de diminuer considérablement la teneur en eau du béton.

- **Propriétés chimiques et physiques :**

Tableau IV.24 Caractéristiques physiques du SP 40 (voir fiche technique, annexe)

Aspect	Liquide
Extrait Sec	40%
Couleur	Marron
Densité (g/cm ³ , à 20°C)	1,20 ± 0,01
PH à 20°C	8,2 ± 1
Chlorure	<1g/l

- **Propriétés :**

Grâce à ses propriétés le MEDAPLAST SP 40 permet :

Sur béton frais : Améliorer la fluidité.

Augmenter la maniabilité.

Réduire à l'eau de gâchage.

Faciliter la mise en œuvre du béton.

Eviter la ségrégation.

Sur béton durci : Augmenter les résistances mécaniques.

Diminuer la porosité.

Augmenter la durabilité.

Diminuer le retrait.

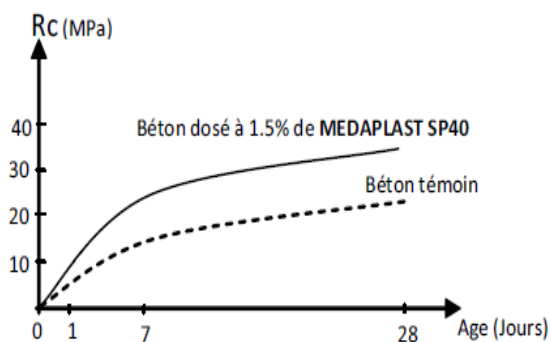


Figure IV.2 Evolution la résistance à la compression d'un béton adjuvante avec SP 40

IV.2.5 Le filler utilisé (Poudre de marbre) :

Le marbre est une roche métamorphique compacte commercialisée par l'entreprise nationale de marbre, Ain El Kabira Sétif. Extraite par abattage à l'exploitation, des moellons de dimensions variant de (80-100 cm), qui sont concassées, broyées pour obtenir une poudre finement broyée.

Les caractéristiques de la poudre de marbre sont présentées dans les tableaux suivants :



Figure IV.3 Poudre du marbre utilisé

Tableau IV.25 Caractéristiques physiques de la poudre de marbre

Couleur	Blanche
Masse volumique	972,0 kg/m ³
Masse spécifique	2,68 g/cm ³
S.S.B	5500 cm ² /g

Tableau IV.26 Composition chimique de la poudre de marbre

Elément	SiO ₂	CaO	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	MgO	P. A. F	SO ₃	P ₂ O ₅	Total
(%)	0.48	54.54	0.12	0.10	0.72	43.53	0.46	0.02	100

Tableau IV.27 Composition minéralogique de la poudre de marbre

CODE	Calcite	Dolomite	Quartz	Illite	Chlorite	Kaolinite	CO2_XRD
ECHANT	98,55	0,14	0,12	0,11	0,39	0,68	43,4

IV.2.6 Fibres métalliques :

a) FIBERTEK A

Les fibres utilisées dans cette étude sont des fibres métalliques industrielles de 50mm de longueur et 1mm de largeur, avec section transversale circulaire et de forme à crochet, provenant du complexe industriel TEKNACHEM à Sétif, le choix de ce type de fibre est justifié par la forme qui donne une bonne adhérence avec la matrice.

- ✓ **Description :** Les fibres FIBERTEK A sont obtenues par étirage à froid de fil acier de haute résistance avec mise en forme spéciale pour obtenir le meilleur ancrage sur toute leur longueur.



Figure IV.4 Fibres métalliques utilisés

Les fibres FIBERTEK A sont destinées pour le renforcement structurel. Les caractéristiques du fil d'acier, à partir de les quel les fibres FIBERTEK A sont formées, répondent aux normes de référence relatives au type d'utilisation et peuvent également être fournies dans le type galvanisé.

- ✓ **Caractéristiques :**

FIBERTEK A, réalisé en acier haute résistance, permet d'obtenir un béton et de mortier à haute résistance aux: Chocs, vibrations et charges concentrées

Avantage :

- ✓ Répartition plus homogène de l'armature dans toute la pâte du ciment.
- ✓ Renfort structurel.
- ✓ Propriétés mécaniques améliorées pendant la phase après-fissure.
- ✓ Augmentation de ductilité du béton.

- ✓ Augmentation de la résistance aux chocs.
- ✓ Meilleure facilité et rapidité de mise en œuvre.
- **Caractéristiques techniques :**

Tableau IV.28 Caractéristiques technique de FIBERTEK A (voir fiche technique, annexe)

Longueur (mm)	(L) $50 \pm 10\%$
Diamètre fil (mm)	(de) $1 \pm 10\%$
Rapport d'aspect	(L/de) 50
Format	à crochet
Section transversale	Circulaire
Tension à la rupture à la traction (N/mm^2)	1100-2700
Allongement à la rupture	< 4%

- b) Fil d'attache :** Fil métallique pour réaliser des nœuds permettant l'ancrage et les fixations des barres de fer entre elles, et pour les travaux de ferrailage.

Tableau IV.29 Caractéristiques technique de Fil d'attache

Longueur (mm)	(L) 50 ± 2
Diamètre fil (mm)	(de) $1 \pm 10\%$
Rapport d'aspect	(L/de) 50
Section transversale	Circulaire

IV.2.7 La fibre de verre :

- **Origine de fibre de verre:** Déchets de la fabrication des systèmes de canalisation armée de fibres de verre (PRV) par la société MAGHREB PIPE Industries de M'Sila.
- **Caractéristiques physiques et chimiques de fibre de verre :**

Les caractéristiques physiques et chimiques de la fibre de verre ont présenté au suivant :

Tableau IV.30 Caractéristiques physiques de la fibre de verre

Caractéristiques	Valeur
Coefficient de dilatation 10^{-6} K^{-1})	5,0
Masse Spécifique (g/cm^3)	2,6
Résistance à la traction (MPa)	3400
Conductivité thermique : W/km	0,9

Tableau IV.31 Caractéristiques chimiques de la fibre de verre

Elément	% la masse
SiO ₂	3-55
Al ₂ O ₃	14-15
CaO	17-22
MgO	5
K ₂ ONaO ₂	<1
B ₂ O ₃	6-8

**Figure IV.5** Fibres de verre

IV.2.8 L'eau de gâchage :

L'eau de gâchage utilisé est une eau potable du laboratoire de génie civil.

- **Caractéristiques chimiques de l'eau utilisée :**

La composition chimique d'eau du laboratoire de département du génie civil est établie au laboratoire de chimie (M'sila). Elle est donnée par :

Tableau IV.32 Caractéristiques chimiques de l'eau de gâchage.

La mesure	Teneur en (mg/l)
Degré de température	24.7
PH	7.78
Conductibilité	1799
Chlore Cl-	234.3
Sulfate So-4	351.6
Magnésium Mg ²⁺	110.8
Sodium Na ⁺	/
Calcium Ca ²⁺	267.2
Sédiment sec	1412
Rééligibilité d'oxydation en eau	1024

IV.3 Techniques expérimentales

IV.3.1 Introduction :

Les connaissances acquises depuis l'apparition des BAP et la meilleure maîtrise de toutes les étapes (formulation, fabrication, mise en œuvre et contrôle) sont suffisantes pour permettre l'utilisation de ces bétons dans de nombreuses applications. Certains points restent cependant à améliorer pour en étendre l'emploi.

Le comportement d'un BAP à l'état frais se différencie notablement de celui d'un béton ordinaire. Son ouvrabilité se décline classiquement suivant: sa mobilité en milieu non confiné, sa mobilité en milieu confiné et sa stabilité.

Nous avons choisi de présenter différemment les caractéristiques des BAP et d'aborder la complexité du matériau selon ses trois principales caractéristiques :

- la fluidité
- l'homogénéité
- la robustesse.

En plus de la capacité à se compacter de lui-même, les propriétés les plus importantes pour la mise en œuvre du BAP sont la fluidité, la viscosité, et la résistance en vers la ségrégation.

Il existe de nombreux procédés pour effectuer le contrôle de ses propriétés sur béton frais. Ils vont du complexe et coûteux rhéomètre à béton, jusqu'au simple cône servant la mesure de l'étalement (Slump Flow).

IV.3.2. Formulation du béton autoplaçant :

Pour la formulation du béton autoplaçant nous adaptons une formulation empirique selon les recommandations de l'AFGC [7] qui recommande des valeurs limites des constituants des BAP:

- ✓ $G/S = 0,9$. Ou $G/S = 1$
- ✓ Le volume de la pâte (ciment + additions + adjuvants + eau efficace + air) important, typiquement de 330 à 400 l/m³.
- ✓ Un dosage en ciment plutôt élevé.

- ✓ Le dosage en superplastifiant est donné selon la fluidité (donné par l'essai d'étalement), on vise un étalement de 660 à 750 mm.
- **Calcule des constituants d'un BAP :**

a. Optimisation de la composition du BAP :

- ✓ Le volume de la pâte pour 1 m^3 du BAP égale à 360 l/m^3 .
- ✓ 40 kg/m^3 du filler calcaire (10% du poids du ciment).
- ✓ $E/(C+F) = 0,50$.
- ✓ $G/S = 1$

b. Détermination de la masse de chaque constituant :

On a:

- ✓ $C = 400\text{ kg/m}^3$. $F = 40\text{ kg/m}^3$.
- ✓ $E/(C+F) = 0,50$ donc $E = 0,50 \times (400+40)$, $E = 220\text{ l/m}^3$.
- ✓ Volume de granulats égale 640 l/m^3 .
- ✓ Le dosage en superplastifiant est 2 % de la masse ciment et filler.
 $SP = 0,02 \times (400+40) = 8,8\text{ kg/m}^3$.

Les masses des constituants pour 1 m^3 du BAP sont :

Tableau IV.33 Composition d'un mètre cube de béton autoplaçant

Constituants	Quantité(kg/m^3)
Sable	800
Gravier 3/8	413
Gravier 8/16	413
Ciment	400
Eau	220
Superplastifiant	8.8
Filler (marbre)	40

- **Préparation de mélange :**

La préparation du béton autoplaçant demande plus d'attention et de précision que la préparation d'un béton ordinaire. Pour parvenir à effectuer plusieurs essais sur le béton frais, il faut suivre une certaine méthodologie.

Le premier paramètre à prendre en compte est la capacité du malaxeur utilisé.

Après avoir déterminé les proportions de chaque constituant on suit le mode opératoire suivant:

- _ Vérifier en premier le nombre et l'état des moules prismatiques et cubiques nécessaires pour les essais. Ces derniers doivent être graissés à l'aide d'une huile pour faciliter le décoffrage.
- _ Réunir tout le matériel nécessaire pour effectuer les essais.
- _ Vérifier que les matériaux ne sont pas humides, sinon les sécher préalablement dans l'étuve.
- _ Préparer la quantité d'eau nécessaire pour la gâchée. Le superplastifiant est ajouté à un quart de l'eau de gâchage.
- _ Peser les matériaux secs (gravier, sable, ciment, marbre) et les introduire dans le malaxeur.
- _ Mettre le malaxeur en marche pour homogénéiser le mélange sec.
- _ Laisser le malaxeur en marche et ajouter progressivement la première un quart de l'eau de gâchage (celle qui contient l'adjuvant).
- _ Ajouter la trois quarts d'eau graduellement.
- _ Effectuer immédiatement les essais après arrêt du malaxage, les essais sont réalisés au moins deux fois pour valider les valeurs obtenues.
- _ Remplir les éprouvettes en deux/trois couches sans vibration.

Pour les BAP avec les fibres en effectuer les mêmes étapes de préparation puis on ajoute la quantité des fibres en pluies avec malaxage de 4 min.

- **Conservation des éprouvettes :**

Après le gâchage pour un béton BAP témoin ou pour un BAP avec les fibres, les moules sont conservés dans une pièce à température ambiante, et démoulés après 24h.

Une fois démoulés, pour assurer un bon mûrissement du béton, les éprouvettes sont conservées dans un bac d'eau à une température de 20°C, ceci permet d'éviter les pertes d'eau, et de garantir le déroulement normal du processus d'hydratation du ciment.

Finalement pour les éprouvettes qui vont être exposées à une température élevée après plus de 30 jours de cure à l'eau et après passage à l'étuve pour 24h les éprouvettes ont été exposées à une température élevée variante de 20°C, 200°C, 400°C et 600°C avec une vitesse

de la montée en température de 10°C/min et un maintien de température dans le four à moufle pendant 1heure. Le procédé expérimental appliqué repose sur un chargement thermique puis mécanique.



Figure IV.6 Le four utilisé pour la montée en température.

IV.3.3 Essais de caractérisations du béton autoplaçant à l'état frais :

Dans la suite du document 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.

Trois principaux essais permettent de caractériser et de contrôler la rhéologie des BAP :

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

IV.3.3.1 Essai d'étalement au cône d'Abrams NFEN12 350-8:

La fluidité des BAP peut être caractérisée par la mesure de l'étalement au cône d'Abrams (essai d'étalement ou slump flow). Des valeurs cibles de l'ordre de 600 à 750 mm correspondent à l'étalement moyen conseillé d'un BAP. La valeur cible d'étalement doit être définie en fonction des caractéristiques de la formulation et des conditions et méthodes de mise en œuvre. Cet essai caractérise la mobilité du BAP en milieu non confiné .Il permet en particulier de vérifier la fluidité du béton lors de sa réception sur chantier. [2]

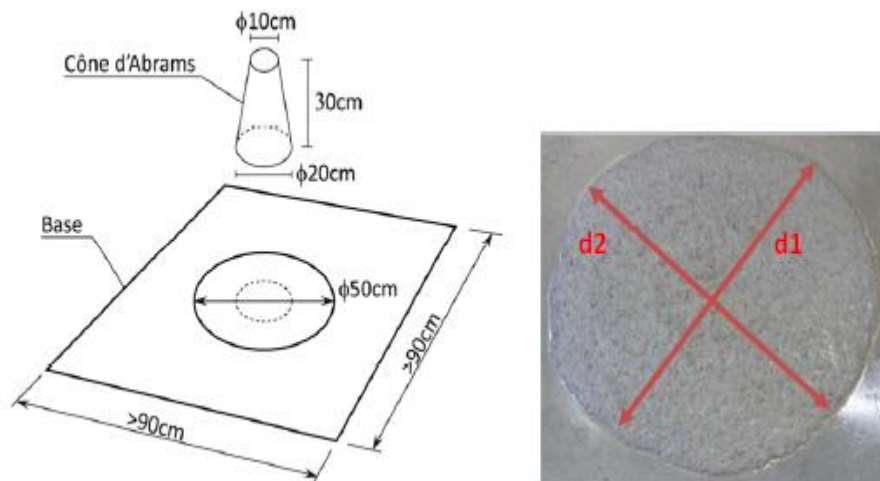


Figure IV.7 Essai d'étalement au cône d'Abrams

➤ **Objet d'étalement (slump flow) :**

- L'essai d'étalement ou slump flow est utilisé pour caractériser la fluidité du béton.

➤ **Matériel nécessaires :**

- Plateau équipé en partie supérieure d'une plaque métallique plane (type table DIN) constituant un carré d'au moins 90 cm de côté
- Cône d'Abrams disposant d'un empattement à sa base afin qu'il puisse être maintenu contre le plateau avec les pieds par l'opérateur.
- Mètre ou règle de 90 cm.

➤ **Mode opératoire :**

- S'assurer que le plateau est placé sur un support stable et horizontal.
- Humidifier la surface de la plaque (éliminer l'eau en excès avec un chiffon).
- Placer et centrer le cône d'Abrams sur le plateau.
- Prélever un échantillon de béton représentatif.
- Equiper la partie supérieure du cône d'un entonnoir. Remplir le cône en déversant de manière continue, jusqu'à l'ara supérieure du cône.
- Retirer l'entonnoir, araser si nécessaire à l'aide d'une truelle et nettoyer la plaque si nécessaire avec un chiffon humide.
- Soulever le cône verticalement à l'aide des deux poignées.
- Une fois que le béton s'est étalé sur la table, mesuré (au centimètre le plus proche) le diamètre final (D final) sur deux côtés perpendiculaires.
- Noter le résultat des deux valeurs. Exemple: (68/70cm). Si les deux valeurs

différentes de plus de 5 cm, l'essai doit être invalidé et reconduit.

- Exprimer le résultat final en termes de moyenne des deux valeurs obtenue, en arrondissant au centimètre supérieur. [2]



Figure IV.8 Essai d'étalement au cône.

IV.3.3.2 Essai de stabilité au tamis NF EN 12 350-11:

Cet essai permet d'étudier la résistance à la ségrégation et au ressuage du BAP, qui doit être stable sous l'effet de la gravité. Il consiste à déverser une quantité de béton (2 litres) sur un tamis (de maille 5 mm) avec une hauteur de chute de 50 cm.

Le pourcentage en poids de laitance ayant traversé le tamis par rapport au poids de l'échantillon initial exprime la stabilité du béton. Ce rapport doit être compris entre 10 % et 20 %.

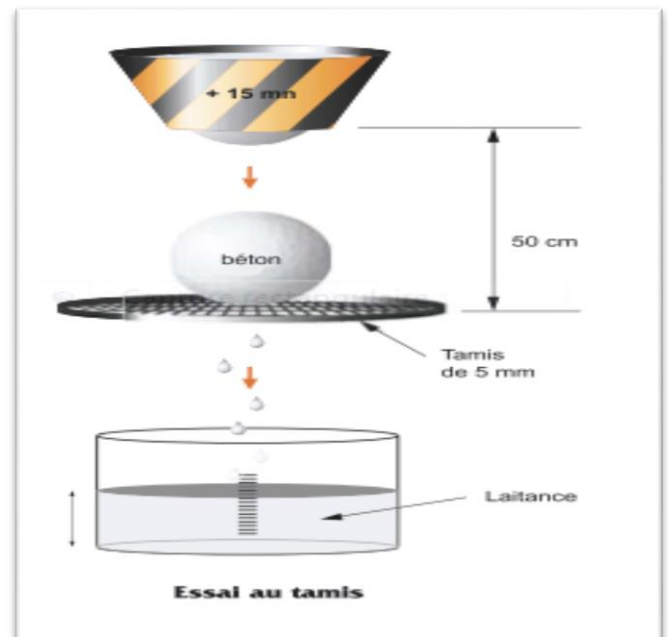


Figure IV.9 Essai de stabilité au tamis.

Objet de l'essai :

Cet essai vise à qualifier les bétons autoplaçants vis-à-vis du risque de ségrégation. Il peut être utilisé en phase d'étude de formulation d'un béton autoplaçant en laboratoire, ou pour le contrôle de la stabilité du béton livré sur le chantier.

Cet essai complète les essais permettant d'apprécier la mobilité, en milieu confiné ou non, en caractérisant la stabilité. [2]

➤ **Matériel utilisé :**

- Seau de 10 L + couvercle
- Tamis 5 mm diamètre 315 mm + fond
- Bascule : précision minimale 20 g, portés minimaux 20kg.

➤ **Mode opératoire :**

- Echantillonnage :
- En laboratoire : Malaxer, versé directement 10 litres de béton dans le seau.
- Temps d'attente entre l'arrêt du malaxeur et le prélèvement <30s.
- Sur chantier, BPE amené par camion malaxeur : Malaxer à grande vitesse pendant 1 minute.
- Remplir le seau avec 10 litres de béton directement depuis la goulotte du camion.
- Sur chantier avec centrale, mise en œuvre à la benne : Prélever 10 L de béton en tête de benne à la main écope pour remplir le seau.
- Couvrir le seau pour protéger le béton de la dessiccation.
- Attendre 15 mn.
- Peser le fond et le tamis à vide.
- Peser le fond seul.
- Poser tamis+fond sur la bascule.
- Faire la tare.
- Observer et noter l'éventuelle présence d'eaux claires de ressuage à la surface du seau après les 15mn.
- Verser sur le tamis un poids de béton égal à 4,8 kg - tolérance ± 0.2 kg ; verser ce béton au centre du tamis : hauteur de chute du béton de 50 cm $\pm$ 5 cm.
- Noter le poids réel lu de l'échantillon.
- Attendre 2 mn.
- Faire la tare.



Figure IV.10 Stabilité au tamis.

Peser le fond avec la laitance :

- On a : $P_{\text{laitance}} = P_{\text{(fond + laitance)}} - P_{\text{fond}}$
- Calculer le pourcentage en poids de laitance par rapport au poids de l'échantillon.
- $\delta = (P_{\text{laitance}}/P_{\text{échantillon}})*100$

Critères d'acceptabilité :

Les critères qui suivent sont particulièrement adaptés aux applications de béton autoplaçant en éléments verticaux. La mesure de pourcentage de laitance conduit à classer les formules de béton autoplaçant de la façon :

- $0\% \leq \% P_{\text{laitance}} \leq 15\%$ **stabilité satisfaisante.**
- $15\% < \% P_{\text{laitance}} \leq 30\%$ **stabilité critique** (essai de ségrégation à réaliser in situ).
- $\% P_{\text{laitance}} > 30$ **stabilité très mauvaise** (ségrégation systématiquement, béton inutilisable). Par ailleurs, la détection d'eau de ressuage lors de l'essai n'est pas acceptable.

Cela induit des risques de tassement, de délavage du parement et d'altération de la perméabilité.

IV.3.3.3 Essai de la boîte en « L » NF EN 12 350-10:

La cohésion armée peut se mesurer avec l'essai de la boîte en forme de L. Cet essai permet de vérifier que la mise en place du béton ne sera pas contrariée par des blocages de granulats en amont des armatures. La méthode consiste à remplir de BAP la partie verticale d'une boîte, puis en levant une trappe à laisser le béton s'écouler dans la partie horizontale à travers un ferrailage (le nombre et le diamètre des armatures peuvent être adaptés pour traduire le ferrailage réellement présent dans la structure du béton, sa mobilité en milieu confiné et son aptitude à traverser une zone fortement ferrillée). Après écoulement du béton, on mesure la différence de hauteur dans la partie verticale (H_1) et horizontale (H_2). Le résultat de l'essai s'exprime par le taux de remplissage H_2/H_1 . Une valeur de ce rapport supérieur à 0.8 traduit un bon écoulement.



Figure IV.11 Essai de la boîte en L.

Objet de boîte en L :

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

Matériel utilisé :



Figure IV.12 Boîte en L.

Mode opératoire :

La partie verticale de la boîte est entièrement remplie de béton (le volume nécessaire est d'environ 13 litres). Après arasement, on laisse le béton reposer pendant une minute. Puis on lève la trappe et on laisse le béton s'écouler dans la partie horizontale de la boîte en L à travers le ferrailage. La distance libre entre les barres est de 39mm.

Quand le béton ne s'écoule plus, on mesure les hauteurs H_1 et H_2 (**Figure IV.11**) et on exprime le résultat en terme de taux de remplissage H_2/H_1 .

Lorsque le béton s'écoule mal à travers le ferrailage et qu'il se produit un amoncellement de granulat en aval de la grille, c'est le signe d'un problème de blocage ou de ségrégation.

A noter que les temps nécessaires pour des écoulements horizontaux respectifs de 20 cm et 40 cm (à matérialiser sur le fond de la boîte en L) peuvent être mesurés pour estimer la viscosité du béton. [2]

IV.3.3.4 La masse volumique du béton autoplaçant NF EN 12 350-6:

Les éprouvettes essuyées et nettoyées sont pesées avec une erreur inférieure à 1/1000. La masse volumique est alors calculée en divisant la masse sur le volume de l'éprouvette.

C'est-à-dire : $\rho = M/V$.

La masse volumique exprimée en kg/dm^3 .

IV.3.4 Essais de caractérisations du béton autoplaçant à l'état durci :

IV.3.4.1. Essai compression NF EN206-1 :

Le but est de déterminer la résistance à la compression du béton.

L'essai se fait sur une éprouvette cylindrique de dimensions normalisées et d'élancement de 2 ($H = 2 \varnothing$) ou éprouvette cubique 10x10x10.

La résistance sera : $G = \frac{F}{S}$

- S : section de l'éprouvette : 100 cm^2 .
- F : force au moment de la rupture.

IV.3.4.2. Essai de traction par flexion : NF P18-408

But de l'essai :

Cet essai a aussi pour but de déterminer la résistance à la traction du béton. C'est un essai de traction par flexion qui consiste à écraser un prisme (7x7x28) de béton placé horizontalement entre deux plateaux d'une presse.

