

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA

FACULTE DE TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT DE GENIE CIVIL

N° :



DOMAINE : SCIENCE ET TECHNIQUES
FILIERE : Génie Civil
OPTION : Matériaux

Mémoire présenté pour l'obtention
Du diplôme de Master Académique

Par : - GUERBAS NABIL
- ATTALLAH OQBA

Intitulé

Etude de l'effet des températures élevées sur les propriétés mécaniques d'un béton autoplaçant renforcé par des fibres métalliques

Le : 01juin 2017

Soutenu devant le jury composé de :

Dr. BELLAGRAA Larbi	Université de M'sila	Président
Pr. RAHMOUNI Zine El Abidine	Université de M'sila	Encadreur
Mme. DJEBRI Noura	Université de M'sila	Co- Encadreur
Dr. ZITOUNI Salim	Université de M'sila	Examineur

Année universitaire : 2016 /2017

Remerciement

Nous tenons à remercier tout premièrement Dieu le tout puissant pour la volonté, la santé et la patience, qu'il nous a donné durant toutes ces longues années.

*En second lieu, Je tiens à remercier aussi et chaleureusement notre encadreur Pr : **RAHMOUNI ZINE EL ABIDINE**, et notre Co-encadreur Mme : **DJEBRI NOURA**, pour l'orientation, la confiance, la patience qui a constitué un apport considérable sans lequel ce travail n'aurait pas pu être mené à bon port. Qu'il trouve dans ce travail un hommage vivant à leur haute personnalité.*

Nous tenons à remercier vivement toutes personnes qui nous ont aidés à élaborer et réaliser ce mémoire, ainsi à tous ceux qui nous ont aidés de près ou de loin à accomplir ce travail

*Nos remerciements vont aussi à tous les enseignants et le chef de département de génie civil Dr : **Baali Aïd** et l'ensemble des membres du laboratoire surtout **YAMNA BAKHTI** qui a contribué à notre formation par ailleurs, Nos remerciements à tous **les membres du jury** qui ont accepté de juger notre travail.*

En fin, nous tenons à exprimer notre reconnaissance à tous nos amis et camarades pour le soutien moral et matériel.

Dédicace

C'est avec un immense plaisir que je dédie ce modeste travail à :

*A ma chère mère **GUERBAS LAILA***

*et mon cher père **GUERBAS DJAMEL***

Aux supports de mon âme, vous ma très chère frère : Abd el aziz

et mes sœurs : Ikram et Amina et Wessam

Un dédicace très spéciale à mon amis : SAHLI RIDHA

Et à mes amis : Houssam, Nouri, Hassan, Imad, Ali et Okba,

A Tous les enseignants qui m'ont aidé de proche ou de loin pour

être un jour un Master en génie civil

*A tous les étudiants de génie civil de l'Université de M'sila et
surtout les étudiants de la deuxième Année Master « Matériaux »*

promo 2016 /2017.

Je vous remercie tous.....

GUERBAS.N

Dédicace

*C'est avec un immense plaisir que je dédie ce modeste travail à :
A ma chère mère TOUIRAT MEBARKA et mon
cher père ATTALLAH SEDDIKE*

*Aux supports de mon âme, vous mon très chers frères : Abd
elwahabe, Souleymane et Mohammed et mes sœurs : Nadia et
Sara et ta femme frère : Rejam Imane.*

Et Mounire, Hachem.

Et à mes amies : Houssam, Nouri, Hassan, Imad, Ali et Nabil,

Walid, Belkacem.

*A Tous les enseignants qui m'ont aidé de proche ou de loin pour
être un jour un Master en génie civil*

*A tous les étudiants de génie civil de l'université de M'sila et
surtout les étudiants de deuxième Année Master « Matériaux »
promo 2016 /2017.*

Je vous remercie tous...

ATTALLAH. O.

Table des matières

Remerciement

Table des matières

Table des figures

Liste des tableaux

Résumé

Abstract

Introduction générale 1

Partie I Etude Bibliographique

Chapitre I : Généralité sur les bétons autoplaçants

Introduction	3
I.1. Concept du béton auto compactant	3
I.2. Cahier des charges d'un béton autoplaçant	4
I.3. Les avantages des bétons autoplaçants	4
I.4. Les critères de composition des BAP	5
I.4.1 Un volume de pâte important	5
I.4.2 Une quantité de fines (<80 µm) importante	5
I.4.3 L'utilisation des superplastifiants	5
I.4.4 Utilisation éventuelle d'un rétenteur d'eau (dit agent de viscosité)	6
I.4.5 Un faible volume de gravillon	6
I.4.6 Les Ajouts minéraux	6
I.4.6.1. Avantages économiques et environnementaux	7
I.4.6.2. Avantages techniques	7
I.5. Formulation des bétons autoplaçants	7
I.5.1. aspect empirique de la formulation des BAP	7
I.5.1.1 Approche basée sur l'optimisation des mortiers	8
I.5.1.2. Approche basée sur l'optimisation du volume de pâte	9
I.5.1.3 Approche basée sur l'optimisation du squelette granulaire	9
I.5.2 Méthodes de formulation des BAP	10

I.5.2.1. Approche Japonaise	10
I.5.2.2 Approche suédoise	12
I.5.2.3. Approche de la JSCE	13
I.5.2.4. Approche du laboratoire central des ponts et chaussées LCPC	13
I.5.2.5. Application de la méthode des plans d'expériences	14
I.6. Propriétés du béton autoplaçant à l'état frais	15
I.6.1. Caractéristiques rhéologiques fondamentales des BAP	15
I.6.2. Essais de caractérisation des bétons autoplaçants	15
I.6.2.1. Etalement [NF EN 12350-8]	15
I.6.2.2. Essai de la boîte en L	16
I.6.2.3. Stabilité	16
I.7. Propriétés du béton autoplaçant à l'état durci	17
I.8. Utilisation des bétons autoplaçants en Algérie	18
Conclusion	18

Chapitre II : Les bétons autoplaçants fibres

Introduction	19
II.1. Les bétons renforcés de fibre(s)	19
II.2. Description des différents types de béton de fibre (classification)	20
II.3. Les fibres	20
II.3.1. Types et caractéristiques	20
II.3.3.1 La fibre métallique	21
II.3.2. La longueur et élancement des fibres	22
II.3.3. Le Pourcentage et le dosage en fibre	23
II.3.4. Propriétés mécaniques des fibres métalliques	25
II.3.5. Rôle des fibres	25
II.4. Composition des BAPF	27
II.5. formulation des BAPF	27
II.6. Comportement mécanique des BAPF	28
II.6.1. Effet du volume des fibres	28
II.6.2. Effet de la longueur des fibres	28
II.6.3. Effet de l'aspect ratio et la forme géométrique	29
II.7. Influence des fibres sur les propriétés rhéologiques des BAP	29
II.7.1. Sur l'étalement	29

II.8. Orientation et distribution des fibres	30
II.9. Utilisation des BAP fibres dans les structures	31
Conclusion	31

Chapitre III : L'effet de la température sur les BAP fibrés

Introduction	32
Contexte	32
III.1 Evolutions des propriétés du béton soumis à des températures élevées	33
III.1.1 Evolution de la matrice cimentaire	33
III.1.2 Evolution des granulats	34
III.1.3 Déformation thermohydrrique libre du béton	34
III.1.4 Evolution des propriétés physiques	35
III.1.4.1 Perte de masse	36
III.1.4.2. Porosité	36
III.1.5. Evolution des propriétés mécaniques du béton	37
III.1.5.1. Résistance à la compression	37
III.1.5.2. Résistance à la traction	40
III.1.5.3. Module d'élasticité	41
Conclusion	44

PARTIE II EXPERIMENTALE

Chapitre IV : Caractéristiques des matériaux utilisés

Introduction	45
IV.1. Les matériaux utilisés	45
IV.2. Ciment	45
IV.2.1 : Caractéristiques chimiques du ciment utilisé (CPJ42.5)	45
IV.2.2. Les caractéristiques minéralogiques du ciment CPJ42.5	45
IV.2.3 : Caractéristiques physiques du ciment utilisé (CPJ42.5)	46
IV.3. Caractéristiques du sable utilisé	46
IV.3.1. Essai d'analyse granulométrique (NF P18-650)	46
IV.3.2 Caractéristiques physiques du sable utilisé	48
IV.3.2.1. Masse spécifique (absolue) : NF P 18-555	48

IV.3.2.2. Masse volumique apparente : NF P 18-555	48
IV.3.2.3 Porosité et compacité et indice des vides : NF P 554	49
IV.3.2.4. Equivalent de sable : NF 18-598	50
IV.3.2.5. Teneur en eau : NF P 18-555	51
IV.3.2.6. Degré d'absorption d'eau	52
IV.3.3. Caractéristiques chimiques du sable	52
IV.4. Caractéristique du gravier utilisé	52
IV.4.1. Origine du gravier utilisé	52
IV.4.2. Analyse granulométrique	53
IV.4.3. Les caractéristiques physiques des graviers utilisés	53
IV.4.3.1. Masse volumique apparent : NF P 18-554	53
IV.4.3.2. Masse volumique absolue	54
IV.4.3.3. Compacité, porosité et l'indice de vide : NF P 18-554	54
IV.4.3.5. Teneur en eau du gravier	54
IV.4.4. Les caractéristiques mécaniques des graviers utilisés	55
IV.4.4.1 Essai Los Angeles (NF P 18-573)	55
IV.4.5. Caractéristiques chimiques des graviers utilisés	56
IV.5. Les Adjuvants	57
IV.5.1. Le MEDAPLAST SP 40	57
IV.5.2. Propriétés chimiques et physiques	57
IV.5.3. Propriétés	57
IV. 6. Le filler utilisé (Poudre de marbre)	58
IV.7. Fibres métalliques	59
IV. 7.1. Description	59
IV.7.2. Caractéristiques	59
IV.7.3. Caractéristiques techniques	59
IV.8. L'eau de gâchage	60
IV.8.1. Caractéristiques chimiques de l'eau utilisée	60
Conclusion	60

Chapitre V : Techniques expérimentales

Introduction	61
V.1. Formulation du béton autoplaçant	61
V.1.1. Calcul des constituants d'un BAP par la méthode AFGC	61

V.2. Préparation de mélange	62
V.3. Conservation des éprouvettes	63
V.4. Essais de caractérisations du béton autoplaçant à l'état frais	63
V.4.1. Essai d'étalement au cône d'Abrams NFEN12 350-8	64
V.4.2. Essai de stabilité au tamis NF EN 12 350-11	65
V.4.3. Essai de la boîte en « L » NF EN 12 350-10	67
V.4.4. La masse volumique du béton autoplaçant NF EN 12 350-6	68
V.5. Essais de caractérisations du béton autoplaçant à l'état durci	68
V.5.1. Essai compression NF EN206-1	68
V.5.2. Essai de traction par flexion : NF P18-408	69
V.5.3. Module d'élasticité	70
V.5.4. Mesure de la perte de masse	71
V.5.5. Mesure la porosité à l'eau (Peau) : NF P 18 459	71

Chapitre VI : Résultats et analyses

Introduction	72
VI .1. Influence de fibres métalliques sur le comportement rhéologique du BAP	72
VI .1.1. Essai d'étalement (Slump flow)	73
VI .1.2. Essai de la Boite en L (L box)	74
VI .1.3. Essai de la stabilité au tamis	75
VI .1.4. La masse volumique	76
VI.2. Influence des fibres métalliques sur le comportement mécanique et physique du BAP soumis à une température élevée	76
VI .2.1. Compression	77
VI .2.2. Tracions par flexion	78
VI .2.3. Module d'élasticité	79
VI .2.4. La porosité	80
VI .2.5. La perte de masse	81
Conclusion	82
Conclusion générale	83
Bibliographie	

Liste des Figures

Fig. I. 1 : Aspect à l'état frais d'un BO plastique et d'un BAP	3
Fig. I. 2 : dispersion des granulats par excès de pâte	5
Fig. I. 3 : Mode d'action des Superplastifiants - Défloculation des grains de ciment	6
Fig. I. 4 : Notion d'excès de pâte : la pâte remplit la porosité (1) et écarte les granulats (2)	9
Fig. I. 5 : Réduction du volume de gravillon à la moitié de sa compacité	11
Fig. I. 6 : Recherche du dosage en eau et en superplastifiant : écoulement relatif T en fonction de l'étalement relatif D	12
Fig. I. 7 : Mesure de l'étalement des BAP	15
Fig. I. 8 : Essai de la boîte en L	16
Fig. I. 9 : Essai de stabilité au tamis	17
Fig. II. 1 : Géométrie des fibres métalliques	22
Fig. II. 2 : Ouvrabilité en fonction de l'élanement et de la teneur en fibre d'acier	24
Fig. II. 3 : Illustration de l'apport du renfort par des fibres	25
Fig. II. 4 : Principe de couture d'une fissure	26
Fig. II. 5 : Différents facteurs influant sur le comportement mécanique d'un béton renforcé de fibres	27
Fig. II. 6 : L'évolution de l'étalement en fonction du facteur de fibre	30
Fig. III. 1 : Illustrations de dégradations d'ouvrages en béton suite à un incendie	32
Fig. III. 2 : Section effondrée du faux plafond dans le tunnel du Gothard après l'incendie du 21 octobre, 2001	33
Fig. III. 3 : Evolution du coefficient de dilatation thermique apparent de la pâte de ciment et des granulats en fonction de la température	35
Fig. III. 4 : 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	36
Fig. III. 5 : Evolution de la porosité de différents bétons en fonction de la température	37
Fig. III. 6 : Evolution de la résistance à la compression d'un béton en fonction du type d'essai (à chaud ou à froid)	38
Fig. III. 7 : Courbes de la variation de la résistance à la compression selon les textes de l'Eurocode 2	39
Fig. III. 8 : Evolution de la résistance résiduelle relative à la compression de bétons de fibres métalliques, de polypropylène et de cocktail de fibres métalliques et polypropylène	39
Fig. III. 9 : Evolution de la résistance résiduelle relative à la traction des bétons chauffés, (vitesse de chauffage est de 1°C/min)	40
Fig. III. 10 : Différents résultats de la résistance à la traction résiduelle relative	41

Fig. III. 11: Evolution de modules d'élasticité apparents déterminé "à chaud" en fonction de différentes températures (a), évolution du module d'élasticité apparent obtenu "à chaud" et "résiduelles" sur le béton de fibres de polypropylène (0.9 kg/m ³) (b)	42
Fig. III. 12: Module d'élasticité statique résiduel en fonction de température	42
Fig. III. 13 : Evolution de module d'élasticité relatif résiduel en fonction de la température	43
Fig. III. 14 : Processus d'endommagement du béton en fonction de la température	44
Fig. IV. 1 : Matériel pour l'essai équivalent de sable	50
Fig. IV. 2 : Appareil de l'essai Los Angeles	55
Fig. IV. 3 : Analyse granulométrique de sable	57
Fig. IV. 4 : Evolution la résistance à la compression d'un béton adjuvanté avec SP 40	58
Fig. IV. 5 : poudre du marbre	58
Fig. IV. 6 : Fibres métalliques utilisés	59
Fig.V. 1 : Le four	63
Fig.V. 2 : Essai au cône d'Abrams	64
Fig.V. 3 : Essai d'étalement au cône	65
Fig.V. 4 : Essai de stabilité au tamis	65
Fig.V. 5 : Stabilité au tamis	66
Fig.V. 6 : Essai de boit L	67
Fig.V. 7 : Boîte en L	68
Fig.V. 8 : Presse hydraulique de compression	69
Fig.V. 9 : Essai de traction par flexion	70
Fig.V. 10 : Formule de calcul de la résistance de traction	70
Fig.V. 11 : Essai de porosité à l'eau	71
Fig.VI. 1: Variation de l'étalement en fonction des formulations en BAP	74
Fig.VI. 2 : Variation de la boîte en L en fonction les formulations en BAP	75
Fig.VI. 3 : Variation de la stabilité au tamis en fonction les formulations en BAP	76
Fig.VI. 4 : Variation de la masse volumique en fonction des formulations en BAP	77
Fig.VI. 5 : Évolution de la résistance à la compression des BAP en fonction des températures	78
Fig.VI. 6 : Évolution de la résistance à la traction par flexion des BAP en fonction des températures	79
Fig.VI. 7 : Évolution de module d'élasticité des BAP en fonction des températures	80
Fig.VI. 8 : Évolution de la porosité des BAP en fonction des températures	81
Fig.VI. 9 : Évolution de la perte de masse des BAP en fonction des températures	82

Liste des Tableaux

Tableau.I. 1 : Classes d'étalement.....	16
Tableau.II. 1 : Les différents types de fibres en fonctions de leurs caractéristiques respectives.....	20
Tableau.II. 2 : Récapitulatifdes différents types de fibres.....	21
Tableau II. 3 : les caractéristiques mécaniques et physiques des fibres les plus utilisées.....	21
Tableau II. 4 : Domaines d'application des BAP.....	31
Tableau.IV. 1 : Les compositions chimiques du CPJ42.5 26/04/2017.....	45
Tableau.IV. 2 : Les compositions minéralogiques du CPJ 42.....	45
Tableau.IV. 3 : Caractéristiques physiques du ciment CEM II 42.5.....	46
Tableau.IV. 4 : Évolution de la résistance à la compression du ciment CEM II 42.5.....	46
Tableau.IV. 5 : Analyse granulométrique du sable.....	47
Tableau.IV. 6 : La masse volumique absolue de sable.....	48
Tableau.IV. 7 : La masse volumique apparente à l'état lâche.....	49
Tableau.IV. 8 : La masse volumique apparente à l'état compact du sable.....	49
Tableau.IV. 9 : Porosité, compacité et indice des vides.....	49
Tableau.IV. 10 : Équivalent de sable.....	51
Tableau.IV. 11 : Teneur en eau de sable.....	52
Tableau.IV. 12 : Degré d'absorption d'eau (sable).....	52
Tableau.IV. 13 : Les Caractéristiques chimiques du sable 26/04/2017.....	52
Tableau.IV. 14 : Analyse granulométrique du gravier 3/8.....	53
Tableau.IV. 15 : Analyse granulométrique du gravier 8/16.....	53
Tableau.IV. 16 : Masse volumique apparente du gravier.....	54
Tableau.IV. 17 : La masse volumique absolue du gravier.....	54
Tableau.IV. 18 : Porosité, compacité et l'indice des vides.....	54
Tableau.IV. 19 : Teneur en eau des graviers.....	54
Tableau.IV. 20 : Caractéristiques mécaniques du gravier utilisé.....	56
Tableau.IV. 21 : Classification des roches en fonction du coefficient L_A	56
Tableau.IV. 22 : Analyse chimique du gravier.....	56
Tableau.IV. 23 : Caractéristiques physiques.....	57
Tableau.IV. 24 : effet de l'adjudant sur béton frais et durci.....	58
Tableau.IV. 25 : Caractéristiques physiques de la poudre de marbre.....	58
Tableau.IV. 26 : Composition chimique de la poudre de marbre.....	58
Tableau.IV. 27 : Composition minéralogique de la poudre de marbre10/04/2017.....	59
Tableau.IV. 28 : Caractéristiques technique de FIL D'ATTACHE.....	60
Tableau.IV. 29 :Caractéristiques technique de FIBERTEK A.....	60
Tableau.IV. 30 : Caractéristiques chimiques d'eau.....	60
Tableau. V. 1 : Composition d'un mètre cube de béton formulé par la méthode AFGC.....	62
Tableau.VI. 1 : Caractéristiques rhéologiques des bétons autoplaçants fibrés.....	73

Glossaire

Notations cimentaires pour l'ensemble du document :

A : Al_2O_3	C : CaO	S : SiO_2
F : Fe_2O_3	C : CO_2	S : SO_3
H : H_2O	M : MgO	K : K_2O
T : TiO_2	P : P_2O_5	N : Na_2O

Notation et Abréviation :

BAP	Béton autoplaçant
AFGC	Association française de génie civil
BHP	Béton à Hautes Performances
BO	Béton ordinaire
BV	Béton vibré
BTHP	Béton à Très Hautes Performances
CaO	Chaux libre
$CaCO_3$	Carbonate de Calcium ou Calcaire
$Ca(OH)_2$	Portlandite
CO_2	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
$f_c(T)$	Résistance mécanique moyenne à la compression
$f_t(T)$	Résistance mécanique moyenne à la traction
S	Sable
G	Gravier
E	Eau
SP	super plastifiant
FM	fibre métallique
P_{eau}	porosité à l'eau

Résume :

Les bétons autoplaçants (BAP) sont des bétons très fluides dont la mise en place sans vibration présente plusieurs avantages tant au niveau environnemental, humain, technologique qu'économique qui intéressent de plus en plus les industriels.

Les dégradations des éléments structuraux soumis à des conditions accidentelles telles que les incendies dans les tunnels, le béton est influencé fortement par ces incendies.

La fibre métallique est ajoutée au béton pour améliorer ses propriétés mécaniques.

Le but de ce travail de recherche est d'étudier l'effet de fibre métallique sur le comportement physique et mécanique du BAP soumis à température élevée.

Pour cela des éprouvettes cubique et prismatique ont subi un traitement thermique d'un chauffage à 10°C/min. après le traitement thermique et après refroidissement de 3 heures, les éprouvettes de béton ont subi des essais de compression, de traction par flexion 3 points, mesure de la perte de masse et l'essai de porosité à l'eau.

A travers cette étude les BAP avec fibre métallique présentent une meilleure résistance mécanique à la compression et à la flexion que le BAP sans fibre.

En revanche l'incorporation de la fibre métallique dans le béton diminue la porosité, et diminue la perte de masse de béton engendrée par l'évaporation de l'eau et la déshydratation progressive des hydrates de la pâte de ciment.

Mots clés : béton autoplaçant, fibres métalliques, propriétés rhéologiques, propriétés mécaniques.

Abstract :

Self-placing concretes (BAP) are very fluid concretes, the vibration-free installation of which has several environmental, human, technological and economic advantages that are increasingly of interest to industrialists.

Damage to structural elements subjected to accidental conditions such as fire in tunnels, concrete and heavily influenced by these fires.

The metal fiber is added to the concrete to improve its mechanical properties.

The aim of this research is to study the effect of metallic fibers on the physical and mechanical behavior of BAP subjected to high temperature.

For this purpose, cubic and prismatic specimens have undergone a heat treatment of a heating at 10 ° C. /min. After the heat treatment and after cooling for 3 hours, the concrete specimens were subjected to compression tests, 3-point bending tests, mass loss measurement and water porosity test.

Through this study, BAPs with metallic fibers have better mechanical resistance to compression and bending than BAP without fiber.

On the other hand, the incorporation of the metallic fiber in the concrete reduces the porosity and reduces the loss of concrete mass caused by the evaporation of the water and the progressive dehydration of the hydrates of the cement paste.

Key words: self - compacting concrete, metallic fibers, rheological properties, mechanical properties.

ملخص:

الخرسانة ذاتية القوية (SCC) هي خرسانة سائلة جدا تتموضع بدون اهتزاز ولديها العديد من المزايا البيئية والبشرية والتكنولوجية والمصالح الاقتصادية الصناعية على نحو متزايد.

تدهور العناصر الهيكلية عند التعرض للحوادث مثل الحرائق في الأنفاق والتي تتأثر بشدة من جراء هذه الحرائق. والغرض من هذا البحث هو دراسة تأثير الألياف المعدنية على السلوك المادي والميكانيكي للخرسانة ذاتية القوية (SCC) عند التعرض لدرجة حرارة مرتفعة. وتضاف الألياف المعدنية الملموسة لتحسين خواصه الميكانيكية.

تطبق على هذه العينات المكعبة والمنشورية معالجة حرارية عن طريق التسخين ب 10°C / دقيقة. بعد المعالجة الحرارية والتبريد بعد 3 ساعات، يتم إخضاع عينات الخرسانة لاختبارات الضغط والانحناء، وقياس فقدان كتلة واختبار المسامية المياه. من خلال هذه الدراسة للخرسانة ذاتية القوية مع الألياف المعدنية نستنتج أن لديها مقاومة ميكانيكية أفضل للضغط والانحناء من الخرسانة ذاتية القوية دون الألياف.

في المقابل إدماج الألياف المعدنية في الخرسانة يقلل المسامية ويقلل من فقدان كتلة الخرسانة سببها تبخر المياه والجفاف التدريجي لعجينة الأسمنت.

كلمات مفتاحية: الخرسانة ذاتية القوية والألياف المعدنية، وخصائص الانسيابية، الخواص الميكانيكية. الخصائص الريولوجية.

Introduction générale

La production journalière mondiale de béton est en moyenne de 16 393 442 m³. Ce matériau est utilisé dans la construction des immeubles d'habitation, des tunnels, des bâtiments d'activité industrielle et de commerce, des ouvrages d'art, etc. Le béton est adapté pour rester robuste et durable pendant une longue période. Cependant, lors des situations extrêmes, comme l'incendie, le béton peut présenter des endommagements plus ou moins sévères. Les constructions doivent respecter plusieurs critères de sécurité vis-à-vis de la protection des personnes, de l'ouvrage, ainsi que de l'environnement lors d'un incendie. [1]

Dans une approche sécuritaire de la construction, les structures en bétons doivent être conçues de façon à résister une éventuelle de température. En particulier, des études ont montré que durant élévation importante de température (comme lors d'un incendie), le béton ordinaire, pouvait présenter des risques importants d'instabilités thermiques (phénomène d'éclatement).

Dans ce but, les recherches continues ont permis l'émergence de bétons spéciaux : les bétons à hautes performances (BHP), les bétons à très hautes performances (BTHP), les bétons de fibres métalliques (BFM) et les bétons autoplaçants (BAP).

Les 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 chantier et le temps de mise en œuvre. [2]

Les principaux avantages des BAP sont liés à leur mise en place qui ne nécessite l'apport d'aucune vibration, qu'elle soit interne ou externe. Ces avantages sont d'ordre technico-économique mais également social. Ainsi, l'absence de vibration des BAP engendre une diminution sensible des nuisances sonores ainsi que de la pénibilité du travail et une réduction des délais et des coûts globaux de production. Sa fluidité permet également de couler des milieux fortement ferraillés ou à géométrie complexe. [3]

Le présent travail de mémoire de fin d'étude 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 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, module d'élasticité, la perte de masse et la porosité) exposés à différentes températures 20°C, 200°C, 400°C et 600°C.

Le mémoire s'organise en six chapitres :

Le première et le deuxième chapitre présentent l'état de l'art des BAP et des BAPF (BAP Fibré) d'un point de vue générale. 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 données publiées sont citées dans les domaines des propriétés mécaniques.

Le troisième chapitre présente une étude bibliographique détaillée sur les formes d'instabilité thermique que présente le béton chauffé. Ensuite, les évolutions des propriétés physiques et mécanique avec la température du béton sans fibre sont comparées à celles des bétons fibres et évolution chimique du matrice cimentaire et granulats.

Le quatrième chapitre est destiné à la caractérisation des matériaux utilisés, dont nous présentons les caractéristiques chimiques, physiques, et mécaniques (Ciment, filler calcaire, superplastifiants, fibres, sable et gravier).

Le cinquième chapitre est consacré à l'étude expérimentale, dans laquelle nous présentons les matériaux et le matériel utilisé dans notre travail.

Le sixième chapitre est consacré à la présentation et à la discussion des résultats obtenus lors de cette étude.

Une conclusion générale clôture ce mémoire en synthétisant les principaux résultats obtenus lors de cette étude ainsi que les intérêts techniques qui en découlent.

Des perspectives de recherche sont aussi présentées pour continuer à apporter de nouvelles informations pertinentes à ces nouveaux matériaux du génie civil à base de matériaux locaux.

Introduction	3
I.1. Concept du béton auto compactant	3
I.2. Cahier des charges d'un béton autoplaçant	4
I.3. Les avantages des bétons autoplaçants	4
I.4. Les critères de composition des BAP	5
I.5. Formulation des bétons autoplaçants	7
I.5.2 Méthodes de formulation des BAP	10
I.5.2.1. Approche Japonaise	10
I.5.2.2 Approche suédoise	12
I.5.2.3. Approche de la JSCE	13
I.5.2.4. Approche du laboratoire central des ponts et chaussées LCPC	13
I.5.2.5. Application de la méthode des plans d'expériences	14
I.6. Propriétés du béton autoplaçant à l'état frais	15
I.6.1. Caractéristiques rhéologiques fondamentales des BAP	15
I.6.2. Essais de caractérisation des bétons autoplaçants	15
I.6.2.1. Etalement [NF EN 12350-8]	15
I.6.2.2. Essai de la boîte en L	16
I.6.2.3. Stabilité	16
I.7. Propriétés du béton autoplaçant à l'état durci	17
I.8. Utilisation des bétons autoplaçants en Algérie	18
Conclusion	18

Chapitre I : Généralité sur les BAP

Introduction :

Cette partie présente un aperçu détaillé sur le béton autoplaçant en tant que nouveau matériau. Elle expose d'abord son concept ainsi que sa 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, finalement, il met en relief les innovations et les avantages apportés par les BAP.

I.1. Concept du béton auto compactant :

L'utilisation des bétons très fluides, ne nécessitant pas d'apport d'énergie extérieure pour le serrage, est apparue comme une solution possible à ce problème [4]. 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 chantier.

Les bétons autoplaçants (BAP) se distinguent donc des bétons dits ordinaires (BO), ou bétons à vibrer, par leurs propriétés à l'état frais [5, 6]. 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 ces 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 (Fig.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 [7].

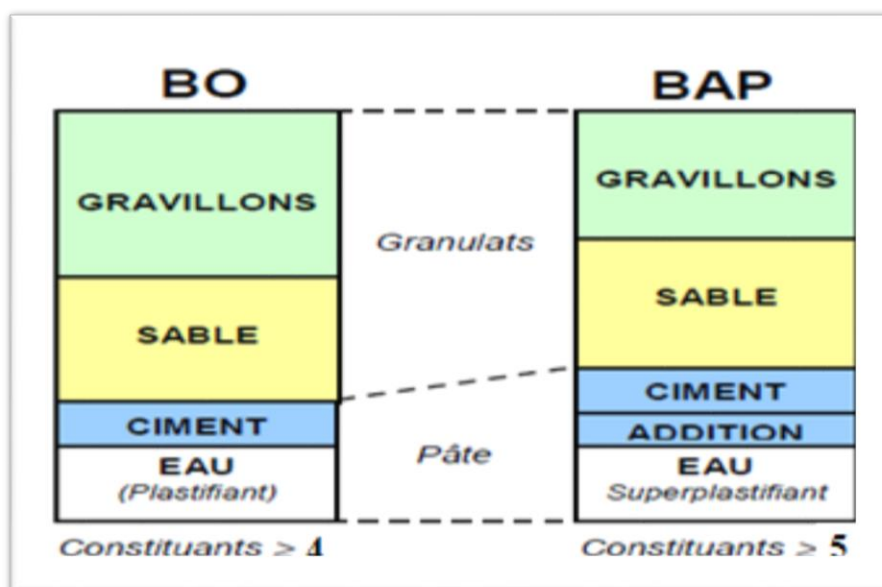


Fig. I. 1: Aspect à l'état frais d'un BO plastique et d'un BAP [8].

I.2.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 importants ;
- 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 zone inférieure lors du coulage, ainsi que l'apparition de fissures.

I.3.Les avantages des bétons autoplaçants :

Les BAP entraînent de nombreux avantages, on cite :

a) Avantages techniques :

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

b) Avantages économiques :

- Réduction du cout de main d'œuvre et du temps de bétonnage
- Absence de systèmes de vibration réduisant ainsi les couts 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) [9], [10].

I.4. Les critères de composition des BAP :

Après plusieurs recherches effectuées en laboratoires, les essais ont montré que pour répondre aux exigences du cahier des charges, la composition d'un béton autoplaçant doit avoir certaines caractéristiques [11], soit :

I.4.1. Un volume de pâte important :

Les frottements entre granulats sont source de limitation vis-à-vis de l'étalement et de la capacité au remplissage des bétons. Le rôle de la pâte (ciment + additions + eau efficace + air) étant précisément d'écarter les granulats les uns des autres, son volume dans les BAP est donc élevé (Fig.I.2).

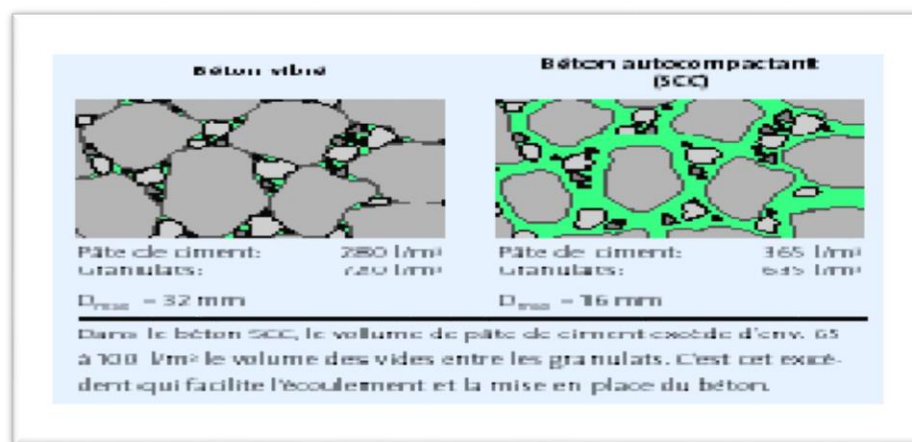


Fig. I. 2: Dispersion des granulats par excès de pâte [12].

I.4.2. Une quantité de fines (<80 µm) importante :

Afin de garantir le compromis entre stabilité et maniabilité tout en limitant les risques de ségrégation et de ressuage, les BAP contiennent une quantité de fines (de l'ordre de 500 kg/m³) supérieure à celle des bétons conventionnels.

Le choix des additions et de leur teneur respective dans les BAP est déterminé en fonction des exigences de résistance à la compression à 28 jours, des critères de durabilité et des paramètres d'ouvrabilité telles qu'imposées par les normes applicables (DTU 21, norme XP P 18-305, normes produit préfabriqué en usine, etc.).

I.4.3. L'utilisation des superplastifiants :

Les superplastifiants permettent d'obtenir des bétons très fluides. Ces fluidifiants ont le rôle de défloculants, ainsi les particules solides sont dispersées par combinaison d'effets électrostatiques et stériques et la proportion d'eau libre est plus importante. Toutefois un dosage trop élevé (proche ou supérieur au dosage de saturation) peut augmenter la sensibilité du béton à des variations de teneur en eau vis-à-vis du problème de la ségrégation et du ressuage.

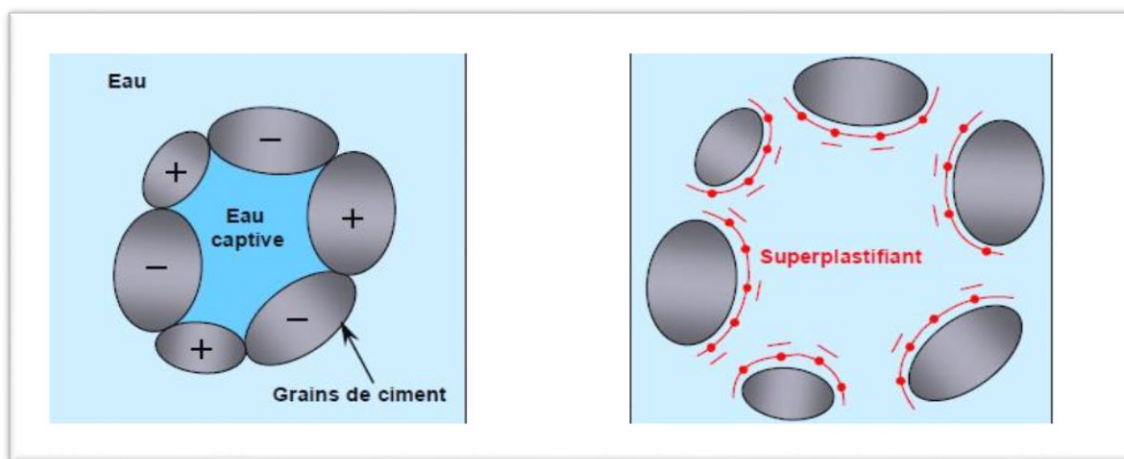


Fig. I. 3: Mode d'action des super-plastifiants - Défloculation des grains de ciment [8].

I.4.4. Utilisation éventuelle d'un rétenteur d'eau (dit 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.4.5. Un faible volume de gravillon :

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

I.4.6. Les Ajouts minéraux :

Différentes additions minérales peuvent être ajoutées au béton, substituant ou non une partie du ciment, afin d'améliorer certaines de ses propriétés ou de lui conférer des propriétés particulières, ce sont des matériaux finement divisés parmi lesquelles nous citons les fillers, la fumée de silice, les cendres volantes qui proviennent principalement de l'industrie, ces fines présentent plusieurs avantages dans l'industrie et la formulation des bétons.

I.4.6.1. Avantages économiques et environnementaux :

La plupart des additions minérales sont des sous-produits provenant de l'industrie et leur coût est souvent égal au coût du transport et de manipulation (broyage par exemple), ainsi l'incorporation des additions minérales à la formulation de béton comme substituant du ciment (produit plus cher), contribue à réduire le coût du béton. Par ailleurs, l'utilisation généralisée des additions minérales dans le monde contribue aussi à réduire la production du ciment qui nécessite une chaleur importante, donc à réduire la quantité de combustible utilisée pour l'industrie du ciment, ainsi que l'émission du CO₂ de l'industrie cimentière dans la nature.

I.4.6.2. Avantages techniques :

En général, les additions minérales influencent fortement les propriétés des bétons à l'état durci, elles permettent d'améliorer les propriétés mécaniques et la durabilité des bétons, en raison de leurs petites dimensions, les particules de la poudre se glissent entre les grains plus gros (sable par exemple), contribuant ainsi à avoir un squelette solide plus compact et réduisant l'espace libre pour l'eau [18], cette optimisation de la granulométrie du squelette total, aide aussi à limiter le ressuage du béton et à augmenter la cohésion de l'ensemble. Par ailleurs, les additions minérales réduisent la chaleur dégagée du béton lors de l'hydratation, ce qui diminue la fissuration d'origine thermique.

I.5. Formulation des bétons autoplaçants :

I.5.1. aspect empirique de la formulation des BAP :

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

Plusieurs approches de formulation des BAP ont été élaborées à travers le monde (approche japonaise, approche suédoise, approche du LCPC, etc.) 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 inter-granulats (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 [13, 14] ;

• Une deuxième famille de formulations repose sur le remplacement d'une partie du ciment par des fines minérales [15]. 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 établit 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 viscosant.

Les auteurs [13, 15] 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.5.1.1. 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 [4] :

- 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 [15, 16]. 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.5.1.2. 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 [17] introduisent la notion d'excès de pâte schématisée sur la Fig.I.4, la formulation consiste à déterminer la quantité de pâte en excès optimale pour fluidifier le BAP et limiter les problèmes de blocage.

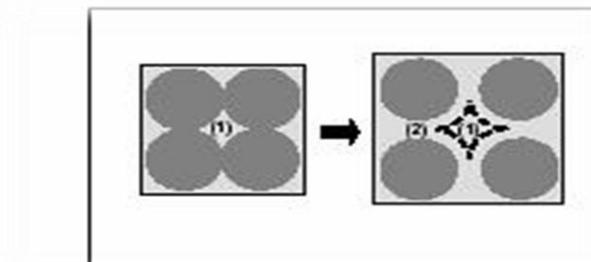


Fig. I. 4 : Notion d'excès de pâte : la pâte remplit la porosité (1) et écarte les granulats (2). [17]

Oh [17] 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.5.1.3. 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. A 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 modélisées la viscosité et le seuil de cisaillement du béton [16, 18, 19].

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.5.2.Méthodes de formulation des BAP :

Des méthodes rationnelles de formulation des BAP commencent à apparaître dans la littérature.

La particularité des BAP réside essentiellement dans leurs propriétés à l'état frais. Un BAP doit, tout d'abord, s'écouler sous son propre poids et avec un débit suffisant. Ceci se traduit dans la pratique par un étalement et une vitesse d'étalement importants. D'un point de vue plus scientifique et considérant que le béton est fluide de Bingham, ceci se traduit par un seuil de cisaillement et une viscosité plastique faibles. Ces grandeurs rhéologiques peuvent être mesurées à l'aide d'un rhéomètre à béton comme BTRHEOM-LCPC, par exemple.

Un BAP doit également pouvoir s'écouler, sans apport de vibration, à travers des zones confinées et une grande fluidité du béton n'est pas une condition suffisante pour cela. En effet, lors de l'écoulement d'un béton fluide au droit d'un obstacle, les gravillons cisailent le mortier et ont tendance à venir en contact les uns avec les autres si ce dernier n'est pas assez résistant au cisaillement. Des voûtes peuvent se former par contacts solides, se colmater avec des parties fines, et interrompre l'écoulement. Il faut donc qu'un BAP présente une bonne résistance à la ségrégation en phase d'écoulement dans une zone confinée.

Un BAP doit également avoir une bonne résistance à la ségrégation statique (une fois mis en place) jusqu'à sa prise, pour des raisons évidentes d'homogénéité de ses propriétés mécaniques. De façon corollaire, il ne doit pas subir un tassement ou un ressuage trop fort car ceci peut générer une chute d'adhérence des armatures en partie supérieure des levées par rapport à celle situées en zone inférieure lors du coulage, ainsi que l'apparition des fissures. Ajoutons, enfin, que ces bétons sont généralement pompables.

En conclusion, la principale difficulté à laquelle le formulateur de BAP est confronté est de pouvoir concilier des propriétés à priori contradictoires : la fluidité et la résistance à la ségrégation et au ressuage du béton. Le formulateur doit donc établir un équilibre entre le rapport eau sur liant et le dosage en superplastifiant pour avoir une pâte fluide mais qui reste suffisamment visqueuse et homogène. Il peut également utiliser un agent de viscosité pour limiter les problèmes de ressuage et de ségrégation.

I.5.2.1.Approche Japonaise :

Les chercheurs de l'université de Tokyo Okamura et Ozawa ainsi que Ouchi et al ont été les premiers à proposer une méthode de formulation des bétons autoplaçants [20, 21].

La teneur volumique du béton en gravillon est fixée à 50 % de leur compacité (les chercheurs ne précisent pas dans leur article comment la compacité est mesurée). Les auteurs prétendent, sur la base de nombreux essais, qu'un tel ratio permet d'éliminer les risques de blocage si le mortier est convenablement formulé.

La formulation des BAP par l'approche développée à l'Université de Kochi se fait de manière sécuritaire, en privilégiant le volume de pâte au détriment des granulats [4,22]. Les bétons obtenus sont sous dosés en granulats et par conséquent loin d'un optimum économique. Le surcoût engendré sur le matériau est compensé au Japon par les économies sur la main d'œuvre. Les principes de formulation et leur application sont les suivants.

Dosage des gravillons : Les chercheurs japonais ont montré que le risque de blocage est minimisé lorsque le volume du gravillon pour 1m³ de béton est limité à la moitié de sa compacité. Par définition, la compacité d'un mélange de grains est le rapport du volume de grains et du volume total du système grains + vides (Fig.I.5). Elle dépend bien sûr du mode de compactage.

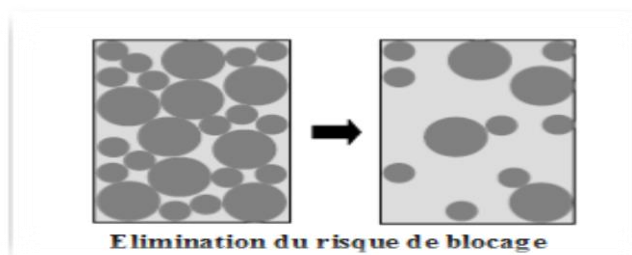


Fig. I. 5 : Réduction du volume de gravillon à la moitié de sa compacité. [23]

À défaut d'indication, ils ont choisi de la mesurer en suivant la procédure du LCPC [23].

La compacité est pour chaque gravillon d'environ 0,57. Dans le cas de la formule de granulométrie 0/10 mm, le volume du gravillon est donc posé à 285 l/m³. Dans le cas de la formule de granulométrie 0/14 mm, ils choisissent de répartir ce volume pour moitié en 6/10 et en 10/14.

Dosage du sable : Le volume du sable est posé forfaitairement à 40 % du volume de mortier du béton. La fluidité du béton est garantie par la réduction des frictions granulaires.

Dosage du liant : La méthode ne précise pas comment doser le liant. Néanmoins la quantité de ciment peut être fixée, par exemple, en respectant la donnée des normes (soit ici une masse minimale de ciment de 350 kg/m³). Les rapports massiques eau sur ciment et filler sur ciment peuvent également être choisis sur des critères de résistance.

Dosage de l'eau et du superplastifiant : Les dosages en eau et en superplastifiant sont déterminés au moyen d'essais sur mortiers, dont le volume de sable est fixé à 40 %. On réalise des mesures d'étalement avec un cône à mortier et des mesures d'écoulement à l'entonnoir.

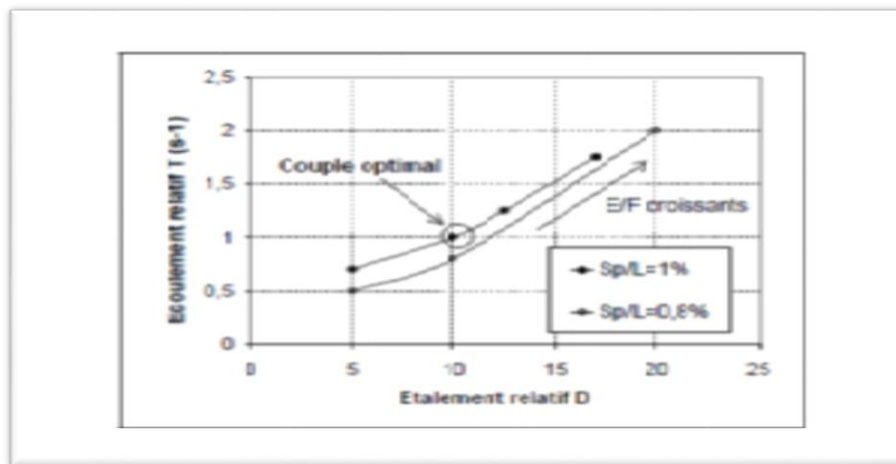


Fig. I. 6: Recherche du dosage en eau et en superplastifiant : écoulement relatif T en fonction de l'étalement relatif D [23].

I.5.2.2.Approche suédoise :

Cette méthode est basée sur la méthode japonaise (Okamura), le principe est d'intégrer l'approche de l'évaluation du risque de blocage dans le processus de formulation.

Pour chaque rapport G/S on estime le volume de pâte critique pour le blocage, on retiendra ensuite le rapport G/S qui vérifie les propriétés rhéologiques recherchées. Les dosages des fines, de l'eau et du superplastifiant sont ajustés pour avoir une viscosité suffisante, un faible seuil de cisaillement, et une résistance souhaitée.

Cette approche permet une meilleure optimisation du squelette granulaire. Cependant, on ne peut pas appliquer le critère de blocage à n'importe quel type de granulats.

I.5.2.3.Approche de la JSCE :

Cette méthode a été proposée par la Japonaise Society of Civil Engineers en 1998, après plusieurs recherches et applications pratiques.

Pour cette méthode la quantité d'eau, le rapport eau/poudre, et la teneur en poudre, varient en fonction de l'emploi ou non d'un agent de viscosité.

Les quantités de différents constituants sont déterminées comme suit :

- La quantité de gros granulats varie selon l'autocompactibilité recherchée et le diamètre maximum est limité à 20 mm voire 25 mm ;
- Lors de l'utilisation d'un agent de viscosité, la quantité d'eau se situe sous les 180 kg/m³ dans les conditions d'exposition normales. Cas particulier, lorsque la durabilité du béton n'est pas une contrainte majeure, on peut aller jusqu'à 190 kg/m³. En l'absence d'agent de viscosité, la quantité d'eau est réduite à 155 jusqu'à 175 kg/m³ ;

- Le rapport eau/poudre est basé sur les performances du béton à l'état durci. Lorsque la fluidité n'est pas atteinte on peut augmenter la quantité du liant. Le rapport massique eau/poudre doit être entre 28 et 37%, et le rapport volumique entre 85 et 115 % ;
- La quantité de poudre se déduit du rapport eau/poudre. Dans le cas d'un agent de viscosité de type polysaccharide, la quantité de poudre est de 0,13 .dans les autres cas la valeur prise doit être entre 0,16 et 0,19.
- Le volume d'air dépend du diamètre maximum des gros granulats, de la résistance souhaitée et des conditions d'exposition du béton. La valeur type s'élève à 4,5% d'air ;
- La quantité des fines est déduite des quantités précédentes ;
- Le dosage en adjuvant est évalué expérimentalement. Pour le superplastifiant, son dosage dépend du rapport eau/poudre ainsi que de la nature des poudres. Il est généralement de 1 à 2 kg d'extrait sec par m³, pour une solution aqueuse de 35% c'est l'équivalent de 3 à 6 litres. En ce qui concerne l'agent de viscosité, son dosage varie selon la nature de l'agent, aussi selon le type de béton (avec ou sans ajouts de fines).

I.5.2.4.Approche du laboratoire central des ponts et chaussées LCPC :

Cette approche consiste à développer un modèle mathématique à partir d'un modèle de suspension solide. Ce modèle est basé sur les interactions granulaires entre différents constituants du mélange.

Il permet de prévoir la compacité d'un mélange granulaire et de prendre en compte l'effet de confinement des armatures sur la compacité du béton et donc sur son ouvrabilité.

La compacité du mélange est déterminée avec une précision inférieure à 1% à partir des caractéristiques des constituants suivants :

- Les distributions granulaires ;
- Les proportions du mélange ;
- La compacité propre ;
- La densité apparente.

Ce modèle est utilisé pour prévoir l'évolution de l'ouvrabilité des bétons en fonction de leur composition, il sert aussi à :

- Comprendre et évaluer l'influence des différents constituants sur les propriétés du béton ;
- Choisir les matériaux qui permettent d'assurer un béton de bonnes caractéristiques que ce soit à l'état frais (ouvrabilité, stabilité) ou à l'état durci (résistance, retrait, fluage) ;
- Prendre en compte la spécificité et la nature d'un projet lors de la formulation de béton (béton pompé par exemple).

I.5.2.5. Application de la méthode des plans d'expériences :

De manière générale, la méthode des plans d'expériences cherchera à déterminer et à établir les liens existant entre 2 types de variables :

La réponse : grandeur physique étudiée ;

Les facteurs : grandeurs physiques modifiables par l'expérimentateur, sensées influé sur les variations de la réponse.

Plus précisément, elle vise aussi bien à comprendre les relations liant la réponse avec les facteurs, que les facteurs entre eux. Pour cela, la solution proposée consiste dans tous les cas à établir un modèle, exprimant la réponse en fonction des facteurs.

Pour bâtir ce modèle, il faut appréhender ces variations. Celles-ci sont déduites des résultats de séries d'expériences, c'est-à-dire de plusieurs configurations pour lesquelles les valeurs des facteurs sont différentes. Il s'agit ici de la notion de plan d'expériences (PE), correspondant à la réalisation d'une série de N expériences, qui sont toutes :

- Déterminées à priori ;
- Obligatoirement réalisables ;
- Indépendantes entre elles.

La réalisation d'un plan revient à déterminer la valeur de la fonction réponse pour ces N configurations. Une relation de modélisation en est alors déduite.

Les deux principales utilisations possibles de la Méthode des Plans d'Expériences (MPE) sont :

- La technique du screening. Parmi les facteurs recensés par l'expérimentateur, cet outil permet de déterminer ceux qui ont une influence statistiquement non négligeable sur les variations de la réponse. On procède ainsi implicitement à une simplification du problème. On recherche pourquoi la réponse varie (en fonction de quels facteurs) ;
- La méthodologie des surfaces de réponse.

Les variations de la réponse sont calculées en fonction des facteurs précédemment jugés influents. Cette étude est davantage quantitative, le but étant de déterminer comment la réponse varie.

Pour connaître les évolutions des variables caractéristiques du problème, leurs interactions, leurs influences sur les grandeurs étudiées, nous avons appliqué dans ces travaux la formalisation conférée par la méthode des plans d'expériences (MPE).

Ce terme désigne en définitive une méthodologie complète pour la caractérisation comportementale d'un système. Elle est basée sur la modification et la mesure des variables propres ; cela comprend principalement les grandeurs étudiées ainsi que leurs sources de variation. Elle permet de déterminer les relations existant entre ces 2 groupes de variables, en

établissant les relations analytiques des liants. Suivant le type de ces modèles mathématiques, l'expérimentateur peut en déduire des informations plus ou moins précises, qualitatives ou quantitatives.

I.6. Propriétés du béton autoplaçant à l'état frais :

I.6.1. Caractéristiques rhéologiques fondamentales des BAP :

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.

De nombreux tests simples ou empiriques ont été mis au point. Ces tests ont pour but de mieux caractériser le comportement du béton autoplaçant ou de valider son utilisation.

I.6.2. Essais de caractérisation des bétons autoplaçants à l'état frais :

Les essais de caractérisation à l'état frais vont être présents en accord avec la propriété qu'ils permettent de caractériser, ensuite la séquence de réalisation de ces essais sera présentée.

I.6.2.1. Etalement [NF EN 12350-8] :

L'essai s'effectue comme un essai d'affaissement au cône d'Abrams (Fig.I.7). 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'autocompacter 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 [24, 25].