IV.3.4.3. Module d'élasticité :

Pour de petites déformations du béton, la courbe contrainte-déformation peut être assimilée à une droite, il y a approximativement proportionnalité entre la contrainte σ et la déformation ϵ . Soit E ce coefficient de proportionnalité :

$$\sigma = E \times \epsilon$$

E est appelé module d'élasticité.

La formule réglementaire du module : $E_{ij} = 11000 f_{CJ}^{1/3}$

IV.3.4.4. Mesure de la perte de masse :

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

$$\text{Perte de masse } (\Delta M) : \Delta M = (M_0 - M_1) / M_0 \times 100\%$$

IV.3.4.5. Mesure de la porosité à l'eau (P_{eau}) : NF P 18 459

Pesée hydrostatique : M_{eau} = masse en grammes pesées sous l'eau.

Pesée dans l'air de l'éprouvette saturée d'eau M_{sat} .

Séchage à $T^\circ = 105^\circ\text{C}$ jusqu'à masse constante (2 pesées espacées de 24 h ne s'écartent pas plus de 0.05%).

Pesée dans l'air de l'éprouvette sèche M_{sec} .

Calcul de la porosité accessible à l'eau :

$$Peau = \frac{Msat - Msec}{Msat - Meau} \times 100$$



Figure IV.13 : Essai de porosité à l'eau.

Conclusion :

Le programme expérimental retenu pour la confection des BAP nécessite dans une première étape à faire un choix des matériaux à utiliser, parmi existant sur le marché tel que la poudre de marbre, ce choix se justifie d'une part par l'intérêt économique, du fait de la disponibilité abondante de cet ajout et de l'existence d'importants gisements à exploiter, d'autre part, cet ajout n'est pas encore exploité et connu tel que le calcaire, ces types d'ajouts considérés comme inertes ont déjà été utilisés dans des études de formulation de béton pour lesquelles les résultats obtenus sont considérés comme satisfaisants. Pour rappel, la poudre de marbre est un déchet résultant des opérations de sciage, façonnage et illustration de la pierre de marbre sont très fins et contiennent un taux appréciable de fines, cette particularité est favorable à leur utilisation pour la formulation des BAP. Les essais ont été exécutés au laboratoire de génie civil à l'université de M'Sila, les résultats du procédé d'identification des différents constituants courants entrant dans la formulation des BAP (sable, gravillons, ciment, ajouts, adjuvant, fibres, eau) répondent aux normes en vigueur, la formulation des BAP se fait par tâtonnement sur la base de ses plages, après la conception par calcul, la formule ne peut être optimisée et vérifiée que par des essais effectués sur le béton.

CHAPITRE : V

Résultats et discussion

Chapitre V

Résultats et Discussion

V.1 Introduction

Ce chapitre est consacré à la présentation des résultats obtenus du programme d'essais, l'analyse et l'interprétation de ces derniers pour des bétons autoplaçants à base de matériaux locaux. La première étape est pour comprendre l'influence des principaux constituants sur le comportement des bétons autoplaçants à l'état frais et à l'état durci, et optimiser une formulation de béton autoplaçant à base de poudre de marbre. Différents mélanges confectionnés avec différents pourcentages de PM (10%, 20 % et 30%) ont été réalisés.

Ensuite, sur cette formulation optimale, l'influence d'incorporation des fibres sur le comportement d'un BAP a été étudiée, quelques paramètres tels que la nature des fibres (Deux types de fibres) et le dosage des fibres ont été choisis. Des essais ont été effectués sur les BAP, les premiers concernent l'étude des propriétés à l'état frais, afin d'estimer leur fluidité et leur ségrégation dynamique et statique (essais d'étalement au cône, de la boîte en L et de stabilité au tamis). Enfin, divers essais relatifs aux domaines mécaniques et physique (résistance mécanique, porosité, perte de masse) ont été réalisés permettant ainsi de caractériser leurs performances physiques et mécaniques et d'évaluer le comportement des bétons autoplaçants renforcé par des fibres (fibres métalliques et fibres de verre) et exposé aux températures élevées.

V.2 Présentation des résultats

V.2.1 État frais

A -Influence de poudre de marbre :

Pour réaliser la première partie de notre objectif nous avons confectionné 9 mélanges différents de BAP avec poudre de marbre. Nous avons utilisé les abréviations suivantes :

Tableau V.1 Les différents mélanges (BAP) en fonction de PM%

Désignation	Rapport E/C	Pourcentage de PM (%)
BAPT	0.5	0
BAP1	0.4	10
BAP2	0.4	20
BAP3	0.4	30
BAP4	0.5	10
BAP5	0.5	20
BAP6	0.5	30
BAP7	0.6	10
BAP8	0.6	20
BAP9	0.6	30

La plupart des formulations de BAP sont conçues actuellement de manière empirique; cependant on doit concilier deux caractéristiques à priori contradictoire la fluidité et la ségrégation.

Les principales propriétés du BAP à l'état frais (l'étalement au cône d'Abrams, la boîte en L, la stabilité au tamis et la masse volumique) sont présentées ci-après.

A-1) Essai de la boîte en L :

L'objectif de cet essai est de voir la capacité du béton à s'écouler dans une zone confinée, sans qu'il soit contrarié par des phénomènes de blocage inacceptable.

Les résultats obtenus de cet essai (pour les différents mélanges des bétons formulés) sont représentés sur la **(figure V.1)**

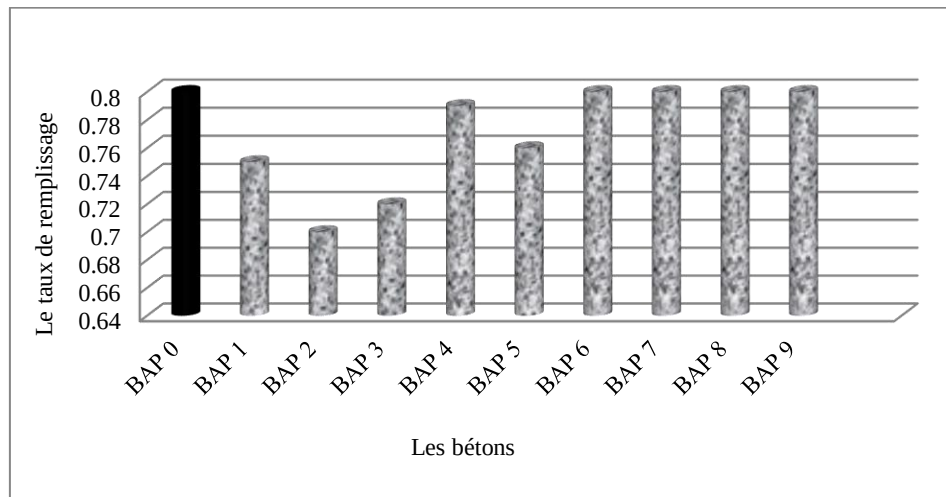


Figure V.1 Le taux de remplissage en fonction de la qualité des bétons (BAP)

L'essai est exploité au travers du taux de remplissage (rapport des hauteurs de béton en fond et en début de la boîte) qui doit en principe être supérieur à 0,8 [7].

Les BAP 7, BAP 8 et le BAP 9 ($E/C=0.6$) sont plus fluides que les autres types de béton, les BAP 1, BAP 2 et le BAP 3 ($E/C=0.4$) qui ont présenté des taux de remplissage inférieurs à 0,8 du fait du rapport E/C .

Le BAP témoin présentant un taux de remplissage supérieur à 0.8. Les BAP avec le filler de marbre ont présenté aussi des taux de remplissage proche de ce dernier alors on peut dire que le remplacement d'une partie du ciment à un dosage de poudre de marbre qui peut atteindre 30% n'affecte en rien la mobilité du béton en un milieu confiné.

A-2) Essai de l'étalement :

L'essai de l'étalement utilisait pour caractériser la fluidité du béton.

Les résultats obtenus sont représentés sur la **Figure V.2**

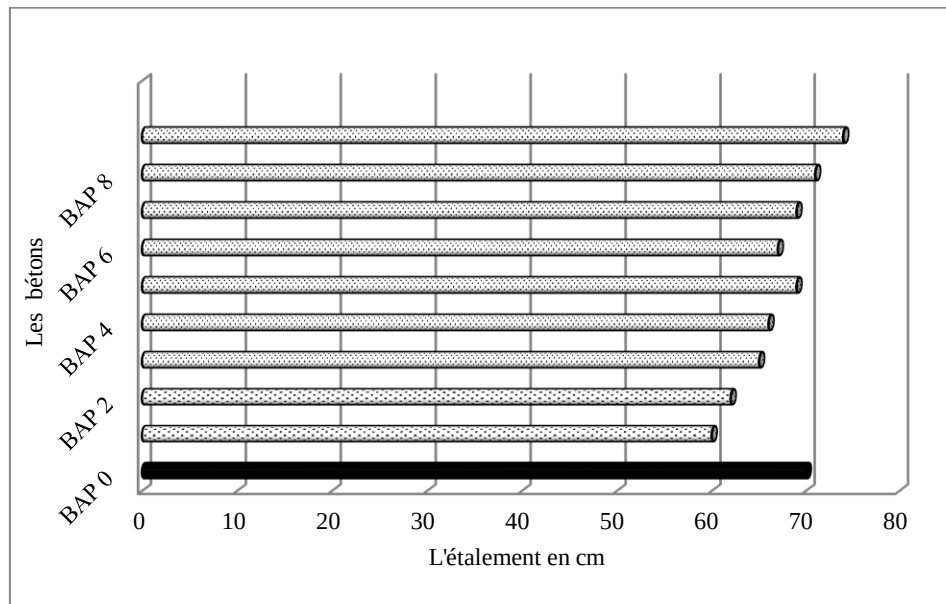


Figure V.2 L'étalement en fonction de la qualité des bétons (BAP)

Les valeurs d'étalement sont habituellement fixées entre 60 et 75 cm. [7]

On remarque que les valeurs de l'étalement de BAP témoin (sans addition de filler de marbre) sont de 70 cm alors que pour les BAP avec addition se situent entre (55 et 60) cm pour les BAP de $E/C=0.4$, se situent entre (61 et 67) cm pour les BAP de $E/C=0.5$, et se situent entre (69 et 74) cm pour les BAP de $E/C=0.6$. Ces valeurs montrent que la plupart des compositions testées présentent un étalement supérieur à 60 cm, soit une grande fluidité. Cette fluidité élevée doit être attribuée à l'utilisation d'un fort dosage en superplastifiant (2 % de la masse du liant).

Pour un même rapport E/C , la substitution d'une partie du ciment par le filler de marbre affaiblit l'étalement du béton, par rapport au béton témoin et on augmentant le dosage en poudre de marbre, l'étalement des BAP augmente mais reste inférieur à celui du BAP0 (béton témoin) et finalement à 30 % le béton avec le rapport $E/C=0.6$ est très fluide par rapport aux autres types de bétons et la même fluidité pour le béton témoin alors que l'étalement du BAP9 devient plus important.

On déduit alors que l'introduction du filler de marbre n'a pas un effet significatif sur l'étalement des BAP testés.

Donc on peut dire que lorsqu'on augmente le rapport E/C l'étalement augmente et l'inverse est juste. Alors la variation du rapport E/C de 0.40 jusqu'à 0.60 a une influence sur l'étalement des BAP testés.

Le mélange comportant 30% de poudre de marbre présente un grand risque de ressuage se traduisant par une couche de laitance qui entoure sa galette (par un contrôle visuel à la fin d'essai d'étalement). Ce ressuage a pour effet de nuire à la stabilité du BAP, et de réduire par conséquent sa résistance à la ségrégation.

A-3) Indice de ségrégation :

Cet essai permet d'étudier la résistance à la ségrégation et au ressuage du BAP, qui doit être stable sous l'effet de la gravité.

Le pourcentage en poids de laitance ayant traversé le tamis par rapport au poids de l'échantillon initial exprime la stabilité du béton.

Les critères d'acceptabilité d'une formulation de BAP sont divisés en (3) classes.

- $0 < P_{\text{laitance}} < 15\% \Rightarrow$ Stabilité suffisante.
- $15 < P_{\text{laitance}} < 30\% \Rightarrow$ Stabilité critique.
- $P_{\text{laitance}} > 30 \Rightarrow$ Stabilité très mauvaise.

Les résultats obtenus des essais sont représentés sur la **Figure V.3**

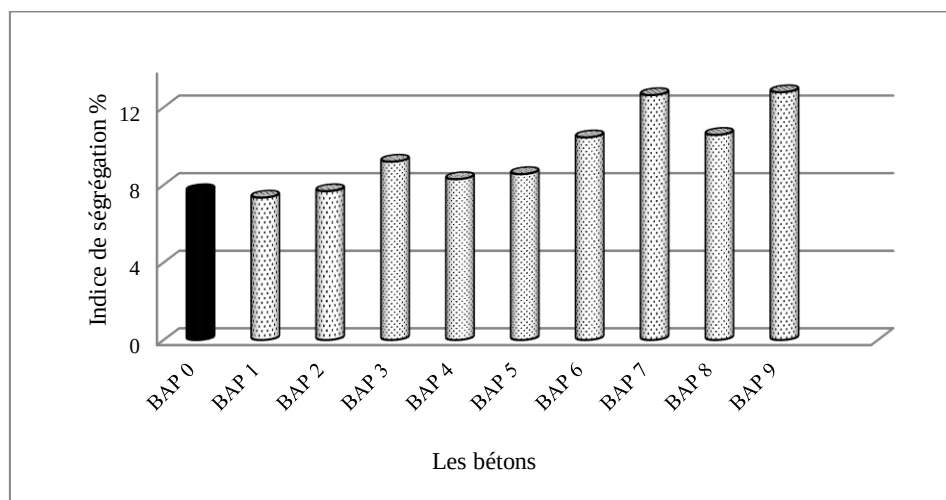


Figure V.3 L'indice de ségrégation en fonction du type de béton (BAP)

À partir des résultats on constate que les BAP présentant un indice inférieur à 15% c.à.d. le béton témoin et les bétons de poudre de marbre présentent une stabilité suffisante. Les bétons ayant une valeur de la résistance à la ségrégation inférieure à 15% offrent un BAP de très bonne qualité.

L'augmentation du taux de substitution du ciment par du filler de marbre respectivement de 10%, 20% et 30% conduit à un abaissement successif de la quantité d'eau nécessaire pour obtenir des BAP satisfaisant les caractéristiques préconisées par l'AFGC. Ceci s'explique par le fait que le filler de marbre est peu absorbant. De ce fait le remplacement d'une partie du ciment par du filler de marbre donne un mélange moins demandeur en eau.

L'augmentation du taux de substitution du ciment par de la poudre de marbre contribue à la diminution de la stabilité du béton autoplaçant.

A-4) La masse volumique :

Cet essai (la masse volumique) est utilisé pour caractériser la compacité des différents bétons. Les résultats obtenus sont représentés sur la (**Figure V.4**).

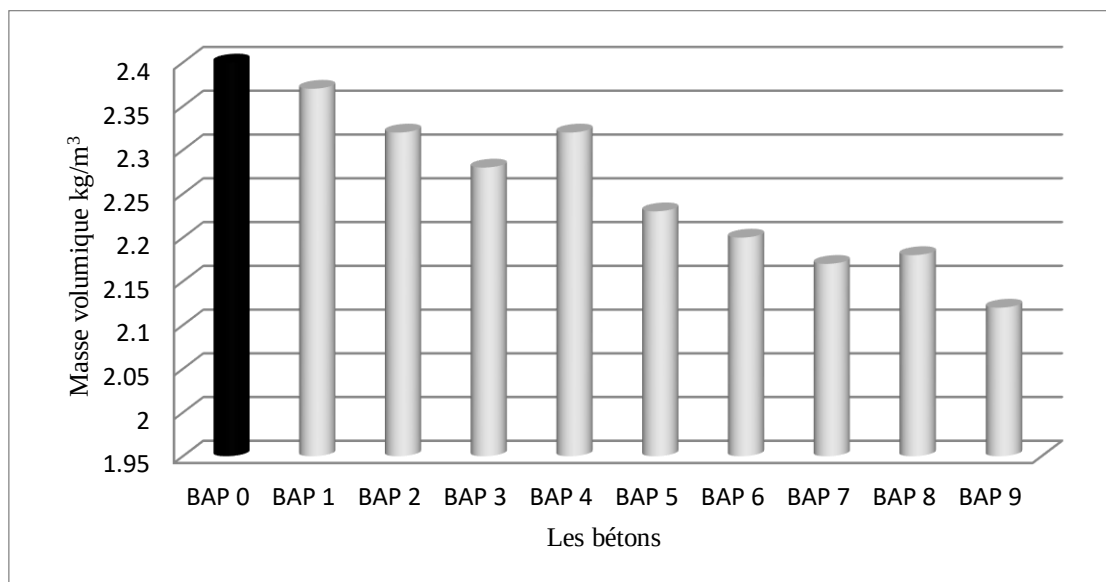


Figure V.4 La masse volumique en fonction du type de béton (BAP)

On constate que l'augmentation du dosage en filler de poudre de marbre diminue la masse volumique du béton par rapport au béton témoin, ce qui est lié aux caractéristiques de poudre de marbre.

B-Influence des fibres :

Pour la composition du béton autoplaçant fibré nous avons réalisé la même formulation que celle de béton autoplaçant témoin (sans fibre) avec l'ajout de 10% de poudre de marbre et avec l'incorporation des fibres en différents pourcentages.

Nous avons confectionné 14 mélanges différents des bétons (BAP) avec l'incorporation de trois types de fibres deux fibres métalliques (des fibres commercialisées FIBERTEX A et fibre métallique utilisés comme fils d'attache des armatures de béton armé coupés en même longueur que les fibres FIBERTEX A) et des fibres de verre. Nous avons utilisé les abréviations suivantes :

Tableau .V. 2 Les différents mélanges (BAP) en fonction le dosage en fibres.

Désignation	Type de fibre	Dosage en fibre (%)
BAPT	Témoin (sans fibre)	--
BAPF1	FIBERTEX A	0.3
BAPF2	FIBERTEX A	0.4
BAPF3	FIBERTEX A	0.5
BAPD1	Fibre métallique	0.3
BAPD2	Fibre métallique	0.4
BAPD3	Fibre métallique	0.5
BAPM1	Mélange (50%F+50%D)	0.3
BAPM2	Mélange (50%F+50%D)	0.4
BAPM3	Mélange (50%F+50%D)	0.5
BAPV1	Fibre de verre (L=5cm)	0.1
BAPV2	Fibre de verre (L=5cm)	0.15
BAPV3	Fibre de verre (L=2.5cm)	0.1
BAPV4	Fibre de verre (L=2.5cm)	0.15

La préparation du béton autoplaçant demande plus d'attention et de précision que la préparation d'un béton ordinaire. Pour parvenir à effectuer plusieurs essais sur le béton frais, on va suivre les mêmes étapes de préparation d'un béton ordinaire.

À la fin du malaxage on a effectué immédiatement les essais sur le béton frais, ils sont réalisés au moins deux fois pour valider les valeurs obtenues.

Pour les BAP avec les fibres on a effectué les mêmes étapes de préparation puis on a ajouté la quantité des fibres en pluies avec malaxage de 4 min.

On a préparé 126 éprouvettes cubiques pour les essais de la résistance à la compression et 126 prismatiques pour la traction par flexion trois éprouvettes pour chaque mesure. Toutes ces éprouvettes sont préparées pour l'étude de l'influence de l'introduction des fibres sur les caractéristiques du BAP à l'état frais et durci. En plus 168 éprouvettes cubiques pour les essais de la résistance à la compression et 168 prismatiques pour la traction par flexion trois éprouvettes pour chaque mesure sont préparées pour l'étude de l'effet des températures élevées sur les caractéristiques de BAP à l'état durci.

- **Influence des fibres métalliques:**

D'après les résultats obtenus, les bétons autoplaçants (BAP) confectionnés présentent d'excellentes propriétés rhéologiques qui sont conformes aux exigences prescrites par l'AFGC. [7]

Ces excellentes propriétés sont dues à l'action du super-plastifiant a défloculé et dispersé les grains du ciment qui sont directement liés à l'adsorption de polycarboxyle à la surface des particules en évitant l'agglomération et libérant l'eau emprisonnée dans ces agglomérats.(Assié S., 2004)[33]

B-1) Essai de l'étalement :

Les résultats obtenus à partir d'essais de l'étalement utilisés pour caractériser la fluidité du béton sont représentés sur la **Figure V.5**.

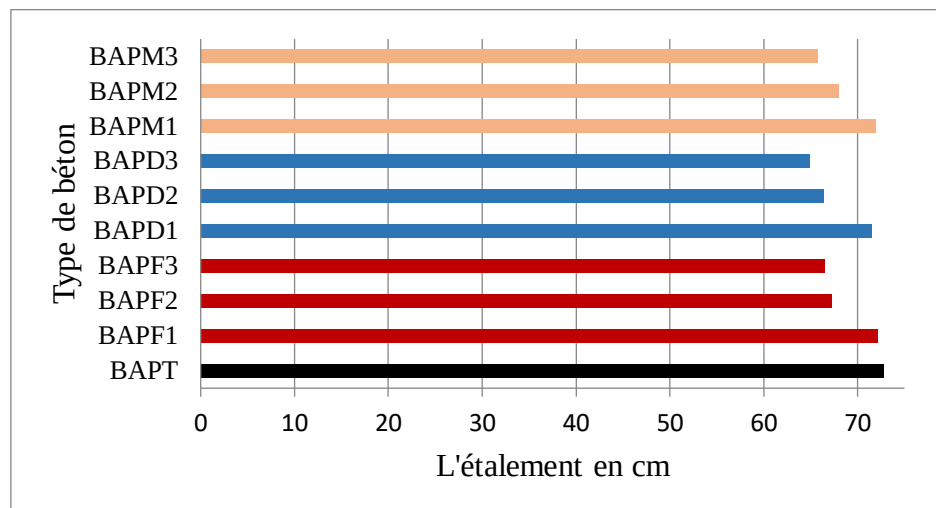


Figure. V. 5 L'étalement en fonction de type de béton

On a remarqué une légère réduction des valeurs d'étalement des bétons fibrés dont le pourcentage varie de 0.3, 0.4 et 0.5% par rapport au béton témoin. Cela peut être expliqué par les effets de frottements entre les fibres et la matrice du béton, ceci conduit à une diminution de maniabilité; cette réduction est plus importante pour le dosage de 0.5% suite à leurs dosages qui bloquent le système lors de son étalement.

L'influence des fibres métalliques sur l'écoulement des bétons est fonction de leur dosage et de leur type. En revanche les particules fines de l'addition de la poudre de marbre remplissent les vides disponibles entre les particules du mortier, augmentant ainsi la compacité du mélange en améliorant l'arrangement total des particules dans la matrice. Par conséquent la quantité d'eau qui occupait les vides est libérée dans la solution interstitielle, ce qui se traduit par une meilleure fluidité. Cependant, au-delà d'un dosage critique en fibres, les frictions entre particules sont de plus en plus importantes.

B-2) Essai de la boîte en L :

L'essai de la boîte en L est le test qui permet de vérifier la capacité d'un béton à s'écouler dans un milieu confiné. Les résultats obtenus sont représentés sur la **Figure V.6**.

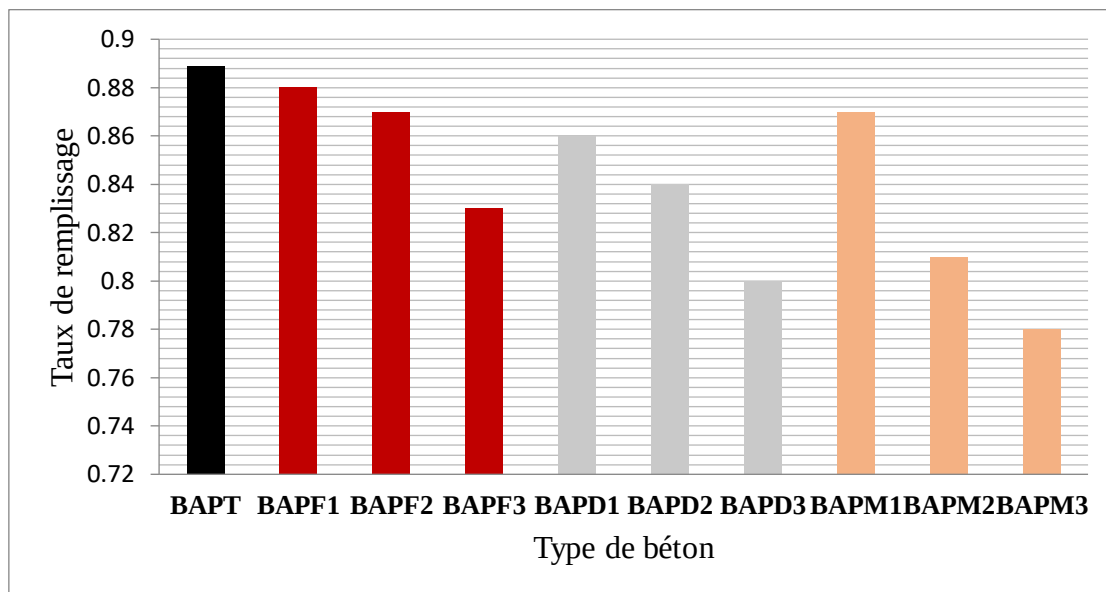


Figure. V. 6 La boîte en « L » en fonction du type de béton

L'essai de la boîte en L est le test qui permet de vérifier la capacité d'un béton à s'écouler dans un milieu confiné. Il apparaît clairement d'après les résultats obtenus sur l'essai de la boîte en L que la grande valeur enregistrée, est au niveau de la composition de BAP témoin et elle diminue avec l'incorporation des fibres.