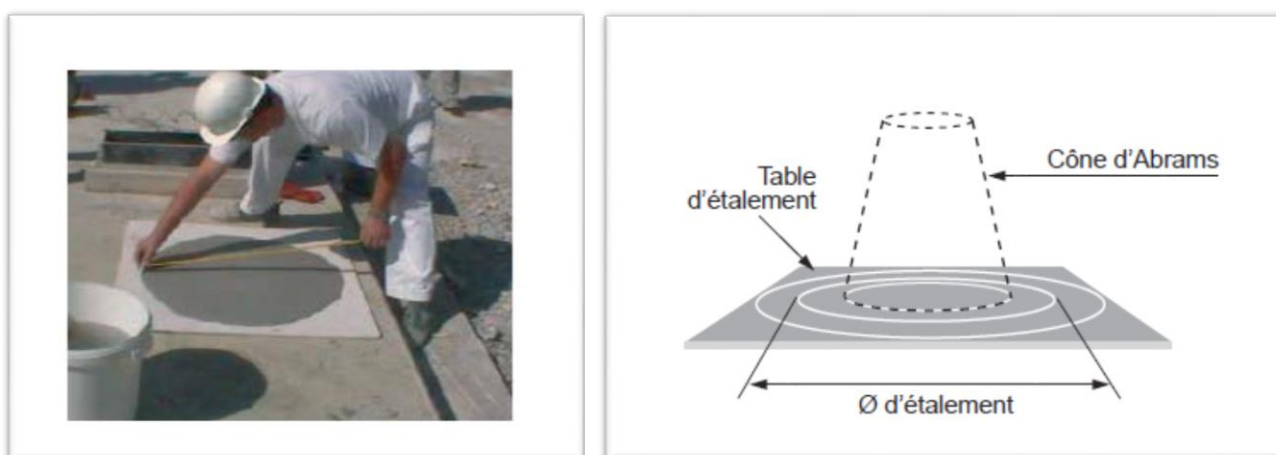


Fig. I. 7: Mesure de l'étalement des BAP.

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

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

Tableau.I. 1 : Classes d'étalement

I.6.2.2. Essai de la boîte en L :

Cet essai est destiné à tester la facilité de 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 Fig.I.8.

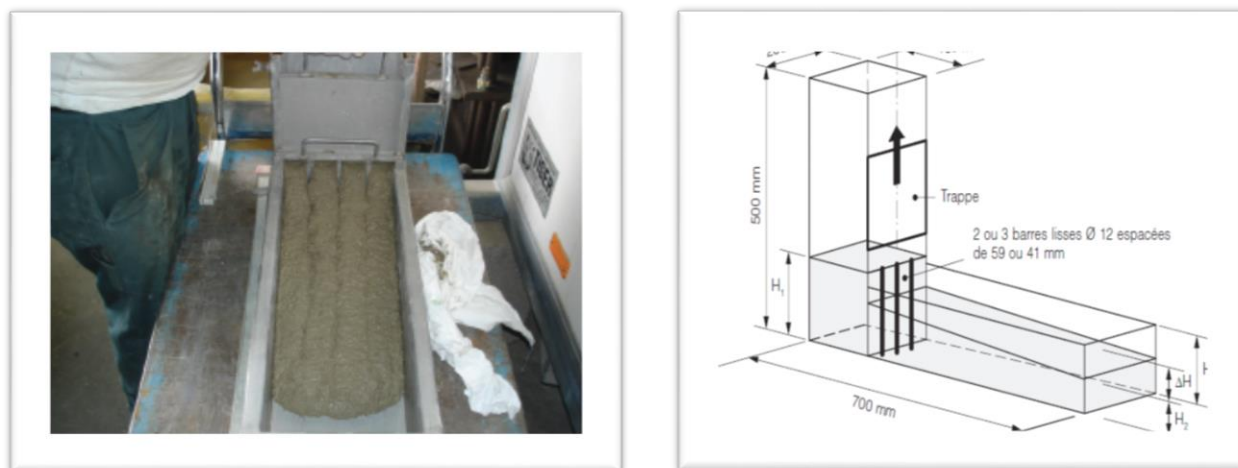


Fig. I. 8 : Essai de la boîte en L.

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/m^3) 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.6.2.3. 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.6.2.3.1. Stabilité au tamis [NF EN 12350-11] :

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. Puis au bout de 2 minutes, on pèse le volume de laitance qui a traversé le tamis.

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

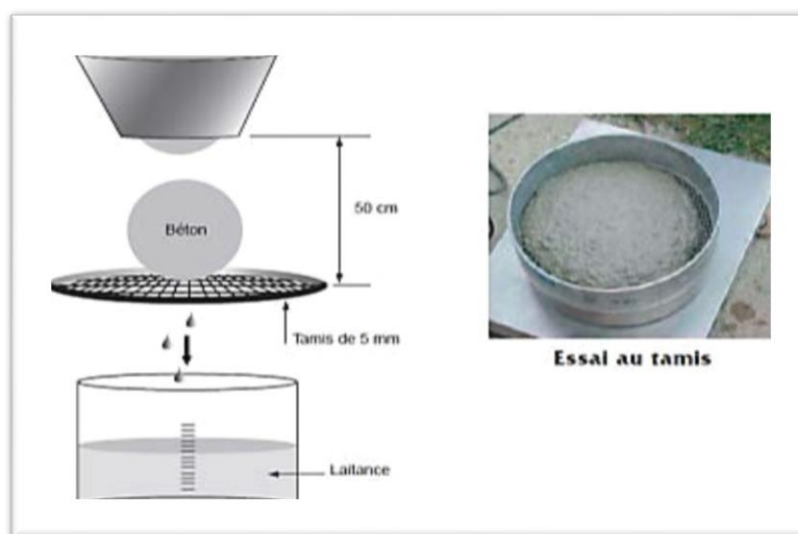


Fig. I. 9: Essai de stabilité au tamis.

I.7. 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 [26, 27]. 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 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 résistance en traction et résistance en compression des BAP est à 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.

I.8.Utilisation des bétons autoplaçants en Algérie :

En Algérie, il existe très peu de rivières, ce qui diminue considérablement la disponibilité des agrégats alluvionnaires et donc roulés, qui sont à la base de la confection d'un bon béton autoplaçant, alors qu'il existe des centaines de carrières qui produisent des milliers de tonnes de granulats calcaires concassés.

L'utilisation de granulats concassés algériens dans la confection des bétons autoplaçants stables et durables. Ceci pourra encourager les entreprises de construction algériennes à utiliser ce type de formulation, d'où l'intérêt pour le développement de l'industrie de la construction en Algérie. [2].

Domaines d'emploi :

Les caractéristiques des BAP laissent entrevoir de nombreuses possibilités techniques du fait de leur grande fluidité :

- Possibilité de coulage de zones fortement ferraillées ;
- Possibilité de coulage de zones d'architecture complexe et difficilement accessibles ;
- Obtention de très bonnes qualités de parement.

Conclusion

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

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

2

Les bétons autoplaçants fibres

Introduction	20
II.1. Les bétons renforcés de fibre(s)	20
II.2. Description des différents types de béton de fibre (classification)	21
II.3. Les fibres	21
II.4. Composition des BAPF	28
II.5. formulation des BAPF	28
II.6. Comportement mécanique des BAPF	29
II.7. Influence des fibres sur les propriétés rhéologiques des BAP	30
II.8. Orientation et distribution des fibres	31
II.9. Utilisation des BAP fibres dans les structures	32
Conclusion	32

Chapitre II : Les bétons autoplaçants fibrés

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. [28] après 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'absorbants d'énergie [29]. 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 de 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 [29].

II.1. Les bétons renforcés de fibre(s) :

Le béton est un matériau hétérogène, fragile en traction et de composition complexe et variable selon la provenance des matériaux de bases qui le constituent. Aujourd'hui, ce matériau est cependant omniprésent dans la construction car son faible coût défait toute concurrence. Les entreprises doivent donc s'accommoder de ses imperfections [30].

Le béton renforcé de fibres métalliques est un matériau composite à matrice fragile. Il est constitué d'un renfort (fibre) plongé dans une matrice (pâte de ciment). Nous étudierons ici le cas de fibres métalliques incorporées dans une matrice cimentaire lors de la fabrication.

Ce concept d'utilisation de béton renforcé avec des fibres métalliques s'est concrétisé vers le début de la fin de dernier siècle. L'idée majeure proposée par les chercheurs était de réduire la fissuration et d'augmenter la résistance globale à la traction.

Ce nouveau matériau présente en effet des propriétés intéressantes, comme la bonne résistance à la traction, à la fatigue, aux chocs, l'amélioration de la durabilité face aux cycles de gel dégel. On peut en effet attendre de ce matériau une répartition de la fissuration plus homogène du fait de sa constitution. Un pourcentage plus ou moins grand de fibres métalliques de dimensions et de formes variables apporte comme nous le verrons une amélioration des propriétés mécaniques et de la durabilité [31].

Les bétons à base de fibres métalliques (BFM) sont actuellement utilisés sur le marché dans

la restauration des ouvrages d'art, la réalisation de bétons projetés dans les tunnels ou les canalisations, la fabrication d'éléments minces et très résistants comme les dallages industriels. Les chercheurs ont mis au point des formulations adaptées à chaque type de situation et des méthodes de dimensionnements font actuellement l'objet de beaucoup de travaux de recherche. Ces travaux sont basés sur l'analyse du comportement du matériau, à l'échelle microscopique, comme à l'échelle de la structure.

II.2. Description des différents types de béton de fibre (classification) :

Il existe actuellement plus d'une trentaine de types de fibres [32]. Le tableau suivant rend compte des principales catégories de fibres et de leurs propriétés. Il est également possible de séparer dans la famille des bétons de fibres, les fibres d'origines naturelles des fibres d'origine manufacturées. Les fibres d'origine naturelle peuvent être organiques, ou minérale. Les fibres manufacturées comptent les fibres d'acier, de titane, de carbone, mais peuvent être de type polymère (nylon, aramide polyéthylène).

Le tableau ci-dessous présente une liste des différents types de fibres en fonctions de leurs caractéristiques respectives :

Matériaux	Utilisation	Propriétés / caractéristiques
Bétons avec fibres de verre	Structures non porteuses-panneaux minces	
Béton de fibres synthétiques (polypropylène)	Dallages industriels – pistes d'aéroports	Bonne tenue en service
Béton renforcé de fibres de carbonées	Peu utilisé car trop cher	Très bonne résistance
Béton de fibre naturelle	Utilisation en Asie	Cout très faible
Bétons renforcés de fibre (BRF)	Eléments préfabriquées-restauration non structural	Macro-fibre (diamètre ≈ 1 mm) dans proportion volumique allant de 0.5% à 2% - ductilité importante.
Les bétons fibrés à ultra hautes performances (BFUHP)	Renforcement et restauration d'ouvrages (ponts)	Micro-fibre (diamètre > 50 μm ou un mélange de macro-fibres et de Micro-fibre - ductilité + résistance

Tableau. II. 1 : Les différents types de fibres en fonctions de leurs caractéristiques respectives

II.3. Les fibres :

II.3.1. Types et caractéristiques :

Comme nous l'avons déjà signalé, les fibres font partie des composants des 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 [33].

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	

Tableau. II. 2 : Récapitulatif des différents types de fibres

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

Fibres	Diamètre (μm)	Long (mm)	Densité	R_t MPa	$E \cdot 10^3$ MPa	Allongement à la rupture en %	Coef de dilatation ($\mu\text{/m}$)	R_{feu} Temps Max $^{\circ}\text{C}$
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
Polyprop ylène	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	-	-

Tableau II. 3 : les caractéristiques mécaniques et physiques des fibres les plus utilisées

II.3.3.1 La fibre métallique :

Dans la présente étude, nous nous sommes intéressé à la fibre métallique (acier), vue les caractéristiques (forme, élancement, caractéristiques physico-chimique...etc.) qu'elles présentent. L'ajout des fibres au béton, apporte une certaine ductilité ; pour une longueur de fibres égale à 30 mm et un pourcentage en fibres de 1%, le résultat est meilleur avec les fibres en copeaux.

Cependant, en ce qui concerne l'énergie de rupture, elle est plus importante dans le cas des éprouvettes armées de fibres Dramix (pour $L_f=50\text{mm}$). Ceci peut s'expliquer par le fait que ces fibres présentent un système d'ancrage, elles sont munies de crochets aux extrémités [40].

L'adhérence fibres-matrice (béton) est ainsi meilleure. Il existe sur le marché, une panoplie de fibres métalliques d'acier, voici (la figure II.1) quelques types de fibres :

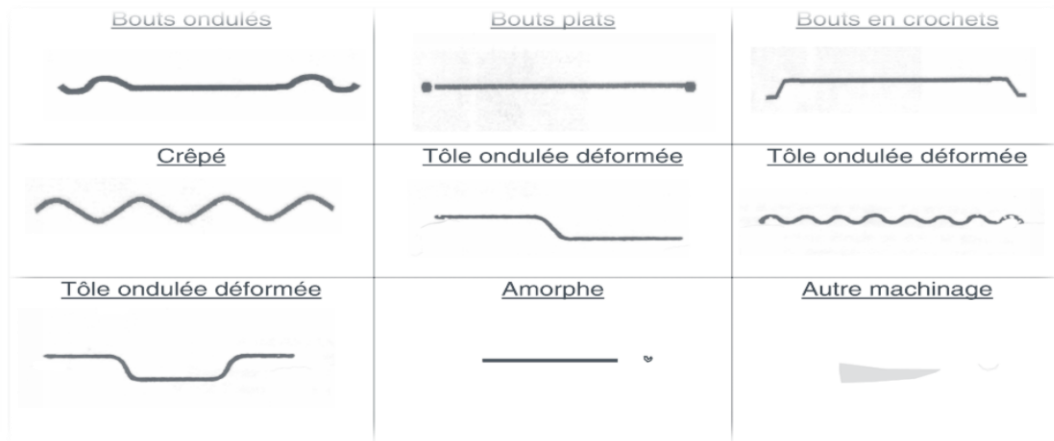


Fig .II. 1 : Géométrie des fibres métalliques

II.3.2. La longueur et l'élançement des fibres :

Ce paramètre joue un rôle important sur les propriétés rhéologiques des mélanges, ainsi que sur le coefficient d'espacement des fibres.

L'élançement étant défini par le rapport L/d (longueur/diamètre de fibre). Quant à l'élançement des fibres, est représenté par la longueur de la fibre sur son diamètre, pour les fibres cylindriques. Il est admis que, pour une matrice donnée, la maniabilité d'un béton de fibres est d'autant plus faible que les fibres sont longues et fines, à cause de leur plus grande tendance à s'enchevêtrer. Pour un dosage en fibre donné, plus l'élançement est important, plus la maniabilité du béton diminue. Rossi explique ceci par deux constatations empiriques [34].

- Pour une longueur de fibre et un volume donnés, plus le diamètre de la fibre sera faible, plus la surface spécifique sera grande. Ceci conduit à des frottements plus importants entre la fibre et la matrice, mais aussi à un nombre de fibres élevé qui augmente la probabilité de contact entre celles-ci. Ceci conduit à une diminution de la maniabilité quand le rapport longueur/diamètre augmente. [34]
- Pour un rapport longueur/diamètre fixe et un dosage en fibres donné, si le diamètre diminue, la longueur va elle aussi diminuer. Selon le raisonnement précédent, ceci conduit à une diminution de la maniabilité ce qui est en décalage avec la réalité car dans ce cas, le poids unitaire de la fibre intervient. Plus elles seront grandes, plus elles auront tendance à passer à travers le fluide visqueux constitué par la pâte de ciment, pour entrer en contact

avec les granulats c'est-à-dire à des frottements solides et donc à une diminution de maniabilité.

- Swamy et Mangat ont mis en évidence une relation linéaire entre le temps d'écoulement et l'élançement de fibres d'acier, et selon ces auteurs la formation d'oursins se ferait pour des élançements supérieurs à 100.
- Hughes et Fattuhi eux observent plutôt une relation de proportionnalité entre le Slump (affaissement) et l'élançement des fibres. [35]
- Pour Snyder et Lankard une bonne maniabilité a été obtenue dans les limites suivante d'élançement : $50 < L/D < 150$, sur du mortier.

Au fait, pour que les fibres puissent être considérées comme armature de renfort homogène, il faut qu'elles bloquent le développement prématuré de fissures intra granulaires au sein du matériau et à l'échelle de ses composants, aussi il faut donc que la longueur de la fibre soit supérieure à la dimension du gros granulat (trois fois celle du granulat). [36]

En résumé, pour une maniabilité donnée, on peut utiliser un dosage important de fibres courtes ou un dosage faible de fibres longues.

De même, le rapport longueur de la fibre/diamètre du plus gros granulat est aussi un paramètre prépondérant concernant l'efficacité des fibres dans le béton. Rossi explique que dans le cas où la résistance de l'interface, entre la matrice cimentaire et le granulat est inférieur à la résistance du granulat et de la matrice, les fissures se développent à cette interface avant de pénétrer dans la matrice. Si la longueur des fibres est proche du diamètre des plus gros granulats, une majorité d'entre elles ne pourront intercepter efficacement les fissures inter granulaires. Pour que les fibres interviennent au niveau de la structure, il est préconisé dans la littérature, un rapport longueur de la fibre/diamètre du plus gros granulat de deux à trois.

II.3.3. Le Pourcentage et le dosage en fibre :

La densité des fibres et leur position, constituent un paramètre prépondérant à l'aboutissement de résultats performants des résistances du béton, et particulièrement en traction.

Considérons deux fibres distantes plongées dans la pâte de ciment. Lorsqu'une fissure se manifeste, et qu'une des deux fibres possède une orientation exactement perpendiculaire à la fissure, cela lui confère une action supérieure à l'autre fibre. La première fibre peut agir sur la seconde par l'intermédiaire d'une compression de la matrice cimentaire et ainsi provoquer une action combinée des deux fibres supérieures à la somme des actions individuelles des deux fibres. Lorsque les fibres sont trop proches, la fine couche de pâte qui les sépare ne suffit pas à provoquer cette synergie. Pire, l'action résultante des deux fibres est inférieure à la somme de leur action individuelle. Nous pouvons ainsi, définir une fourchette qui fixe un taux de fibre dans le mélange.

En effet, Toutes les études s'accordent pour conclure à une diminution très nette de la maniabilité, lorsque la quantité de fibres dans un mélange augmente, la composition de la matrice étant conservée.

Ritchiet Ratman ont établi des courbes montrant une très nette diminution de Slump lorsque Vf, augmente. (Vf= pourcentage en fibre)

Pour Edgington, au-delà de 2% de fibres d'acier l'ouvrabilité d'un mélange devient insuffisante.

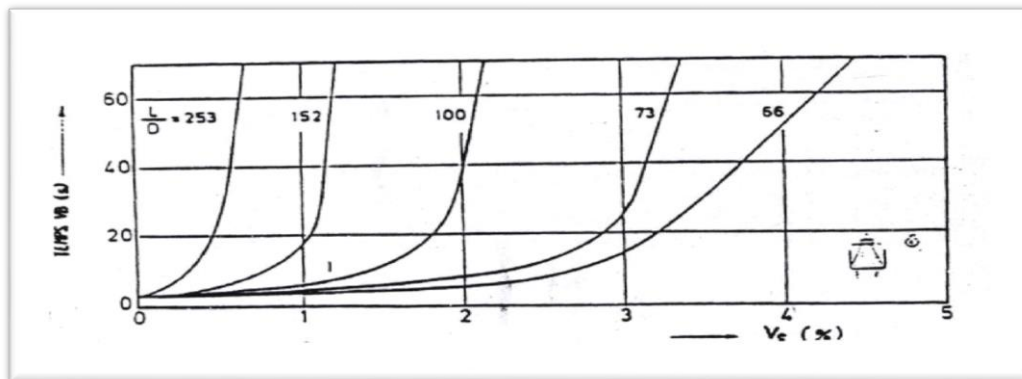


Fig. II. 2 : Ouvrabilité en fonction de l'élancement et de la teneur en fibre d'acier [8].

Grunewald a réalisé un programme dédié aux propriétés des BAP fibrés en fonction de la teneur en fibres, du type de fibres (métallique et polypropylène avec différentes géométries) et du rapport massique sable/granulat. Pour la composition de référence, le rapport sable/granulats de 40% était utilisé car considéré comme optimal pour la compacité du béton. Après les différents essais d'ouvrabilité réalisés sur les différentes compositions des bétons à l'état frais, des conclusions ont été tirées :

Grünewald 2004 [37] mentionne qu'une augmentation de la limite d'élasticité est fonction de l'augmentation du volume des fibres dans les BAP. Parallèlement, Grünewald et al 2001 [38] ont rapporté que pour obtenir un affaissement donné, la longueur des fibres doit être réduite avec l'augmentation du volume des fibres ; en d'autres termes, pour un type de fibre donné, le taux d'affaissement diminue avec l'augmentation du volume des fibres.

Sahmaran et al. 2005 [39] ont étudié l'effet de la combinaison des fibres métalliques de différentes forme et nature sur les propriétés rhéologiques et mécaniques. Les auteurs concluent que la maniabilité est fonction des propriétés des fibres (volume, longueur, aspect ratio et la forme). Khayat et al. 2000 [40] ont rapporté que l'inclusion des fibres dans les BAP pourrait modifier de manière significative les propriétés rhéologiques par leurs formes et leurs interactions avec les agrégats, par conséquent une augmentation de la résistance à l'écoulement.

Les auteurs ont noté que l'essai d'affaissement et d'écoulement ne sont pas des paramètres rhéologiques suffisants pour évaluer la déformabilité des BAPF. Ils recommandaient l'essai de V Funnel, pour évaluer la déformabilité dans un milieu confiné, surtout dans le cas où le volume des

fibres est important. Kassimi 2008 [41] a montré que l'incorporation d'un volume de fibre dépassant les 0.5% affecte les propriétés rhéologiques et donne un BAP semi-fluide.

II.3.4. Propriétés mécaniques des fibres métalliques :

Les fibres ont une influence importante sur le comportement mécanique du béton fibreux, leur incorporation peut augmenter les résistances, en traction, en flexion et particulièrement au cisaillement en résistant aux efforts de traction. Offrent plus de ductilité et de ténacité.

Leur géométrie est très variable (Fig.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 [42] 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 ondulées 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 à ce problème mais, ne fonctionnant que par adhérence avec la matrice, leur efficacité s'en ressent.

II.3.5. 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 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 Fig II-3-a.
- La transformation du comportement fragile d'un matériau en un comportement ductile qui accroît la sécurité lors des états de chargement ultimes (Fig II-3-b) [43].

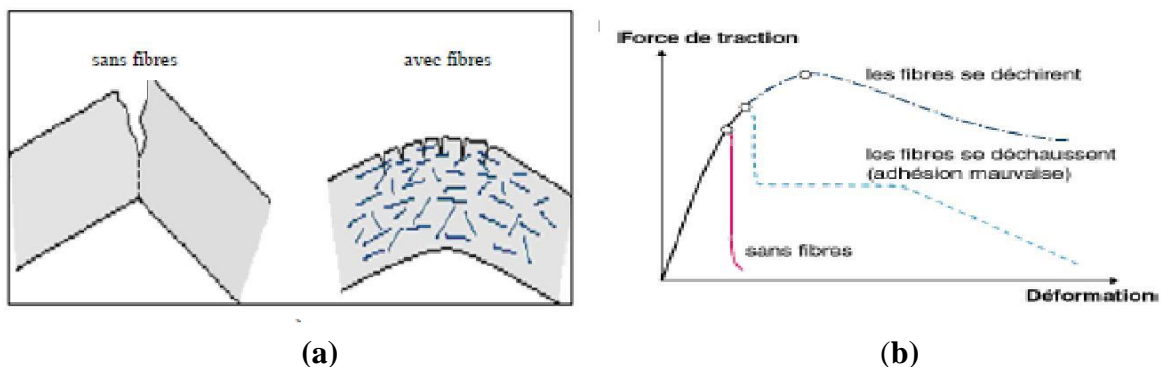


Fig .II. 3 : Illustration de l'apport du renfort par des fibres [43]

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. [43]

Le principe de couturation des fissures et limitation de leurs ouvertures est comme montré en (Fig.II.4), les fibres qui traversent la fissure offrent une résistance résiduelle (résistance au-delà de la fissuration), ces fibres se déforiment aux extrémités ancrées qui se redressent graduellement avec l'augmentation du chargement au-delà de la charge de fissuration. [44]

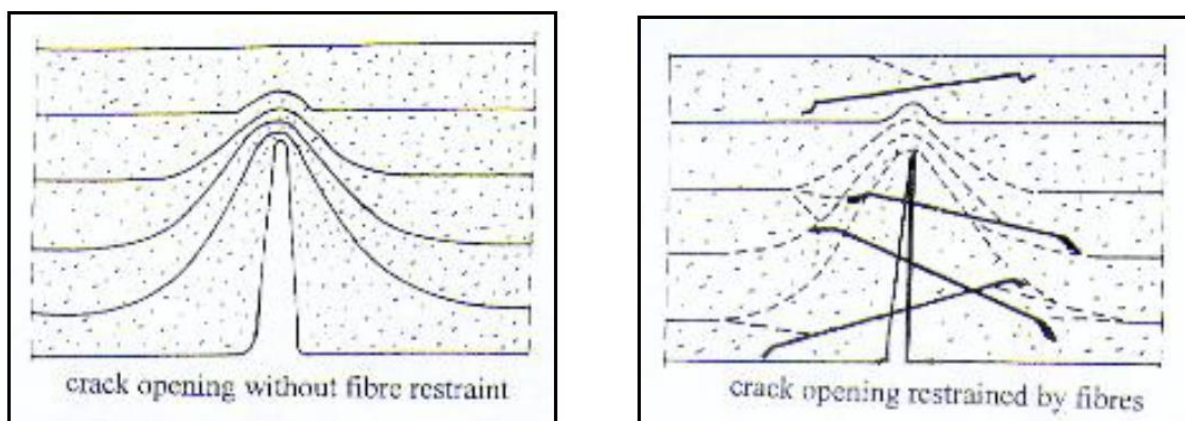


Fig. II. 4 : Principe de couturation d'une fissure [42].

En réalité, les fibres ont des effets sur les performances mécaniques des bétons dans tous les modes de rupture [Gopalaratnam et Shah 1987], la Fig.II-5 illustre les différents facteurs influant sur le comportement d'un béton renforcé de fibres. [37]

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. [45]

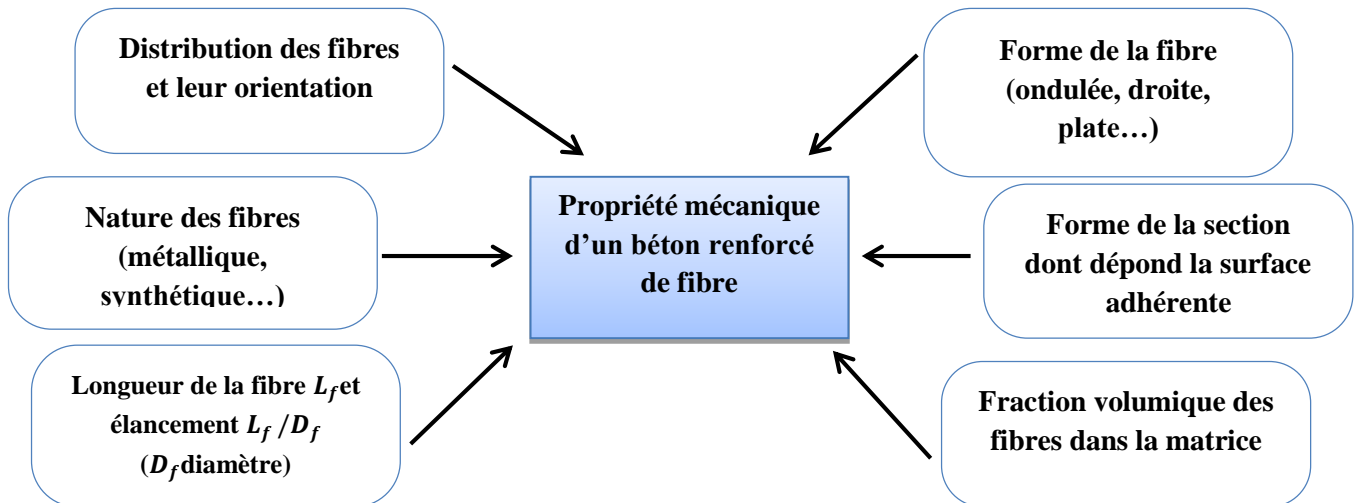


Fig. II. 5: Différents facteurs influant sur le comportement mécanique d'un béton renforcé de fibres [43].

II.4. Composition des BAPF :

La composition de mélange du béton autoplaçant 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. [46]

II.5. 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, HARROUCHE et HOY [47] ont approché la conception du mélange des matrices de béton autoplaçant renforcé de fibres sur une façon plus systématique : ils ont optimisés le squelette granulaire, le contenu et les caractéristiques de la pâte doit être tenue 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 seconde lieu, le premier juge varie indépendamment de la nature ou du volume

de la pâte de ciment. [46]

II.6. 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 tel que la flexion et la compression et qui ont fait l'objet de quelques recherches sont résumés ci-après :

II.6.1. Effet du volume des fibres :

Pour les bétons fibrés, le concept de la ductilité est souvent utilisé pour caractériser leur rendement [48]. 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. [49] ont noté une amélioration de la résistance à la flexion de prismes 100×100×350 mm des BAPF par rapport au béton conventionnel.

MUELLER [50] GAO et al. [51] 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. [52] 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. [53] ont conclu que les fibres augmentent la résistance à la compression. SAHMARAN et al. [54] ont constaté que la résistance à la compression augmente avec l'augmentation du volume des fibres surtout dans le cas où les fibres sont de petite taille. Par contre BANTHIA et al ont [55] et ZHANG et al. [56] ont observé que l'effet des fibres sur les BAP n'est pas clair ou sensible.

II.6.2. Effet de la longueur des fibres :

Les travaux entrepris par ZHANG et al [56] sur le béton pour les applications de béton projeté contenant 60% de cendres volantes en substitution partielle avec le ciment, a 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 [53]. ZHANG et al ont constaté que la charge de la fissure était légèrement influencée par des fibres de polypropylène. DREUX et al. [53] 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.6.3. 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 [57]. 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 [57]. BALAGURU et al. [58] 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. [51] ont observé que la ténacité à la flexion augmente avec l'augmentation de la L_f / d_f . Lou et al. [59] 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. [51] en utilisant des fibres d'acier dans les bétons légers et à haute résistance.

II.7. Influence des fibres sur les propriétés rhéologiques des BAP :

II.7.1. Sur l'étalement :

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 composition de référence. On remarque sur la Fig.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 Fig.II.6.b) avec des fibres plus longues, une ségrégation des granulats et des fibres au centre de la galette a été remarquée. La Fig.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 20 (Fig.II.6) – Effets des fibres sur l'étalement des BAP [60].

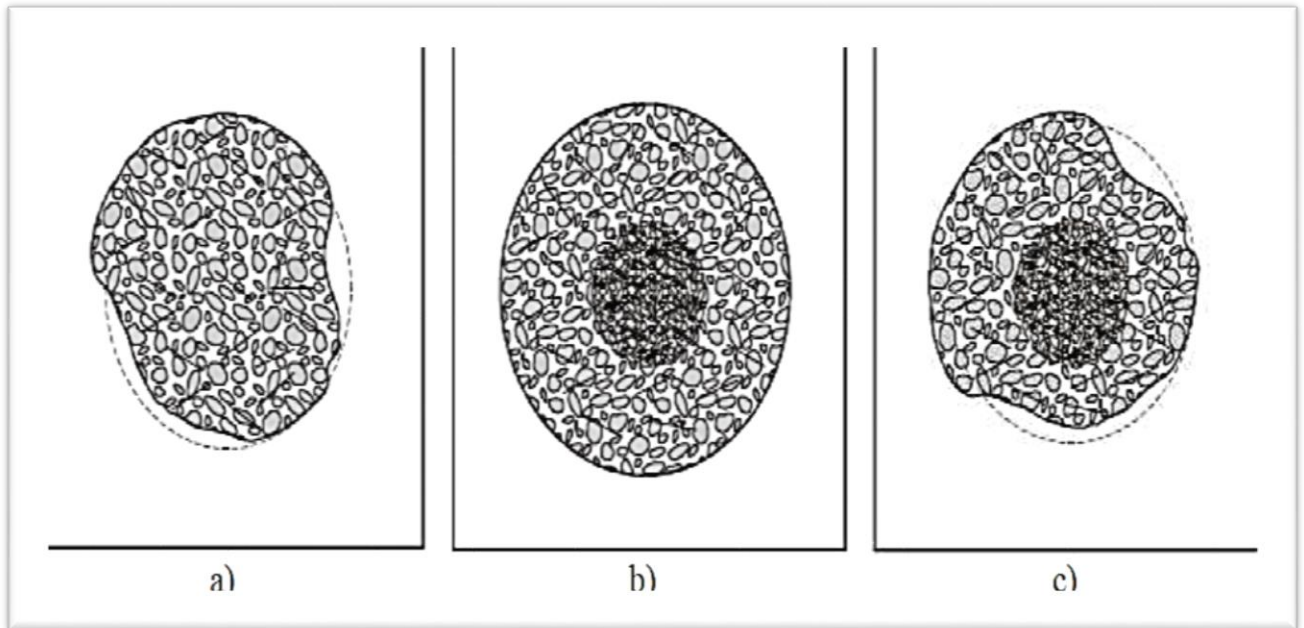


Fig. II. 6 : L'évolution de l'étalement en fonction du facteur de fibre [61]

II.8. 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 1998 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 grande longueur [62].

Groth et Nemegeer 1999 a 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. [63]

II.9. Utilisation des BAP fibres dans les structures :

Les Différentes applications de BAPF sont présentées dans le tableau.II.4 :

Applications	Intérêt apporte par l'adjonction des fibres dans le béton
Canalisation et coques minces faiblement sollicitées	<ul style="list-style-type: none"> - Amélioration de la tenue des pièces aux jeunes âges - Modification des variations dimensionnelles, lutte contre les fissurations
Dallages, chaussées en béton, Dallages manufacturés, et tous éléments structuraux soumis à la flexion	<ul style="list-style-type: none"> - Diminution de 40% de l'ouverture de fissures - L'augmentation de la rigidité après fissuration - Augmentation de la résistance au cisaillement - Augmentation de la résistance à l'usure
Éléments structuraux soumis à la compression (poteaux, pieux, fondations, ...etc.	<ul style="list-style-type: none"> - Amélioration de la charge ultime - Pas de rupture catastrophique
Structures soumises à des sollicitations pulsionnelles ex : piste d'un aéroport	<ul style="list-style-type: none"> - L'énergie absorbée est plus importante - La durée de choc est augmentée - Loi de comportement du matériau est fortement modifiée
Réparation des revêtements routiers, tablier de ponts	<ul style="list-style-type: none"> - Amélioration de la résistance aux chocs - Amélioration de la déformabilité
Parties exposées aux fortes variations de température et même aux très hautes températures	<ul style="list-style-type: none"> - Remplacement avec succès du revêtement réfractaire - Diminution le coût de réparation des éléments réfractaires
Stabilisation des parois rocheuse, les talus, les tunnels, les galeries souterrains.	<ul style="list-style-type: none"> - Évite le travail de fixation du grillage ordinairement employé. - Diminution du coût de réparation de stabilisation des parois rocheuses et les talus,

Tableau.II. 4 : Domaines d'application des BAP [63]

Conclusion :

Dans cette chapitre nous avons résumé les connaissances sur les bétons autoplaçants fibré et présentons une idée générale sur la classification et caractéristiques des différents type des fibres utilisé pour les bétons autoplaçants, aussi l'effet des différents fibres sur les propriétés rhéologiques et le comportement mécanique de ces béton fibré.

Chapitre

3

Chapitre III : L'effet de la température sur les BAP fibrés

Introduction

Contexte

III.1 Evolutions des propriétés du béton soumis à des températures élevées

III.1.1 Evolution de la matrice cimentaire

III.1.2 Evolution des granulats

III.1.3 Déformation thermohydrrique libre du béton

III.1.4 Evolution des propriétés physiques

III.1.4.1 Perte de masse

III.1.4.2. Porosité

III.1.5. Evolution des propriétés mécaniques du béton

III.1.5.1. Résistance à la compression

III.1.5.2. Résistance à la traction

III.1.5.3. Module d'élasticité

Conclusion

Chapitre III : L'effet de la température sur les BAP fibrés

Introduction :

Ce chapitre présente une analyse des recherches bibliographiques sur l'influence de la température sur les propriétés physiques et mécaniques du béton. Après avoir présenté le contexte de cette étude, la première partie portera sur les transformations physiques et chimiques du béton au cours du chauffage ainsi que sur l'évolution des propriétés thermiques, physiques et mécaniques des bétons non fibrés et des bétons de fibres métalliques.

Contexte :

Les incendies majeurs survenus ces vingt dernières années ont démontré la difficulté d'appréhender le feu. Les exemples d'incendie de tunnels tels que: Tunnel du Mont Blanc entre la France et l'Italie de 11,6 km (39 morts) en 1999 (Fig.III.1(a)), Tunnel de Tauern en Autriche de 6,4 km (12 morts, 40 blessés) en 1999, Tunnel Gleinalm en Autriche de 8,3 km (5 morts, 4 blessés) en 2001, Tunnel St. Gothard en Suisse de 16,9 km (11 morts) en 2001, Viamala Tunnel en Suisse de 755 m (9 morts, 6 blessés) en 2006 et de bâtiments comme la Tour Windsor en Espagne de 32 étages en 2005, l'hôtel Mandarin Oriental en Chine de 34 étages (1 mort, 7 blessés) en 2009 (Fig.III.1 (b)) montrent des instabilités thermiques caractérisées par un endommagement partiel ou complet de l'ouvrage.



a) Incendie du Tunnel du Mont Blanc, en France.

b) Incendie de l'Hôtel Mandarin Oriental.

Fig. III. 1 : Illustrations de dégradations d'ouvrages en béton suite à un incendie

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 vingt 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. Depuis l'ouverture du tunnel du Mont Blanc, le nombre de poids lourds est passé de 45000 (en 1966) à 777000 (en 1998) (Haack 2003).

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 (INERIS 2009).

Le dégagement de gaz toxiques présent 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) (Fig.III.2), ou bien d'une chute de caractéristiques mécaniques des armatures de surface (perte d'adhérence, éclatement de l'enrobage).



Fig. III. 2 : Section effondrée du faux plafond dans le tunnel du Gothard après l'incendie du 21 octobre, 2001

III.1 Evolutions des propriétés du béton soumis à des températures élevées :

III.1.1 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. [1]

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

- 20-120°C : départ de l'eau libre et adsorbée (Noumowé 1995), décomposition de l'ettringite à partir de 60 - 70°C (Castellote et al. 2004). Premiers signes de décomposition de C-S-H avant 100°C. [64]

- 130-170°C : double réaction endothermique lors de la décomposition du gypse $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$. [65]

- 450-550°C : décomposition de la portlandite (deshydroxylation par déshydratation). [66]

- 600-750°C : décomposition des C-S-H, formation de $\beta\text{-C}_2\text{S}$. [67]

- Décomposition de carbonate de calcium à partir de 600°C.

- 1200°C : début de fusion du béton.

Dans la phase de refroidissement, 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. [64]

III.1.2 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 liaisons importantes avec la matrice cimentaire. Les granulats calcaires au contraire présentent de fortes liaisons avec la pâte de ciment et sont considérés comme réactifs [68]. Les granulats de quartzite (siliceux) présentent des caractéristiques relativement stables vis-à-vis du feu. A partir de 573°C une transformation du quartz α en quartz β s'accompagne d'une forte dilatation de 1 % à 5 %. [69] Cette variation de structure cristalline dans les granulats peut provoquer une instabilité thermique lors du chauffage. Les travaux de Mindeguia [Mindeguia 2009] et de Xing [Xing2011] ont montré un éclatement du granulatsilex entre 110°C et 450°C [1]. Cet endommagement précoce du silex peut être dû à la présence d'eau 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 $\text{Ca}(\text{OH})_2$. La formation de cette nouvelle Portlandite avec un volume supérieur à celui du granulats initial, crée des nouvelles fissurations dans le béton. [1]

III.1.3 Déformation thermohydrique libre du béton :

La déformation thermique libre du béton dépend de sa composition, de la nature des granulats et de différentes transformations physico-chimiques, qui ont lieu durant le chauffage. [1]

Lors du chauffage, la pâte de ciment subit deux phases : la phase d'expansion et ensuite la phase de retrait. Les travaux de Menou [Menou 2004] et Hager [Hager 2004] montrent une dilatation de la pâte de ciment entre 20°C et 150°C. Cette phase de dilatation initiale de la pâte de ciment est attribuée aux mouvements cinétiques moléculaires qui s'ajoutent à la pression développée par une diminution de la tension superficielle de l'eau lors de la sollicitation thermique. [70] delà de cette plage de température, la pâte de ciment présente un retrait très important lié au départ de l'eau contenue dans le matériau. [1]

Les granulats ont un comportement différent. La nature minéralogique influence significativement l'expansion thermique des granulats. La comparaison des déformations

thermiques de bétons formulés avec différents granulats, menée par Pista [Piasta 1989], montre que le coefficient de dilatation thermique du béton dépend de celui des granulats. La déformation du béton est caractérisée par une expansion volumique non linéaire dépendante de la température. Après 150°C, la pâte de ciment se rétracte. L'évolution opposée des granulats et de la pâte de ciment provoque à l'interface pâte-granulats des incompatibilités de déformations qui génèrent des contraintes de traction au sein de la pâte de ciment et des contraintes de compression au niveau des granulats. La Figure 3 présente l'évolution de dilatation thermique apparente de la pâte de ciment et des granulats en fonction de la température. [71]

Les travaux de Kodur [Kodur 2014] sur le béton ordinaire montrent une augmentation de la déformation thermique de 1,3 % à 700°C. L'auteur explique cette augmentation par l'expansion thermique des granulats et le retrait de la pâte de ciment au sein du béton. Il est intéressant de noter que la déformation thermique libre du béton reste constante de 700°C à 1000°C. [1]

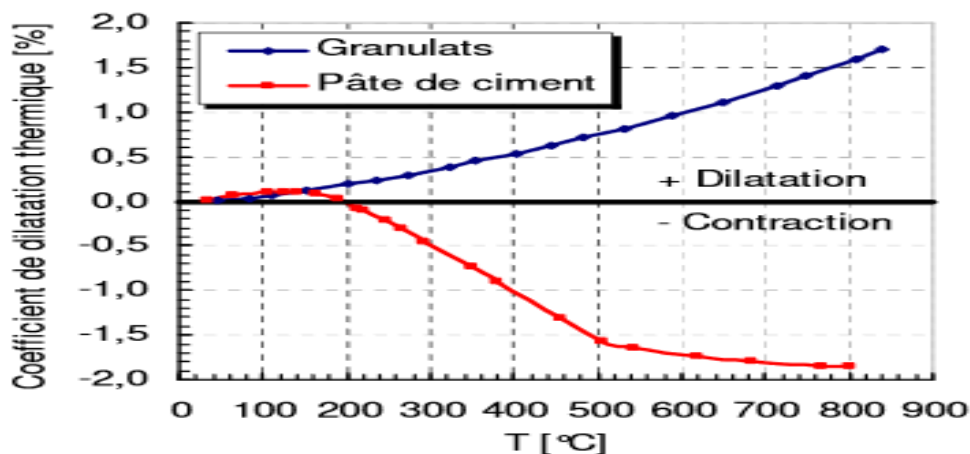


Fig. III. 3 : Evolution du coefficient de dilatation thermique apparent de la pâte de ciment et des granulats en fonction de la température [72]

III.1.4 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 [Noumowé 1995], (Kalifa, Chéné, and Gallé 2001), [Menou 2004], [Hager 2004], [Zeiml et al. 2006], [Choinska 2006], [Mindeguia 2009]. 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. [1]

III.1.4.1 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. (Fig.III.4) présente l'évolution de la perte de masse de différentes compositions de béton avec et sans fibres de polypropylène au cours du chauffage [73]. Il est important de noter que les limites de température varient suivant les auteurs.

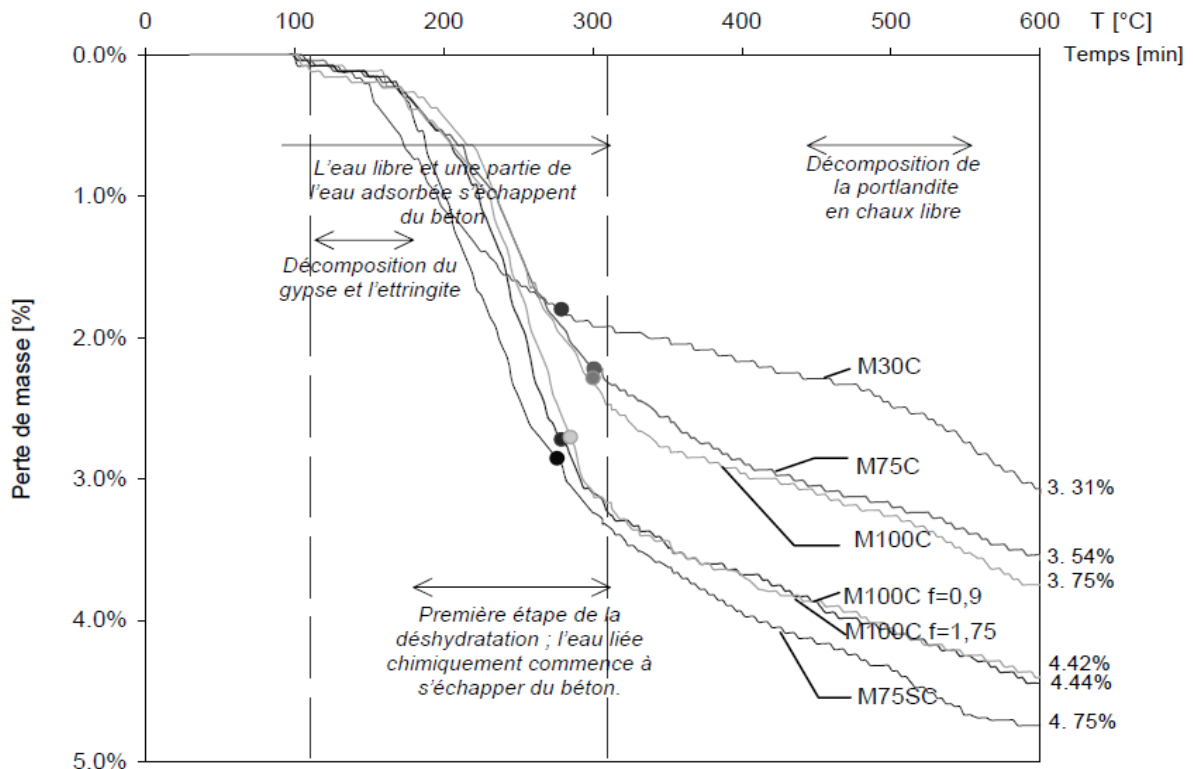


Fig. III. 4: Pertes de masse des bétons déterminées durant le chauffage de 20°C à 600°C à la vitesse de 1°C/min. Les points indiquent la valeur de la teneur en eau obtenu par séchage à 105°C [73]

III.1.4.2. 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 autoplaçants ont montré une augmentation progressive de la porosité de ces bétons en cours de l'élévation de la température, Fig.III.5 regroupe les études réalisées par Tsimbrovska [Tsimbrovska 1997] et Fares [Fares 2009] sur l'évolution de la porosité à l'eau en fonction de la température. Les travaux de Tsimbrovska [Tsimbrovska 1997] portent sur un BO (36 MPa) et un BHP (110 MPa) soumis à un chauffage à 0,2 °C/min. A 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 [Fares 2009] a testé les bétons autoplaçants (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 fissure sous l'action des déformations thermiques différentielles. [1]

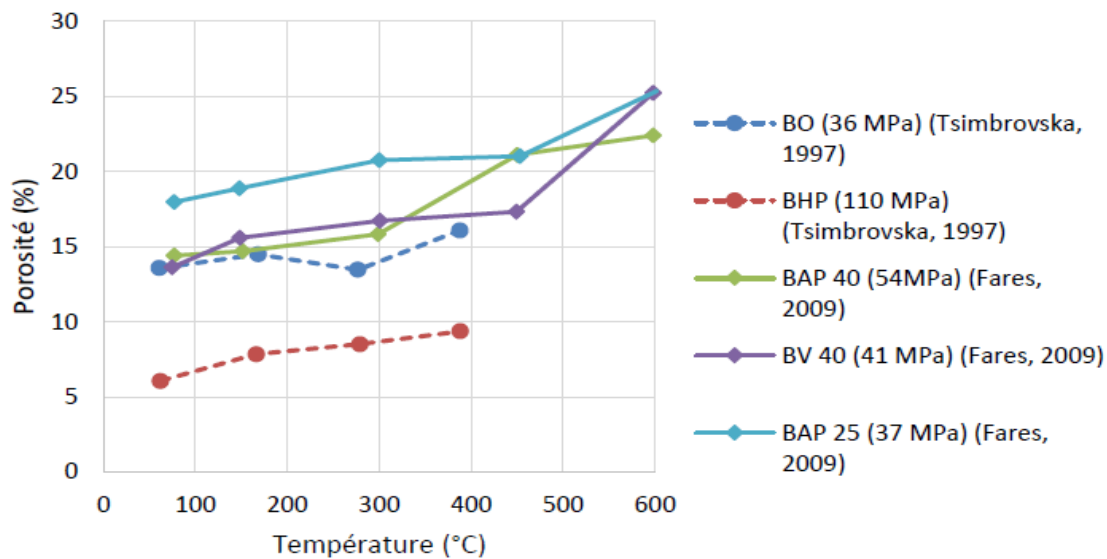


Fig. III. 5: Evolution de la porosité de différents bétons en fonction de la température [74], [9]

III.1.5. 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. [1]

III.1.5.1. 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. [75] 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. [75]

Plusieurs études regroupent en deux zones le comportement résiduel du béton à la compression :

- De la température ambiante à 250°C (400°C) : une légère baisse, un maintien ou une augmentation de résistance est observée [Bilodeau, Kodur, and Hoff 2004], [Kanema 2007], [Phan 2008]. [1]
- De 250°C (400°C) à 600°C : une chute de la résistance à la compression est notée [73], [76]

La variation des propriétés mécaniques des bétons évolue différemment selon que l'essai soit réalisé à chaud ou à froid (essai résiduel). (Fig.III.6) présente une évolution de la résistance à la compression relative du même béton à chaud et à froid. Nous constatons que la résistance à chaud est supérieure à la résistance résiduelle pour toutes les températures après 150°C. Ceci peut être expliqué par un endommagement supplémentaire du béton au cours du refroidissement (réhydratation de la chaux, décomposition des granulats, changement du signe de gradient thermique). [77]

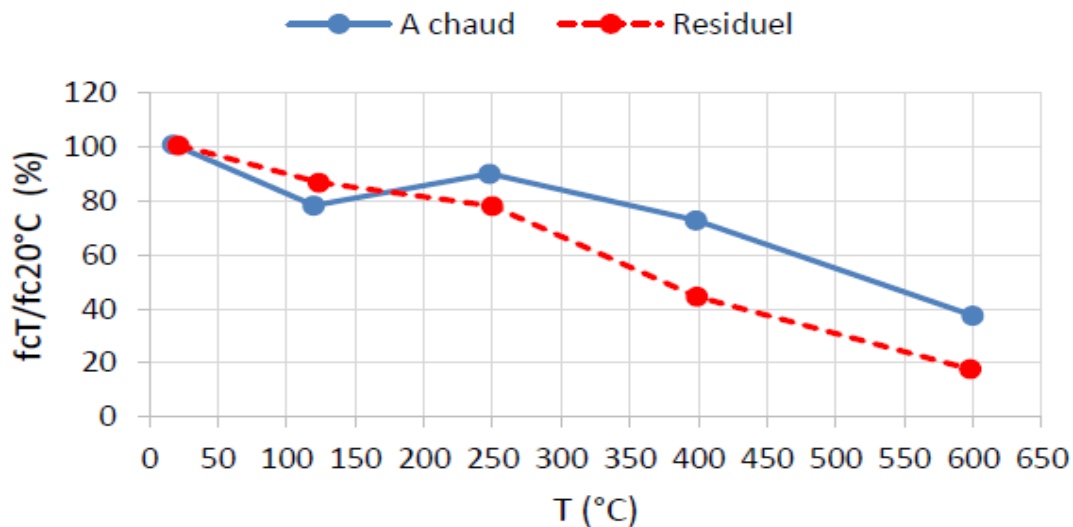


Fig. III. 6 : Evolution de la résistance à la compression d'un béton en fonction du type d'essai (à chaud ou à froid), [77]

Les courbes d'évolution de résistance à la compression en fonction de la température, proposées par l'Eurocode 2 (EUROCODE 2 2004), sont présentées sur la Fig.III.7. Les courbes de l'Eurocode 2 se basent sur deux types de granulats : calcaires et siliceux et concernent les bétons ordinaires (BO) et les bétons à hautes performances (BHP). Les BO (calcaires) se comportent mieux au feu que les BHP (C80/95).