Tous les mélanges donnent des taux de remplissage qui s'inscrivent dans le domaine des BAP, excepté le BAPM3 qui donne une valeur de 0.78, alors qu'elle doit être supérieure ou égale à 0.8 (AFGC 2008). L'augmentation du dosage des fibres a rendu difficile l'écoulement et a entraîné un blocage du béton surtout pour les BAPF3, BAPD3, BAPM3. On peut noter aussi pour les BAP fibré à des dosages optimums de 0.5%. Mais au-delà de cette teneur, on relève une diminution des taux de remplissage.

B-3) Indice de ségrégation :

Cet essai permet d'étudier la résistance à la ségrégation et au ressuage du BAP, qui doit être stable sous l'effet de la gravité.

Les critères d'acceptabilité d'une formulation sont :

- $0 < P_{\text{laitance}} < 15 \%$ $\Rightarrow$ Stabilité suffisante.
- $15 < P_{\text{laitance}} < 30 \%$ $\Rightarrow$ Stabilité critique.
- $P_{\text{laitance}} > 30$ $\Rightarrow$ Stabilité très mauvaise.

Les résultats obtenus des essais sont représentés la **Figure V.7**.

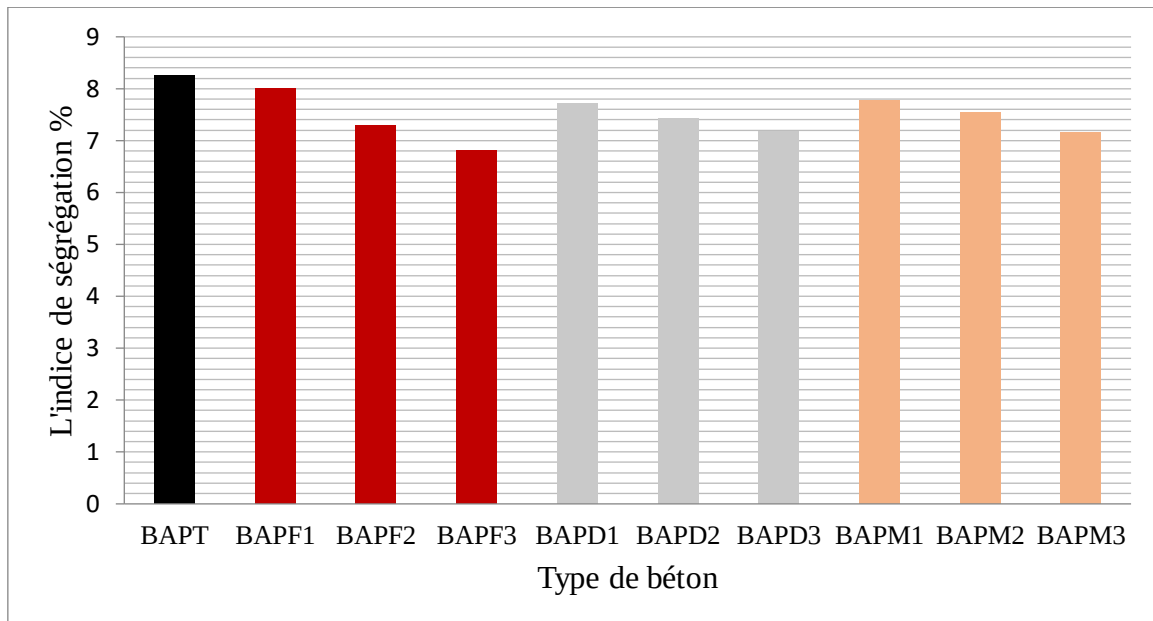


Figure. V. 7 Stabilité au tamis en fonction du type de béton

Les résultats obtenus par l'essai de stabilité au tamis, marquent une amélioration de la stabilité avec l'incorporation des fibres métalliques. La bonne adhérence entre la pâte et les fibres explique ce comportement avantageux.

Le rôle des fibres FIBERTEK A est plus important dans la stabilité de béton à l'état frais. Ce résultat démontre que l'incorporation de la fibre (FIBERTEK A) augmente l'adhérence entre les fibres et la pâte.

B-4) La masse volumique :

Les résultats obtenus sont représentées sur le (Figure V.8).

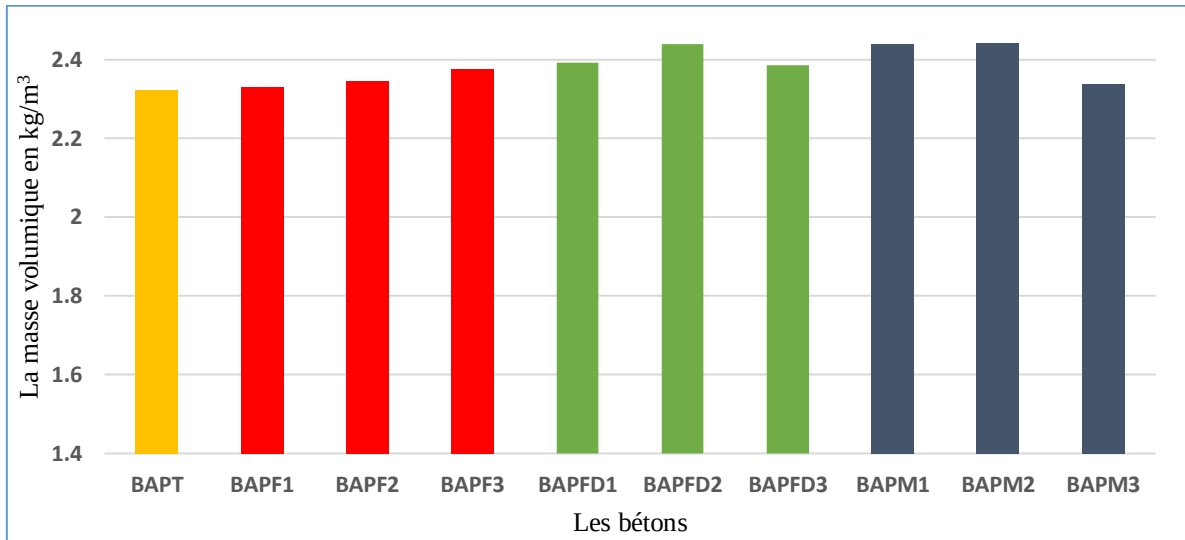


Figure V.8 La masse volumique en fonction du type de béton(BAP)

Comme la montre la **Figure V.8** la masse volumique des BAP fibrés est supérieure à celle du béton témoin ceci est dû à la présence des fibres dans le béton et à leurs masses volumiques qui sont plus importantes que celle des autres composants du béton.

- **Influence des fibres de verre:**

Les compositions des bétons autoplaçants donnent une grande fluidité sans ségrégation et sans ressuage qui constitue d'ailleurs ses spécificités.

L'étude du béton autoplaçant à l'état frais basé sur les essais d'étalement, la boîte en L et stabilité au tamis, donne des résultats qui correspondent aux critères des recommandations provisoires.

C-1) Essai de l'étalement :

La **Figure V.9** illustre les résultats d'essais d'étalement sur des bétons autoplaçants avec des fibres de verre.

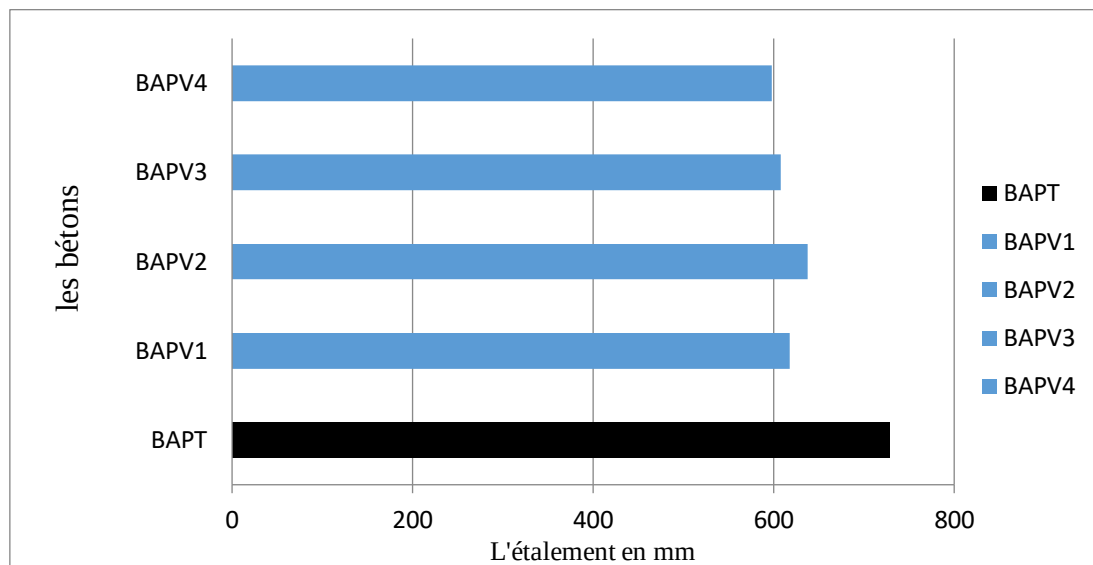


Figure V.9 L'étalement en fonction du type de béton

On a remarqué une réduction des valeurs d'étalement des bétons fibrés dont le pourcentage varie de 0.1% et 0.15% par rapport au béton témoin. Cela peut être expliqué par les effets de frottements entre les fibres et la matrice du béton, ce qui conduit à une diminution de maniabilité ; on remarque aussi que les dimensions de fibre de verre n'ont pas une grande influence sur l'étalement des BAP, tous les BAP fibrés possèdent presque les mêmes étalements.

C-2) Essai de la boîte en L :

Les résultats obtenus à partir d'essais de la boîte en L sont représentés sur la **Figure V.10**.

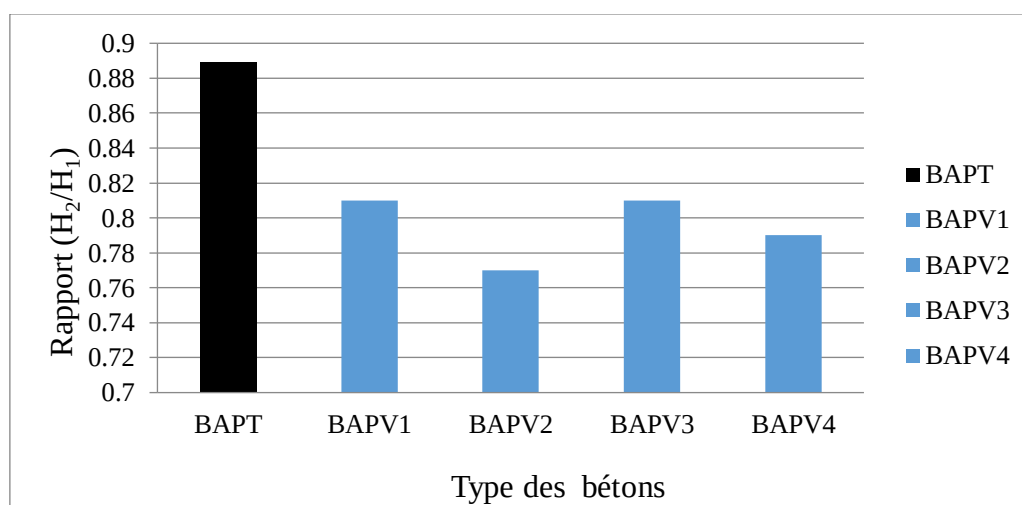


Figure V. 10 La boîte en « L » en fonction du type de béton

Il apparaît clairement d'après les résultats obtenus sur l'essai de la boîte en L que la grande valeur enregistrée est au niveau de la composition de BAP témoin et elle diminue avec l'incorporation des fibres de verre.

Les mélanges le témoin et ceux dosés en 0,1% de fibre de verre donnent des taux de remplissage qui s'inscrivent dans le domaine des BAP, alors que les BAP dosés en 0,15% de fibre de verre donnent des valeurs de 0.77 et 0.79 alors qu'elle doit être supérieure ou égale à 0.8 (AFGC 2008)[7]. L'augmentation du dosage des fibres a rendu difficile l'écoulement et a entraîné un blocage du béton. On peut noter aussi pour les BAP fibré à des dosages optimums de 0.15%. Mais au-delà de cette teneur, on relève une diminution des taux de remplissage.

C-3) Indice de ségrégation :

Les résultats obtenus à partir d'essais de stabilité au tamis sont représentés sur la **Figure V.11**.

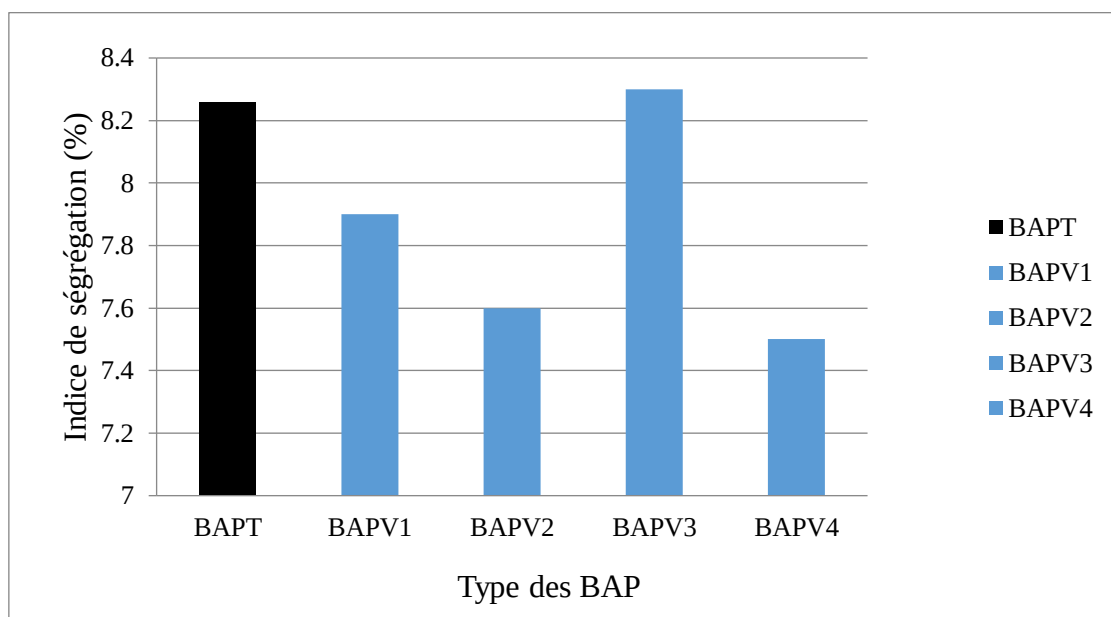


Figure V. 11 Stabilité au tamis en fonction du type de béton

Les résultats obtenus par l'essai de stabilité au tamis, marquent une amélioration de la stabilité avec l'incorporation des fibres de verre. La bonne adhérence entre la pâte et les fibres explique ce comportement avantageux.

Les étalements des bétons autoplaçants testés sont supérieurs à 60 cm, le taux de remplissage de la boîte en L est de l'ordre 80 %, la laitance est inférieure de 15 % selon le critère d'acceptabilité, la stabilité au tamis est considérée comme satisfaisante.

C-4) La masse volumique :

Les résultats obtenus sont représentés sur le (Figure V.12).

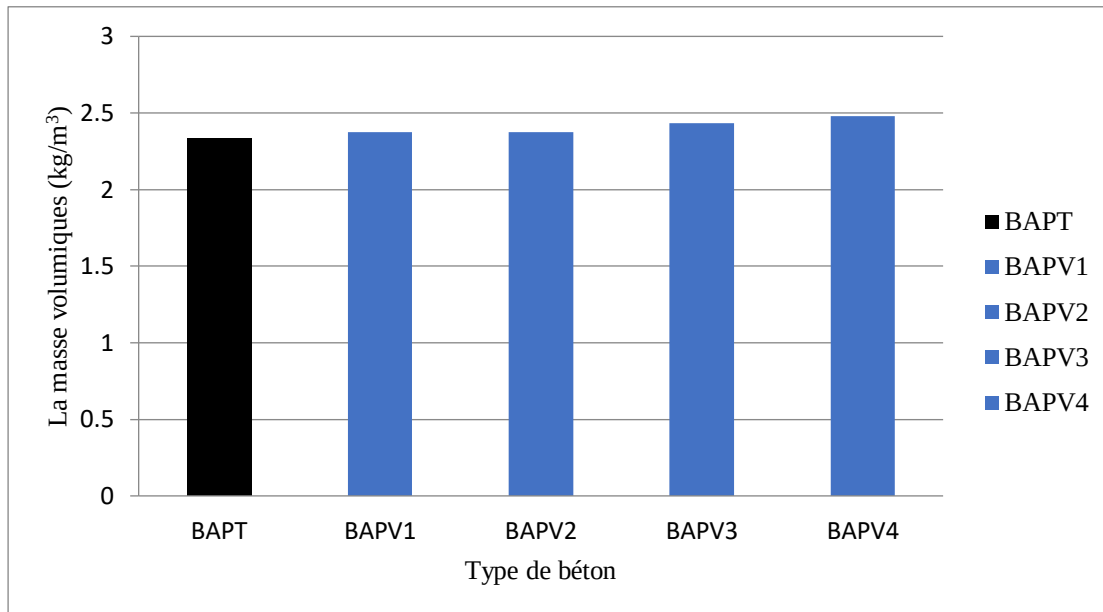


Figure V.12 La masse volumique en fonction des bétons (BAP)

À partir des résultats obtenus (Figure V.12) on constate que la masse volumique des BAP fibrés (avec des fibres de verre) est légèrement supérieure à la masse volumique du béton témoin ceci est dû à la présence des fibres dans le béton et à leurs masses volumiques qui se sont proches de celles des autres composants du béton.

V.2. 2 État durci :

- **Effet de la poudre de marbre sur le béton autoplaçant:**

A) Résistance à la compression :

Cet essai permet de contrôler la qualité du béton durci. Il s'agit des essais les plus courants.

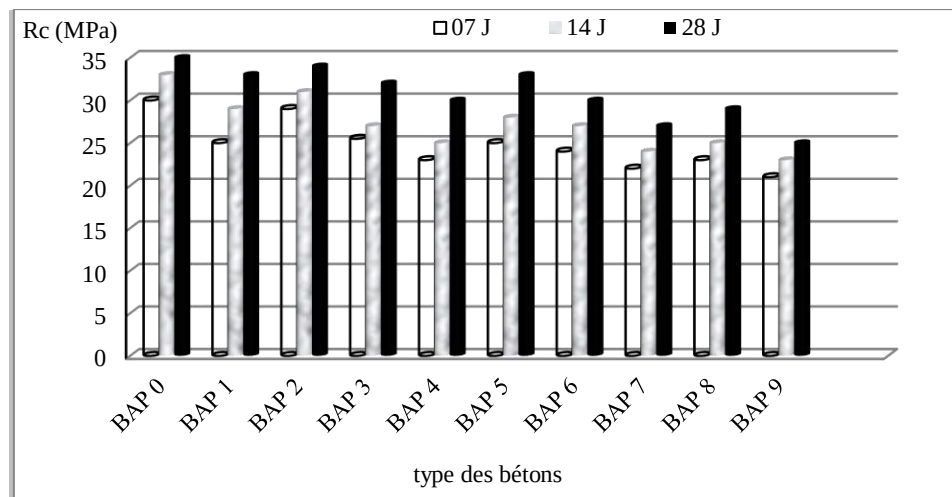


Figure V. 13 La résistance à la compression en fonction des bétons (BAP)

On observe que pour tous les BAP la résistance à la compression augmente avec l'âge de ces derniers.

On remarque que l'augmentation du rapport $F/C=20\%$ augmente la résistance à la compression des BAP par rapport au $F/C = 10\%$ et $F/C=30\%$.

Les résistances en compression des BAP avec ajout de filler de marbre sont inférieures à celles de BAP témoin à l'âge de 7, 14 et 28 jours pour les trois rapports E/C et tous les F/C , cette diminution de la résistance en compression se traduit par le fait que la teneur des BAP en produits inertes a augmenté.

On sait que plus le rapport E/C augmente et plus la résistance en compression diminue et ceci est en accord avec nos résultats, néanmoins la résistance de BAP témoin reste élevée par rapport à ceux contenant du filler de marbre.

Le filler de marbre ne manifeste aucune activité qui contribue à la résistance en compression. Mais il permet d'obtenir des BAP de performances acceptables. (Belaidi et al, 2012)[63]

B) Résistance à la traction :

Cet essai permet de contrôler la qualité du béton; il donne une indication sur la résistance à la traction par flexion du béton et donc sur sa résistance à la fissuration.

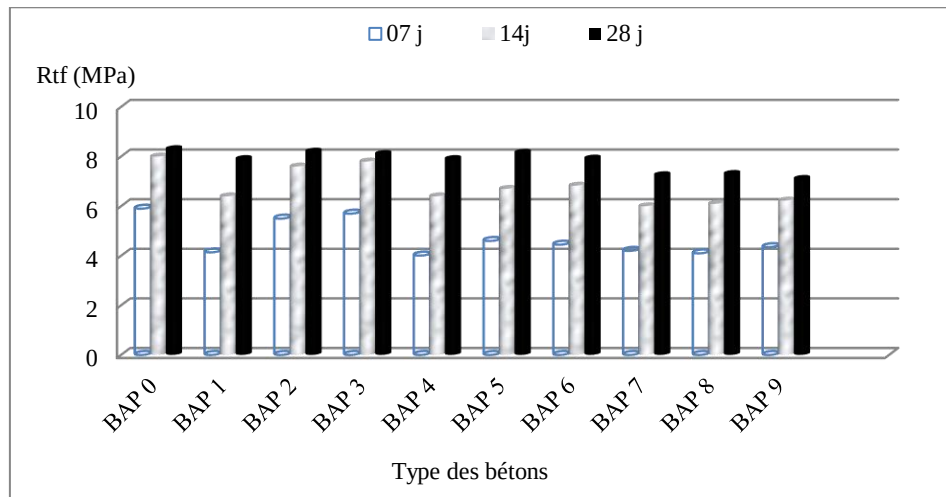


Figure V. 14 La résistance à la traction en fonction des bétons (BAP).

On remarque que l'augmentation du rapport $F/C=20\%$ augmente la résistance à la traction des BAP par rapport au $F/C = 10\%$ et $F/C=30\%$.

L'ajout de filler de marbre diminue la résistance à la traction à celle de BAP témoin à l'âge de 7,14 et 28 jours pour les trois rapports E/C et tous les F/C .

Et comme pour la résistance à la compression tout ça se traduit par le fait que la teneur des BAP en produits inertes a augmenté.

L'augmentation de la teneur en poudre de marbre à 30% entraîne une diminution dans les résistances mécaniques.

C) La porosité:

Les résultats obtenus sont représentés sur la figure suivante :

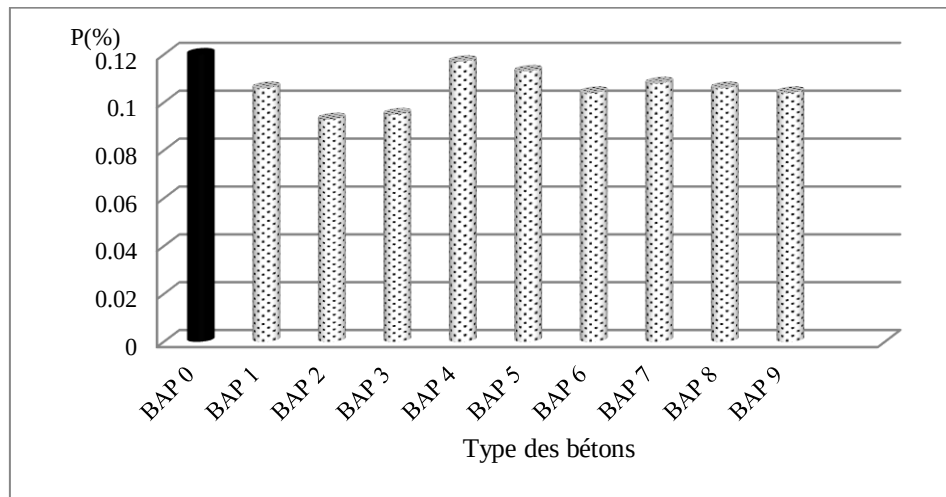


Figure V. 15 La porosité en fonction des bétons (BAP)

On constate que l'augmentation du dosage en filler de marbre s'accompagne d'une diminution de la porosité du béton à 10% de filler par rapport au béton témoin à cause de la grande homogénéité et de la faible teneur en air.

- **Influence des fibres métalliques :**

A) Résistance à la compression :

Parmi toutes les sollicitations mécaniques, la résistance du béton en compression a été la plus étudiée, vraisemblablement parce qu'elle projette généralement une image globale de la qualité du béton, puisqu'elle est directement liée à la structure de la pâte de ciment hydratée.

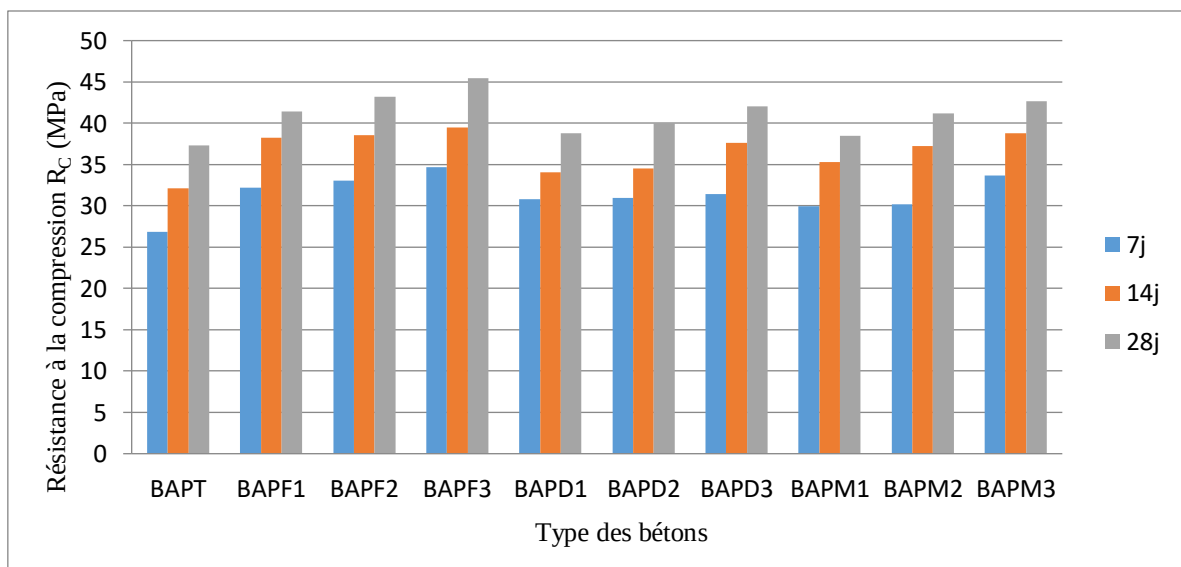


Figure V. 16 Evolution de la résistance à la compression des BAP en fonction de durée de conservation

Nous remarquons que les BAP avec fibres à crochet longues sont nettement plus résistants que celles des BAP de fibres métalliques pour toutes les échéances et cette différence est attribuée aux propriétés mécaniques des fibres. Les fibres métalliques assurent un retardement de l'apparition de la première fissure et une efficacité dans la restriction et ceci grâce à leur bonne adhérence mais leur module d'élasticité qui n'est pas élevé les rend moins rentables. Les fibres à crochet avec un module d'élasticité élevé procurent une réserve de sécurité importante pour les BAP.

L'association des fibres à crochet et des fibres métalliques (BAPD) qui sont à bas prix et disponibles sur le marché algérien entraîne une amélioration des résistances mécaniques par rapport au BAPD pour tous les dosages et pour toutes les échéances. Alors pour l'hybridation des fibres, les essais en compression ont montré que l'association des fibres apportait à la fois un gain de ductilité et une augmentation résistance.

B) Résistance à la traction :

Les résultats obtenus à partir d'essais de traction par flexion sont représentés sur la **Figure V.17**.

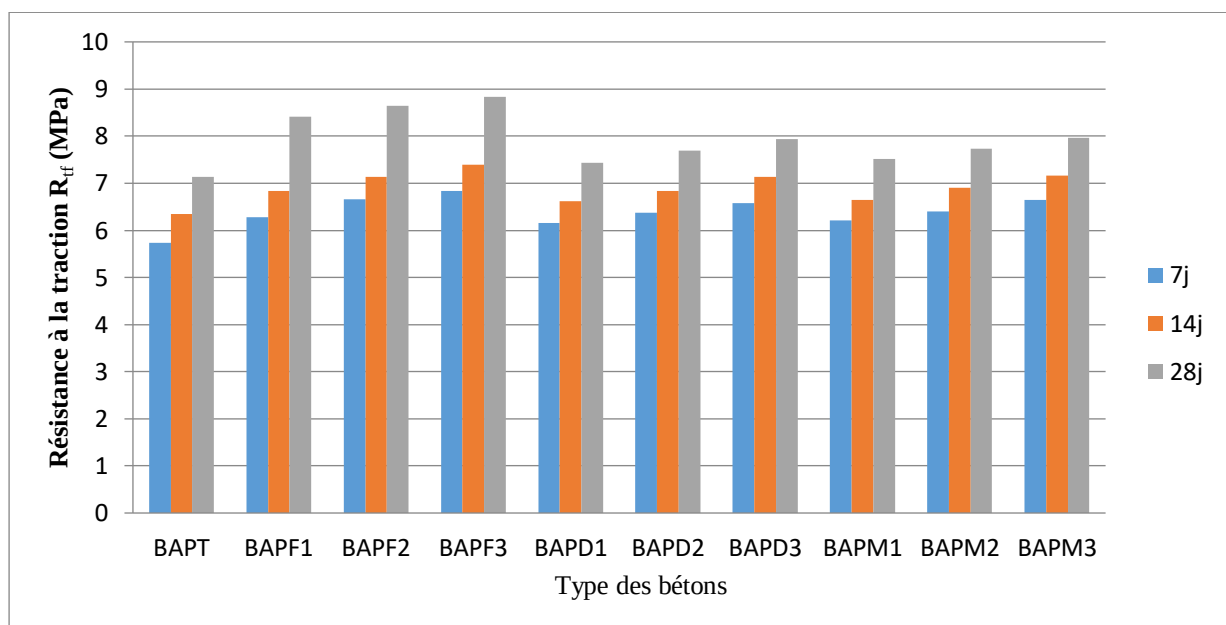


Figure V. 17 Evolution de la résistance à la traction par flexion des BAP en fonction de durée de conservation

D'après les résultats l'utilisation des fibres métalliques et grâce à leurs bonnes adhérences améliore la résistance à la flexion des BAPD (de 11.06% à 28 jours pour le dosage de 0.5%).

Le mélange des fibres améliore la résistance à la flexion des BAPM (de 11.48 % à 28 jours pour le dosage de 0.5%).

On remarque que la résistance à la traction par flexion du BAPF est supérieure à celle du BAPD et BAPM. Ceci est dû essentiellement à l'élancement et la nature des fibres utilisées.

- **Influence des fibres de verre :**

A) Résistance à la compression :

Les résultats obtenus à partir d'essais de compression sont représentés sur la **Figure V.18**.

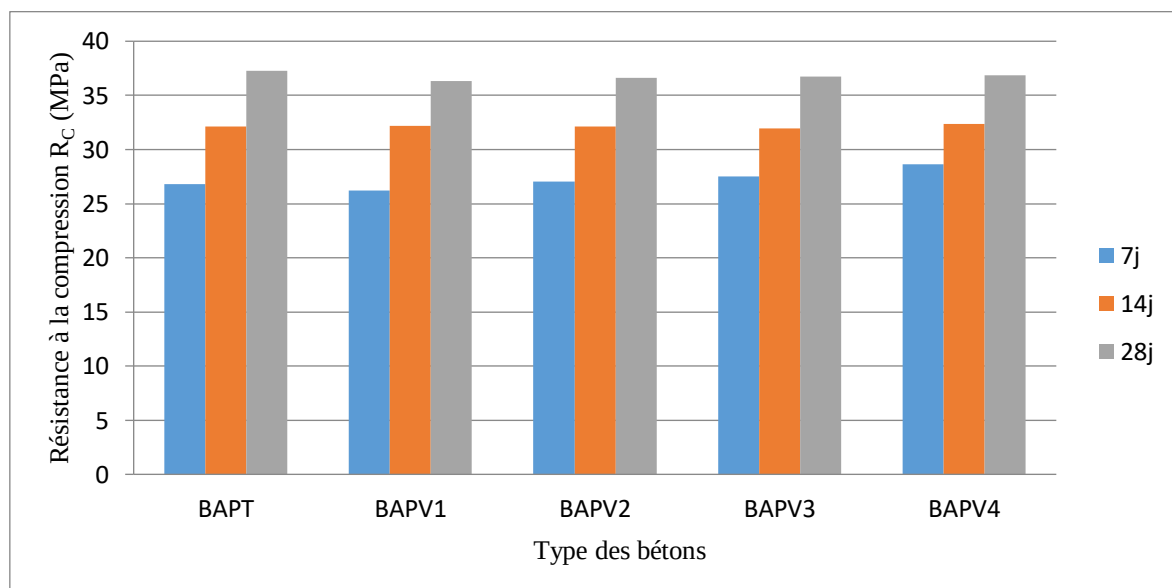


Figure V. 18 Evolution de la résistance à la compression des BAP en fonction de durée de conservation

D'après les résultats inscrits dans la figure ci-dessus on constate une légère amélioration de résistance à la compression dans la formulation contenant des fibres de verre longues, et pour celle qui contiennent des fibres de verre courtes.

B) Résistance à la traction :

Les résultats obtenus à partir d'essais de traction par flexion sur des éprouvettes des BAP renforcés par des fibres de verre sont représentés sur la **Figure V.19**.

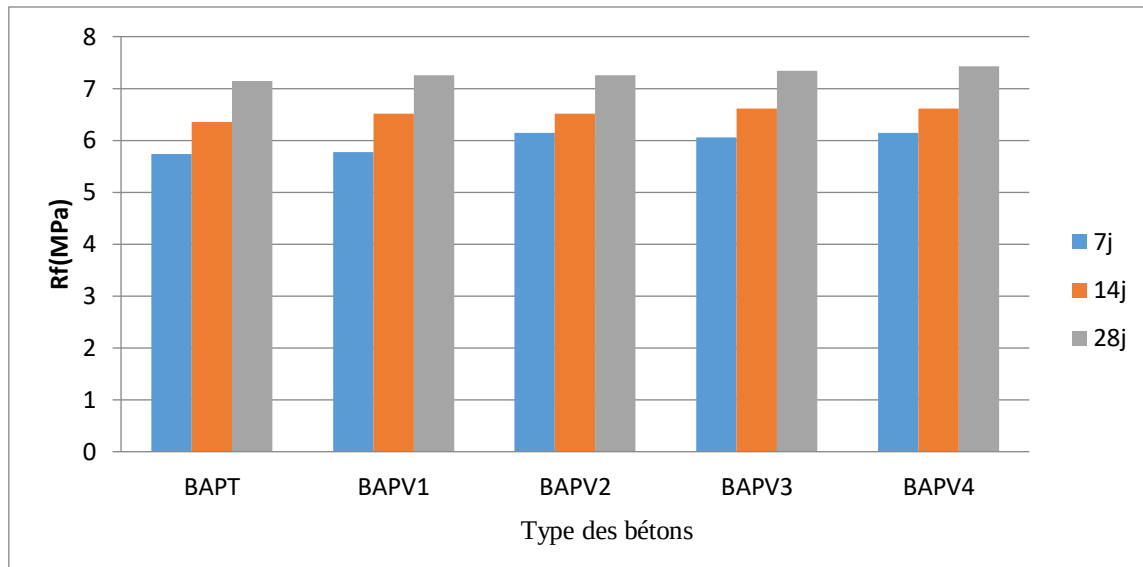


Figure V. 19 Evolution de la résistance à la traction par flexion des BAP en fonction de durée de conservation

Concernant la résistance à la flexion il y a une légère augmentation de résistance pour la formulation qui contient des fibres de verre longues, et pour celle qui contient des fibres de verre courtes et les résultats obtenus montrent que les améliorations des fibres courtes sont meilleures que celles des fibres longues. Donc les dimensions des fibres de verre jouent un rôle important dans l'amélioration des propriétés mécaniques des bétons autoplacants et la performance du béton autoplacant avec fibres courtes mieux qu'à fibres longues, et cela est confirmé par de nombreux chercheurs comme DREUX et al [86] qui ont prouvé une légère augmentation de la résistance lors de l'utilisation des fibres courtes en raison de leurs meilleures homogénéités dans la matrice béton.

V.2. 3 L'effet des températures élevées:

Les formulations des bétons étudiés ont été confectionnées en éprouvettes cubiques ($10 \times 10 \times 10$) cm³ et prismatiques ($7 \times 7 \times 28$) cm³.

Nous suivons les démarches suivantes :

- Les éprouvettes ont été conservées à l'eau pendant 30 jours à une température ambiante de 20°C.
- Passage de toutes les éprouvettes à l'étuve jusqu'à la stabilisation de leur masse à une température de 100±5°C.
- Exposition des éprouvettes à des températures élevées de 200°C, 400°C et 600°C avec une vitesse de montée en température de 10°C/min et un maintien en température dans le four à moufle pendant 1heure.

Le procédé expérimental appliqué repose sur un chargement thermique puis mécanique (l'écrasement).

Les résultats de la résistance à la compression, la résistance à la traction par flexion, module d'élasticité, perte de masse et porosité des BAP exposées à l'effet de températures 20°C (ambiante), 200°C, 400°C et 600°C sont présentés dans les points suivants :

- **Sur les BAP avec les fibres métalliques :**

A) Résistance à la compression :

Après les chargements thermiques les essais de la résistance à la compression ont été effectués et les résultats sont présentés sur la **Figure V. 20**.

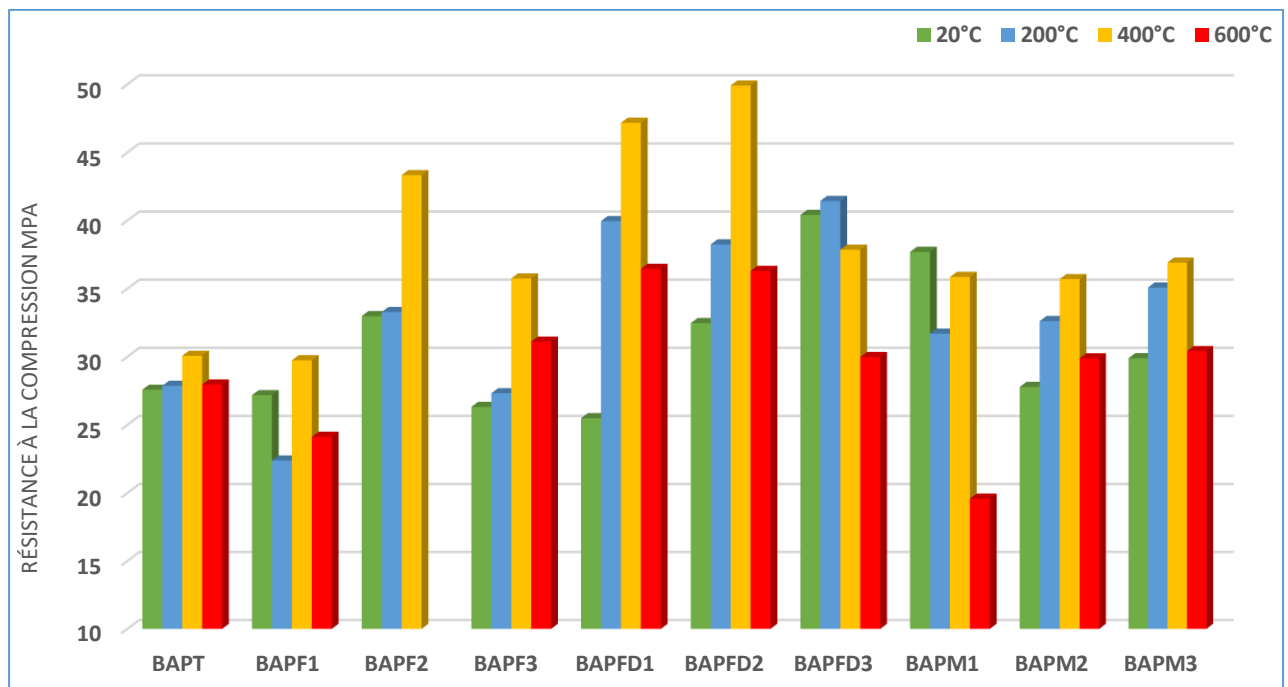


Figure V. 20 Évolution de la résistance à la compression des BAP en fonction des températures

Le comportement des BAP fibré exposé aux hautes températures est similaire de celui du BAP témoin. Pour tous les BAP, on observe après une diminution modérée de la résistance entre 20°C et 200°C, une augmentation importante de la résistance en compression entre 200°C et 300°C. Au-delà de 300°C, on observe une diminution importante de la résistance en compression relative pour tous les bétons. À 600°C, les valeurs de résistance sont très faibles.

Le gain de résistance entre 200°C et 400°C peut être expliqué par une hydratation supplémentaire de la matrice cimentaire due à la migration de l'eau déliée dans les pores.

Ce gain de résistance entre 200°C et 400°C pour les BAP fibrés peut-être expliqué par cette hydratation supplémentaire de la matrice cimentaire et aussi peut être expliqué par la dilatation des fibres qui diminue la porosité parce qu'on a remarqué ce gain de plus dans le cas des BAP à fibres métalliques BAPD.

Au-delà de 400°C, le béton témoin présente une baisse de résistance importante due aux quantités importantes de microfissures. À 600°C, la baisse de résistance est due à une dégradation couplée de la matrice cimentaire et à une désagrégation des granulats causant une fissuration importante. Pour les BAP fibrés la baisse de résistance est moins importante que celle du béton témoin et les valeurs de résistance à 600 °C ne sont pas très faibles que ce dernier. Alors on peut dire que les fibres ont un effet positif sur la résistance à la compression des BAP exposés à hautes températures.

Pour les éclatements observés pour le BAPF2 entre 400°C et 600°C on peut dire que les BAP présentent des risques d'instabilité thermique.

B) Résistance à la traction :

Après les chargements thermiques des essais de traction par flexion ont été aussi effectués et les résultats sont présentés sur la **Figure V. 21**.

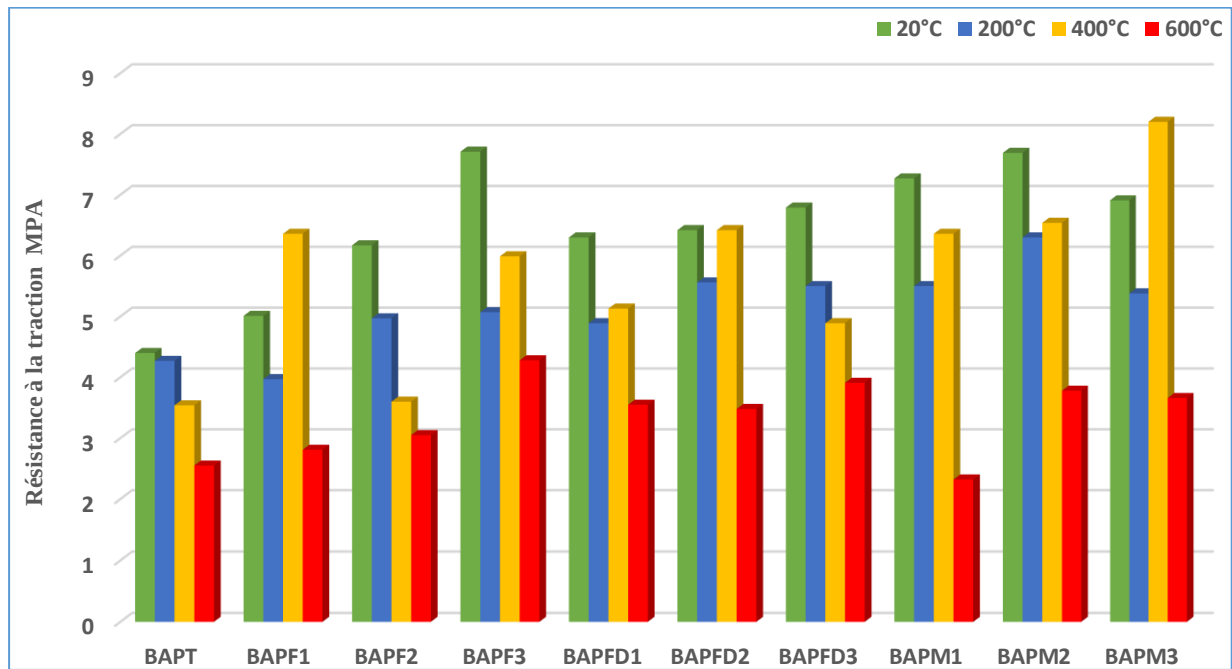


Figure V. 21 Évolution de la résistance à la traction par flexion des BAP en fonction des températures

Comme le montre la **Figure V. 21** le comportement des BAP fibré exposé aux hautes températures diffère de celui du BAP témoin. Pour ce dernier, on observe une décroissance monotone de la résistance à la traction.

Les résistances à la traction de béton témoin diminuent de manière continue avec l'élévation de la température, ceci est expliqué par l'apparition de fissures. Cette décroissance est tout d'abord modérée puis s'accélère à partir de 400°C. En revanche, pour les BAP fibrés, après une diminution modérée de résistance entre 20°C et 200°C, on observe une augmentation importante de la résistance à la traction entre 200°C et 400°C. Au-delà de 400°C, on observe une diminution importante de la résistance à la traction relative pour tous les bétons. À 600°C, les valeurs de résistance à la traction sont très faibles.