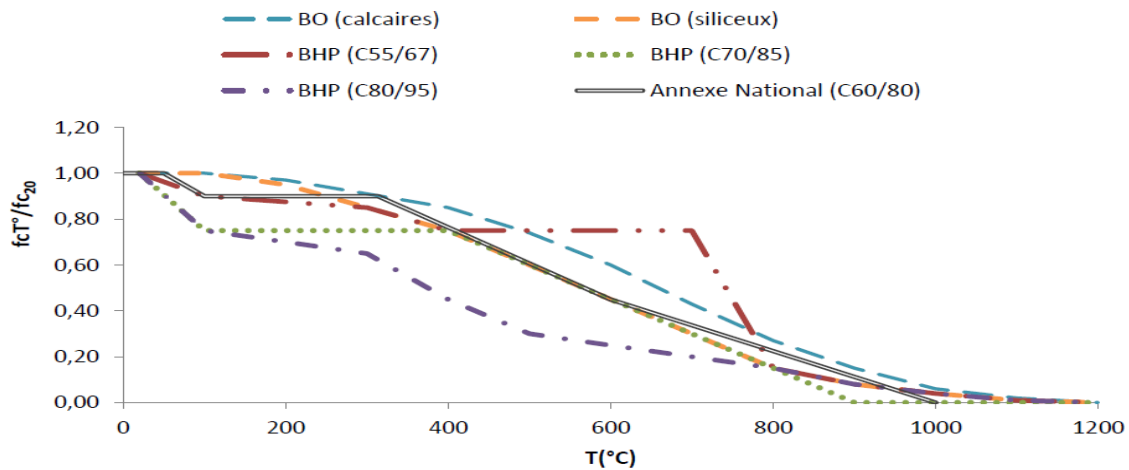


Fig. III. 7 : Courbes de la variation de la résistance à la compression selon les textes de l'Eurocode 2, [EUROCODE 2 2004]. [1]

Behnood [Behnood and Ghandehari 2009] a testé les bétons de fibres de polypropylène avec des dosages de 1 kg/m^3 ; 2 kg/m^3 ; 3 kg/m^3 (Fig.III.8). 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/m^3 présente les meilleures performances mécaniques de 200 à $600^{\circ}C$. L'auteur préconise le dosage de 2 kg/m^3 comme un optimum parmi les trois dosages testés. Les résultats de Khaliq [Khaliq and Kodur 2011] et de Behnood [Behnood and Ghandehari 2009] sur les bétons de fibres de polypropylène (1 kg/m^3) 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 réduit la résistance à la compression. De plus, les fibres métalliques (42 kg/m^3) et le cocktail de fibres ($42 \times 1 \text{ kg/m}^3$) n'ont pas donné d'effet favorable vis-à-vis de la résistance à la compression [Khaliq and Kodur 2011]. [1]

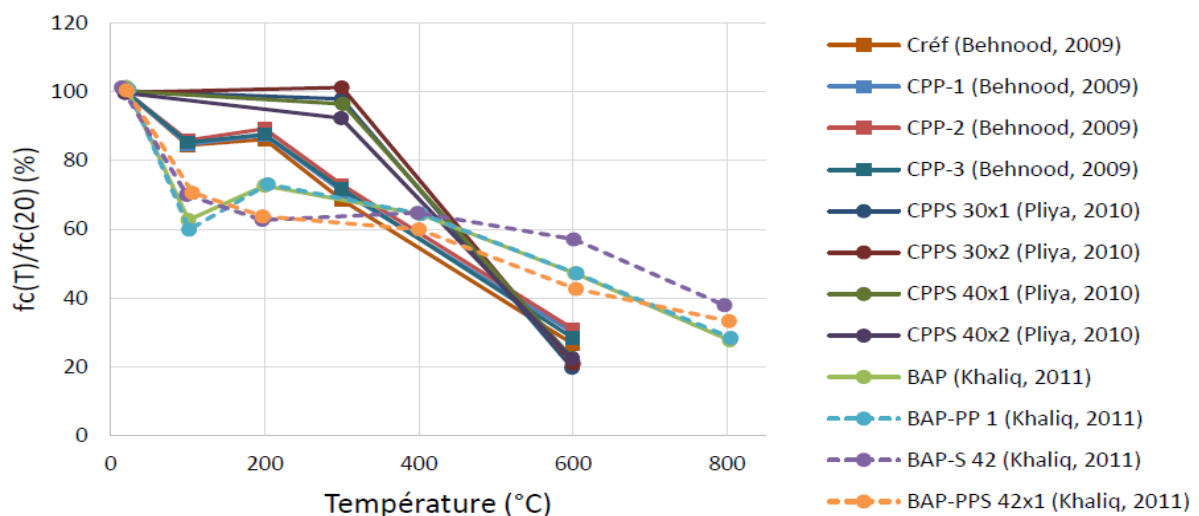


Fig. III. 8: Evolution de la résistance résiduelle relative à la compression de bétons de fibres métalliques, de polypropylène et de cocktail de fibres métalliques et polypropylène [1]

Les différents teneurs en fibres de polypropylène et métalliques ne changent pas la cinétique de la perte de résistance à la compression (Fig. III.8). Il est important de souligner, qu'il ne suffit pas d'ajouter 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. [76]

III.1.5.2. 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 structurels 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. [1]

Kanema (Kanema 2007) a étudié l'évolution de la résistance à la traction résiduelle sur des bétons de différents dosages en ciment (B325 ($f_c = 39$ MPa), B350 ($f_c = 45$ MPa), B400 ($f_c = 53$ MPa), B450 ($f_c = 60$ MPa) et B500 ($f_c = 72$ MPa) (Figure 19). Les bétons à faible rapport E/C (B450 et B500) présentent une réduction plus importante de leur résistance à la traction comparativement au béton à fort rapport E/C (B325). La diminution de la résistance résulte d'une déstructuration de la matrice cimentaire et plus particulièrement de la déshydratation de l'auréole de transition avec l'augmentation de la température. L'auteur conclut que la baisse de la résistance à la traction résiduelle des bétons dépend du rapport E/C initial et de la sollicitation thermique imposée. [1]

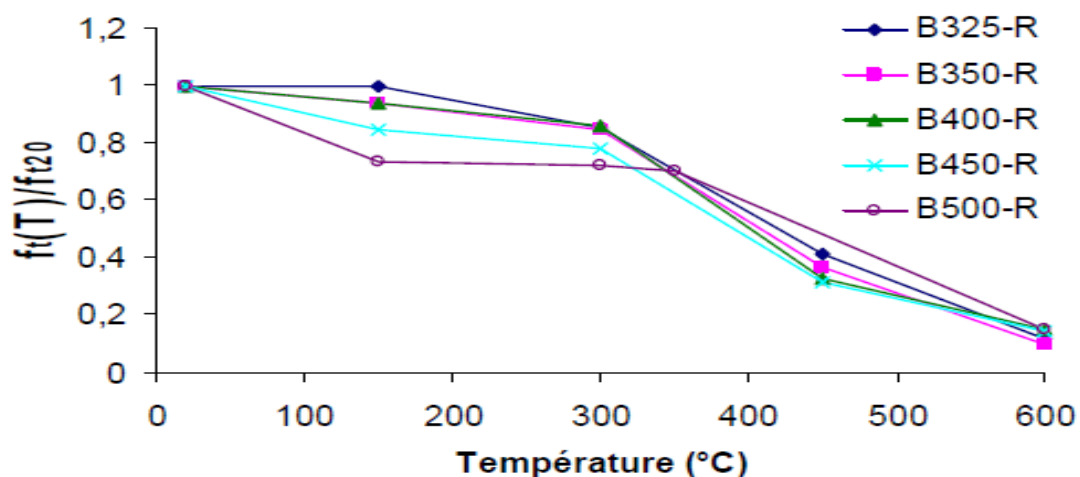


Fig. III. 9: Evolution de la résistance résiduelle relative à la traction des bétons chauffés, (vitesse de chauffage est de 1°C/min). [18]

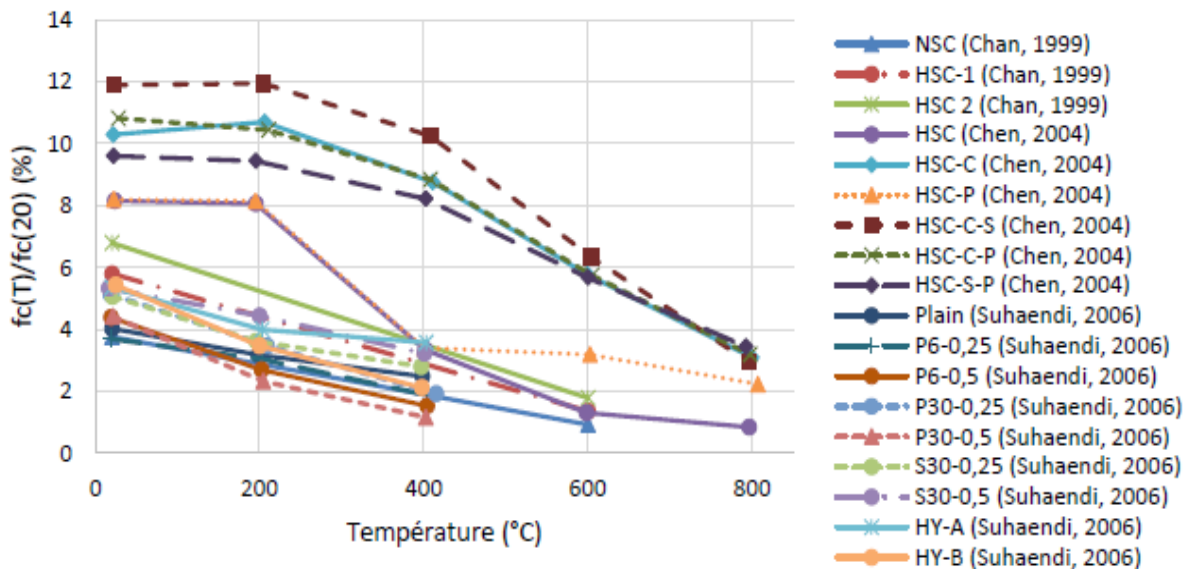


Fig. III. 10 : Différents résultats de la résistance à la traction résiduelle relative [1]

III.1.5.3. 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.

Noumowé [Noumowé 1995] a présenté l'évolution des modules d'élasticité résiduels par rapport au module initial de BO et BHP. Une baisse de module est remarquée pour les deux bétons (BO et BHP). A 500°C, le BO garde seulement 48 % de son module initial, tandis que le BHP est à 54 %. Il est intéressant de noter que pour la température de 150°C, la valeur relative du BO (90 %) est supérieure à celle du BHP (83 %). [66]

Les résultats de modules d'élasticité mesurés à chaud sont peu nombreux. Hager (Hager 2004) a réalisé des essais à chaud avec des bétons de différents rapports E/C (0,3 ; 0,4 ; 0,5) (Fig.III.11) (a). Une diminution progressive et monotone de module d'élasticité est observée, ainsi l'auteur a constaté que le départ d'eau n'influence pas le module, contrairement aux résultats de la résistance à la compression. A 120°C la perte de résistance est de 20 %, tandis qu'à 600°C la baisse est déjà d'environ 80 %. [73]

En comparant l'évolution de module d'élasticité à chaud et à froid (Fig.III.11 (b)), nous constatons que le module décroît dans les deux cas et présente une plus forte diminution dans le cas de module résiduel. D'après Hager (Hager 2004), cette différence peut être expliquée par différents processus au cours de refroidissement : le gradient thermique inversé, l'absence de la déformation thermique transitoire (relaxation des contraintes entre la pâte et les granulats) et l'augmentation de volume consécutive à la réhydratation de la chaux.

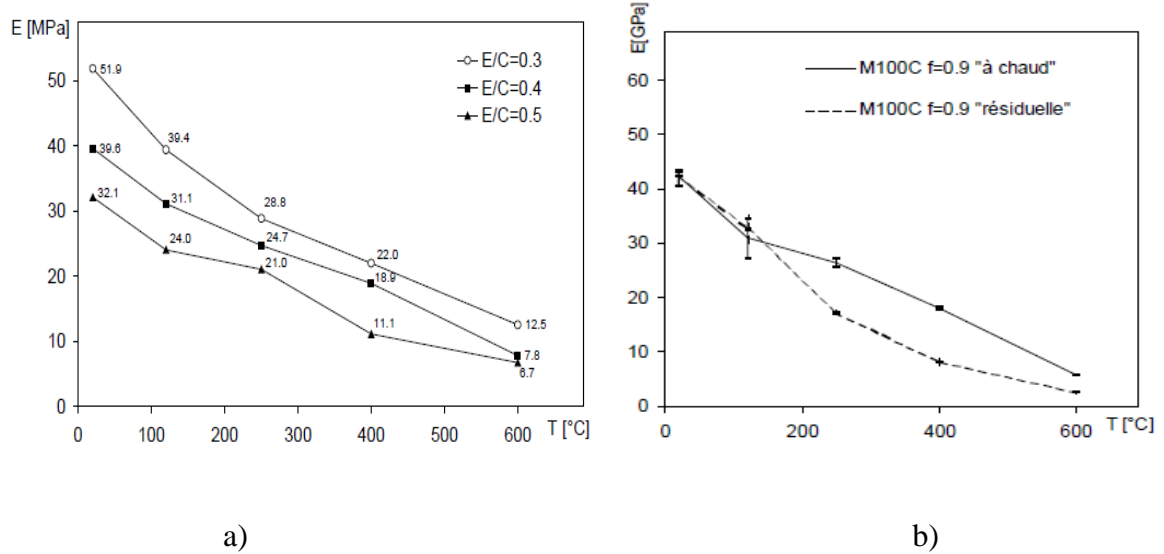


Fig. III. 11: Evolution de modules d'élasticité apparents déterminés "à chaud" en fonction de différentes températures (a), évolution du module d'élasticité apparent obtenu "à chaud" et "résiduelles" sur le béton de fibres de polypropylène (0.9 kg/m³) (b), [73]

L'incidence des fibres métalliques et de polypropylène sur le module résiduel des bétons a été étudiée par plusieurs auteurs. Kanema [Kanema 2007] 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. [78]

L'influence de l'ajout de 1 % (78 kg/m³) de fibres métalliques (Fig.III.12). 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. [79]

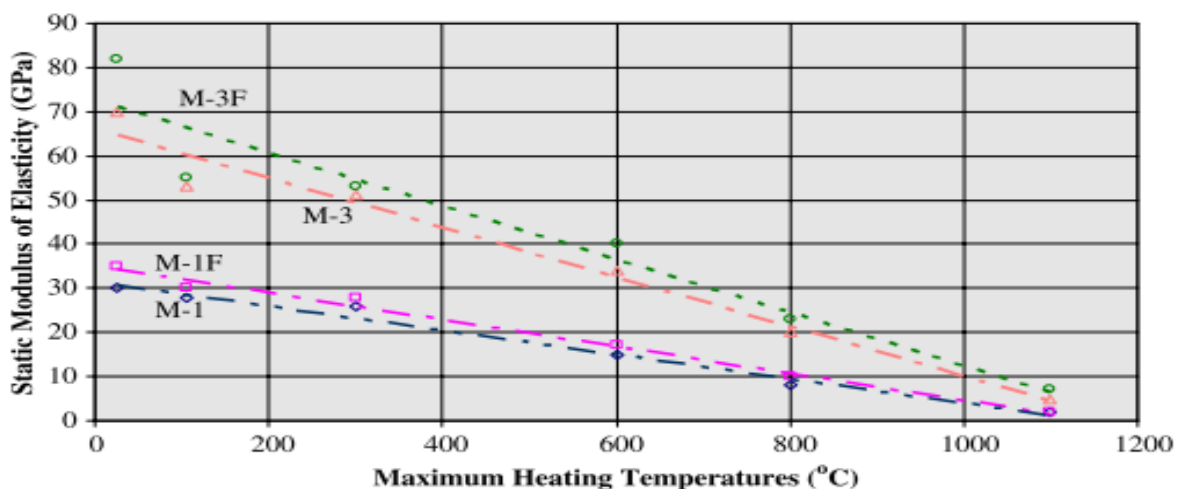


Fig. III. 12: Module d'élasticité statique résiduel en fonction de température, [79]

Sideris et al. [Sideris, Manita, and Chaniotakis 2009] ont mesuré les modules d'élasticité résiduels sur différents bétons. (Fig.III.13) présente une évolution de module d'élasticité relatif de bétons ordinaires (NSC) et de bétons à hautes performances (HPC1 et HPC2), de bétons 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. [1]

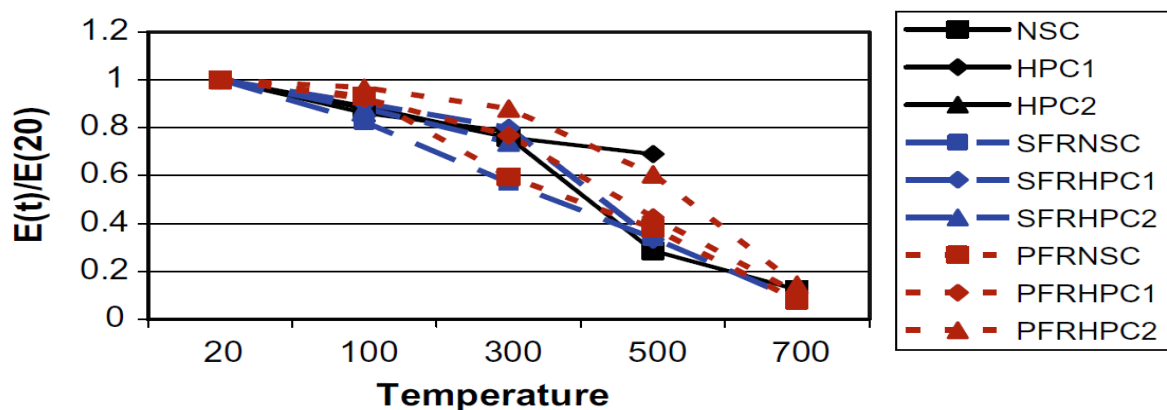


Fig. III. 13 : Evolution de module d'élasticité relatif résiduel en fonction de la température, [Sideris et al. 2009], [1]

Les performances mécaniques résiduelles des bétons dépendent fortement de la nature du granulat après 300°C . Les bétons de granulat siliceux présentent la fissuration la plus marquée et par conséquent une importante perte de résistance mécanique entre 300°C et 600°C . Pour le béton de granulat calcaire, la décarbonatation de la calcite (entre 600°C et 750°C) génère la dégradation des propriétés mécaniques dès 600°C . [80]

La Fig.III.14 résume le lien entre les modifications physiques, chimiques et dimensionnelles du béton au cours du chauffage et ses pertes de performances mécaniques. [76] Lors de la sollicitation thermique, la pâte de ciment subit dans un premier temps une dilatation jusqu'à 150°C - 200°C puis une contraction importante jusqu'au-delà de 600°C due essentiellement au départ de l'eau libre puis de l'eau chimiquement liée. Les granulats subissent durant le chauffage une importante expansion volumique non proportionnelle à la température. Une expansion

importante de la plupart des granulats a lieu autour de 550°C. Ceci est lié aux modifications chimiques et cristallines de la matrice. Cette incompatibilité de déformations entre la pâte et les granulats provoque des endommagements supplémentaires du béton (l'apparition de fissurations dans la matrice, transgranulaires et interface pâte/granulats). Au final, l'incompatibilité des déformations entre la pâte et les granulats amène à la dégradation des performances mécaniques du béton. La résistance à la compression du béton chauffé diminue progressivement jusqu'à 300°C et ensuite chute brusquement au-delà de 300°C. Le module d'Young montre une baisse progressive durant tout le chauffage.

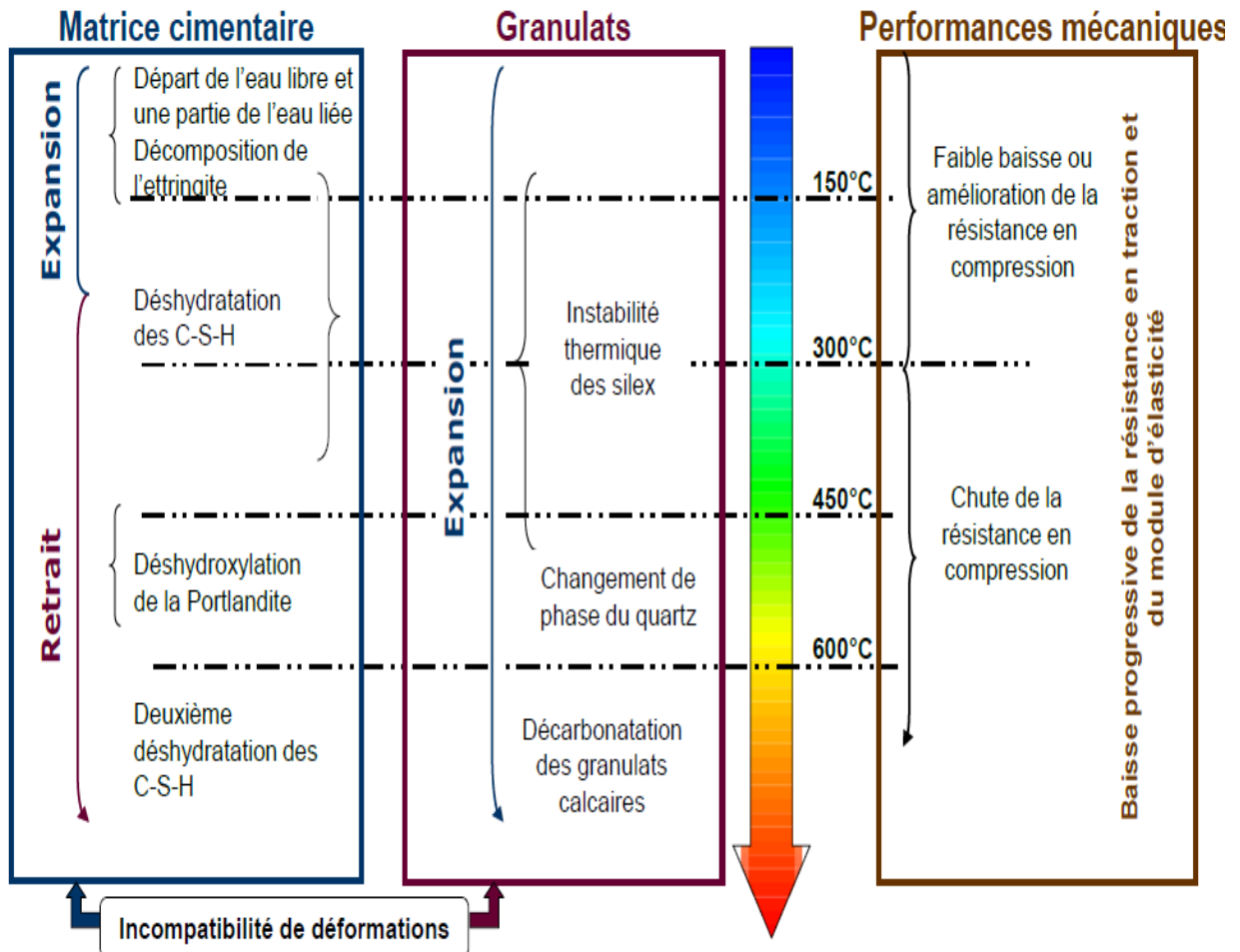


Fig. III. 14: Processus d'endommagement du béton en fonction de la température, [76]

Conclusion :

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

Chapitre

4

Caractéristiques des matériaux utilisés

Introduction	46
IV.1. Les matériaux utilisés	46
IV.2. Ciment	46
IV.3. Caractéristiques du sable utilisé	47
IV.4. Caractéristique du gravier utilisé	53
IV.5. Les Adjuvants	58
IV. 6. Le filler utilisé (Poudre de marbre)	59
IV.7. Fibres métalliques	60
IV.8. L'eau de gâchage	61
Conclusion	61

Chapitre IV : Caractéristiques des matériaux utilisés

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 constituants sont bien caractérisés, c'est l'objet de ce chapitre.

Les essais ont été exécutés au laboratoire de génie civil de l'université de M'sila.

IV.1. Les matériaux utilisés :

Les matériaux utilisés dans cette campagne expérimentale font partie d'une gamme de constituants disponibles localement (contexte algérien).

- Le sable à l'origine siliceux provenant de Oued Maiter de Boussaâda «M'sila »
- Deux fractions de gravier concassé (3/8,8/16) d'origine calcaire à BBA
- Ciment CPJ42.5 provenant de la cimenterie Lafarge de Hammam Dalaa «M'sila»
- L'adjuvant de MEDAPLAST SP 40 zone industrielle Oued Smar Alger
- L'ajout : le filler (farine de marbre de fraction 0,08mm)
- L'eau de gâchage et conservation : eau potable du laboratoire.
- Les fibres métalliques commercialisées par la société TEKNACHEM, Sétif.

IV.2. Ciment : le ciment utilisé pour l'ensemble des compositions est un ciment portland composé (CPJ CEM II/B - 42,5) 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.

IV.2.1 : Caractéristiques chimiques du ciment utilisé (CPJ42.5)

Element	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	SO_3	Na_2O	K_2O
%	16.2	04.49	2.92	57.84	1.68	2.67	0.09	0.65

Tableau.IV. 1 : Les compositions chimiques du CPJ42.5 26/04/2017

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

IV.2.2. Les caractéristiques minéralogiques du ciment CPJ42.5 :

Selon la méthode de bogue, la composition minéralogique de ciment CPJ42.5 donnée :

Minéraux	C_3S	C_2S	C_3A	C_4AF
%	58 -64	12 - 18	6 - 8	10 - 12

Tableau.IV. 2 : Les compositions minéralogiques du CPJ 42.

IV.2.3 : Caractéristiques physiques du ciment utilisé (CPJ42.5)

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

Tableau.IV. 3 : Caractéristiques physiques du ciment CEM II 42.5

Age	Résistance à la compression MPa (NA 234)
2 jours	23,42 ± 0,06
7 jours	38,51 ± 0,06
28 jours	46,23 ± 0,06

Tableau.IV. 4 : Évolution de la résistance à la compression du ciment CEM II 42.5

IV.3. Caractéristiques du sable utilisé :

IV.3.1. Essai d'analyse granulométrique (NF P18-650) :

L'essai consiste à fractionner au moyen d'une série de tamis un matériau en plusieurs classes granulaires de tailles décroissantes, les dimensions de mailles et le nombre des tamis sont choisis en fonction de la nature de l'échantillon et de la précision attendue, l'analyse granulométrique est une opération qui nous permet d'identifier un matériau, les masses des différents refus ou celles des différents tamis sont rapportées à la masse initiale de matériau, les pourcentages ainsi obtenus sont exploités, soit sous leur forme numérique, soit sous une forme graphique (courbe granulométrique). L'analyse granulométrique permet aussi, de déterminer la grosseur minimale «d » et la grosseur maximale «D» des matériaux entrant dans la composition du béton, la connaissance de la grosseur de grains de granulats dans la composition du béton, est nécessaire, pour pouvoir les combiner dans les meilleures conditions.