C) Module d'élasticité :

Le module d'élasticité a été calculé à partir de formule réglementaire $E_{ij} = 11000 f_{Cj}^{1/3}$

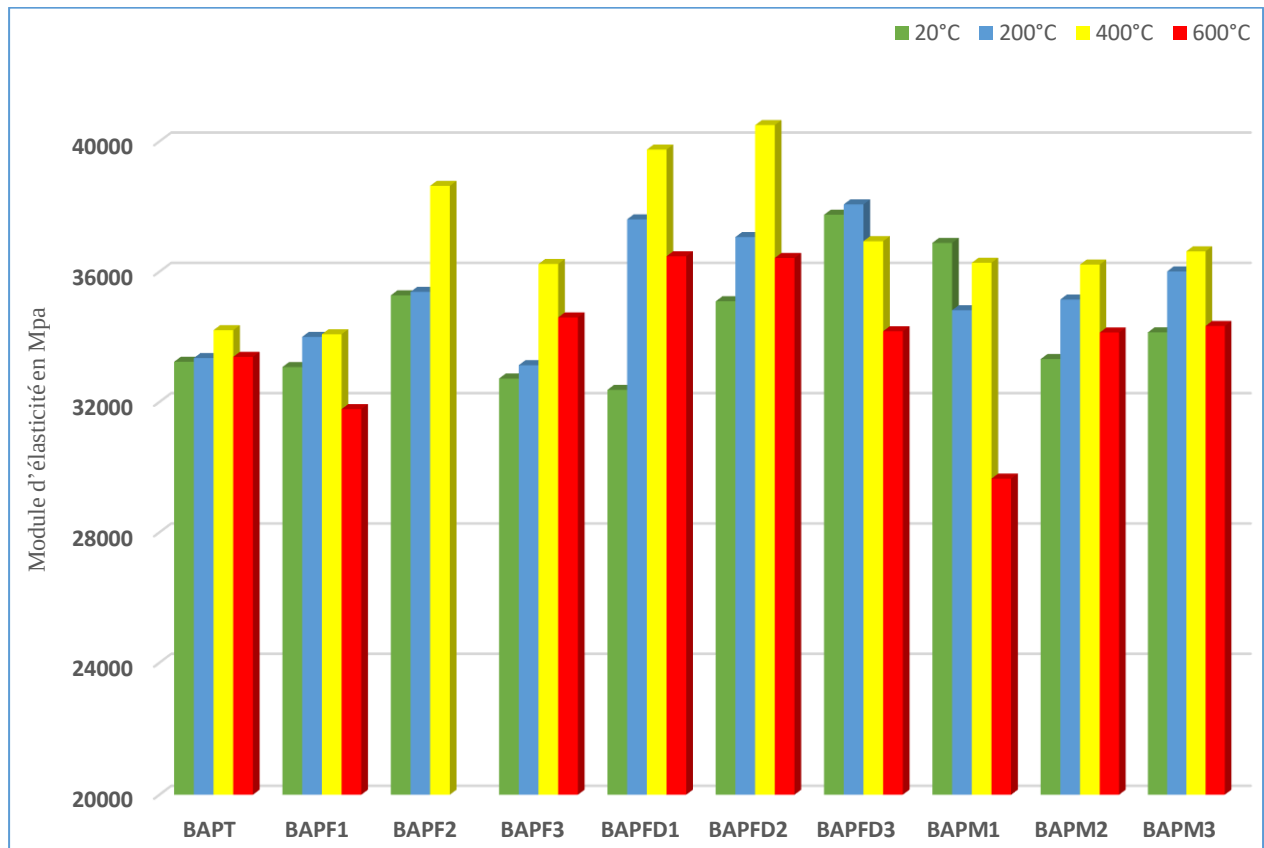


Figure V. 22 Évolution de module d'élasticité des BAP en fonction des températures

Comme l'illustre la **Figure V. 22**, quels que soit le type de béton et la température, le module d'élasticité change selon la résistance à la compression de 28 jours f_{c28} .

D) La porosité :

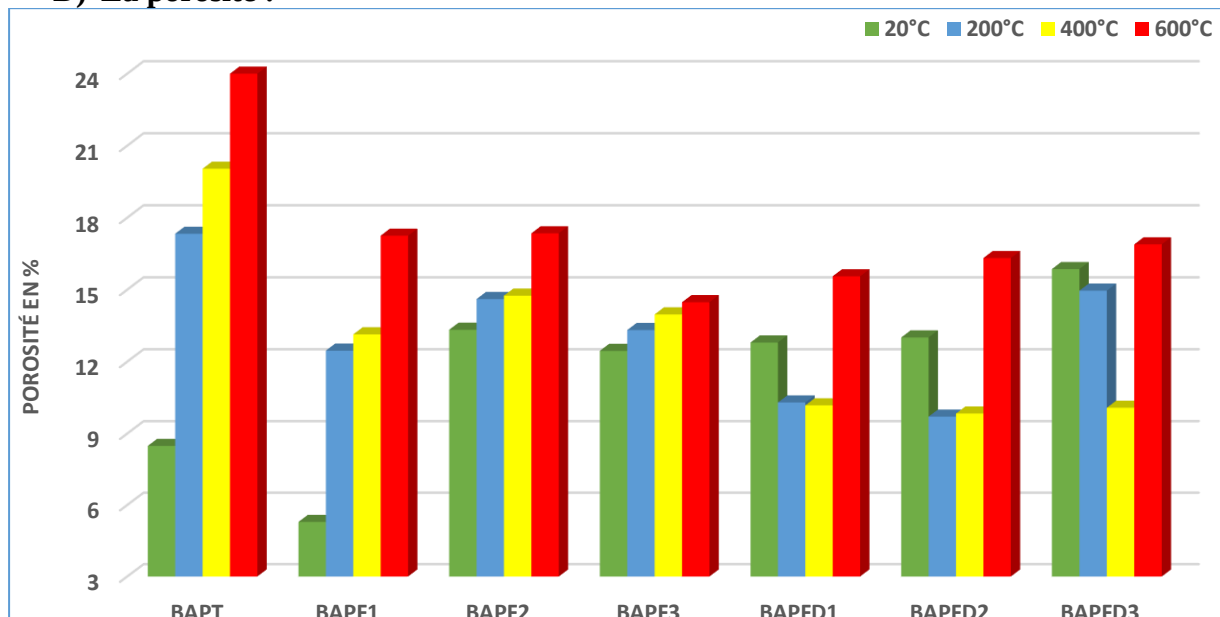


Figure V. 23 Évolution de la porosité des BAP en fonction des températures

À partir des résultats obtenus (**Figure V. 23**) on observe que les bétons autoplaçants à 20 °C (la température ambiante) présentent une faible porosité. Cela est dû à la forte homogénéité et reproductibilité des BAP.

On observe pour tous les bétons une augmentation monotone de la porosité avec la température. On peut expliquer ça par le départ de l'eau adsorbée des pores.

E) La perte de masse :

La perte de masse sert à quantifier l'eau sortant du matériau.

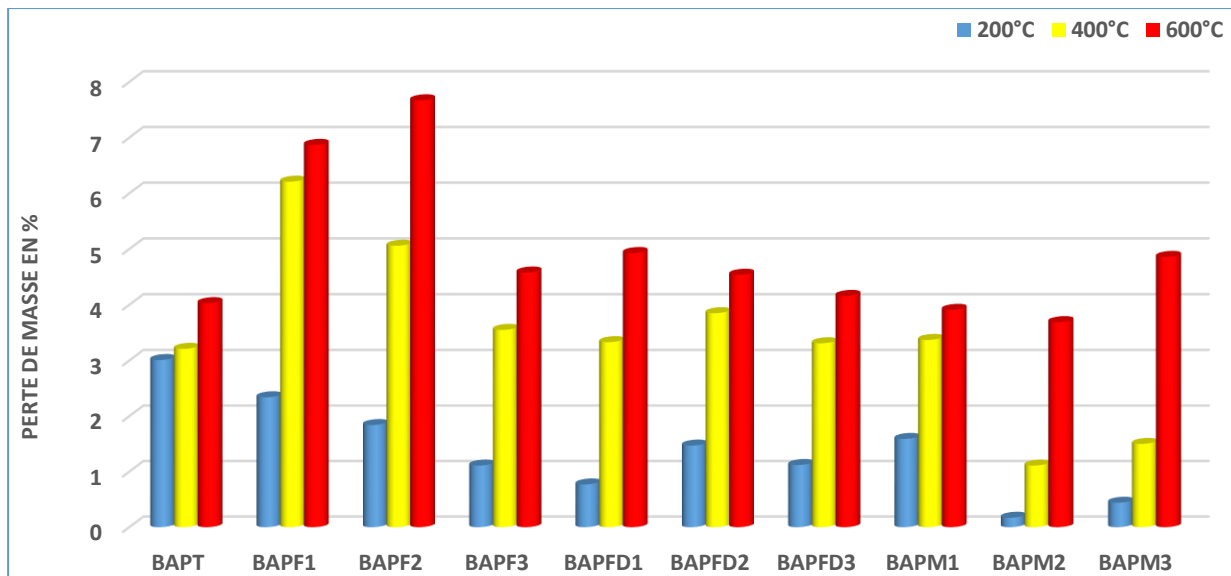


Figure V. 24 Évolution de la perte de masse des BAP en fonction des températures

De la **figure V.24** on observe que durant l'échauffement du béton, la masse du béton diminue à cause de l'évaporation de l'eau et la déshydratation progressive des hydrates de la pâte de ciment.

- **Pour les BAP avec les fibres de verre :**

A) Résistance à la compression:

Après les chargements thermiques des essais de résistance à la compression ont été effectués et les résultats sont présentés sur la **Figure V. 25**.

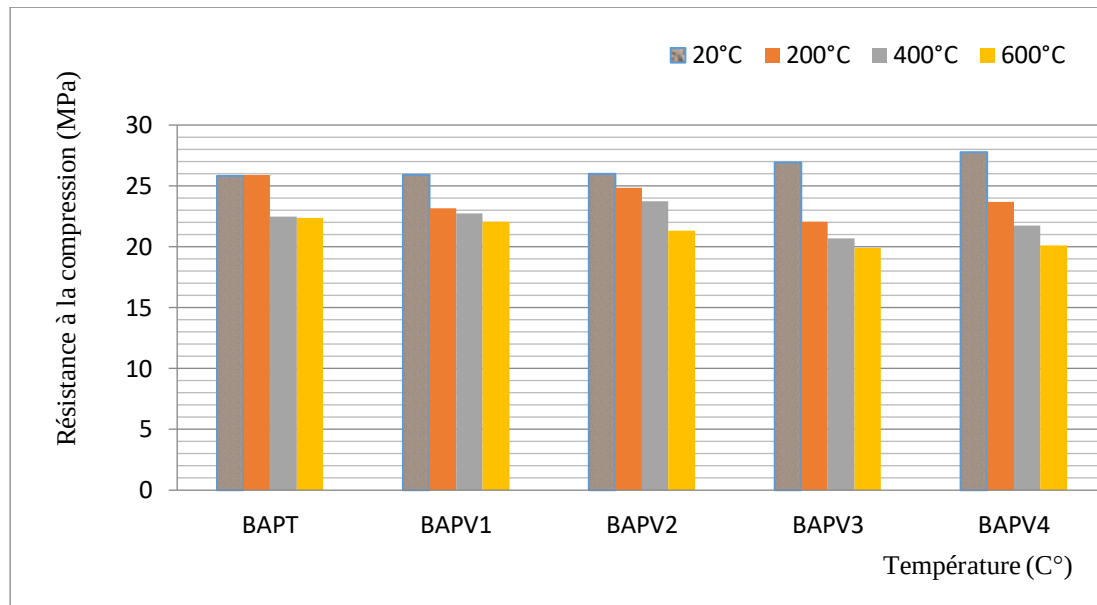


Figure V. 25 La résistance à la compression des différents types de béton en fonction de température

La **figure V.25** montre qu'il est possible d'obtenir en température ambiante un béton autoplaçant fibré dont la résistance supérieure à 28 jours est similaire à celle de béton autoplaçant témoin (supérieure à 28 jours aussi) avec le même dosage en ciment et même rapport E/C c'est-à-dire même résistance et plus de fluidité et facilité de mise en œuvre.

En comparant la résistance à la compression des BAP on voit clairement que la résistance de BAPV1 est supérieure à la résistance de BAPV2 et la résistance de BAPV3 est supérieure à la résistance de BAP4 tous ça est liée au dosage en fibres.

Le comportement des BAP fibrés exposés aux hautes températures diffère de celui du BAP témoin. Pour ce dernier, on observe une décroissance monotone de la résistance en compression. Cette décroissance est tout d'abord modérée puis s'accélère à partir de 300°C. En revanche, pour les BAP, une diminution modérée et importante de la résistance en compression relative pour tous les bétons. À 600°C, les valeurs de résistance sont très faibles.

B) Résistance à la traction :

Après les chargements thermiques des essais de traction par flexion ont été aussi effectués et les résultats sont présentés sur la **Figure V. 26**.

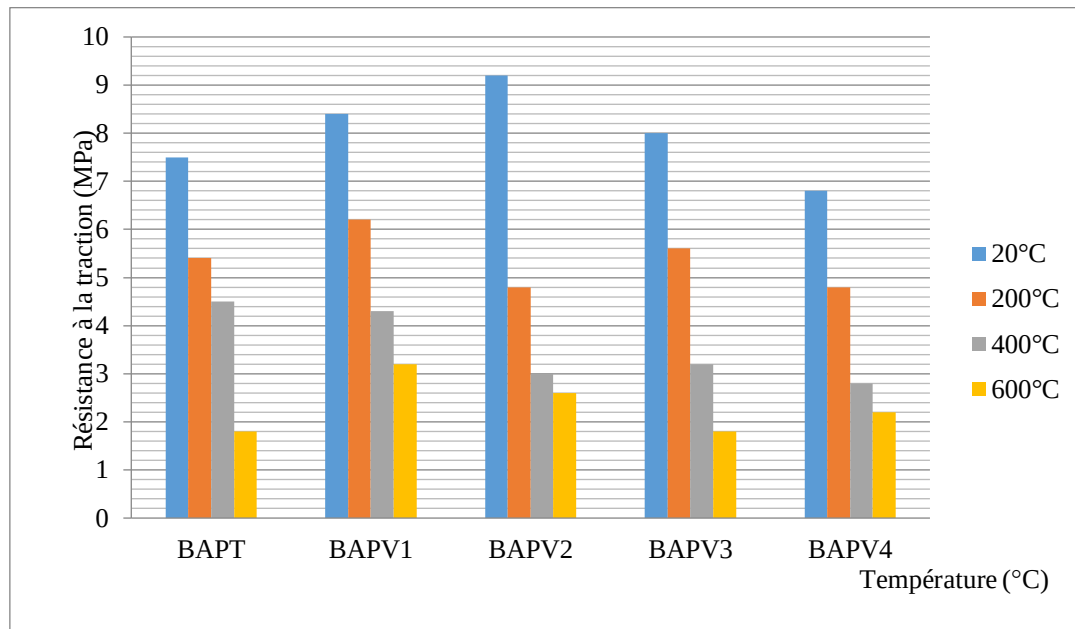


Figure V. 26 La résistance à la traction en fonction de température

La figure V.26 présente la variation de la résistance à la traction en fonction de la température. Les résistances à la traction des bétons testés diminuent de manière continue avec l'élévation de la température. Nous pouvons conclure que l'évolution de la résistance à la traction avec la température est la même pour tous les bétons étudiés.

Contrairement aux résistances à la compression, on observe une diminution des résistances à la traction des BAP testés. Ceci est expliqué par l'apparition de fissures lors de la montée en température.

Et comme nous le savons le degré de fissuration a une influence plus importante sur la résistance en traction qu'en compression, et une fois que la fissuration apparaît, la dégradation de BAP (du point de vue résistance à la traction) se développe et continue jusqu'à la ruine.

C) La porosité :

La mesure de la porosité à l'eau est un paramètre important qui permet de caractériser le réseau poreux des bétons testés.

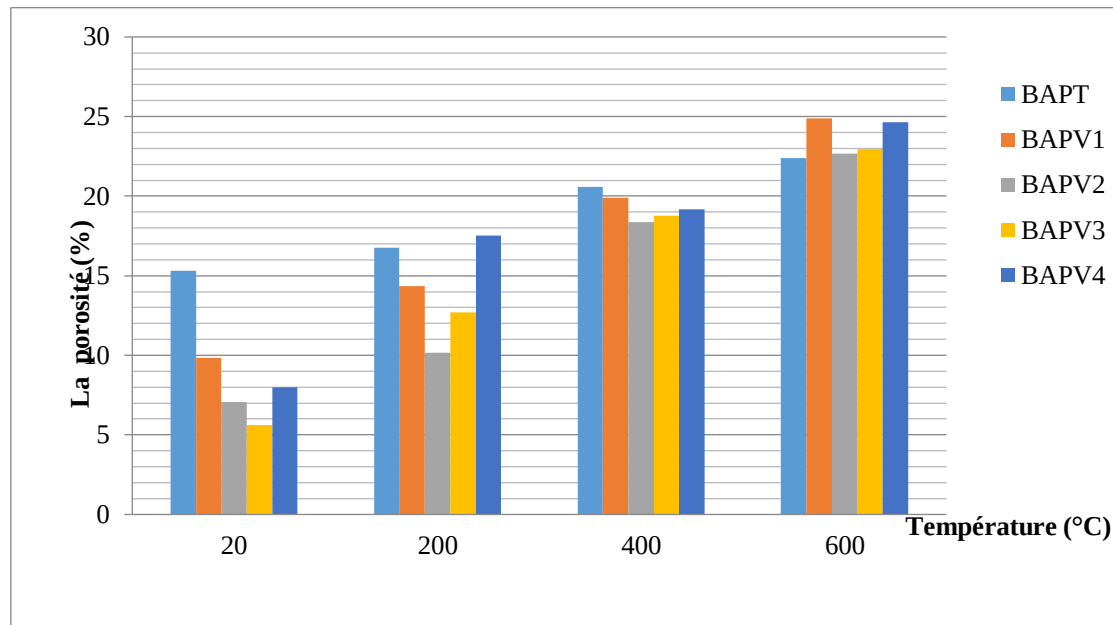


Figure V. 27 Porosité des différents bétons en fonction de la température.

A partir des résultats obtenus on observe que les bétons autoplaçant à 20 °C (la température ambiante) présentent une faible porosité. Cela est dû à la forte homogénéité et reproductibilité des BAP.

On observe pour tous les bétons une augmentation monotone de la porosité avec la température. On peut expliquer ça par le départ de l'eau adsorbée des pores. Les fibres de verre n'influent pas sur la porosité des BAP exposés à haute température.

Conclusion :

D'après les résultats expérimentaux obtenus, on peut dire que notre béton est caractérisé comme un béton autoplaçant selon les critères de l'AFGC, qui présente un étalement compris entre (600 à 750mm) et un rapport de la boîte supérieure à 0.8 et une stabilité en tamis inférieure à 15%.

L'introduction des fibres diminue les caractéristiques rhéologiques mais les résultats sont acceptables, l'augmentation de la masse volumique est fonction du pourcentage des fibres.

Pour l'état durci les propriétés mécaniques et physiques sont influencées fortement par la température, le BAP avec fibre présente un comportement plus acceptable que le BAP sans fibre.

En traction les fibres jouent un rôle très important dans l'amélioration du comportement sous l'effet de la température appliquée.

L'augmentation de la porosité est essentiellement liée à l'ouverture de microfissures engendrée par la dilatation entre pâte et granulats. L'incorporation de la fibre métallique dans le béton diminue la porosité.

La perte de masse de BAP et BAPF augmente en fonction de la température, l'utilisation des fibres diminue légèrement la perte de masse.

Conclusion générale

Conclusion générale

Le premier objectif de ce travail de thèse était de comprendre l'influence des principaux constituants sur le comportement des bétons autoplaçants à l'état frais et à l'état durci, et optimiser une formulation de béton autoplaçant à base de poudre de marbre. Le deuxième objectif était d'étudier l'influence d'incorporation des fibres sur le comportement d'un BAP et chercher à comparer le comportement vis-à-vis les hautes températures des BAP à celle des BAP fibrés.

Afin de répondre à ces préoccupations, un programme expérimental a été mis en place. Plusieurs enseignements ont été tirés :

À l'état frais

Les propriétés à l'état frais des bétons autoplaçants avec la substitution de ciment par la poudre de marbre ont été discutées et analysées; les essais d'étalement, la boîte en L et l'essai de stabilité au tamis, donnent des résultats qui correspondent aux critères des recommandations en vigueur et elles sont en corrélation avec les études précédentes sur le sujet. Les points tirés de cette étude sur la substitution des poudres de marbre dans le cas des bétons autoplaçants sont énumérés ci-dessous :

- Le remplacement d'une partie du ciment à un dosage de poudre de marbre qui peut atteindre 30% n'affecte en rien la mobilité du béton en un milieu confiné, quelque soit le rapport E/C.
- Pour un même rapport E/C, la substitution d'une partie du ciment par le filler de marbre affaiblit l'étalement du béton, par rapport au béton témoin et en augmentant le dosage en poudre de marbre l'étalement des BAP augmente mais reste inférieur à celui du BAP témoin.
- Le béton témoin et les bétons de poudre de marbre présentent une stabilité suffisante.

Les propriétés à l'état frais des bétons (BAP) avec l'incorporation de fibres ont été aussi discutées et analysées. Les résultats tirés de cette étude sur l'incorporation de fibres sont cités ci-dessous :

- On a remarqué une légère réduction des valeurs d'étalement des bétons fibrés par rapport au béton témoin. Cela peut être expliqué par les effets de frottements entre les fibres et la matrice du béton, ceci conduit à une diminution de maniabilité.
- L'influence des fibres métalliques sur l'écoulement des bétons est fonction de leur dosage et de leur type.
- D'après les résultats obtenus par l'essai de la boîte en L, la grande valeur enregistrée, est au niveau de la composition de BAP témoin et elle diminue avec l'incorporation des fibres.
- Les résultats obtenus par l'essai de stabilité au tamis, marquent une amélioration de la stabilité avec l'incorporation des fibres. La bonne adhérence entre la pâte et les fibres explique ce comportement avantageux.

À l'état durci :

Les principales conclusions sont les suivantes :

- Les BAP avec fibres à crochet sont plus résistants que ceux des BAP de fibres métalliques et cette différence est attribuée aux propriétés mécaniques des fibres. Les fibres métalliques assurent un retardement de l'apparition de la première fissure et une efficacité dans la restriction et ceci grâce à leur bonne adhérence.
- L'association des fibres à crochet et les fibres métalliques (BAPD) qui sont à bas prix entraîne une amélioration des résistances mécaniques par rapport au BAPD. Alors pour l'hybridation des fibres, les essais en compression ont montré que l'association des fibres apportait à la fois un gain de ductilité et une augmentation de résistance.
- Les dimensions des fibres de verre jouent un rôle important dans l'amélioration des propriétés mécaniques des bétons autoplaçants et la performance du béton autoplaçant avec fibres courtes est meilleure que celle avec fibres longues.
- Le comportement des BAP fibrés exposés aux hautes températures est similaire de celui du BAP témoin. Pour tous les BAP, on observe après une diminution modérée de résistance entre 20°C et 200°C, une augmentation importante de la résistance en compression entre 200°C et 300°C. Au-delà de 300°C, on observe une diminution importante de la résistance en compression relative pour tous les bétons. A 600°C, les valeurs de résistance sont faibles.

Le gain de résistance entre 200°C et 400°C peut-être expliqué par une hydratation supplémentaire de la matrice cimentaire due à la migration de l'eau déliée dans les pores.

Ce gain de résistance entre 200°C et 400°C pour les BAP fibrés peut être expliqué par cette hydratation supplémentaire de la matrice cimentaire et aussi peut-être expliqué par la dilatation des fibres (fibres métalliques) qui diminue la porosité.

- Les résistances à la traction de béton témoin diminuent de manière continue avec l'élévation de la température, ceci est expliqué par l'apparition de fissures. Cette décroissance est tout d'abord modérée puis s'accélère à partir de 400°C. En revanche, pour les BAP fibrés, après une diminution modérée de résistance entre 20°C et 200°C, on observe une augmentation importante de la résistance à la traction entre 200°C et 400°C. Au-delà de 400°C, on observe une diminution importante de la résistance à la traction relative pour tous les bétons.

- À la traction les fibres jouent un rôle très important dans l'amélioration du comportement sous l'effet de la température appliquée.
- L'augmentation de la porosité est essentiellement liée à l'ouverture de microfissures engendrée par la dilatation entre pâtes et granulats. L'incorporation de la fibre métallique dans le béton diminue la porosité.
- La perte de masse de BAP et BAPF augmente en fonction de la température, l'utilisation des fibres diminue légèrement la perte de masse.

Il serait souhaitable de prolonger cette étude par quelques perspectives :

- ✓ Approfondir cette étude à l'échelle microscopique,
- ✓ Etudier la durabilité des bétons autoplaçants fibrés après sollicitation thermique.