L'allure de la courbe granulométrique, permet de faire apparaître certaines propriétés des matériaux utilisés pour l'analyse.

L'analyse permet aussi de calculer le module de finesse du matériau et en particulier celui du sable, qui est un facteur important dans une étude de composition de béton.

Matériel pour l'analyse granulométrique :

- Une balance de 3500 g,
- Un appareil pour sécher les matériaux (étuve),
- Une série de tamis ou passoires,
- Echantillonneur.

Mode opératoire :

- Prélever une masse de 2Kg de matériau (sable sec).
- Peser chaque tamis à vide, soit la masse du tamis.

- Constituer une colonne de tamis propre et sec dont l'ouverture des mailles de haut en bas (exprimer en mm) [5-2,5-1,25-0,63-0,315-0,125-0,08-fond].
- Verser le sable sur la colonne de tamis et celle-ci est vibrée à l'aide de la tamiseuse électrique pendant 10 minutes.
- Peser chacun des tamis.

On considère que le tamisage est terminé lorsque le refus ne varie pas de plus de 1% entre deux séquences de vibration de la tamiseuse.

A la fin de tamisage peser les refus en matière retenue par chaque tamis à 1g près, soit M_i : la masse de tamis (i) +le sable.

Calculer la différence entre M_i et m_i (tamis de plus grandes mailles correspond au refus partiel R_1 de tamis 1).

Prendre la même opération avec le tamis immédiatement inférieur.

Ajouter le refus obtenu sur le second tamis à R_1 , soit R_2 la masse de refus m de tamis 2 ($R_2=R_1 +$ refus partiel sur tamis 2)

Pour suivre la même opération avec la rente des tamis pour obtenir les masses des différents refus cumules $R_3 R_4 \dots R_n$ le tamisât est calculé par la relation :

$$T=100 - R_c \quad (R_c : \text{refus cumulé en \%} \quad T : \text{tamisât en\%})$$

Les résultats obtenus sont représentés dans le tableau suivant :

Tamis (mm)	Refus partiel (g)	Refus cumulés		Tamisât cumulé (%)
		(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

Tableau.IV. 5 : Analyse granulométrique du sable

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

C'est un facteur très important, qui nous permet de juger la grosseur du sable, il est exprimé par le rapport de la somme des refus cumules des tamis de mailles : [0.16 - 0.315 - 0.63 - 1.25 et 5mm] sur 100 et calculé par la relation suivante :

$$M_f = \sum R_c / 100$$

R_c : Refus cumulé

Les normes soviétiques spécifient de M_f des sables comme suit :

- Sables gros $M_f > 2.5$
- Sables moyen $2 < M_f < 2.5$
- Sables fin $1.5 < M_f < 2$
- Sable très fin $1 < M_f < 1.5$

On se basant sur cette classification, on trouve le résultat suivant :

$$M_f = \sum R_c / 100$$

R_c : Refus cumulé $M_f = 1.45$ Le sable utilisé est considéré comme un sable très fin.

IV.3.2 Caractéristiques physiques du sable utilisé :

IV.3.2.1. Masse spécifique (absolue) : NF P 18-555

Pour étudier la formulation d'un béton, il est plus évident de travailler avec les quantités de composants d'après leur masse plutôt qu'avec leur volume.

Mode opératoire : la masse volumique absolue du sable est déterminée à l'aide d'un récipient de 100 cm^3 on prend 3 échantillons de masse de 300g. On place l'échantillon dans le récipient de capacité 1000 ml et on verse d'eau, puis on malaxe soigneusement le contenu pour chasser l'air qui y excite après cette opération, on détermine le volume final occupé par le mélange (sable + eau), soit (v) ce volume. Donc le volume occupé par le sable c 'est :

$$\text{Volume de sable : } V_1 = V - V_e; V_e = 300 \text{ cm}^3$$

La masse volumique absolue du sable est calculée par la formule :

$$P_s = M / V_1 \quad M = 300 \text{ g}$$

Résultats obtenus :

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

Tableau.IV. 6 : La masse volumique absolue de sable

IV.3.2.2. Masse volumique apparente : NF P 18-555

A- Masse volumique à l'état lâche :

-On détermine la masse volumique apparente du sable à l'aide d'un entonnoir standardisé de capacité 2 à 2.5l litres.

-On emplit l'entonnoir avec du sable sec

-En pèse le récipient vide de capacité de 0.9 L, soit M_1 ce poids

-En place le récipient sous l'entonnoir à une distance de 10 à 15cm, et on le remplit avec du sable.

-On nivelle la surface du sable et on pèse le tout, soit M_2 ce poids.

La masse volumique apparente du sable est donnée par la formule suivante :

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

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

Tableau.IV. 7 : La masse volumique apparente à l'état lâche

B-Masse volumique à l'état compact :

C'est la masse du matériau par unité de volume après compactage compris les vides restant entre les grains, elle est souvent supérieure à la masse volumique à l'état lâche.

Mode opératoire :

Même procédure que celle de l'état lâche, après remplissage du récipient et le compactage par tassement à 30secousses manuelle, jusqu'au remplissage du récipient après on nivelle ce dernier et on le pèse, soit M_2 la masse de l'ensemble (sable + récipient)

La masse volumique à l'état compacte est donnée par la formule suivant :

$$\gamma_c = M_2/V_r$$

M_1 : La masse de récipient vide

V_r : volume du récipient

M_2 : La masse de récipient plus le sable

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

Tableau.IV. 8 : La masse volumique apparente à l'état compact du sable

IV.3.2.3 Porosité et compacité et indice des vides : NF P 554

A/ la porosité par la formule : $P = (1 - \rho_{app}/\rho_{abs}) \cdot 100$

B/ la compacité par la formule : $C = \rho_{app}/\rho_{abs} = 1 - P$

C/ l'indice des vides par la formule : $E = P/C$

Pour le sable de Boussaâda.

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

Tableau.IV. 9 : Porosité, compacité et indice des vides

IV.3.2.4. Equivalent de sable : NF 18-598

Cet essai consiste à plonger un poids défini de sable dans une éprouvette normalisée remplie par une solution flocculant ; après agitation, on laisse décanter le mélange pendant 20 minutes, ensuite on mesure la hauteur du sédiment + flocculant (h_1) et du sédiment (h_2).

Mode opératoire

- On remplit l'éprouvette de solution lavant jusqu'au trait inférieur.
- A l'aide du récipient de mesure, on introduit une masse sèche de 120 g de matériau dans l'éprouvette par l'intermédiaire de l'entonnoir, on frappe fortement à plusieurs reprises la base de l'éprouvette sur la paume de la main pour déloger les bulles d'air,
- On laisse pendant dix minutes, ensuite on agite l'éprouvette à l'aide de l'agitateur électrique afin de boucher l'éprouvette à l'aide du bouchon de caoutchouc à raison de 90 cycles en 30 s,
- Laver le sable et le bouchon avec précaution jusqu'à atteindre le trait supérieur,
- Laisser reposer pendant 20 minutes,

Mesure à l'aide réglé la hauteur h_1 (sable + flocculat), et à l'aide de piston la hauteur h_2 (sable).

Cadence des essais : au nombre de 2.

Equipement pour équivalent de sable :

- Eprouvettes cylindrique en plastiques portant deux repères (un repère inférieur et un repère supérieur),
- Récipients pour mesure de l'échantillon à tester,
- Tamis de 5 mm d'ouverture,
- Récipient de 10 litres pour contenir la solution lavant, muni d'un tuyau et pipettes de lavage,
- Bouchon en caoutchouc,
- Règle métallique graduée,
- Entonnoir,
- Agitateur électrique,
- Piston muni d'un contre poids



Fig.IV. 1: Matériel pour l'essai équivalent de sable

L'équivalent de sable est donné par la relation suivante :

$$E.S = \left(\frac{h_2}{h_1} \right) * 100 \quad (\%)$$

A. Equivalent de sable visuel : (E.S.V)

Après 20 minutes de dépôt de sable, lire la hauteur h_1 du niveau supérieur du flocculant jusqu'au le fond de l'éprouvette à l'aide d'une règlette.

Mesurer également avec le réglet la hauteur h_2 comprise entre le niveau supérieur de la partie sédimentaire et le fond de l'éprouvette.

$$E.S.V = \left(\frac{h_2}{h_1}\right) * 100 \quad (\%)$$

On : h_1 : la hauteur du sable +floculat h_2 : la hauteur du sable ($h_2 < h_1$)

B. Equivalent de sable piston : (E.S.P)

Introduire le piston dans l'éprouvette et laisser descendre doucement jusqu'à ce qu'il repose sur le sédiment, cet instant bloquer le manchon du piston, et sortir celui-ci de l'éprouvette.

Introduire le règle dans l'encoche du piston jusqu'à ce que de zéro vienne buter contre la face intérieur de la tête du piston, soit h'_2 la hauteur lue et correspondant à la hauteur de la partie sédimentée.

$$E.S.P = \left(\frac{h'_2}{h_1}\right) * 100 \quad (\%)$$

On : h_1 : la hauteur du sable +floculat h'_2 : la hauteur du sable ($h'_2 < h_1$)

L'équivalent de sable permet de quantifier la notion de propreté d'un sable, la présence d'un excès d'argile peut provoquer une augmentation du retrait et une forte demande en eau ce qui entraînera une baisse de résistance mécanique, cependant un manque total de fines conduit à des bétons peu maniabiles, ségréables et de faibles compacité.

L'équivalent de sable est d'autant plus élevé que la teneur en argile est faible

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	

Tableau.IV. 10 : Équivalent de sable

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

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

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

IV.3.2.5. Teneur en eau : NF P 18-555

Le sable a la capacité de retenir une grande quantité d'eau, Si son humidité est comprise entre 0 et 3% on le considère comme un sable sec.

Mode opératoire :

- Peser un échantillon de sable humide, soit M_h son poids.
- Mettre le sable dans l'étuve à une température de 100°C environ, et cela pour 24h.
- Peser l'échantillon de nouveau, soit M_s son poids

$$W = \frac{[(M_h - M_s) * 100]}{M_s} \quad (\%)$$

Ou : M_s : Poids du sable sec en (g)

M_h : Poids du sable humide en (g)

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	

Tableau.IV. 11: Teneur en eau de sable

IV.3.2.6. Degré d'absorption d'eau :

C'est le pouvoir d'un matériau d'absorption et de retenir l'eau. Elle est définie par la formule suivante :

$$A = [(m_2 - m_1)/100]$$

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	

Tableau.IV. 12 : Degré d'absorption d'eau (sable)

IV.3.3. Caractéristiques chimiques du sable :

La composition chimique de (Oued Maitre) est établie en (26/04/2017), à la cimenterie Lafarge (M'sila). Elle est donnée au Tableau 13 :

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

Tableau.IV. 13: Les Caractéristiques chimiques du sable 26/04/2017

Commentaire :

Noter sable est un sable pur à haute teneur en silice.

IV.4. Caractéristique du gravier utilisé :

IV.4.1. Origine du gravier utilisé :

Notre gravier utilisé pour la confection du béton est obtenue par concassage de la roche par Cossider.

Les fractions des graviers utilisés sont : **Fraction 3/8&Fraction 8/16**

IV.4.2. Analyse granulométrique :

Le même essai d'analyse granulométrique de sable :

- Fraction 3/8
- $M_{G3/8} = 2$ kg

Tamis (mm)	Refus partiel (g)	Refus cumulés		Tamisât cumulé (%)
		(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. 14 : Analyse granulométrique du gravier 3/8

- Fraction 8/16
- $M_{G8/16} = 3$ kg

Tamis (mm)	Refus partiel (g)	Refus cumulés		Tamisât cumulé (%)
		(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

Tableau.IV. 15 : Analyse granulométrique du gravier 8/16

IV.4.3. Les caractéristiques physiques des graviers utilisés :

IV.4.3.1. Masse volumique apparent : NF P 18-554

Le principe de cette mesure s'agit de remplir un récipient de volume intérieur connu et de peser la quantité de granulats correspondant.

Mode opératoire :

Verser le granulat dans le récipient choisi et le disposer sous tassement par couches horizontales successives.

Araser la couche supérieur du granulat à l'aide d'une règlette que d'on anime la masse volumique est déterminée par la formule suivante :

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

Ou : V : volume du récipient

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

M₁ : poids de récipient

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	

Tableau.IV. 16 : Masse volumique apparente du gravier

IV.4.3.2. Masse volumique absolue :

Le mode opératoire est même effectuée pour le sable, et les résultats sont :

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	

Tableau.IV. 17 : La masse volumique absolue du gravier

IV.4.3.3. Compacité, porosité et l'indice de vide : NF P 18-554

Le mode opératoire est semblable à celui effectuée pour le sable on calcule la porosité selon la formule :

A- la porosité donnée par formule : $\rho = (1 - \gamma_g / \rho_g) * 100\%$

B- la compacité donnée par la formule : $C = \gamma_g / \rho_g = 1 - \rho$

C- l'indice des vides donnés par la formule : $E = \rho / (1 - \rho) = \rho / c$

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

Tableau.IV. 18 : Porosité, compacité et l'indice des vides

IV.4.3.5. Teneur en eau du gravier :

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	

Tableau.IV. 19 : Teneur en eau des graviers

IV.4.4. Les caractéristiques mécaniques des graviers utilisés :

Ce sont des essais importants pour les granulats routiers, en effet, le passage répété de véhicules conduit émousser, à polir progressivement les granulats et ainsi à diminuer l'adhérence des pneumatiques sur la chaussée. Ces caractéristiques permettent également d'estimer la qualité des granulats utilisés dans la confection des bétons.

IV.4.4.1 Essai Los Angeles (NF P 18-573) :

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

Principe de l'essai :

Le principe consiste à mesurer la quantité d'éléments passant à travers un tamis de 1,6 mm, produite en soumettant le matériau aux chocs de boulets normalisés, dans la machine « Los Angeles », le nombre de boulets est 11, soit environ une masse totale des boulets égale à 4840 g

Si M est la masse du matériau soumis à l'essai, m la masse des éléments inférieurs à 1,6 mm produits au cours de l'essai, la résistance à la fragmentation par chocs s'exprime par la quantité :

$$L_A = \left(\frac{m}{M}\right) * 100 \quad L_A = \left(\frac{m}{M}\right) * 100$$

Cette quantité sans dimension est appelée, par définition, coefficient Los Angeles du matériau. (L_A) : Le coefficient Los Angeles est d'autant plus élevé que le granulat est moins bon.



Fig.IV. 2: Appareil de l'essai Los Angeles

Mode opératoire :

- Tamisage de l'échantillon à sec.
- Lavage de du matériau et son séchage à l'étuve à 105 °c jusqu'à masse constante.
- La masse de la prise d'échantillon pour essai est de 5000 g.
- Introduction avec précaution la charge de boulets correspondant de la classe granululaire choisie au nombre de 11 B pour fractions 8/16 et 8 B pour fractions 3/8, puis l'échantillon pour l'essai.
- Faire effectuer à la machine 500 rotations à vitesse régulière (30 tr /mn).
- Recueillir le granulat dans un bac placé sous l'appareil, en ayant soin d'amener l'ouverture, juste au-dessus de ce bac, afin d'éviter les pertes de matériau.

- Tamiser le matériau sur le tamis de 1,6 mm.
- Laver le refus au tamis de 1,6 mm égoutter et sécher à l'étuve à 105 °c jusqu'à masse constante, pesé ce refus une fois séché, soit, m' le résultat de la pesée.

Où : $m = 5000 - m'$

Les résultats obtenus sont présentés au tableau suivant :

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

Tableau.IV. 20 : Caractéristiques mécaniques du gravier utilisé

Classification :

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

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

Tableau.IV. 21 : Classification des roches en fonction du coefficient L_A

Commentaire :

Le gravier (3/8) : C'est un gravier dur ($LA=27.58\%$) ($25 < LA < 30$) et Assez dure.

Le gravier (8/16) : c'est un gravier assez dur ($LA=19.12\%$) ($LA < 20$) et Très dure.

IV.4.5. Caractéristiques chimiques des graviers utilisés :

La composition chimique du gravier de carrier Cossider est établie en Mars 2004, à la cimenterie ACC de M'sila. Elle est donnée au tableau III.18

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

Tableau.IV. 22: Analyse chimique du gravier

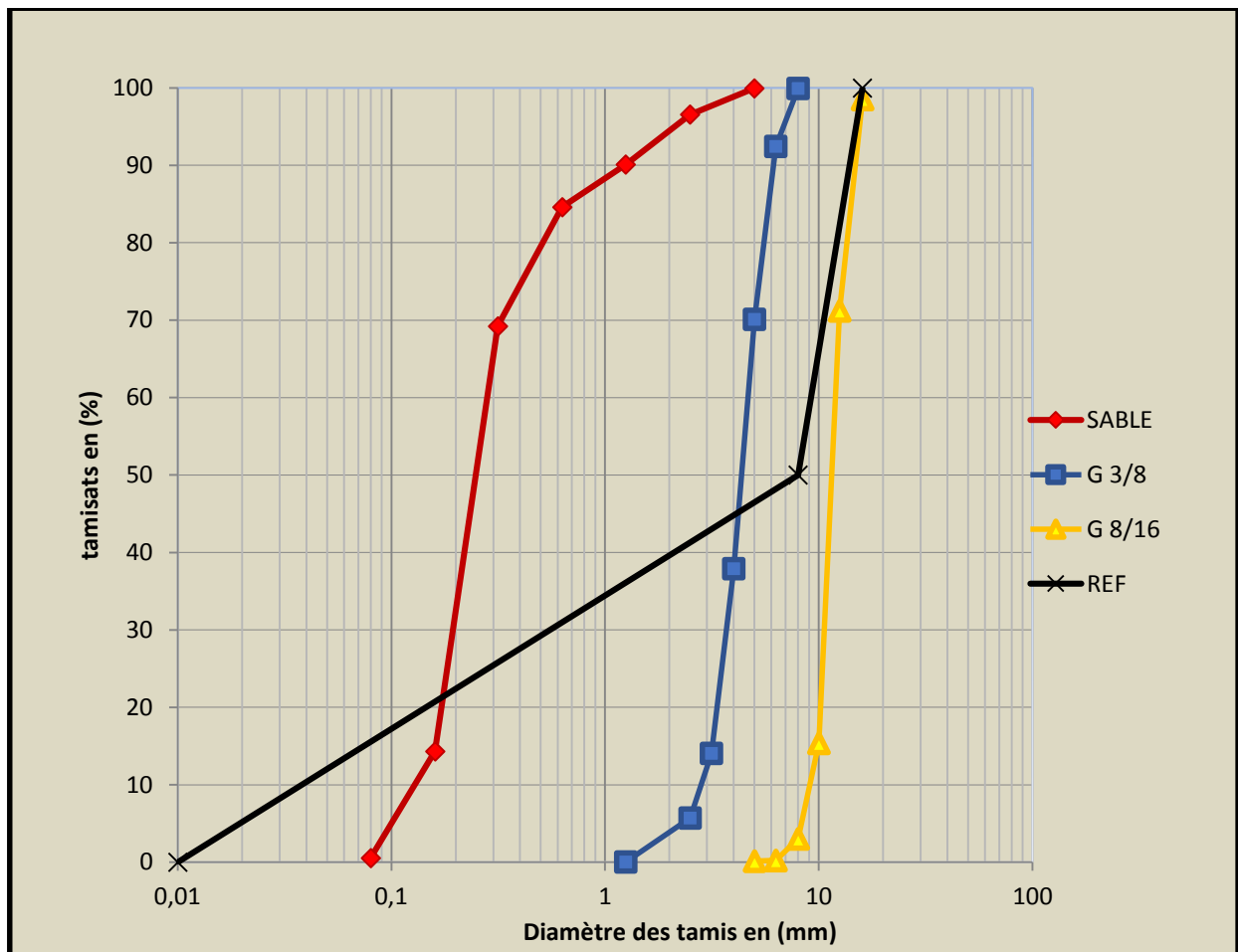


Fig.IV. 3 : Analyse granulométrique de sable

IV.5. 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 zone industrielle Oued Smar – Alger, à savoir : MEDAPLAST SP 40.

IV.5.1. Le MEDAPLAST SP 40 :

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.

IV.5.2. Propriétés chimiques et physiques :

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

Tableau.IV. 23: Caractéristiques physiques

IV.5.3. Propriétés :

Grace à ses propriétés le MEDAPLAST SP 40 permet :

Sur béton frais	Sur béton durci
Améliorer la fluidité	Augmenter les résistances mécaniques
Augmenter la maniabilité	Diminuer la porosité
Réduire à l'eau de gâchage	Augmenter la durabilité
Eviter la ségrégation	Diminuer le retrait
Faciliter la mise en œuvre du béton	

Tableau.IV. 24 : effet de l'adjudant sur béton frais et durci

IV. 5.4. Domaines application:

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

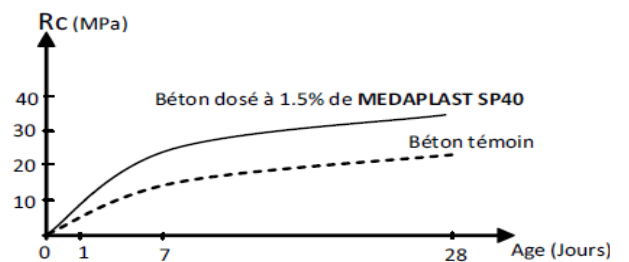


Fig.IV.4 : Evolution la résistance à la compression d'un béton adjuvanté avec sp 40

IV. 6. 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 dimension variant de (80-100 cm), qui sont concassés, broyés pour obtenir une poudre finement broyée.

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



Fig.IV. 5 : poudre du 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. 25 : Caractéristiques physiques 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. 26 : Composition chimique de la poudre de marbre

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

Tableau.IV. 27 : Composition minéralogique de la poudre de marbre10/04/2017

IV.7. Fibres métalliques :

Les fibres utilisées dans ce travail 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 Zone d'Activité 6^{ème} tranche – Sétif, le choix de ce type de fibre est justifié par la forme qui donne une bonne adhérence avec la matrice.

IV.7.1. 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.



Fig.IV. 6 : Fibres métalliques utilisés

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

IV.7.2. Caractéristiques :

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

- Chocs et vibrations
- Charges concentrées

La distribution uniforme des fibres dans le mélange rend l'utilisation du FIBERTEK A possible pour remplacer l'armature secondaire et le confinement de la propagation des fissures.

Les fibres FIBERTEK A sont disponibles (sur demande) en différents diamètres et longueurs selon les exigences d'utilisation.

Avantage :

- Répartition plus homogène de l'armure 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.

IV.7.3. Caractéristiques techniques :

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

Tableau.IV. 28 : Caractéristiques technique de FIL D'ATTACHE

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%

Tableau.IV. 29Caractéristiques technique de FIBERTEK A**IV.8. L'eau de gâchage :**

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

IV.8.1. Caractéristiques chimiques de l'eau utilisée :

La composition chimique d'eau du laboratoire de département de génie civil est établie en 10/05/2005, au laboratoire de chimie (M³sila). Elle est donnée par :

La mesure	Teneur en (mg/l)
Le temps de prise d'échantillon	10/05/2005(9 :25)
Degré de température	24.7
PH	7.78
Conductibilité	1799
Chlore Cl-	234.3
Sulfate So-4	351.6
Magnésium Mg ²⁺	110.8
Calcium Ca ²⁺	267.2
Sédiment sec	1412
Rééligibilité d'oxydation en eau	1024

Tableau.IV. 30 : Caractéristiques chimiques d'eau**Conclusion :**

Le programme expérimental retenu pour la confection des BAP nécessite dans une première étape de faire un choix des matériaux à utiliser, parmi ceux existants sur le marché tel que la poudre de marbre, les essais ont été exécutés au laboratoire de génie civil de l'université de M³sila. 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 ce fait par tâtonnement sur la base de ces plages, après la conception par calcul, la formule ne peut être optimisée et vérifiée que par des essais effectués la plupart du temps directement sur béton.

Introduction	62
V.1. Formulation du béton autoplaçant	62
V.1.1. Calcul des constituants d'un BAP par la méthode AFGC	62
V.2. Préparation de mélange	63
V.3. Conservation des éprouvettes	64
V.4. Essais de caractérisations du béton autoplaçant à l'état frais	64
V.4.1. Essai d'étalement au cône d'Abrams NFEN12 350-8	65
V.4.2. Essai de stabilité au tamis NF EN 12 350-11	66
V.4.3. Essai de la boîte en « L » NF EN 12 350-10	68
V.4.4. La masse volumique du béton autoplaçant NF EN 12 350-6	69
V.5. Essais de caractérisations du béton autoplaçant à l'état durci	69
V.5.1. Essai compression NF EN206-1	69
V.5.2. Essai de traction par flexion : NF P18-408	70
V.5.3. Module d'élasticité	71
V.5.4. Mesure de la perte de masse	72
V.5.5. Mesure la porosité à l'eau (Peau) : NF P 18 459	72

Chapitre V : Techniques expérimentales

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 envers la ségrégation.

Il existe de nombreux procédés pour effectuer le contrôle de ces 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).

V.1. Formulation du béton autoplaçant :

Pour la formulation du béton auto plaçant nous adaptions la méthode de l'AFGC donnant les paramètres suivants :

V.1.1. Calcul des constituants d'un BAP par la méthode AFGC :

❖ Les données de base :

On a choisi :

- $G/S = 0,9$. Ou $G/S = 1$
- On fixe le rapport $E/(C+F) = 0,50$.
- Le dosage en superplastifiant est donné selon la fluidité (donné par l'essai d'étalement), on vise un étalement de 660 à 750 mm.

a. Optimisation de la composition du BAP :

- Le volume de la pâte pour $1m^3$ 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 $E = 0,50 \cdot (400+40)$ $E = 220 \text{ l/m}^3$.
- Volume de granulats égale 640 l/m^3 .
- Le dosage en superplastifiant est 2 % de la masse ciment et filler.
 $SP = 0,02 \cdot (400+40) = 8,8 \text{ kg/m}^3$.

Les masses des constituants pour 1m³ du BAP sont :

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

Tableau. V. 1 : Composition d'un mètre cube de béton formulé par la méthode AFGC

V.2. 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 prismatique cubique 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, si non 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 quart 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.

V.3. 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 démoulées, 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 **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 variant de 20C°, 200C°, 400C° et 600C° avec une vitesse de la montée en température de 10C°/min et un maintien de température dans le four à moufle pendant 1heure.

Le procédé expérimental appliqué repose sur chargement thermique puis mécanique



Fig. V. 1 : Le four

V.4. 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 (décrit par l'essai d'étalement au cône d'Abrams).
- Mobilité en milieu confiné (décrit par l'essai d'écoulement à la boîte en L).
- Stabilité (résistance à la ségrégation décrite par l'essai de stabilité au tamis).