Références bibliographiques

Références

- [1] Mohamed Rissel Khelifa, «Effet de l'attaque sulfatique externe sur la durabilité des bétons autoplaçants», Thèse de doctorat, Université de Constantine et Orleans soutenue le 20 juin 2009.
- [2] Stéphan Assié, « durabilité des bétons autoplaçants», Thèse de doctorat, l'institut national des sciences appliquées de Toulouse soutenue le 29 octobre 2004.
- [3] Cléo Laneyrie, «Valorisation des déchets de chantier du BTP : comportement à haute température des bétons de granulats recyclés », Thèse de doctorat en Génie Civil, Ecole doctorale de Sciences et Ingénierie Université de Cergy-Pontoise, le 15 décembre 2014.
- [4] Okamura H. et al., "Self-compacting high performance concrete", Proceeding of the Fifth EA SEC, vol.3, pp.2381-2388, 1995.
- [5] Okamura h, Ouchi m., "Self-compacting concrete. Development present use and future", First International RILEM symposium on self-compacting concrete. Rilem Publication s.a.r.l, 3 14, 1999.
- [6] Bensebti S.E, "Formulation et propriétés des bétons autoplaçants à base de matériaux locaux", Thèse de Doctorat, Université de Constantine 2008.
- [7] Association française de génie civil, " Recommandations pour l'emploi des Bétons autoplaçants ", 2008.
- [8] Necira B, Guettala A, Chabi S, "Formulation des bétons autoplaçants : effet des ajouts minéraux et des adjuvants", Cinquième Conférence Internationale sur la Science des Matériaux (CSM5) Beyrouth –Liban, 17-19 Mai 2006.
- [9] Samara M, Roziere E, Khokhar M, Loukili A, "Valorisation des sédiments traités dans les bétons autoplaçants", Projet ANR-RGCU SEDIBET, 2007.
- [10] Ayed K, Vidal T, Pons G, Benaissa A, "Influence du type d'addition minérales sur les déformations différées des bétons autoplaçants", Thèse INSA, Laboratoire Matériaux et Durabilité des Constructions, 2006.

- [11] El Hilali A, E.Ghorbel E, Gonnon P, “Influence des fillers sur l’ouvrabilité des bétons autoplaçants”, 24^{ème} Rencontres Universitaires de génie civil «Construire : les nouveaux défis », 1 et 2 juin 2006. Association Universitaire de Génie Civil. La Grande Motte, France, 2006.
- [12] Bouhamou N, “Étude de l’influence des paramètres de composition sur le comportement à l’état frais du béton autoplaçant à base de matériaux locaux”, Thèse de doctorat d’État, Université de Mostaganem, Algérie, 2004.
- [13] Haddad O, Aggoun S, Cabrillac R, « Influence des additions minérales sur le comportement à court terme des bétons autoplaçants », Université de Cergy-pontoise, France, 2003.
- [14] Mebrouki A, Belas N, Bouhamou N, «Contribution à la formulation d’une pâte autoplaçante à base de matériaux locaux », Université de Mostaganem, 2007.
- [15] Turcry Ph, “Retrait et fissuration des bétons autoplaçants : influence de la formulation”, Thèse de doctorat, Ecole centrale de Nantes, février 2004.
- [16] Association Française De Génie Civil, "Bétons autoplaçants - recommandations provisoires", documents scientifiques et techniques, afgc, juillet 2000.
- [17] Haddadou Naima, « Elaboration et caractérisation de béton autoplaçant fibré avec ajout de poudre de marbre», Thèse de doctorat de l'Université M’hamed Bougara, Boumerdes, 2015.
- [18] Fiches Techniques, Les bétons: formulation, fabrication et mise en œuvre G11 Collection Technique CimBéton Réédition janvier 2013
- [19] Okamura.H, Ozawa.K and ouchi.M, “self-compacting concrete”, Structural Concrete, Marsh - 2000
- [20] MA. Bury and BJ. Christensen. “The role of innovative chemical admixture in producing self consolidation concrete”. Proceedings of the first North American conference on the design and use of self consolidating concrete - Chicago, ACBM : 141-146, 2002.

- [21] H. Nakamura and S. Ogawa. "Influence of interaction between sand and superplasticizer on the fluidity of concrete". Proceedings of the Japan Concrete Institute, Vol. 21, N₂:181-186, 1999.
- [22] PC. Aitcin, S. Jiang, BG. Kim, PC. Nkinamubanzi, and N. Pétrov. « L'interaction ciment : superplastifiant. Cas des polysulfonates ». Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées, Vol. 233 :87-98, Juillet-Aout 2002.
- [23] S. Bethmont. « Mécanismes de ségrégation dans les BAP ». Thèse de doctorat, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées. 2005.
- [24] Abib.Z, "Formulation et caractérisation des bétons autoplaçants", Mémoire de magister USTHB, 2004
- [25] T. Shindoh and YH. Matsuoka. "Development of combinaison type Self compacting concrete and Evaluation test methods". Journal of advanced concrete technology, Vol. 1 no 1 :26-36, 2003.
- [26] Boukni.B, "Tenue au feu des bétons autoplaçants", Mémoire de magister UMC, 2007.
- [27] RJ. Flatt and YF. Houst. "A simplified view on chemical effects perurbing the action of superplasticizer". Cement and concrete research, Vol. 31 :1169{1176, 2001
- [28] T. Sugamata, K. Umezawa, and S. Okazawa. "A study of particle dispersing retention effect of polycarboxylate-based superplasticizers". Transactions of NMB Central Research Laboratories - Japan, Vol. 13:7-14, 2000.
- [29] J. Jin. "Properties of mortar for self compacting concrete". In PhD thesis, University of London, page 398. 2002.
- [30] L. Schwartzentruber, R. Le Roy, and J. Cordin. "Rheological behaviour of fresh cement pastes formulated from a self compacting concrete". Cement and Concrete Research, Vol. 36 N₇:1203-1213, 2006.
- [31] KC. Hsu, JJ. Chiu, S.D. Chen, and YC. Tseng. "Effect of addition time of a superplasticizer on cement adsorption and on concrete workability". Cement and concrete composites, Vol. 21 N₅ :425- 430, 1999.

- [32] F. De Larrard, F. Bosc, C. Catherine, and F. Deorene. « La nouvelle méthode des coulis de l'afrem pour la formulation des bétons à hautes performances ». Bulletin de Liaison des Ponts et Chaussées, Vol. 202 :61- 69, 1996.
- [33] Tahar Ali Boucetta «Contribution du laitier granulé et de la poudre de verre sur les propriétés d'écoulement et de durabilité des bétons autoplaçants et de hautes performances», Thèse doctorat 3^{ème} Cycle, Université Badji Mokhtar, Annaba, 2014.
- [34] AFGC, Bétons autoplaçants - Recommandations provisoires. Annales du bâtiment et des travaux publics, Juin 2000.
- [35] De Larrard, F., Concrete Mixture Proportioning: "A Scientific approach. Modern Concrete Technology", ed. S. Press. 448., London. 1999.
- [36] Domone, P.L., Self-compacting concrete: "An analysis of 11 years of case studies". Cement and Concrete Composites, 2006. 28(2): p. 197-208.
- [37] FEBELCEM – Fédération de l'Industrie Cimentière Belge, « Les bétons autoplaçants », Bruxelles, août 2005
- [38] Adam M. Neville., «Propriétés des bétons », traduit par le CRIB édition Eyrolles, 2000.
- [39] Produits de ciment Couillard, « Les superplastifiants », <http://www.betoncouillard.com>, Internet, 2008.
- [40] Bellagraa Larbi, «Formulation et caractérisation d'un béton recyclé local», Thèse de Doctorat de l'Université de M'sila Mai 2015,
- [41] El-Hilali, A., « Etude Expérimentale de la Rhéologie et du Comportement des Bétons Autoplaçants (BAP): Influence des Fines Calcaires et des Fibres Végétales », Thèse de Doctorat, Université de Cergy-Pontoise. 2009
- [42] Moosberg-Bustnes, H., B. Lagerblad, and E. Forssberg, "The function of fillers in concrete", in Materials and Structures, Springer Netherlands. p. 74-81. 2004

- [43] Ye, G., et al., "Influence of limestone powder used as filler in SCC on hydration and microstructure of cement pastes". *Cement and Concrete Composites*, 29(2): p. 94-102. 2007.
- [44] Nehdi, M., "Why some carbonate fillers cause rapid increases of viscosity in dispersed cement-based materials". *Cement and Concrete Research*, 30(10): p. 1663-1669. 2000.
- [45] Zhu, W. and J.C. Gibbs, "Use of different limestone and chalk powders in self compacting concrete". *Cement and Concrete Research*, 35(8): p. 1457-1462. 2005.
- [46] Baron and Ollivier, *Les Bétons : « Bases et données pour leur formulation »*. Construction béton, Paris: Eyrolles. 1996
- [47] Nagataki S, Fujiwara H, "Self-Compacting Property of Highly Flowable Concrete", Second CANMET/ACI International Symposium on Advances In Concrete Technology, LasVegas, ACI SP 154-16, pp. 301-314, June 1995.
- [48] Hayakawa M, Matsuoka Y, Yokota K, "Application of superworkable concrete in the construction of 70-story building in Japan", Second CANMET/ACI on advances in concrete technology, Las Vegas, ACI 154-20, pp. 381-397, 1995.
- [49] Petersson Ö., Bellberg P. and Van B.K., "A model for Self-Compacting concrete" International Rilem conference on 'Production methods and workability of concrete' Rilem proceeding 32, 1996
- [50] Ö. Petersson. "Limestone powder as filler in self-compacting concrete - frost resistance and compressive strength". *Proceeding of 2nd International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete*, Tokyo, Japan: 277{284, 2001.
- [51] S.G. Oh, T. Nogushi, and F. Tomosawa. "Toward mix design for rhéology of self-compacting concrete". In *Proceedings of the First International RILEM Symposium of Self-Compacting Concrete*. RILEM, 1999.
- [52] T. Sedran. « Rhéologie et rhéométrie des bétons. Application aux bétons autonivellants ». *Thèse de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées*, 1999.

- [53] Sedran T, De Larrard F, Angot D, « Prévion de la Compacité des Mélanges Granulaires par le Modèle de Suspension Solide. I. Fondements théoriques et étalonnage du modèle», Bull. Liaison Lobo. P et Ch. -194 -, Réf 3862, nov-déc 1994.
- [54] Benkechkache G, « Etude de comportement diffère des bétons autoplaçants Influence des paramètres de composition et de chargement », Mémoire de magister, Université Mentouri Constantine, novembre 2007.
- [55] Delarrard F, Le Roy R, « Relation entre formulation et quelques propriétés mécaniques des bétons à hautes performances », Matériaux et Constructions, 25, pp. 464-475, 1992.
- [56] Gibbs J.C. And Zhu W., “ Strength of hardened self-compacting concrete ”, Proceedings of First International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete (PRO 7), Stockholm, Suède, pp. 199-209, 13-15 September 1999.
- [57] Klug Y. And Holschemacher K., “Material properties of hardened self-compacting concrete”, ICPCM – A new era of building, Le Caire, Egypte, 18-20 Février 2003.
- [58] Persson B., “A comparison between mechanical properties of self-compacting concrete and the corresponding properties of normal concrete”, Cement and Concrete Research, 31, pp.193-198, 2000.
- [59] Pons G., Proust E. et Assie S., “Creep and shrinkage of self-compacting concrete: a different behaviour compared with vibrated concrete?”, Proceedings of 3rd International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete (PRO 33), Reykjavik, Iceland, pp. 645-645, 17-20 août 2003.
- [60] Alyamac KE, Ince R. A., (2009), « A preliminary concrete mix design for SCC with marble powders». Construction and Building Materials, 23, Elsevier, pp. 1201–2010.
- [61] Uysal M., Sumer M., «Performance of self-compacting concrete containing different mineral admixtures», Construction and Building Materials, 25, 4112-4120. 2011.
- [62] Topcu B.I., Sengel S., «Properties of concretes produced with waste concrete aggregate», Cement Concrete Research, 34(8), 1307–1312. 2004

- [63]** Belaidi A S E., Azzouz L., Kadri E., Kenai S., «Effect of natural pozzolana and marble powder on the properties of self-compacting concrete», *Construction and Building Materials*,31, 251-257. 2012
- [64]** Belagraa L., Beddar M., Bouzid A., «Marble fillers effect on the mechanical performance of a recycled aggregate concrete», *Environmental Engineering and Management Journal*, , Vol.1 6, No. 1, 197-204.
- [65]** Belagraa L., Bouzid A., «Performance study of low environmental impact mortars based on mineral additions and cement resistant to sulfate (crs) », *Mining Science*, vol. 23 , 65–76. 2016.
- [66]** Guillaume Camps, "Etude des interactions chemo-mécaniques pour la simulation du cycle de vie d'un Elément de Stockage en Béton", Thèse Doctorat de l'Université de Toulouse soutenue le 10 Septembre 2008.
- [67]** Rossi .P, *Les Bétons de Fibres Métalliques, Ponts et Chaussées*, Paris, 309p. . (1998)
- [68]** Bentur A., Mindess S. "Fibers reinforced cementous composites", Elsevier, Vol 3, 2, pp. 440- 449. 1990.
- [69]** Johnston C.D. "Proportioning, mixing and placement of fibre-reinforced cements and concretes, Production Methods and Workability of Concrete", *Proceedings of the International RILEM Conference*, edited by Bartos, Marrs and Cleland, E&FN Spon, London, pp. 155-179. 1996.
- [70]** Redaelli. D ; "Comportement et modulation des éléments en structure en béton fibré à ultra haute performance avec armature passive" Thèse de doctorat, École Polytechnique Fédérale de Lausanne, 2009.
- [71]** M. Bentalha. «Influence de l'introduction de Fibres Métalliques sur le Comportement Différé d'une Matrice Cimentaire. Caractérisation - Comportement monotone - Microstructure». Thèse de Doctorat d'état, Université Mentouri-Constantine, Octobre, 2007.

- [72] Rossi .P, Harrouche, N, Lemaou .F, «Comportement Mécanique des Bétons de Fibres Métalliques utilisés dans les Structures en Béton Armé et en Béton précontrainte». Annales de l'itbtp, Série Matériaux 73, n°479 bis, pp. 166-183, Décembre 1989.
- [73] Youcef Fritih, « Apport d'un renfort de Fibres sur le comportement d'éléments en Béton autoplaçant armé », Thèse de Doctorat de l'Université de Toulouse ,08 Juillet 2009.
- [74] Chemrouk, M .Tahenni, T et Boulekbeche.B, «Béton renforcé en Fibres : un Matériau aux avantages multiples». 1ère Conférence Internationale sur les Energies, Matériaux et Environnement Cieme'09 Centre Universitaire de Khemis Miliana, 22 et 23 Novembre 2009.
- [75] Rossi. P, Tunnels et Espace Souterrain, Revue Béton[s]- n°218 - pp. 154- 154, Avril 2010.
- [76] Markovic I., Walraven J. C., Van Mier J. G. M., “Self-compacting hybrid-fibre concrete mix design” , Workability and mechanical properties, 3 rd International Symposium on self-compacting concrete 17- 20 August Reykjavik, Iceland. 2003
- [77] Pons G., Mouret M., Alcatra M., Granju J. L., « Mechanical behavior of Self-compacting hybrid-fibre reinforcement” Materials and structures, Vol 40, no 2, pp 201-210 2007.
- [78] Harrouche. N ; "Formulation et comportement à la fissuration des de fibres métalliques", Thèse de doctorat, Université de Pierre et Marie Curie Paris VI, 1989.
- [79] P. Rossi, N. Harrouche, A. Belloc. « Méthodes de composition des bétons de fibres métalliques », Annales de l'Institut technique du bâtiment et de travaux publics no 475 juin- juillet 1989, série béton 266, 1989.
- [80] Rossi P, Harrouche N, “Mix design and mechanical behavior of some steel-fiber-reinforced concretes used in reinforced concrete structures”, Materials and Structures, Vol. 23, pp. 256-266, 1990.
- [81] Chen L, Mindess S, Morgan D R., Shah S P, Johnston C D, Pigeon M. “Comparative Toughness Testing of Fiber Reinforced Concrete”, ACI, SP-155, Editors, Stevens D J, Banthia N, Gopalaratham V S, Tatnall P C, Michigan, p 41-69. 1995

- [82] Khayat K.H, Roussel Y “Testing and Performance of Fiber-Reinforced Self-Consolidating Concrete”, *Materials and Structures Journal*, vol. 33, p. 391-397. Jul., 2000.
- [83] Mueller T, And Holschemacher, K., “Self-compacting Steel Fibre Reinforced Concrete – A Study about the Influence of Fibre Content and Concrete Composition”, 2nd International RILEM Symposium on Design, Performance and Use of Self- Consolidating Concrete SCC’2009, China, Edition Shi, C.; Yu, Z.; Khayat, K.H.; and Yan, P. p. 152-161, Jun., 2009.
- [84] Gao J, Sun W, Morino K. “Mechanical Properties of Steel Fiber-Reinforced High-Strength, Lightweight Concrete”, *Cement and Concrete Composites*, vol. 19, n° 4, p. 307-313, 1997.
- [85] Yadegaran I, Mahoutian M., Shekarchi M, Libre N A. “Effect of Polypropylene Fibers on Shrinkage of Self-Compacting Concrete”, 5th International RILEM Symposium on SCC, Ghent, Belgium vol. 2, p. 707-713, 2007.
- [86] Dreux J, Festa, J. « Nouveau Guide du Béton et de ses Constituants », 8° édition, Eyrolles, Paris, France, Mai, 2002
- [87] Sahmaran M, Yurtseven A, Yaman I.-O. “Workability of Hybrid Fiber Reinforced Self-Compacting Concrete”, *Building and Environment Journal*, vol. 40, n° 12, p. 1672–1677. Dec., 2005
- [88] Banthia N, Dubey A “Measurement of Flexural Toughness of Fiber-Reinforced Concrete Using a Novel Technique”—Part 2: Performance of Various Composites, *ACI Materials Journal*, vol. 97, n° 1, p. 3-11. 2000
- [89] Zhang M H, Chevrier R L, Malhotra V M, Mirza J “ Use of High- Volume Fly Ash in Polypropylene Fiber-Reinforced Concrete for Shotcrete Applications” CANMET - Durability of concrete, Proceedings 4th International Conference, MALHOTRA V. M., Sydney, Australia, p. 681-722. 1997
- [90] Ahmad S H, Shah S.P “Stress-Strain Curves of Concrete Confined by Spiral Reinforcement”, *ACI Journal*, vol. 79, n° 6, p. 484-490. Nov, 1982.

- [91] Balaguru P N, Shah S P “Fiber Reinforced Cement Composites”, McGraw-Hill, Inc., 530 p. 1992.
- [92] Luo X, Sun W, Chan S Y N “Steel Fiber Reinforced High-Performance Concrete: a Study on the Mechanical Properties and Resistance Against Impact”, Materials and Structures, vol. 34, n° 3, p. 144-149. Apr., 2001.
- [93] Grünewald S, Walraven J C, “ Rheological study on the workability of fiber-reinforced mortar”, Second Int. Symposium on SCC, Edited by Ozawa and Ouchi, University of Tokyo, COMS Engineering Publication, pp. 127-136, 2001.
- [94] Grünewald S, Walraven J C, “ Maximum content of steel fibers in self-compacting concrete”, Second Int. Symposium on SCC, Edited by Ozawa and Ouchi, University of Tokyo, COMS Engineering Publication, pp. 137-146, 2001.
- [95] Groth P, “Steel Fiber Reinforced SCC, Final report of task 6”, Brite Euram project (BE 96-3801) - Rational production and improved working environment through using SCC, Doc. No.: RT6-v1.doc, 2000.
- [96] Ding Y, Liu S, Zhangy, Thomas A, “The investigation on the workability of fiber cocktail reinforced self-compacting high performance concrete”. Construction and Building Materials. No.22 1462-1470. 2008.
- [97] Kassimi, F. “Optimisation and Mecanical and Structural Performance of Fiber-Reinforced Self-Consolidating Concrete”, M.Sc.A memory (in French), Université de Sherbroke, Québec, Canada, 205 p. Sep. 2008.
- [98] Petersson Ö, “Preliminary Mix Design - Final Report of Task 1”, Brite Euram project (BE 96-3801) - Rational production and improved working environment through using SCC, Document RT1_v2.doc, 1998.
- [99] Groth P, Nemegeer D, “ The use of steel fibers in self-compacting concrete”, First Int, Symposium on SCC, Stockholm, Edited by Skarendahl and Petersson, RILEM publications PRO 7, Cachan, pp. 497-508, 1999.
- [100] Tabet N. « Contribution à l'étude de l'influence de la nature et des dimensions des fibres sur le comportement physico- mécanique des bétons autoplaçants fibres BAPF).

Mémoire de magister, Université de Boumerdès, Faculté des sciences de l'ingénieur, Département génie des matériaux, 2012.

[101] INERIS. 2009. "Institut National de L'environnement Industriel et Des Risques et La Sécurité Des Tunnels." <http://www.ineris.fr/>.

[102] INERIS-DRA-2006-46055-C70050 « Incendies en milieu confiné », INERIS (Institut national de l'environnement industriel et des risques) 2006

[103] Nonna Yermak «Comportement à hautes températures des bétons additionnés de fibres », Thèse de doctorat en Génie Civil, Ecole doctorale de Sciences et Ingénierie Université de Cergy-Pontoise, le 07 Décembre 2015.

[104] Noumowé, A. "Effet Des Hautes Températures (20-600°C) Sur Le Béton. Cas Particulier Du Béton à Hautes Performances." Thèse de doctorat, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon. 1995.

[105] Castellote, M., C. Alonso, C. Andrade, X. Turrillas, and J. Campo. "Composition and Microstructural Changes of Cement Pastes upon Heating, as Studied by Neutron Diffraction." Cement and Concrete Research n°9 34:1633–44. 2004.

[106] Alarcon-Ruiz, L., G. Platret, E. Massieu, and A. Ehrlacher. "The Use of Thermal Analysis in Assessing the Effect of Temperature on a Cement Paste." Cement and Concrete Research 35:609–13. 2005.

[107] Schneider, U., U. Diederichs, and C. Ehm. "Effect of Temperature on Steel and Concrete for PCRV's." Nuclear Engineering and Design 67:245–58. 1982.

[108] Alonso, C. and L. Fernandez. "Dehydration and Rehydration Processes of Cement Paste Exposed to High Temperature Environments." Journal of Materials Science 39:3015–24. 2004.

[109] Nguyen, VT. "Comportement Des Bétons Ordinaire et à Hautes Performances Soumis à Haute Température : Application à Des éprouvettes de Grandes Dimensions." Thèse de doctorat, Université de Cergy Pontoise. 2013.

- [110] Laneyrie, C. “Valorisation Des Déchets de Chantiers Du BTP : Comportement à Haute Température Des Bétons de Granulats Recyclés.” Thèse de doctorat, Université de Cergy Pontoise. 2014.
- [111] Mindeguia, J. C. “Contribution Expérimentale à La Compréhension Des Risques D’instabilité Thermique Des Bétons.” Thèse de doctorat, Université de Pau et des pays de l’Adour. 2009.
- [112] Xing, Z. “Influence de La Nature Minéralogique Des Granulats Sur Leur Comportement et Celui Du Béton à Haute Température.” Thèse de doctorat, Université de Cergy Pontoise. 2011.
- [113] Kalifa, P., G. Chéné, and C. Gallé. “High-Temperature Behaviour of HPC with Polypropylene Fibres - From Spalling to Microstructure.” *Cement and Concrete Research* 31(10):1487–99. 2001.
- [114] Menou, A. “Etude Du Comportement Thermomécanique Des Bétons à Haute Température : Approche Multi échelles de L’endommagement Thermique.” Thèse de doctorat, Université de Pau et des Pays de L’Adour; Institut Aquitaine du Bâtiment et des Travaux Publics d’Anglet. 2004.
- [115] Hager, I. “Comportement à Haute Température Des Bétons à Haute Performance - évolution Des Principales Propriétés Mécaniques.” Thèse de doctorat, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées et l’Ecole Polytechnique de Cracovie. 2004.
- [116] Zeiml, M., D. Leithner, R. Lackner, Herbert, and A. Mang. “How Do Polypropylene Fibers Improve the Spalling Behavior of in-Situ Concrete?” *Cement and Concrete research* 36:929–42. 2006.
- [117] Choinska, M. “Effets de La Température, Du Chargement Mécanique et de Leurs Interactions Sur La Perméabilité Du Béton de Structure.” Thèse de doctorat, L’Ecole centrale de Nantes et l’Université de Nantes. 2006.
- [118] Mindeguia, J. C. “Contribution Expérimentale à La Compréhension Des Risques D’instabilité Thermique Des Bétons.” Thèse de doctorat, Université de Pau et des pays de l’Adour. 2009.

- [119] Tsimbrovska, M. “Dégradation Des Bétons à Hautes Performances Soumis à Des Température élevées.” Thèse de doctorat, Université de Grenoble 1. 1997.
- [120] Fares, H. “Propriétés Mécaniques et Pysico-Chimiques de Bétons Autoplaçants Exposés à Une Température élevée.” Thèse de doctorat, Université de Cergy Pontoise. 2009.
- [121] BHP, 2000. “Le Comportement Au Feu Des BHP, Synthèse Des Travaux Du Projet National BHP 2000 Sur Les Bétons à Hautes Performances.” *Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées* 77–124. 2000.
- [122] Haniche, R. “Contribution à L’étude Des Bétons Portés En Température / Evolution Des Propriétés de Transfert / Etude de L’éclatement.” Thèse de doctorat, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon 2011.
- [123] Pliya, P. “Contribution Des Fibres de Polypropylène et Métalliques à L’amélioration Du Comportement Du Béton Soumis à Une Température élevée.” Thèse de doctorat, Université de Cergy Pontoise. 2010.
- [124] Khoury, G. A. “Compressive Strength of Concrete at High Temperatures: A Reassessment.” *Magazine of Concrete Research* (161):291–309. 1992.
- [125] Behnood, A. and M. Ghandehari. “Comparison of Compressive and Splitting Tensile Strength of High-Strength Concrete with and without Polypropylene Fibers Heated to High Temperatures.” *Fire Safety Journal* 44(8):1015–22. 2009.
- [126] Khaliq, W. and V. Kodur. “Thermal and Mechanical Properties of Fiber Reinforced High Performance Self-Consolidating Concrete at Elevated Temperatures.” *Cement and Concrete Research* 41(11):1112–22. 2011.
- [127] Chen, B. and J. Liu. “Residual Strength of Hybrid-Fiber-Reinforced High-Strength Concrete after Exposure to High Temperatures.” *Cement and Concrete Research* 34(6):1065–69. 2004.
- [128] Suhaendi, S. and T. Horiguchi. “Effect of Short Fibers on Residual Permeability and Mechanical Properties of Hybrid Fibre Reinforced High Strength Concrete after Heat Exposition.” *Cement and Concrete Research* n°9 36:1672–78. 2006.

- [129]** Kanema, T. M. “Influence Des Paramètres de Formulation Sur Le Comportement à Haute Température Des Bétons.” Thèse de doctorat, Université de Cergy Pontoise. 2007.
- [130]** Lau, A. and M. Anson. “Effect of High Temperatures on High Performance Steel Fibre Reinforced Concrete.” *Cement and Concrete Research* 36(9):1698–1707. 2006.
- [131]** Sideris, K. K., P. Manita, and E. Chaniotakis. “Performance of Thermally Damaged Fibre Reinforced Concretes.” *Construction and Building Materials* 23(3):1232–39. 2009.

Table des matières

Table des matières

Liste des tableaux

Liste des figures

Notations

Introduction

Générale.....1

Partie I

Synthèse bibliographique

CHAPITRE I

Notions générales sur le béton autoplaçant

I.1 Introduction4

I.2 Concept du béton autoplaçant.....4

I.3 Propriétés des BAP.....5

I.4. Cahier des charges d'un béton autoplaçant6

I.5 Les avantages des bétons autoplaçants7

a) Avantages techniques7

b) Avantages économiques.....7

c) Avantages écologiques7

I.6. Influence des paramètres de formulation sur les propriétés à l'état frais7

I.6.1 Rôle des adjuvants.....7

a) Utilisation de super plastifiant.....7

b) Utilisation éventuelle d'un agent de viscosité.....9

I.6.2. Volume de pâte élevé.....10

I.6.3. Volume de gravillons.....10

I.6.4. Influence des additions minérales.....10

I.7. Les constituants du BAP	12
I.7.1. Le ciment.....	12
I.7.2. Les granulats.....	12
I.7.3. L'eau.....	13
I.7.4. Les fines minérales.....	13
I.7.5. Les agents de viscosité.....	15
I.7.6. Les superplastifiants.....	15
I.8. Formulation des bétons autoplaçants.....	16
I.8.1. Aspect empirique de la formulation des BAP	17
I.8.1.1 Approche basée sur l'optimisation des mortiers.....	18
I.8.1.2. Approche basée sur l'optimisation du volume de pâte.....	18
I.8.1.3 Approche basée sur l'optimisation du squelette granulaire.....	19
I.9. Propriétés du béton autoplaçant à l'état frais.....	19
I.9.1. Mobilité en milieu non confiné.....	20
I.9.1.1 Etalement.....	20
I.9.2. Mobilité en milieu confiné.....	21
I.9.2.1. Essai de la boîte en L (L-BOX TEST)	21
I.9.3. Stabilité.....	22
I.9.3.1. Stabilité au tamis.....	22
I.10. Propriétés du béton autoplaçant à l'état durci.....	23
I.10.1. Résistance à la compression.....	24

I.10.2. Résistance à la traction.....	25
I.10.3. Module d'élasticité.....	25
I.11 Bétons autoplaçant avec fillers de marbre.....	27

Chapitre II

Les bétons autoplaçants fibrés

II.1. Introduction.....	29
II.2. Les bétons renforcés de fibre(s).....	29
II.3. Mécanismes de fonctionnement des fibres dans le béton.....	30
II.4. Les fibres.....	31
II.4.1. Types et caractéristiques.....	31
II.4.2 Critère de choix du type de fibres.....	33
II.4.3.Rôle des fibres.....	35
II.4.4 Durabilité des bétons de fibres.....	37
II.4.5 Utilisation et influence de deux ou plusieurs types de fibres.....	38
II.4.6 Les avantages du béton de fibres.....	39
II.5 Bétons autoplaçants fibrés.....	40
II.5.1Définition.....	40
II.6.Composition des BAPF.....	41
II.7. Formulation des BAPF.....	41
II.8. Comportement mécanique des BAPF.....	41

II.8.1. Effet du volume des fibres.....	42
II.8.2. Effet de la longueur des fibres.....	42
II.8.3. Effet de l'aspect ratio et la forme géométrique.....	43
II.9. Influence des fibres sur les propriétés rhéologiques des BAP.....	43
II.10. Orientation et distribution des fibres.....	44

CHAPITRE III

L'effet de la température sur les BAP fibrés

III.1.Introduction.....	46
III.2 Evolutions des propriétés du béton soumis à des températures élevées.....	47
III.2.1 Evolution de la matrice cimentaire.....	47
III.2.2 Evolution des granulats.....	47
III.2.3 Evolution des propriétés physiques.....	48
III.2.3.1 Perte de masse	48
III.2.3.2. Porosité.....	49
III.2.3.3.Perméabilité au gaz.....	51
III.2.4. Evolution des propriétés mécaniques du béton.....	52
III.2.4.1. Résistance à la compression.....	52
III.2.4.2. Résistance à la traction.....	54
III.2.4.3. Module d'élasticité.....	55

PARTIE II**Étude expérimentale****CHAPITRE IV****Caractérisation des matériaux et procédures expérimentales**

IV.1 Introduction.....	58
IV.2 Matériaux.....	58
IV.2.1 Le ciment.....	59
IV.2.1.1 Caractéristiques physiques et chimiques du ciment.....	59
IV.2.1.2 : Caractéristiques chimiques du ciment utilisé CEM II 42,5.....	60
IV.2.1.3 Les caractéristiques minéralogiques du ciment CEM II 42,5.....	60
IV.2.2 Caractéristiques du sable utilisé.....	61
IV.2.2.1. Essai d'analyse granulométrique.....	61
IV.2.2.2 Caractéristiques physiques	61
IV.2.2.3.Caractéristiques chimiques.....	63
IV.2.3 Caractéristique du gravier utilisé.....	64
IV.2.3.1. Origine du gravier utilisé.....	64
IV.2.3.2. Analyse granulométrique.....	64
IV.2.3.3. Les caractéristiques physiques des graviers utilisés.....	64
IV.2.3.4. Les caractéristiques mécaniques des graviers utilisés.....	66

IV.2.3.5. Caractéristiques chimiques des graviers utilisés.....	67
IV.2.4. Les Adjuvants.....	67
IV.2.4.1. Le MEDAPLAST SP 40.....	67
IV.2.5. Le filler utilisé (Poudre de marbre).....	69
IV.2.6. Fibres métalliques.....	70
IV.2.7 La fibre de verre.....	71
IV.2.8. L'eau de gâchage.....	72
IV.3 Techniques expérimentales.....	73
IV.3.1 Introduction.....	73
IV.3.2. Formulation du béton autoplaçant.....	73
IV.3.3 Essais de caractérisations du béton autoplaçant à l'état frais.....	76
IV.3.3.1 Essai d'étalement au cône d'Abrams.....	76
IV.3.3.2 Essai de stabilité au tamis.....	78
IV.3.3.3 Essai de la boîte en « L ».....	80
IV.3.3.4 La masse volumique du béton autoplaçant.....	82
IV.3.4 Essais de caractérisations du béton autoplaçant à l'état durci.....	82
IV.3.4.1. Essai compression.....	82
IV.3.4.2. Essai de traction par flexion.....	83
IV.3.4.3. Module d'élasticité.....	83
IV.3.4.4. Mesure de la perte de masse.....	83

IV.3.4.5. Mesure la porosité à l'eau (P_{eau}).....	83
--	----

CHAPITRE V

Résultats et Discussion

V.1 Introduction.....	85
V.2 Présentation des résultats.....	85
V.2.1 État frais.....	85
V.2. 2 État durci.....	100
V.2. 3 L'effet des températures élevées.....	105
Conclusion générale.....	115
Références bibliographiques.....	118

Table des matières

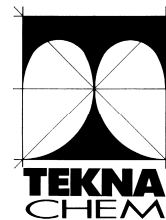
Annexes

Liste des publications et communications

Annexes

FICHE TECHNIQUE

Version Mars 2010



FIBERTEK A

FIBRE EN ACIER

DESCRIPTION

Les fibres **FIBERTEK A** sont conçues en acier avec une forme particulière de manière à réaliser le meilleur ancrage dans la matrice du béton.

Les caractéristiques du fil d'acier dont sont faites les fibres **FIBERTEK A** répondent aux normes de référence relative au type d'emploi

CARACTERISTIQUES

Les **FIBERTEK A**, permettent d'obtenir des bétons et des mortiers avec une résistance élevée aux :

- Chocs
- Vibrations
- Charges concentrées
- Fatigue

La distribution uniforme des fibres **FIBERTEK A** dans le mélange rend, d'autre part, possible la révision de l'armature secondaire et la maîtrise de la propagation d'éventuelles fissures.

Les fibres **FIBERTEK A** sont disponibles dans les dimensions standards/

L/D= 30/50 ; L/D= 30/80 ; L/D= 60/100

DOMAINE D'UTILISATION

Les fibres **FIBERTEK A** sont utilisées pour réaliser une armature de renfort diffuse dans les structures de bétons sujettes à des sollicitations particulièrement élevées, chocs, trafic lourd, vibrations, etc.

FIBERTEK A est utilisé pour :

- Dallages industriels
- Aires de stationnement
- Cordons de jonction routière
- Garnitures pour galerie, parois et talus
- Réfection de structure
- Revêtement de tube métallique
- Eléments préfabriqués
- Réfection de conduites hydrauliques

DOSAGE

Les fibres **FIBERTEK A** sont dosées entre 20 à 30 kg /m³

Le dosage optimal doit être déterminé en fonction du type de béton et des caractéristiques demandées.

MODE OPERATOIRE

Introduire **FIBERTEK A** progressivement la bétonnière ou avec les agrégats (tapis transporteur).

Mélanger à vitesse maximale, pour quelques minutes, afin de permettre une répartition homogène, avant de procéder à la mise en œuvre.

Le béton, contenant les fibres d'acier **FIBERTEK A**, peut normalement être pompé avec les traditionnelles pompes à béton

CONDITIONNEMENT ET STOCKAGE

Cartons de 20kg

Stocké sur palettes, il se conserve 2 années à l'abri de l'humidité.

PRECAUTIONS D'EMPLOI

Se référer à la fiche de données de sécurité.



TEKNACHEM ALGERIE SARL

B.P. 11 M Zone Industrielle

Sidi Bel Abbas - 22000

Tel : 048.55.64.63 - Fax : 048.55.64.62

Site : www.teknachem.com

E-mail : info@teknachem.com

Les informations contenues dans la présente fiche technique, bien que représentant le stade le plus avancé de la connaissance, ne dispense pas l'utilisateur de procéder à des tests préliminaires dans les propres conditions d'emploi. Par conséquent la TEKNACHEM ALGERIE SARL décline toutes responsabilités pour l'emploi inapproprié du produit.

MEDAPLAST SP 40

Conforme à la norme EN 934-2 Tab 1, 3.1
et 3.2 NA 774

Super plastifiant - haut réducteur d'eau

DESCRIPTION

Le **MEDAPLAST SP 40** est un superplastifiant haut réducteur d'eau permettant d'obtenir des bétons et mortiers de très haute qualité. En plus de sa fonction principale de superplastifiant, il permet de diminuer considérablement la teneur en eau du béton.

DOMAINES D'APPLICATION

- Bétons à hautes performances
- Bétons pompés
- Bétons précontraints
- Bétons architecturaux
- Bétons extrudés
- Bétons BCR

PROPRIÉTÉS

Grâce à ses propriétés le **MEDAPLAST SP 40** permet :

Sur béton frais :

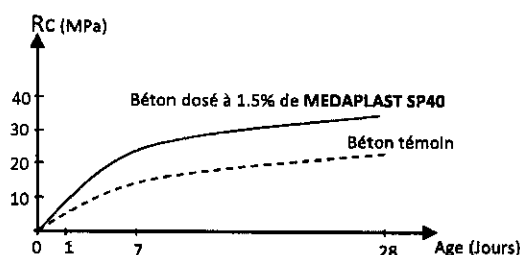
- Améliorer la fluidité
- Augmenter la maniabilité
- Réduire l'eau de gâchage
- Éviter la ségrégation
- Faciliter la mise en œuvre du béton

Sur béton durci :

- Augmenter les résistances mécaniques même à jeune âge
- Diminuer la porosité
- Augmenter la durabilité
- Diminuer le retrait

CARACTÉRISTIQUES

- Aspect Liquide
- Couleur Marron
- pH 8,2
- Densité $1,20 \pm 0,01$
- Teneur en chlore $< 1\text{g/L}$
- Extrait sec 40%



Evolution des résistances en compression

MODE D'EMPLOI

Le **MEDAPLAST SP 40** est introduit dans l'eau de gâchage.

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

DOSAGE

Plage de dosage recommandée :

0,6% à 2,5% du poids de ciment soit 0,5L à 2L pour 100 kg de ciment

Le dosage optimal doit être déterminé sur chantier en fonction du type de béton et des effets recherchés.

CONDITIONNEMENT ET STOCKAGE

Le **MEDAPLAST SP 40** est conditionné en bidons de 12Kg, fûts de 270 kg et cubitenaire de 1200 kg.

Délai de conservation :

Une année emballage d'origine, à l'abri du gel et de la chaleur ($5^{\circ}\text{C} < t < 35^{\circ}\text{C}$).

PRÉCAUTIONS D'EMPLOI

Manipulation non dangereuse.

Se référer à la Fiche de Données de Sécurité disponible sur : www.granitex-dz.com

PV d'essais conforme aux normes, établi par le CNERIB en Janvier 2007.

Les renseignements donnés dans cette notice sont basés sur notre connaissance et notre expérience à ce jour. Il est recommandé de procéder à des essais de convenance pour déterminer la fourchette d'utilisation tenant compte des conditions réelles de chantier.



Granitex

Zone Industrielle Oued Smar - BP85 Oued Smar - 16270 Alger

Tél : (213) 021 51 66 81 & 82

Fax : (213) 021 51 64 22 & 021 51 65 23

www.granitex-dz.com - E-mail: granitex@granitex-dz.com



*Liste des publications et
communications*

THESE DE DOCTORAT EN SCIENCES
(Spécialité : Génie Civil – Option : Matériaux)

Présentée par
DJEBRI Noura

Sur le thème

FORMULATION ET CARACTÉRISATION D'UN BÉTON AUTOPLAÇANT FIBRÉ A BASE DE MATERIAUX LOCAUX EXPOSÉ AUX HAUTES TEMPÉRATURES.

Publications et communications

1. Publications :

- a. Noura Djebri, Rahmouni Zine El Abidine and Belagraa Larbi, **Experimental Investigation on the Effect of Marble powder on the performance of Self-Compacting Concrete (SCC)**, Mining Science 2017;24:183–194, DOI: <https://doi.org/10.5277/msc172411> .

2. Communications Internationals :

- a. Z. RAHMOUNI et N. DJEBRI, **Comportement des bétons autoplaçants (BAP) exposés aux hautes températures**. 12ème Congrès de Mécanique, 21 – 24 avril 2015, Casablanca – Maroc. <http://smsm.fsac.ac.ma/congres/index.php>
- b. Z. RAHMOUNI, N. DJEBRI and L. BELAGRAA, **Study of the effect of Marble fillers substitution of Cement on the Rheological and Mechanical characteristics of the Self Compacting Concrete (SCC)**. 2nd International Conference on Pure and Applied Sciences, ICPAS 2016, Yildiz Technical University, Turkey , Jun 1-5, 2016, ISBN : 978-9944-5868-5-6.
- c. N. Djebri, Z. Rahmouni et L. Belagraa, **The effect of high temperature exposure on the behavior of Self-compacting concrete (SCC)**, - 12th International Congress on Advances in Civil Engineering, ACE 2016, Boğaziçi University, 21 – 23 September 2016, Istanbul, Turkey. ISBN : 978-975-518-395-4. <http://www.ace2016.org/en/default.asp>
- d. N. Djebri, Z. Rahmouni and L. Belagraa, **STUDY OF THE EFFECT OF STEEL FIBERS ON THE RHEOLOGICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF SELF COMPACTING CONCRETE (SCC)**, ICEUBI2017 - INTERNATIONAL CONGRESS ON ENGINEERING 2017, A vision for the future, December 5-7, 2017, University of Beira Interior – Covilhã, Portugal. http://iceubi.ubi.pt/?page_id=462#1510598052094-0e0d629c-c36f

3. Communications Nationales :

- a. N. Djebri, Z. Rahmouni et L. Belagraa, **Etude de l'effet de l'introduction des fibres sur les propriétés mécaniques et rhéologiques des bétons autoplaçants**, 3^{ème} Congrès International sur la technologie et la durabilité du béton (CITEDUB 3), 26 au 27 septembre 2016, USTHB, Alger. <http://www.usthb.dz/CITEDUB3/>
- b. DJEBRI Noura, RAHMOUNI Zine El Abidine et BELAGRAA Larbi, **Etude de l'influence de la Nature et les Dimensions des Fibres sur les Propriétés Rhéologiques et Mécaniques des Bétons Autoplaçants**, International Symposium on Construction Management and Civil Engineering (ISCMCE- 2017), November 15 - 16, 2017. Skikda, Algeria. <http://ftch.univ-skikda.dz/ISCMCE2017/index.php/participants-list>
- c. DJEBRI Noura, RAHMOUNI Zine El Abidine et BELAGRAA Larbi, **Etude de l'effet des Températures Elevées sur les Propriétés Mécaniques d'un Béton Autoplaçant Renforcé par des Fibres de Verre**, International Symposium on Construction Management and Civil Engineering (ISCMCE- 2017), November 15 -16, 2017. Skikda, Algeria. <http://ftch.univ-skikda.dz/ISCMCE2017/index.php/participants-list>

Received June 20, 2017; reviewed; accepted September 15, 2017

EXPERIMENTAL INVESTIGATION ON THE EFFECT OF MARBLE POWDER ON THE PERFORMANCE OF SELF-COMPACTING CONCRETE (SCC)

Nora DJEBRI¹, Zine Elabidine RAHMOUNI², Larbi BELAGRAA^{1, 3 *}

¹ Department of Civil Engineering, M'Sila University, Algeria

² Department of Civil Engineering, Development of Géomaterials Laboratory, M'Sila University,
BP 819 RP 28000 M'sila, Algérie

³ Laboratory of Materials and Electronic Systems, Faculty of Sciences and Technology,
B B Arreridj University, (34 062), Algeria.

Abstract: The self-compacting concretes (SCC's) are characterized by their high fluidity so that they could be placed without any vibration. The effect of fillers addition on the behavior of SCC in fresh and hardened state is of great importance. This incorporation of marble powder aims to preserve the environment and to widen its use in the future in SCC formulation.

The present research experimental program examines the effect of the partial substitution of cement with marble powder on the characteristics of self-compacting concrete in fresh and hardened state. Thus, the marble powder (MP) was introduced into the composition of self-compacting concretes at dosages of 10%, 20% and 30%. Three water cement ratios (W/C) of 0.4, 0.5 and 0.6 were maintained for the studied mixtures. The reference one with 100% of cement served as a control concrete mix. Finally, it can be concluded that such valuation of the marble waste could be beneficial for self-compacted concrete formulation.

Keywords: *Self-Compacting Concrete (SCC), Marble powder (MP), Mechanical proprieties, rheological characteristics, environment.*

INTRODUCTION

The self-compacting concrete was developed in Japan in 1988. It represents one of the most important advances in the technology of concretes in the last two decades. The SCC can be considered as a material of high performance, which could be placed

* Corresponding author: Lbelagraa@yahoo.fr (L. Belagraa)

under the influence of its own weight without any mechanical vibration to adapt itself in a desired shape even in the case of a very small spacing between the steel reinforcement.

The easy placement under only the effect of the gravity, required a very high fluidity of materials but It is as well essential as the concrete preserves a satisfactory stability and a perfect homogeneity. These two contradictory properties are obtained by a high quantity of fine particles of fillers coupled with a high water cement ratio W/C corresponding to a fixed dosage of super-plasticizier admixture. The local materials in any region of the world form the first natural product of construction appropriate to this region given that it was able to resist the climatic changes of the same region in the past. Algeria with its vast area includes a heterogeneousness of local materials which deserve to be valued, like the dune sand, clays, tuff, pozzolan, the marble powder and others which are still up to now under valorized (Belagraa et al., 2016; 2017).

Topcu et al, (2009) investigated the effect of waste marble powder on the properties of SCC. It was concluded that the fresh properties had not been affected up to 200 Kg/m³ marble dust content, mainly the workability. It was reported that the air content increased by using marble waste in the SCC mixtures. The mechanical properties at hardened state had decreased for a higher dosage of marble addition above this level. Consequently, if the positive effect of marble dust incorporation is to be considered on fresh and hardened state of SCC a new method could be developed for dosages of marble waste below 200 Kg/m³ (Topcu et al, 2009).

Other researchers pointed out that using marble powder in the SCC formulated revealed higher strength at a given water cement ratio compared to traditional concrete mix. The mean strength for SCC mixes with marble powder was 25 % higher than reference concrete (Alyamac And Ince, 2009). A similar conclusion was observed for SCC containing limestone and chalk powders (Zhu and Gibbs, 2005).

According to the research work undertaken by Corinaldesi and al (2010) on the use of marble powder as a substitution of cement and sand for SCC mortars and concretes, they noted that 10 % replacement of marble powder proved to be effective in assuring good cohesiveness of mortars and concrete at fresh state. But in terms of mechanical performance the 10 % substitution of sand by marble powder provided maximum compressive strength at the same workability level compared to the reference mixture after 28 days of age. Moreover, an even more positive effect of marble powder was noticed at early ages, due to its physical filler ability (Corinaldesi V., Moriconi G and Naik T R., 2010).

Recent studies on the use of marble powder combined with pozzolana for SCC formulation is reported to enhance the rheological properties of mortars and concrete based on this addition for ternary cement. However, a reduction of compressive strength was observed with pozzolana and marble addition compared to control concrete (Belaidi et al., 2012).

In this frame of idea, the use of the marble waste fillers in the composition of the SCC, the present research work investigated the marble waste fillers incorporation to see the effect of such addition on the properties of SCC when using a dosage up to 30 % of marble powder addition in the due formulation of SCC mixtures. Also, the generated marble waste could be with a positive impact on the environment level by the valuation of the local materials in concrete composition in the field of the construction. Hence, it reduces the dust and CO₂ gas emissions in the atmosphere when used as cement replacement.

NOMENCLATURE

SCC, refers to Self-Compacting Concrete.

MP, refers to Marble powder.

BAP0, refers to SCC as control mix without Marble Fillers.

BAP1, refers to SCC with 10 % MP and W/C = 0.4.

BAP2, refers to SCC with 10 % MP and W/C = 0.5.

BAP3, refers to SCC with 10 % MP and W/C = 0.6.

BAP4, refers to SCC with 20 % MP and W/C = 0.4

BAP5, refers to SCC with 20 % MP and W/C = 0.5

BAP6, refers to SCC with 20 % MP and W/C = 0.6.

BAP7, refers to SCC with 30 % MP and W/C = 0.4.

BAP8, refers to SCC with 30 % MP and W/C = 0.5.