V.4.1. 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. [81]

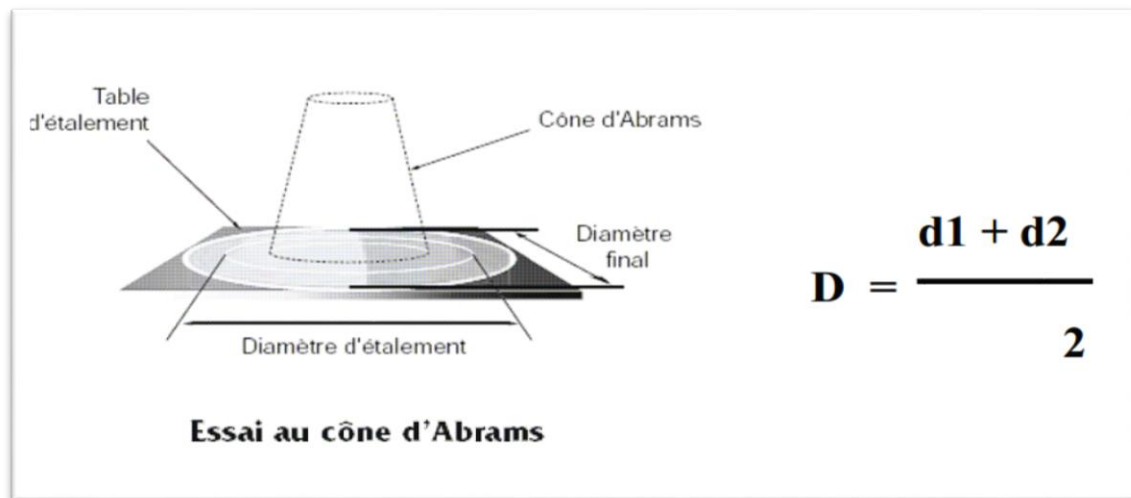


Fig. V. 2 : Essai au cône d'Abrams

➤ 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'arase supérieure du cône.
- Retirer l'entonnoir, raser 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 cotés perpendiculaires.
- Noter le résultat des deux valeurs. Exemple : ((68/70cm)). Si les deux valeurs différentes de plus de 5 cm, l'essai doivent être invalidé et reconduit.
- Exprimer le résultat final en termes de moyenne des deux valeurs obtenue, en arrondissant au centimètre supérieur. [81]



Fig.V. 3 : Essai d'étalement au cône

V.4.2. 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 %.

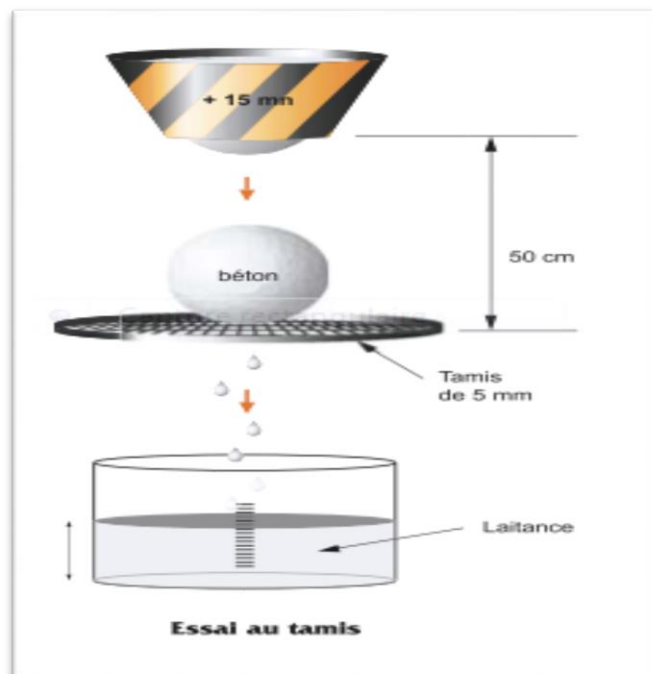


Fig.V. 4 : Essai de stabilité au tamis

Objet de l'essai : Cet essai vise à

qualifier les bétons autoplaçant 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 chantier.

Cet essai complète les essais permettant d'apprécier la mobilité, en milieu confiné ou non, en caractérisant la stabilité. [81]

➤ **Matériel utilisé :**

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



Fig.V. 5 : Stabilité au tamis

➤ **Mode opératoire :**

- Echantillonnage :
- En laboratoire : Malaxer, verser 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 balance.
- Faire la tare.
- Observer et noter l'éventuelle présence d'eau claire 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 ± 5 cm.
- Noter le poids réel lu de l'échantillon.
- Attendre 2 mn.
- Faire la tare.

Peser le fond avec la laitance :

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

- $\delta = (P \text{ laitance}/P \text{ échantillon}) \cdot 100$

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.

V.4.3. 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 du béton, sa mobilité en milieu confiné et son aptitude à traverser une zone fortement armatures peuvent être adaptés pour traduire le ferrailage réellement présent dans la structure). Après écoulement du béton, on mesure la différence de hauteur dans la partie verticale (H1) et horizontale (H2). Le résultat de l'essai s'exprime par le taux de remplissage $H2/H1$. Une valeur de ce rapport supérieur à 0.8 traduit un bon écoulement.



Fig.V. 6 : Essai de boit 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 blocage inacceptables.

Matériel utilisé :**Fig.V. 7 : Boite 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 H1 et H2 Fig.V.7 et on exprime le résultat en terme de taux de remplissage H2/H1.

Lorsque le béton s'écoule mal à travers le ferrailage et qu'il se produit un amoncellement de granulats 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. [81]

V.4.4. La masse volumique du béton autoplaçant NF EN 12 350-6 :

Voir été essuyées ou nettoyées, les éprouvettes 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/dm³.

V.5. Essais de caractérisations du béton autoplaçant à l'état durci :**V.5.1. Essai compression NF EN206-1 :****But de l'essai:**

- 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'éclatement de 2. ($H= 2 \varnothing$) ou éprouvette cubique 10x10x10. Les dimensions les plus utilisées sont : $H= 32 \text{ cm } \varnothing = 16 \text{ cm}$. [81]

Principe de l'essai:

- Après malaxage, on remplit en béton un moule cylindrique normalisé, le remplissage du moule se fera en 3 couches bien vibrées chacune.
- L'éprouvette sera immergée dans un bac d'eau pour durcir à une température moyenne de 20 C° .
- Le démoulage se fera après un 24 heures. Généralement, la résistance est déterminée à 28 jours.



Fig.V. 8 : Presse hydraulique de compression

Conduit de l'essai :

- Ce temps écoulé, on retire le moule et on fait passer l'éprouvette à la presse permet la lecture de la force qui s'exerce sur les facettes latérales du cylindre de béton.
- Epreuve sera placée entre les deux mâchoires de la machine et on élèvera une seule lecture. Celle de la force correspondant à la rupture de l'échantillon. Soit F cette lecture.

Calculs :

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

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

Et essai se fait également sur les roches que l'on doit tailler au préalable sous forme de cubes d'arête égale à 7 cm.

V.5.2. 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.



Fig.V. 9 : Essai de traction par flexion

Conduite de l'essai :

Lors d'un essai de flexion trois points, la poutre de béton est soumise dans sa partie supérieure à des contraintes de compression et dans sa partie inférieure à des contraintes de traction. Compte tenu que le béton résiste beaucoup moins à la traction qu'à la compression (dans un rapport de 10) l'éprouvette va se rompre dès que le béton aura atteint sa limite en traction. La contrainte limite qui découle d'un calcul classique de résistance des matériaux en élasticité est σ_{ff} (contrainte de traction par flexion). Le matériau béton n'ayant pas un comportement élastique au voisinage de la rupture, il convient d'apporter au calcul de la résistance en traction du béton σ_t un terme correctif de 0,6 ($\sigma_t = 0,6 \sigma_{ff}$)

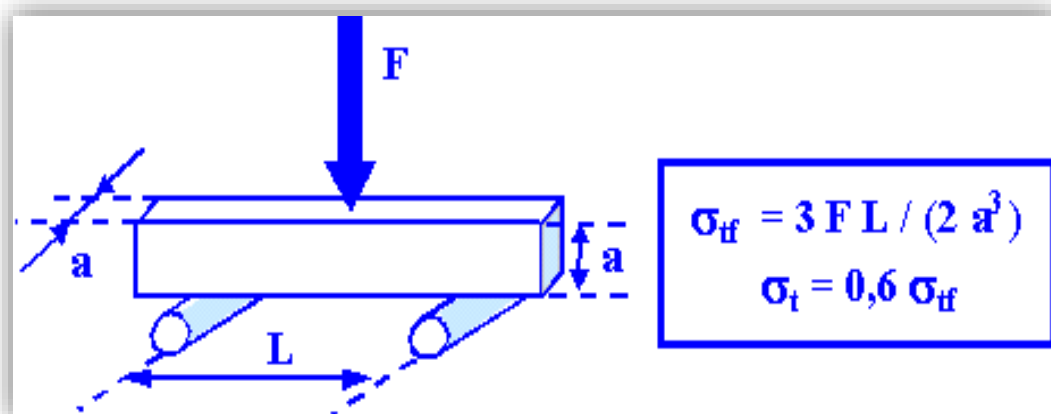


Fig.V. 10 : Formule de calcul de la résistance de traction

V.5.3. Module d'élasticité :

Objectif :

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 : [81]

$$\sigma = E * \epsilon$$

E est appelé module d'élasticité.

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

V.5.4. 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 cinq bétons avant et après l'essai d'échauffement stationnaire. Les pesés ont été effectués avec une balance de résolution 0,1g.

$$\text{PERTE DE MASSE} \quad \Delta M = (M_0 - M_1) / M_0 * 100\%$$

V.5.5. Mesure la porosité à l'eau (P_{eau}) : NF P 18 459

Pesée hydrostatique M_{eau} = masse en grammes pesée sous l'eau

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

Séchage à $T^\circ = 105^\circ C$ 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 :

$$P_{eau} = \frac{M_{sat} - M_{sec}}{M_{sat} - M_{eau}} \times 100$$

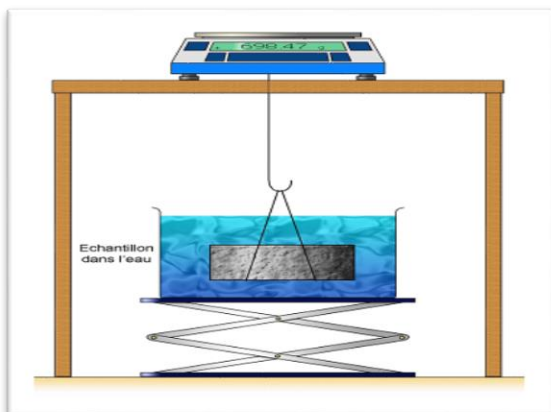


Fig.V. 11 : Essai de porosité à l'eau

Introduction	73
VI .1. Influence de fibres métalliques sur le comportement rhéologique du BAP	73
VI .1.1. Essai d'étalement (Slump flow)	74
VI .1.2. Essai de la Boite en L (L box)	75
VI .1.3. Essai de la stabilité au tamis	76
VI .1.4. La masse volumique	77
VI.2. Influence des fibres métalliques sur le comportement mécanique et physique du BAP soumis à une température élevée	77
VI .2.1. Compression	78
VI .2.2. Tractions par flexion	79
VI .2.3. Module d'élasticité	80
VI .2.4. La porosité	81
VI .2.5. La perte de masse	82
Conclusion	83

Chapitre VI : Résultats et analyses

Introduction :

Les fibres métalliques sont utilisées dans le béton pour limiter la propagation des fissures et améliorer la ductilité du béton. Le but dans ce chapitre est de choisir quelques paramètres tels que la nature des fibres (deux types de fibre) et le dosage des fibres sur le comportement d'un BAP à l'état frais.

Ensuite, de s'intéresser aux essais sur béton, permettant ainsi de caractériser leurs performances physiques et mécaniques et d'évaluer le comportement des bétons autoplaçants renforcés par des fibres métalliques et exposés aux températures élevées.

Les formulations des bétons réalisés sont les suivantes :

- BAPT : BAP sans fibre
- BAPF1 : BAP avec 0.3% de fibres FIBERTEK A
- BAPF2 : BAP avec 0.4% de fibres FIBERTEK A
- BAPF3 : BAP avec 0.5% de fibres FIBERTEK A
- BAPFD1 : BAP avec 0.3% de FIL D'ATTACHE
- BAPFD2 : BAP avec 0.4% de FIL D'ATTACHE
- BAPFD3 : BAP avec 0.5% de FIL D'ATTACHE
- BAPM1 : BAP avec 0.3% mélange de 50% de FIBERTEK A et 50% de FIL D'ATTACHE
- BAPM2 : BAP avec 0.4% mélange de 50% de FIBERTEK A et 50% de FIL D'ATTACHE
- BAPM3 : BAP avec 0.5% mélange de 50% de FIBERTEK A et 50% de FIL D'ATTACHE

VI .1. Influence de fibres métalliques sur le comportement rhéologique du BAP :

La plupart des formulations de BAP sont conçues actuellement de manière empirique ; cependant on doit concilier deux caractéristiques à priori contradictoires 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).

Le tableau ces dessous, fournit les résultats des caractéristiques rhéologiques d'un BAP témoin et un autre fibré par fibre métallique avec les pourcentages 0.3%, 0.4% et 0.5% en volume pour la formulation de béton autoplaçant. On remarque une légère réduction des valeurs de la stabilité au tamis, de l'écoulement à la boîte en L et d'étalement au cône des bétons fibrés par rapport au béton témoin.

Type de béton	Caractéristiques rhéologiques			
	Étalement (mm)	Boîte en L H2/H1	Stabilité au tamis (%)	Masse volumique (kg/dm ³)
BAPT	730	0,89	13,02	2,323
BAPF1	710	0,88	12,13	2,330
BAPF2	690	0,87	11,71	2,347
BAPF3	675	0,85	09,06	2,376
BAPFD1	710	0,88	12,02	2,393
BAPFD2	705	0,85	10,66	2,439
BAPFD3	700	0,83	09,79	2,386
BAPM1	695	0,85	12,85	2,441
BAPM2	685	0,84	12,01	2,443
BAPM3	665	0,82	10,14	2,338

Tableau.VI. 1 : Caractéristiques rhéologiques des bétons autoplaçants fibrés

VI .1.1. Essai d'étalement (Slump flow) :

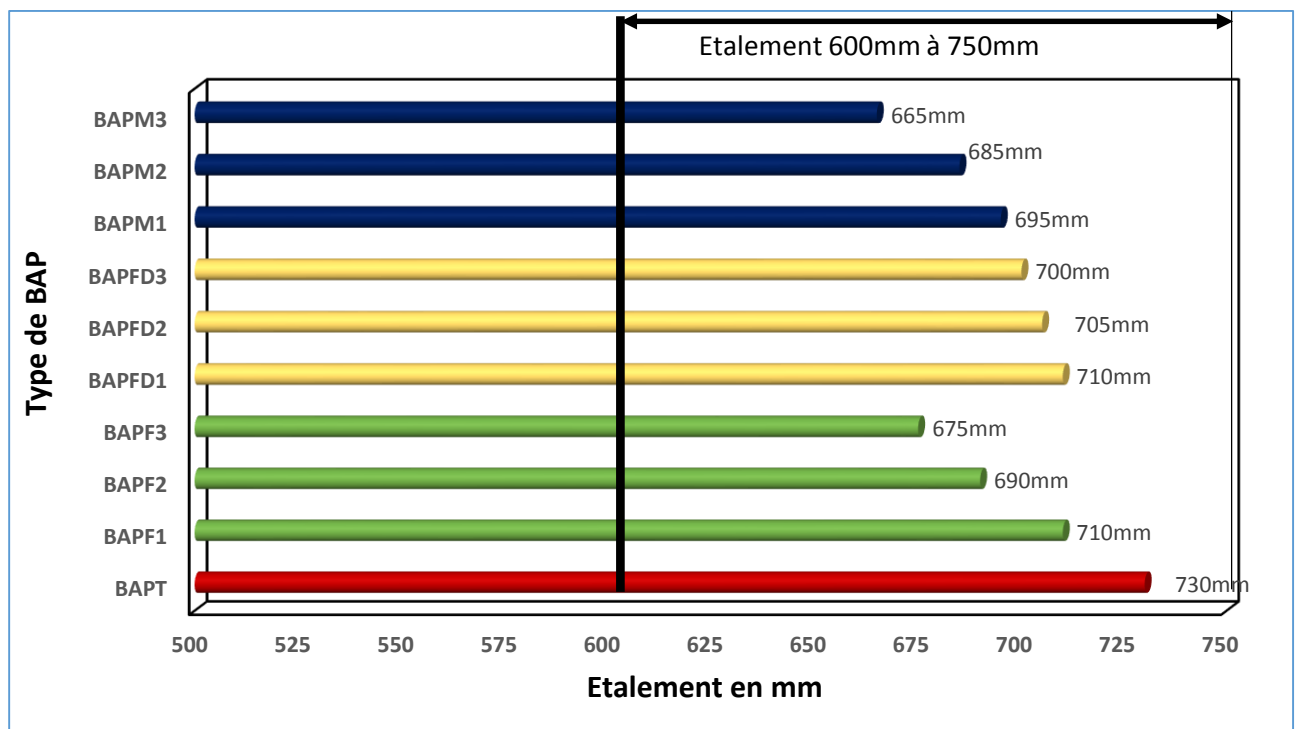


Fig.VI. 1: Variation de l'étalement en fonction des formulations en BAP

L'étalement d'un béton autoplaçant peut varier entre (600 et 750) mm selon [AFGC, 2008].

La figure VI.1 présente le résultat de variation de l'étalement en fonction des formulations en BAPT et BAP Fibre on remarque une légère réduction des valeurs de l'étalement.

L'introduction des fibres métalliques au pourcentage 0.3%, 0.4% et 0.5% diminue l'étalement puisque on observe une ségrégation au centre de la galette parce que les fibres bloquent le passage du granulat et limitent l'écoulement.

Nous observons qu'avec l'augmentation de pourcentage de fibres, le béton autoplaçant perd ses caractéristiques rhéologiques comme la fluidité (essai d'étalement), pour BAPM3 une

diminution de la fluidité à l'ordre de 65 mm (8.9 %), parce que les fibres se chevauchent et forment des zones de blocage de l'écoulement.

Les résultats d'étalements au cône d'Abrams acceptables pour un BAP et BAP Fibré sont généralement acceptables (pas de ségrégation visible en fin d'essai c'est-à-dire pas d'amoncellement de gros granulats ni d'auréole de laitance). L'utilisation de superplastifiant aide à augmenter la fluidité.

VI .1.2. Essai de la Boite en L (L box) :

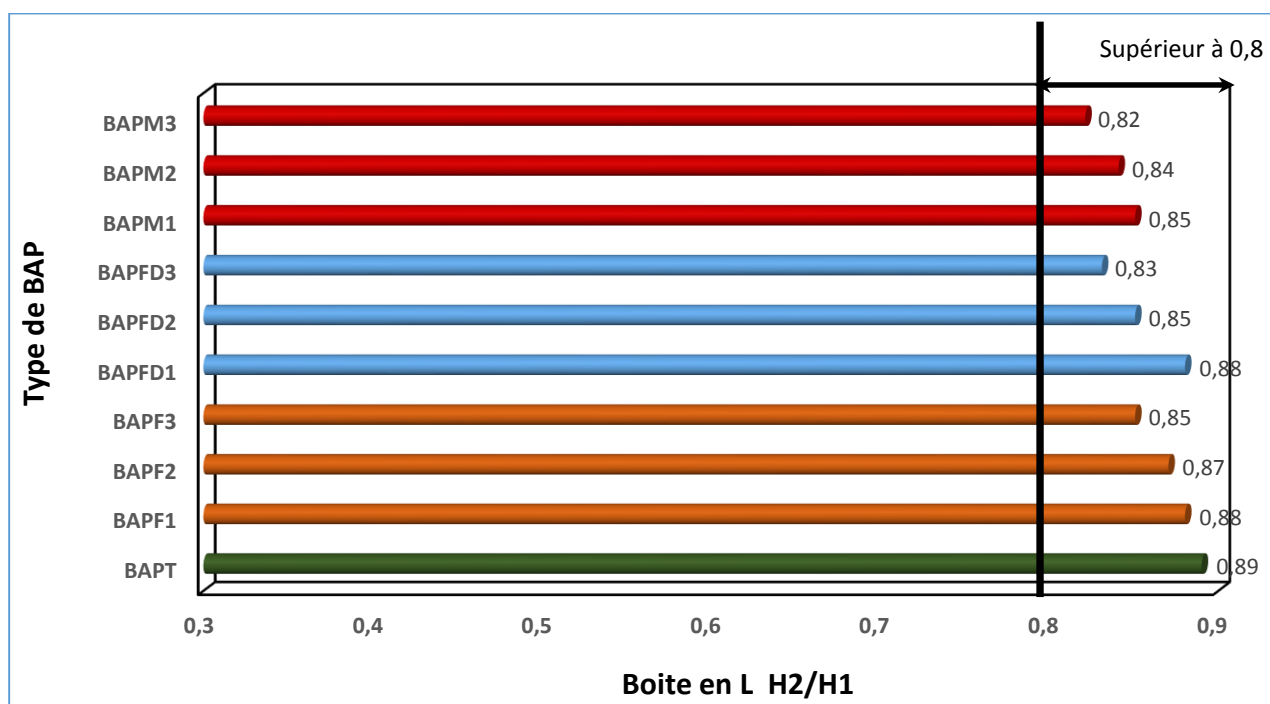


Fig.VI. 2 : Variation de la boite en L en fonction les formulations en BAP

La figure VI.2 ci-dessus présente la variation de la mesure de l'essai de la boite en L en fonction des formulations de BAP on peut constater que les bétons autoplaçants fibrés respectent le critère capacité de remplissage (supérieur 0,8) malgré la légère diminution pour BAP avec les fibres métalliques.

On remarque que l'introduction des fibres métalliques diminue l'écoulement de la Boite L.

Nous observons qu'avec l'augmentation de pourcentage de fibres, le béton autoplaçant perd ses caractéristiques rhéologiques comme la capacité de passage (essai Boite en L), pour BAPM3 une diminution de la capacité de passage (7.86 %), parce que les fibres forment avec les trois ferraille des zones de blocage.

VI .1.3. Essai de la stabilité au tamis :

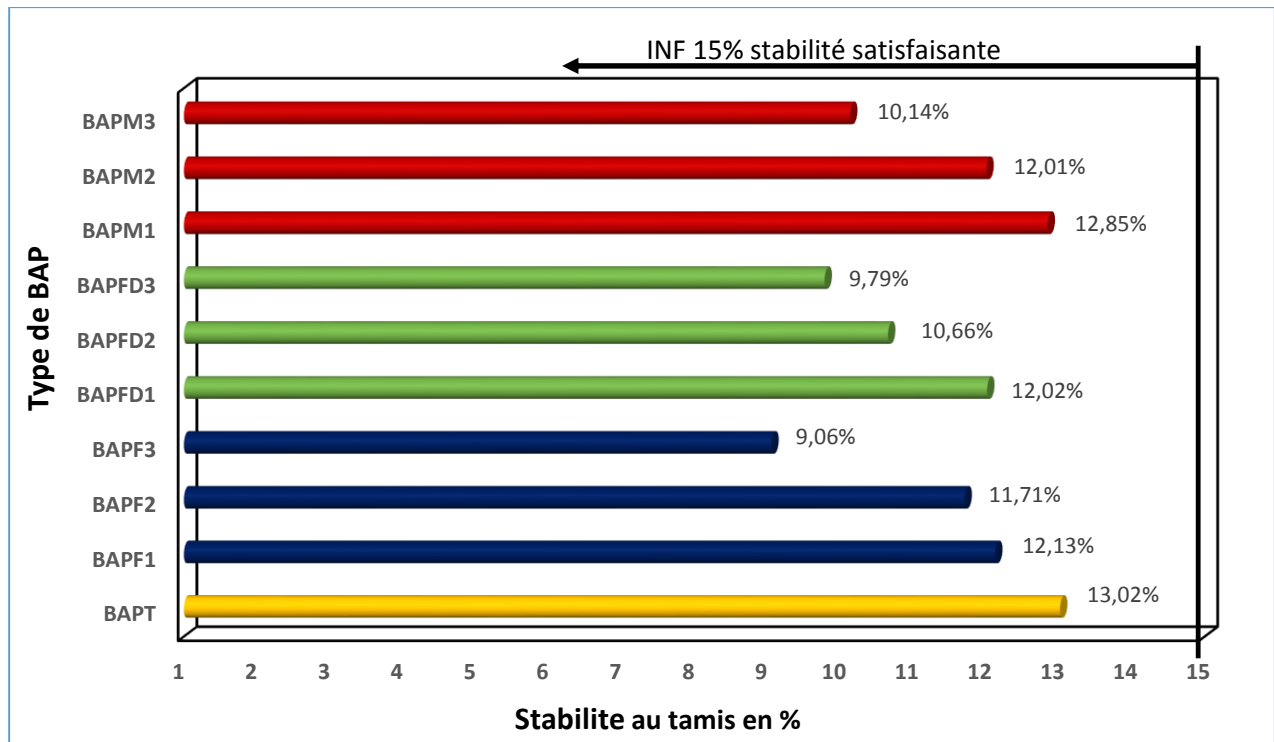


Fig.VI. 3 : Variation de la stabilité au tamis en fonction les formulations en BAP

La figure VI.3 présente les résultats des variations de la stabilité au tamis en fonction des formulations où on remarque une amélioration de la stabilité avec l'introduction des fibres métalliques.

Pour la ségrégation statique ou stabilité au tamis, les BAP présentent des taux de ségrégation inférieurs à 15%, l'augmentation des pourcentages de la fibre à un effet néfaste sur la stabilité au tamis, néanmoins le superplastifiant qui n'a pas une influence directe sur la stabilité statique.

L'introduction des fibres surtout pour les BAPF3, BAPFD3 et BAPM3 diminue la ségrégation puisque la fibre absorbe de l'eau et l'adhérence avec la matrice cimentaire diminue la laitance.

Aucun des BAP étudié ne présente un risque de ségrégation statique puisque la quantité de laitance est située à l'intérieur du domaine exigé.

L'utilisation des superplastifiants augmente la sensibilité du béton à des variations de teneur en eau vis-à-vis du problème de la ségrégation et du ressuage.