BAP9, refers to SCC with 10 % MP and W/C = 0.6.

R_(c), refers to the compressive strength of concrete.

R_{tf}, refers to the tensile strength of concrete.

W (%), refers to the absorption of concrete.

P (%), refers to the porosity of concrete.

EXPERIMENTAL PROGRAM

MATERIALS

The used Cement is a CEM II /B 42.5 grade delivered from the Lafarge cement plant with a specific density of 3.1. As fine aggregates, the originally siliceous river sand was used. Two fractions of limestone crushed gravel (3/8, 8/16) were utilized. Marble fillers powder of fraction 0,08 mm having a density of 2.67 was kept at variable dosages for the experimental program. Also, the local super-plastizier MEDAPLAST SP40 delivered by GRANITEX manufacturer and a drinking water from the laboratory of civil engineering for concrete mixtures formulation were used (Dreux and Festa, 2000). The properties of the different materials are presented in table 1, table 2, table 3 and figure 1.

Tab. 1. The chemical and mineralogical composition of cement and marble powder used

The chemical composition of cement (%)										
Constituents	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	L.O.I	Σ
Clinker	27.77	7.00	2.29	56.91	3.38	2.30	0.12	0.51	2.73	100
Marble powder	0.48	0.10	0.12	54.54	0.72	0.46	0.079	0.053	43.55	100
The mineralogical composition of clinker (%)										
Constituents	C ₃ S		C ₂ S		C ₃ A		C ₄ AF			
(%)	58 - 64		12 - 18		6 - 8		10 - 12			
The mineralogical composition of marble powder (%)										
Constituents	Calcite	Dolomite	Quartz	Illite	Chlorite		Kaolinite		CO ₂ -XRD	
(%)	98.55	0.14	0.12	0.11	0.39		0.68		43.4	

Tab. 2. The physical properties of cement and marble powder used

Physical properties of cement and marble powder used		
Properties	Cement CEM II / B 42.5	Marble powder
Normal consistency	25,2 %	/
Initial setting (mn)	155	/
Final setting (mn)	280	/
Specific density (g/cm ³)	3,1	2.68□
Fineness (cm ² /g)	3995	5500
Bulk density (g/cm ³)	1,1	0,97

Tab. 3. The properties of aggregates

Aggregate size	Bulk density (Kg/Cm ³)	Specific density (Kg/cm ³)	LA (%)	Porosity (%)	Compacity (%)	Void ratio	W (%)	Fineness modulus (%)
Sand(0/5)	1.41	2.51	--	40.87	59.13	0.69	0.39	1.94
Gravel(3/8)	136	2.58	25	2.5	58.87	0.70	0.64	/
Gravel(8/15) *	1331	2.58	19	41.13	62.67	0.60	0.73	/

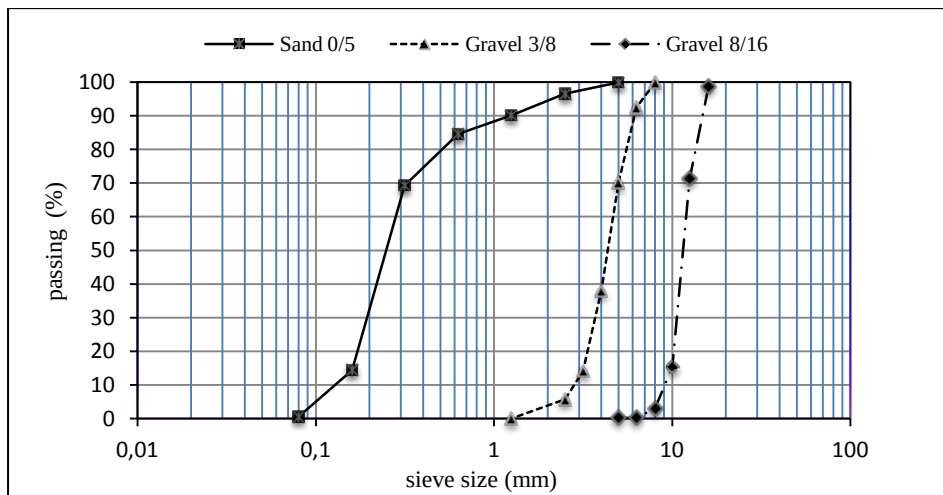


Fig 1. Sieve analysis curve for gravel and sand used.

COMPOSITION OF SCC MIXTURES

The necessary conditions allowing to guarantee the self-compacting and easy placing while based on compositions proposed in the specialized literature were respected in the due formulation of SCC mixtures (AFGC, 2000; Behim and Boucetta, 2009; Assié, 2004; Turcry, 2004; Diederich, 2010). It is fundamental to make the choice for the proportioning of constituents of SCC in one cubic meter (1 m^3) by having the following parameters, a proportional of gravel to sand relationship of G/S equal to one ($G/S = 1$) and a water cement ratio (W/C) of 0.4, 0.5 and 0.6. A determined dosages for the superplastizier admixture (1.7 % of the weight of cement) and variable percentages of 10, 20 and 30 % of marble powder addition were maintained for this program. To be able to compare the performances of various concretes independently of the cement factor, we fixed the dosage of the latter at $420 \text{ kg} / \text{m}^3$. A total of ten mixtures beside a control concrete mix at (100 % of cement) were prepared.

RESULTS AND DISCUSSION

FRESH STATE

L- BOX TEST

The characteristic tests at fresh state of concrete following the batching as recommended by the French Association of Civil Engineering (AFGC, 2000); the flow table, the L-box test and the sieve stability test in the aim of estimating the fluidity and the static and dynamic segregation of the SCC mixes were realized.

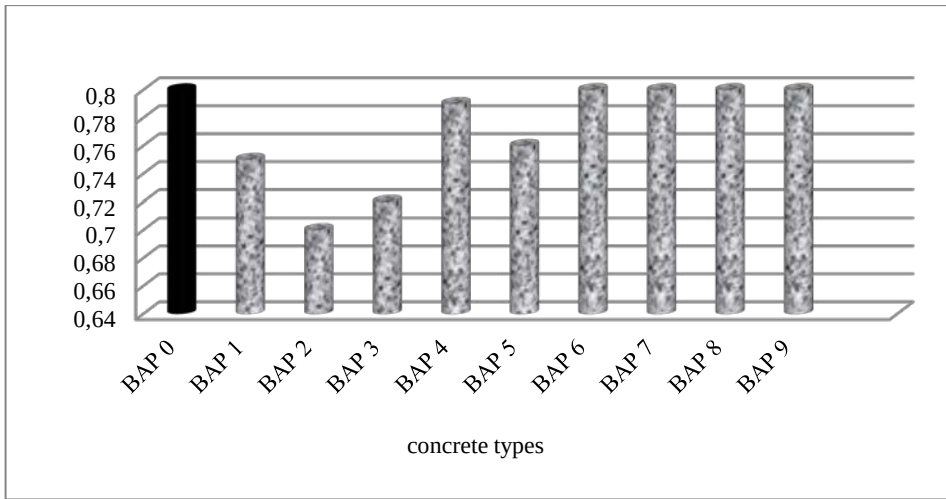


Fig. 2. L box test results for the different concretes types

Figure 2, shows the results obtained for the L box test. The test is exploited through the occupancy rate relationship of the concrete heights in bottom and in the beginning of the box which must as a rule be upper to 0,8 according to the recommendations (AFGC, 2000). The BAP 7, BAP 8 and the BAP 9 ($W/C = 0.6$) are more fluid than the other concrete types, because of the higher W/C ratio.

The mixtures with marble powder presented occupancy rates being closer to the control mix, one can say that the partial replacement of the cement by the marble powder reaching 30 % has no effect on the mobility of the concrete in a confined medium.

FLOW TABLE TEST

The values of the flow diameter are usually fixed between 60 and 75 cm for SCC mixtures. It can be noticed that the values of the spreading of control mix (without addition of marble fillers) is 70 cm . While for the concretes with addition is situated between 55 to 60 cm for the SCC mixtures with $W/C = 0.4$, (61 to 67 cm, 69 to 74 cm for $W/C = 0.5$ and 69 to 74 cm for mixes with $W/C = 0.6$, consequently.

These values show that most of the tested compositions present a spreading upper to 60 cm, that expresses greater fluidity. This high fluidity could be attributed to the use of the dosage of super-plastizier as 1.7 % of the weight of the binder. For the same ratio of W/C , the partial substitution of a part of cement by marble powder leads to a lower fluidity, hence a limited flow table diameter of the SCC mixture, in comparison with the witness. However, this increase of the marble powder dosage is resulting greater values for the flow diameter but it remains lower than that of the control one (BAP0). Finally, at the dosage of 30 % the concrete with the bigger fluidity (BAP9)

having a W/C ratio equal to 0.6 in regards to other SCC types with additions and It is similar to the control mix.

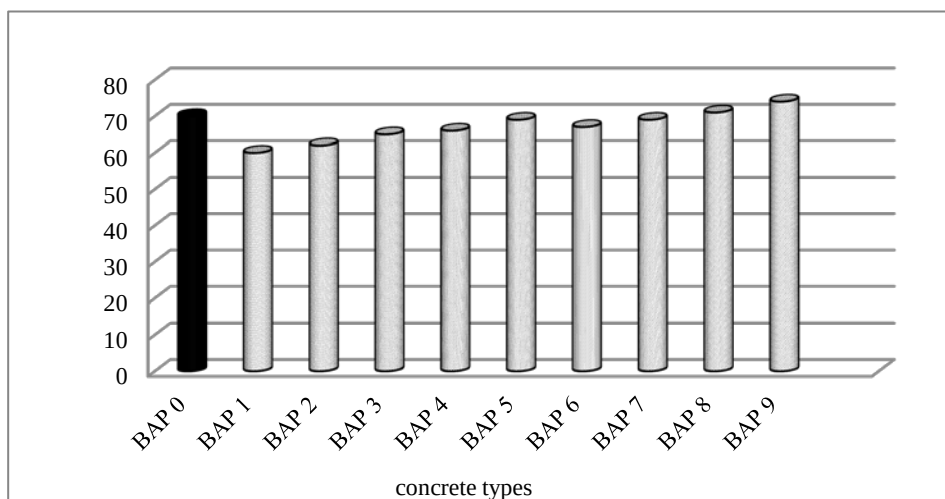


Fig. 3. Flow table test results for the different concrete types

One could conclude that the introduction of the marble fillers has no meaning effect on the workability of the tested SCC's types.

SEGREGATION INDEX

The percentage in weight of slurry having crossed the sieve compared with the weight of the initial sample expresses the stability of the concrete.

From figure 4. the results obtained which showed that the SCC's present an index of segregation inferior to 15 % for either the concrete witness mix and other concretes with marble powder additions. This reflects a sufficient stability, SCC's having a value of the resistance for the segregation lower than 15 % offer a self compacted concrete of very good quality.

The increase of the substitution amount of the cement by the marble powder at dosages of 10 %, 20 % and 30 % leads to a successive reduction in the quantity of necessary water to obtain the SCC satisfying the characteristics recommended by the AFGC. This gives some explanation by the fact that the marble powder in addition to the filler physical role could contribute to an improvement of the fluidity when coupled to the superplastizier admixture used SP 40. The due fact is that the partial replacement of a part of the cement by the marble powder gives a mixture with a less water demand.

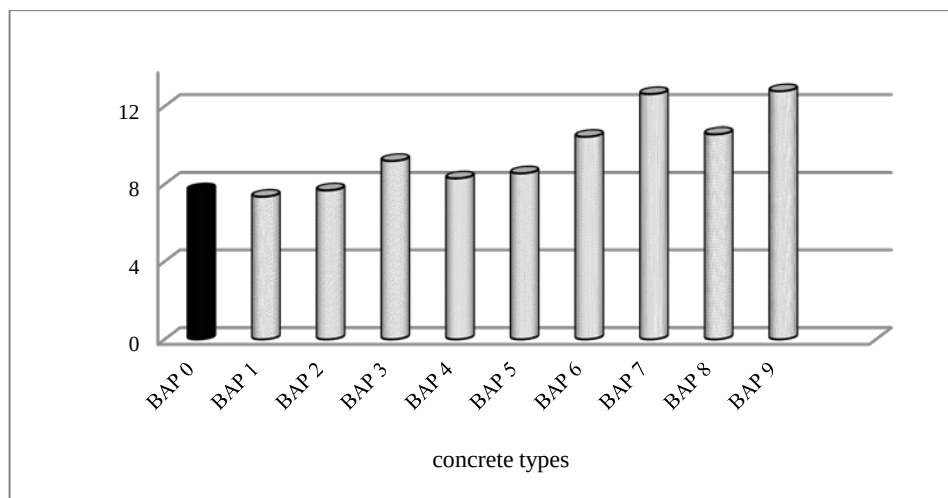


Fig. 4. Segregation index test for the different concrete types

HARDENED STATE

THE COMPRESSIVE STRENGTH R_c

The mechanical response in compression test allows to control the quality of the hardened concrete. It is about the most common current methods used so far.

It can be observed that for all the SCC mixtures the compression resistance increases with the age of the concrete in a normal development of strength according to the age of testing 7, 14 and 28 days (figure 5).

It is noticed that the dosage of the ratio $F/C=20\%$ gives a higher compressive strengths relatively to the SCC mixtures with $F/C = 10\%$ and $F/C = 30\%$. The compressive strength of the SCC with addition of marble powder are lower than that of the control mix at the age of 7, 14 and 28 days whatever the water cement ratios adopted in the experimental program.

This decrease of the resistance in compression is translated by the fact that the content of replacement introduced which led to the reduction of hydrate components in the cement based material. And these are responsible of the strength development in the SCC matrices with marble powder addition.

It is evident that the increase of W/C ratio is resulting in more a reduction of the strength; nevertheless, the witness mix resistance remains high compared to those containing the marble powder addition. Consequently, except for its physical role of filling the voids in concrete matrix, no activity as inerte constituents could be attributed to the marble powder.

This allows the aquisition of SCC mixtures with acceptable performances (Belaidi et al, 2012).

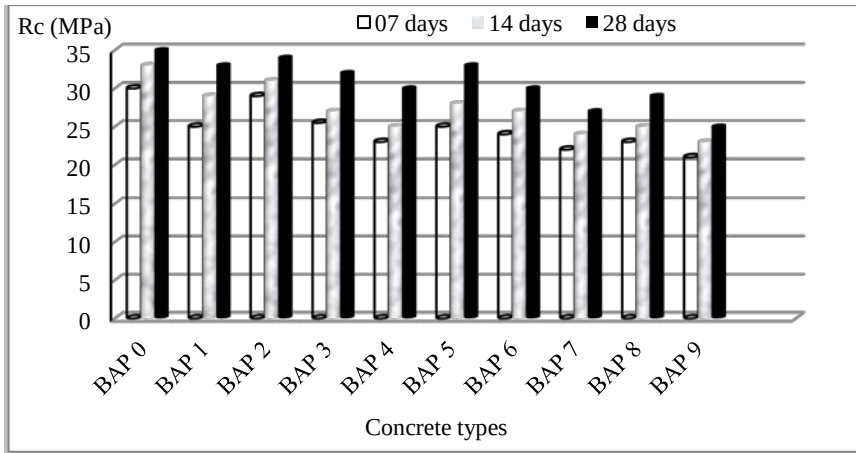


Fig. 5. The compressive strength (R_c) for the different concrete types at 7, 14 and 28 days of age

TENSILE STRENGTH (R_{TF})

It can be observed that for all the SCC mixtures the tensile strength resistance increases with the age in a normal development trend (figure 6). The increase at a dosage of 20 % is remarkable for the tensile strength of this mix compared to 10 % and 30 % percentages of marble powder SCC mixes. The addition of filler of marble led to the reduction of the tensile strength in regards to the witness concrete at the age of 7, 14 and 28 days for three water cement ratio used so far. As reported for the compressive strength all this is translated by the fact that the content of the SCC mixtures of inert replacement addition of MP instead of the active clinker.

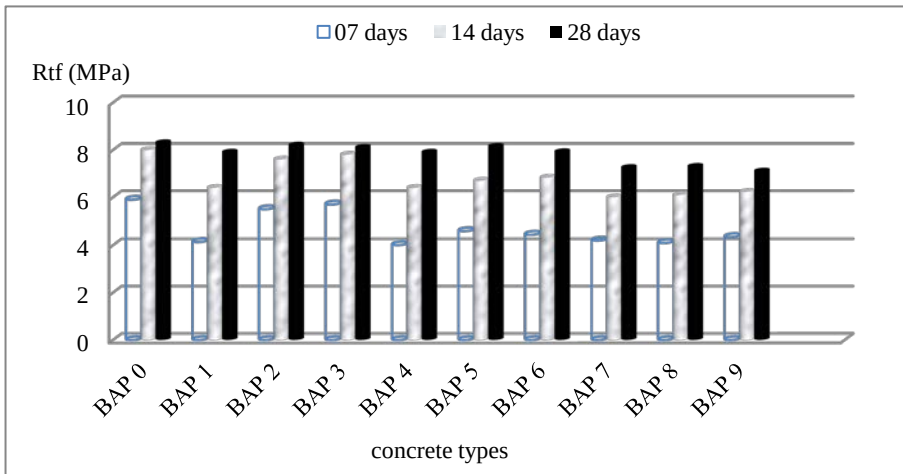


Fig. 6. The tensile strength for the different concrete types

ABSORPTION TEST

It is marked in this test the influence of water cement ratio W/C regarding the SCC concrete absorption rate. From figure 7, the marble powder dosage increases the absorption of SCC mixes in comparison with witness concrete (without addition). This may be due to the increase of water demand of these mixes to achieve the required fluidity.

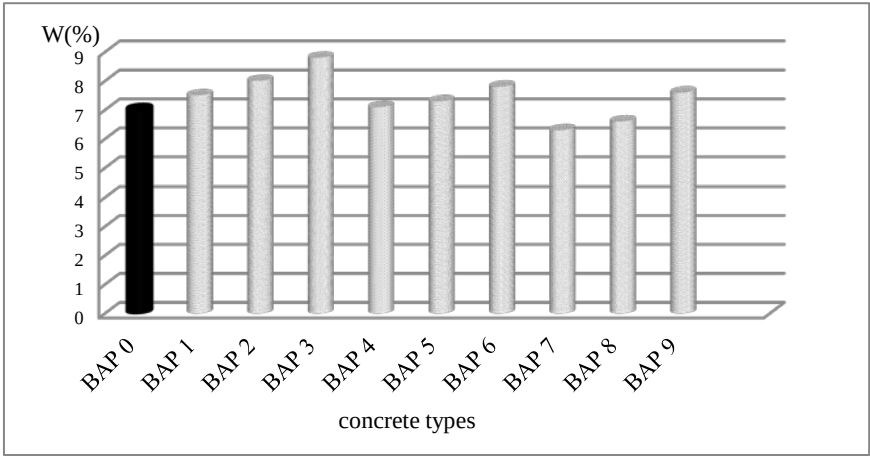


Fig. 7. The absorption W (%) as a function of concrete types

POROSITY TEST

The obtained results for porosity test are reported in the following figure 8.

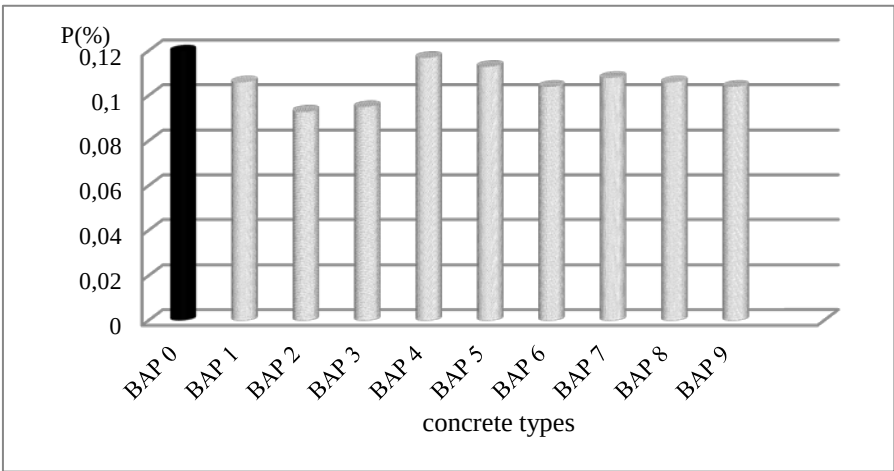


Fig. 8. The porosity for the different concrete types

It can be noticed from figure 8, that the increase of the dosage of marble powder causes a decrease of the porosity of the concrete at the percentage of 10 % and over compared to the concrete witness mix. The latter type is with a great homogeneity and low air content as the voids are filled with marble powder fines.

CONCLUSION

Self-compacting concretes are extremely fluid allowing the easy placement by gravitation and without vibration. These concretes are distinguished from traditional concretes by their properties in the fresh state, higher fluidity, better stability and more robustness. These exceptional particularities impose a higher dosage of cement in the paste to a denser matrix, which allows to keep reasonable heat release during the hydration process. This experimental study highlighted the possibility of using the marble powder waste as addition in the composition of the Self Compacting Concrete. The characteristic tests undertaken on SCC's at fresh state proved a satisfactory fluidity and a good stability as acquired properties at dosages of marble powder reaching 30 %. This could be attributed to the addition of marble powder coupled with a super-plastizier which results a homogeneous mix, without segregation and characterized by easy placing in confined densified steel reinforcement elements. Furthermore, at hardened state, the SCC with marble powder percentages less than 20 % presented acceptable compressive and tensile strengths in regards to the control. In addition, limited porosity and lower absorption are watched for SCC mixtures at these dosages up to 20 % of partial cement replacements by marble powder additions, which reveals enhanced sustainability .

Finally, it could be concluded that the marble powder waste incorporation could be advantageous for SCC formulation at the economic and the environmental levels.

ACKNOWLEDGEMENTS

The authors express their acknowledgement for any help provided by all person contributing in the preparation of the present work.

REFERENCES

- AFGC, Association française de Génie Civil, 2000. *Les bétons autoplaçants: Recommandations provisoires*.
- Alyamac K E and Ince R., 2009. *A preliminary concrete mix design for SCC with marble powders*, Construction and building Materials, 23, Elsevier, pp. 1201- 1210.
- Assié S., 2004. *Durabilité des bétons autoplaçants*. Thèse de doctorat. l'INSA de Toulouse, France.
- Behim M., Boucetta A., 2009. *Effet des additions micronisées sur l'écoulement des bétons autoplaçants (Laitier de haut fourneau, filler calcaire et poudre de verre)*, 1st International Conference on Sustain-

- able Built Environment Infrastructures in Developing Countries ENSET Oran, Algeria 12-14, October 2009.
- Belagraa L., Beddar M., Bouzid A., 2017. *Marble fillers effect on the mechanical performance of a recycled aggregate concrete*, Environmental Engineering and Management Journal, , Vol.1 6, No. 1, 197-204.
- Belagraa L., Bouzid A., 2016. *Performance study of low environmental impact mortars based on mineral additions and cement resistant to sulfate (crs)*, Mining Science, vol. 23 , 65–76.
- Belaidi A SE., Azzouz L., Kadri E and Kenai S., 2012, *Effect of natural pozzolana and marble powder on the properties of self-compacting concrete*, Construction and Building Materials, 31, Elsevier, 251-257.
- Corinaldesi V., Moriconi G and Naik T R., 2010. *Characterization of marble powder for its use in mortar and concrete*, Construction and Building Materials, 24, Elsevier, 113-117.
- Diederich, P., 2010. *Contribution à l'étude de l'influence des propriétés des fillers calcaires sur le comportement autoplçant du béton*, Thèse de doctorat, Université Toulouse III - Paul Sabatier, France.
- Dreux G. et Festa J., 2000. *Nouveaux guide du béton et de ces constituants*, Ed. Eyrolles.
- Dupain R., Lanchon R., Saint-Arromain J.C., 2000. *Granulats, sols, ciments et bétons*, Edition Casteilla,
- Topcu I B., Belir, T., and Uygunoglu T., 2009. *Effect of marble dust content as filler on properties of self-compacting concrete*, Construction and building Materials, 23, Elsevier, 1947-1953.
- Turcry, P., 2004. *Retrait et fissuration des bétons autoplçants –Influence de la formulation*. Thèse de doctorat. Université de Nantes, France.
- Zhu W., Gibbs J C., 2005. *Use of different limestone and chalk powders in self-compacting concrete*, Cement and Concrete Research, 35, 1457-1462.