VI .1.4. La masse volumique :

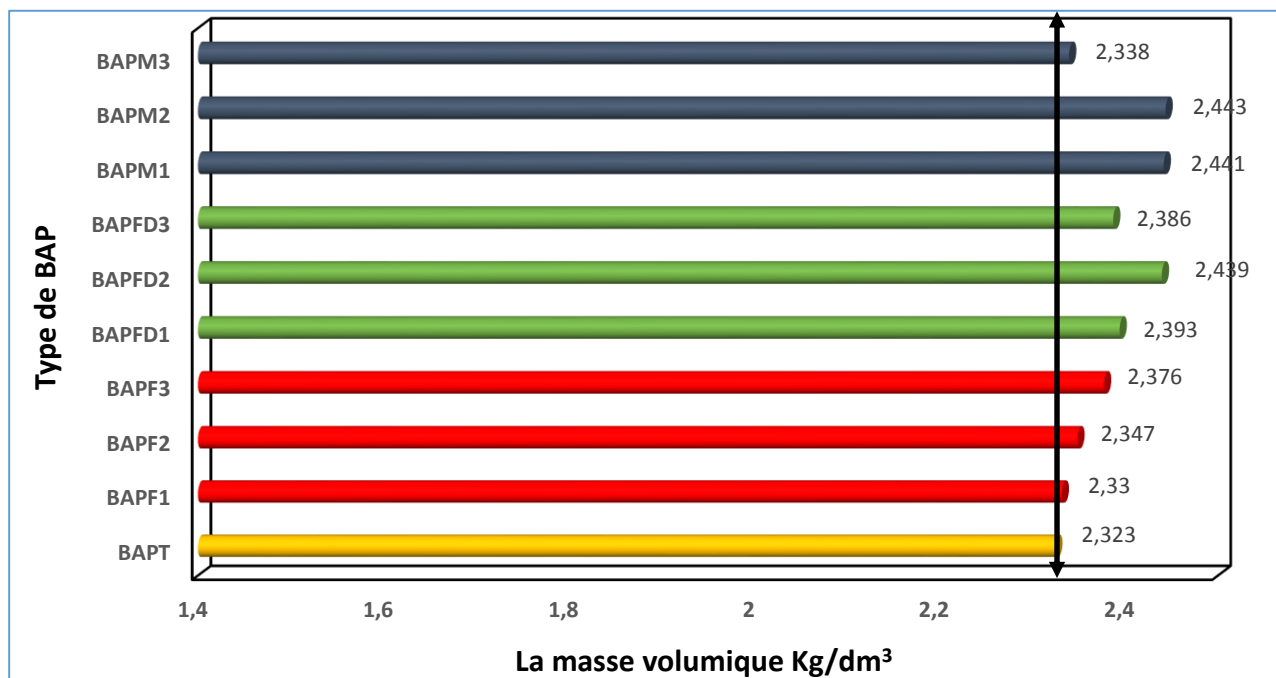


Fig.VI. 4 : Variation de la masse volumique en fonction des formulations en BAP

A partir des résultats obtenus on constate que la masse volumique des BAP fibrés est supérieure à la masse volumique du béton témoin ceci est dû à la présence des fibres.

VI.2. Influence des fibres métalliques sur le comportement mécanique et physique du BAP soumis à une température élevée :

Les essais de caractérisation des propriétés des bétons à l'état durci ont été présentés dans le chapitre précédent. Cependant, la caractérisation à l'état durci des bétons : la résistance à la compression, la résistance à la traction par flexion, module d'élasticité, perte de masse et porosité exposée de traitement thermique : 20°C, 200°C, 400°C, 600°C et l'effet de fibre métallique sur le comportement des BAP.

VI .2.1. Compression :

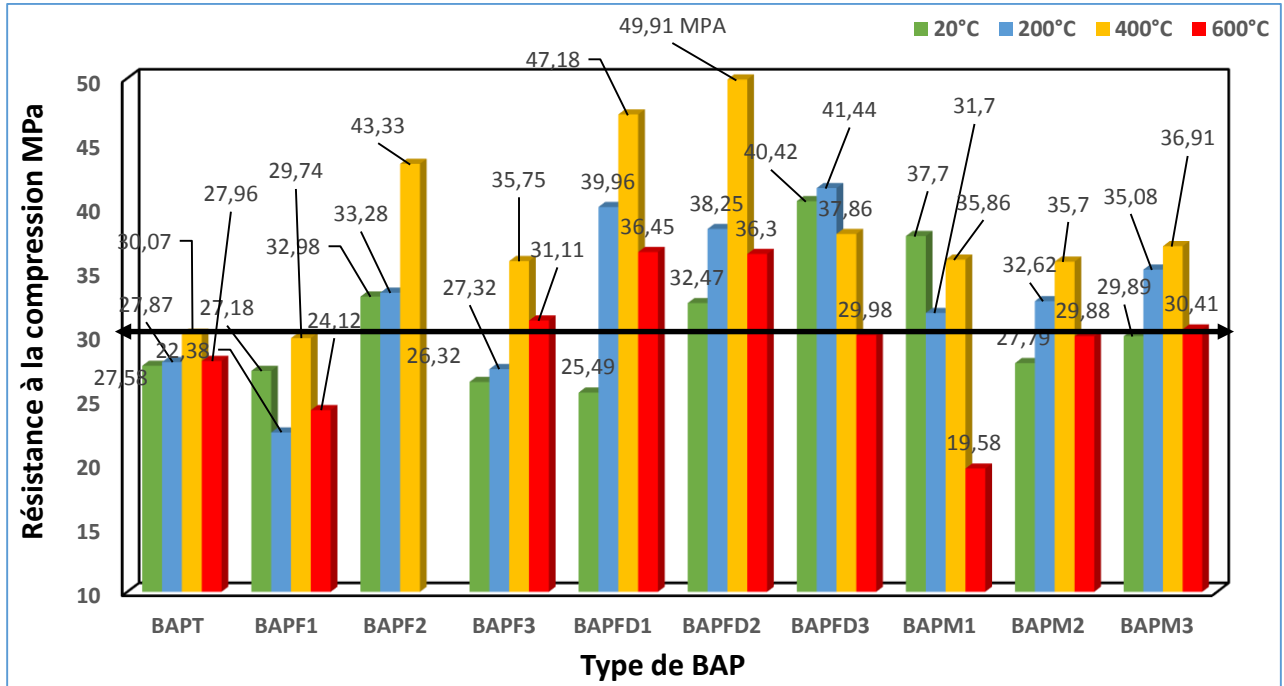


Fig.VI. 5 : Évolution de la résistance à la compression des BAP en fonction des températures

La figure.VI.5 présente l'évolution de la résistance à la compression des BAP en fonction des températures. Le comportement des BAP diffère de celui subi des variations de température.

La première observation c'est l'absence de l'écaillage dans les BAPF juste une fissuration cette absence s'explique par l'action des fibres sur la microstructure.

L'association des fibres à crochet les fibres métalliques (fil d'attache) entraîne une amélioration des résistances mécaniques par rapport au BAPT pour tous les dosages. 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 la résistance.

Entre 20°C et 200°C on observe un léger gain de résistance à la compression dans tous les BAP.

A 400°C le de gain la résistance dans tous les BAP et le BAPM3 est le meilleur de 22,75%, le BAPM2 a eu un gain de 18,72% par rapport le BAPT, on explique ceci par l'effet du taux de fibre sur la résistance à la compression.

On observe une augmentation considérable de la résistance à la température 400°C, Différentes hypothèses ont été émises dans la littérature afin d'expliquer cette augmentation. Dias et al. [83] attribuent cela à une hydratation supplémentaire de la matrice cimentaire due à la migration de l'eau déliée dans les pores.

A 600°C on observe une chute de la résistance dans tous les BAP, mais par rapport le BAPT la résistance augmente pour les BAPFD1, BAPFD2 et BAPFD3 respectivement de 30,36%, 29,82% et 7,22%. Cette chute 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 haute température.

Pour les éclatements observés ont été causé par l'absorption d'humidité.

L'effet de la fibre de FIL D'ATTACHE et un effet positive puisque la fibre dilate et remplit les vides entre les granulats et la matrice cimentaire.

Entre 500°C - 600°C : le Quartz α se transforme en quartz β dans les agrégats. Cette réaction est accompagnée d'un gonflement et provoquer un endommagement dans le béton.

VI .2.2. Tracions par flexion :

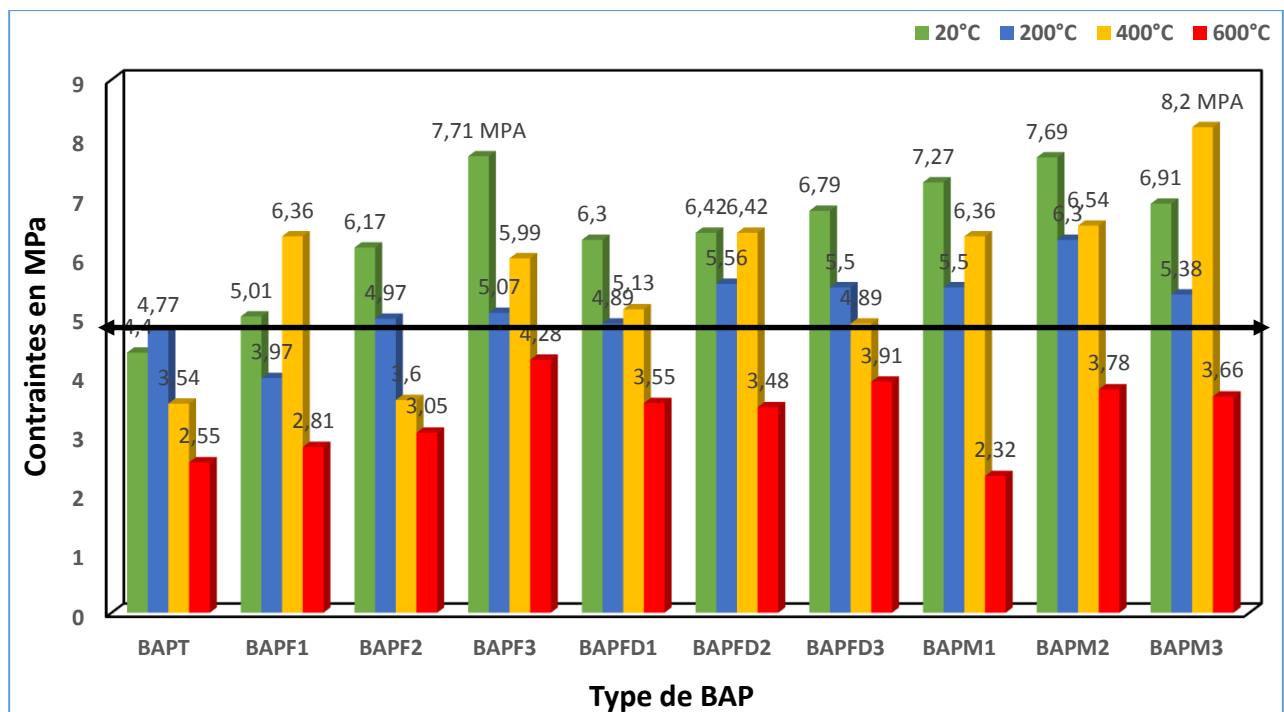


Fig.VI. 6 : Évolution de la résistance à la traction par flexion des BAP en fonction des températures

La figure.VI.6 présente l'évolution de la résistance à la traction par flexion des BAP en fonction des cycles de chauffage, on observe après la rupture de l'éprouvette prismatique de l'essai de traction par flexion à certains éprouvettes une présence de la fibre métallique dans le centre intérieur de rupture et autre fois l'absence des fibres métalliques la cause principale c'est le gain et le perd de la résistance.

Le BAPF3 présente la meilleure résistance (7,71 MPa) en traction que le BAPF2 (6,17 MPa) et BAPF1 (5,01 MPa). Les fibres métalliques sont utilisées dans le béton pour limiter la propagation de la fissuration et empêcher ou retarder l'apparition des microfissures.

La distribution et le dosage de fibre influe sur la résistance à la traction par flexion.

A la température ambiante tous les BAP fibrés subissent une augmentation de la résistance BAPFD3, BAPFD2 et BAPFD3 est respectivement 54,31%, 45,9% et 43,18% par rapport au BAPT.

L'effet de fibre métallique et le dosage des fibres est un effet positif sur le comportement mécanique de traction par flexion, mais à la température 200°C la perte de la résistance pour les BAPFD1, BAPFD2 et BAPFD3 respectivement 28,83%, 15,46% et 23,45% par rapport à la température ambiante.

L'augmentation de la résistance en flexion du BAP renforcé de fibres métalliques est beaucoup plus importante que celle à la compression. La flexion varie avec la géométrie de la fibre, son orientation et son adhérence à la matrice.

VI .2.3. Module d'élasticité :

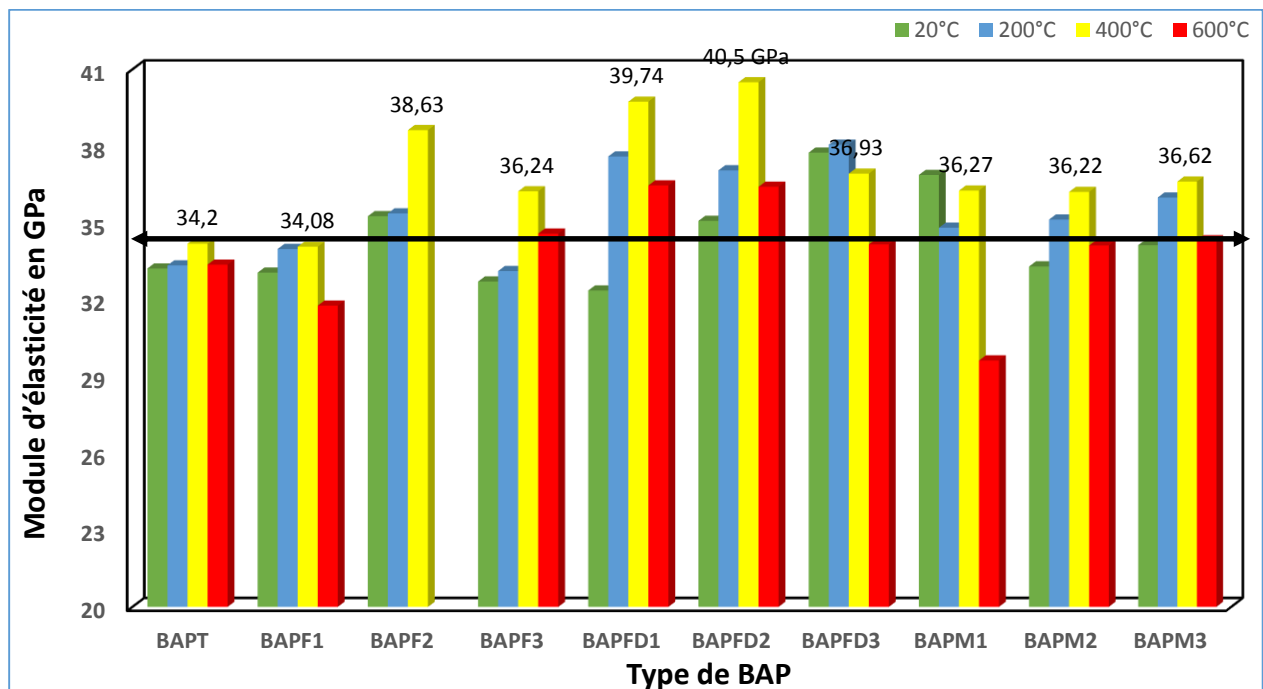


Fig.VI. 7 : Évolution de module d'élasticité des BAP en fonction des températures

Quelle 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}

VI .2.4. La porosité :

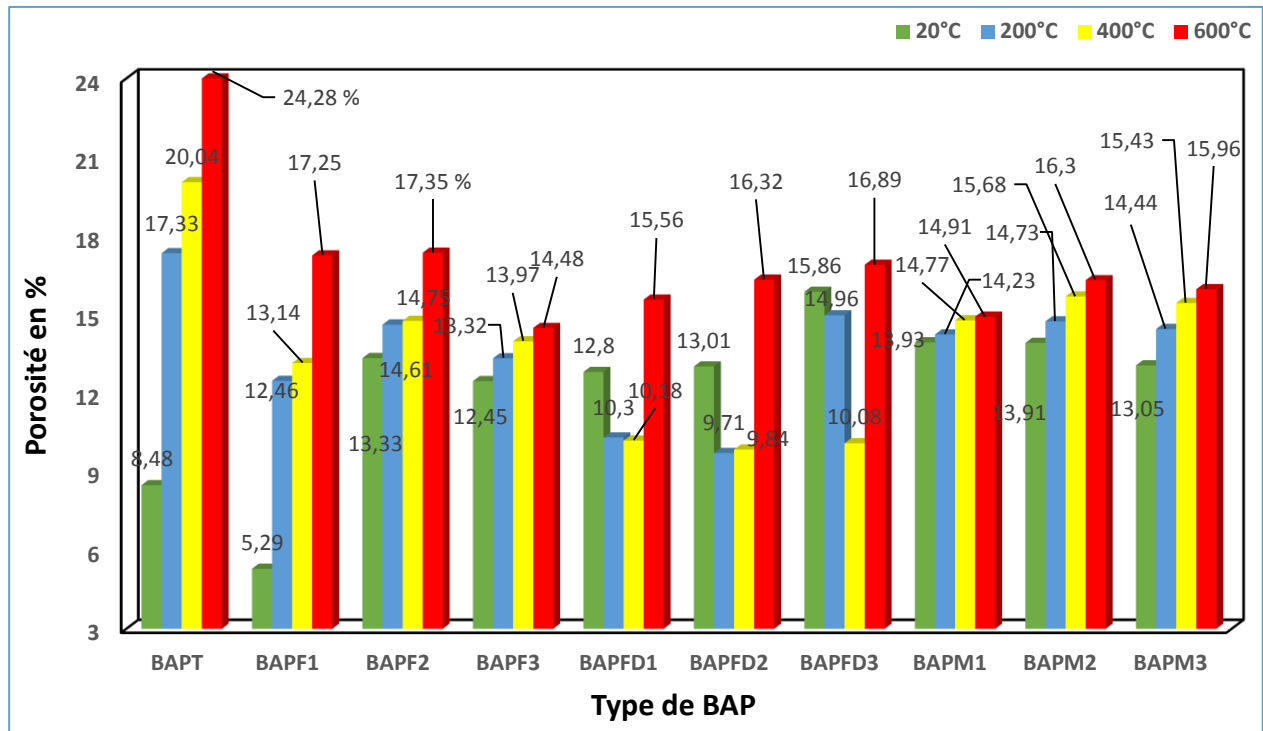


Fig.VI. 8 : Évolution de la porosité des BAP en fonction des températures

On a observé l'évolution de la porosité en cycle de chauffage thermique la grande valeur celle de BAPT à 600°C (24,28%) par rapport BAPF1 (17,25%) et BAPF2 (17,35%) alors l'incorporation de la fibre métallique dans le béton diminue la porosité.

L'augmentation de porosité est majoritairement liée à l'ouverture de microfissures engendrée par la dilatation pâte granulats.

Entre 200°C à 400°C on remarque une augmentation de la porosité des BAPT, BAPF1, BAPF2, BAPF3, BAPM1, BAPM2 et BAPM3 mais certains valeurs BAPFD1 (10,3% et 10,18%), BAPFD2 (9,71% et 9,84%) et BAPFD3 (14,96% et 10,08%) on peut expliquer la diminution de la porosité est engendrée par la dilatation le FIL D'ATTACHE qui ferme les pores entre les granulats et la pâte.

En effet le superplastifiant permettant de mieux défloculer les grains de ciment donne à priori une meilleure hydratation, donc une structure plus dense et une plus faible porosité ((Khatib and Mangat 1999), (Sakai et al. 2006), (Hamami 2009)).

Kalifa et al. [82] et Noumowé [66] attribuent l'augmentation de porosité en fonction de la température à l'augmentation du volume total du béton, au départ de l'eau liée et à la microfissuration engendrée par la dilatation différentielle entre la pâte et les granulats.

VI .2.5. La perte de masse :

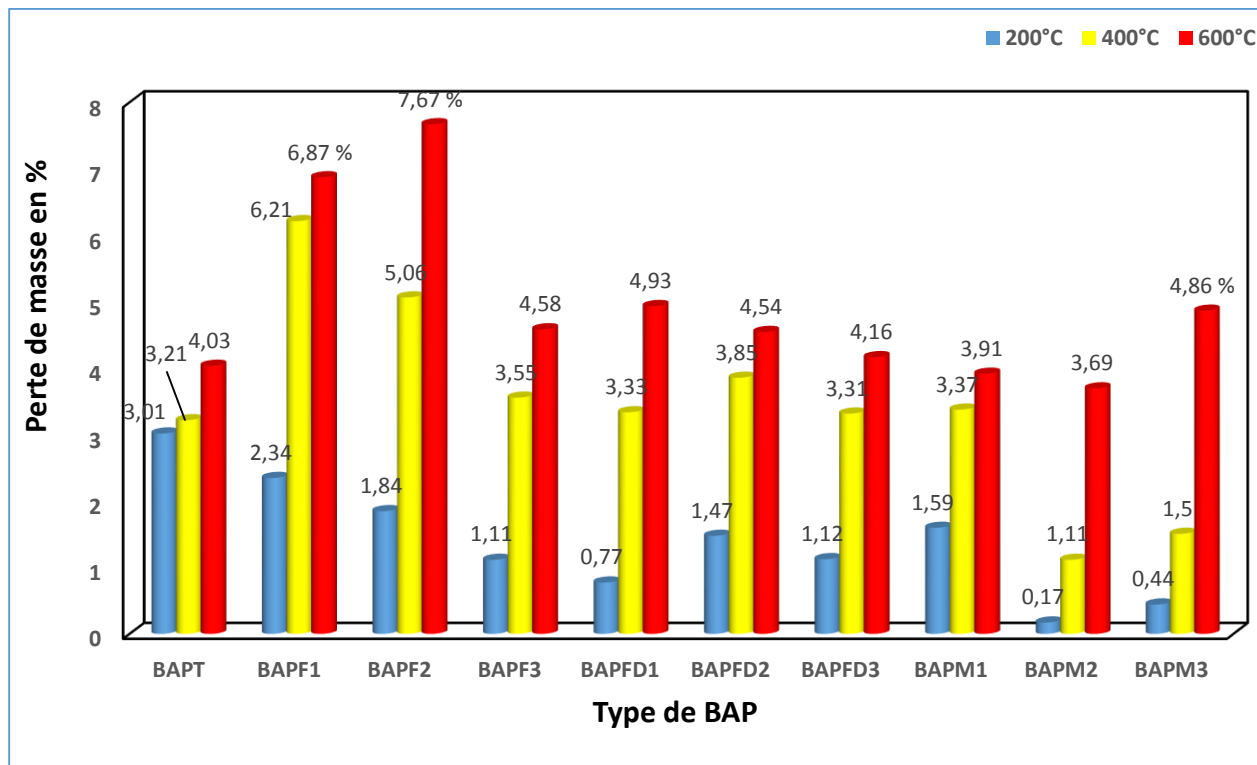


Fig.VI. 9 : Évolution de la perte de masse des BAP en fonction des températures

De la figure VI.9 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. La perte de masse sert à quantifier l'eau sortant du matériau.

Cette perte de masse est essentiellement due au départ de l'eau libre contenue dans les pores, de l'eau adsorbée à la surface des éléments solides et de l'eau liée.

A 400°C une forte perte de masse de tous les BAP, la grande valeur BAPF1 (6,21%) pour le BAPT (3,21%) mais les autres BAPM2 (1,11%) et BAM3 (1,5%) la diminution de la perte de masse engendrée par le teneur des fibres métalliques qui diminue la perte de masse par rapport BAP sans fibre.

Noumowé [66] a constaté une forte perte de masse entre 150 et 300°C, l'auteur explique ce phénomène par le départ de l'eau contenue initialement dans les hydrates CSH.

A 600°C la perte de masse est relativement faible BAPFD1, BAPFD2 et BAPFD3 sont respectivement 4,93%, 4,54% et 4,16%. Cette variation de perte de masse semble être liée à la quantité de fibres. Ce domaine correspond à la deshydroxylation de la portlandite.

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 métallique 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.

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

Quelle 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} .

L'augmentation de la porosité est majoritairement 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

L'objectif de ce travail était d'apporter de manière expérimentale un nouveau point de vue sur le comportement à haute température des bétons autoplacants renforcés par des fibres métalliques.

Les BAP (SCC) sont des bétons très fluide et homogène, les principaux avantages des BAP sont leur mise en place sans vibration, les essais mis au point pour caractériser le BAP à l'état frais concernent deux propriétés essentielles et indissociables : la fluidité et l'homogénéité.

Les fibres métalliques sont utilisées dans le béton pour limiter la propagation des fissures et produire un matériau plus ductile, trois compositions de béton ont été testées fonction des fibres utilisées (FIBERTEK A, fil d'attache et mixte 50% FIBERTEK A, 50% fil d'attache) avec trois dosages (0.3%, 0.4%, 0.5%) pour chaque composition. Afin de comparer avec un béton témoin sans fibre, les propriétés rhéologiques des BAP diminuent en fonction du dosage en fibre, d'autre part l'utilisation d'un superplastifiant a permis d'avoir d'excellentes propriétés rhéologiques de BAPF, ainsi que l'amélioration des résistances mécaniques avec un rapport $E/(C+F)$ modéré.

Nos premiers résultats expérimentaux ont montré que les propriétés mécaniques et physiques sont influencées fortement par la température.

Nous avons réalisé un traitement thermique sur les bétons il s'agissait d'un chauffage avec une montée en température de $10^{\circ}\text{C}/\text{min}$ jusqu'à 3 températures (200°C , 400°C et 600°C).

Après le traitement thermique et après refroidissement de 3 heures, les bétons ont subi des essais de compression, de traction par flexion 3 points, module d'élasticité, perte de masse et porosité à l'eau.

Entre 20°C et 200°C on trouve un léger gain de résistance à la compression de tous les BAP

À 400°C le gain de résistance dans tous les BAP et le BAPM3 est le meilleur de 22,75%, le BAPM2 a eu un gain de 18,72% par rapport au BAPT, on explique cela par l'effet de taux de fibre sur la résistance à la compression.

On observe une augmentation considérable de la résistance à la température 400°C , différentes hypothèses ont été émises dans la littérature afin d'expliquer cette augmentation. Dias et al. [38] attribuent cela à une hydratation supplémentaire de la matrice cimentaire due à la migration de l'eau déliée dans les pores.

À 600°C on observe une chute de la résistance dans tous les BAP, mais par rapport au BAPT la résistance augmente pour les BAPFD1, BAPFD2 et BAPFD3 est respectivement de 30,36%, 29,82% et 7,22%, cette chute 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 haute température.

L'effet de fibre métallique et le dosage positif sur le comportement mécanique en traction par flexion, mais à la température 200°C la perte de la résistance des BAP : BAPFD1, BAPFD2 et BAPFD3 respectivement 28,83%, 15,46% et 23,45% par rapport à la température ambiante.

L'augmentation de la résistance en flexion du BAP renforcé de fibres métalliques est beaucoup plus importante que celle en compression. La résistance en flexion varie avec la géométrie de la fibre, son orientation et son adhérence à la matrice.

Quelle 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}

L'incorporation de la fibre métallique dans le béton diminue la porosité. Avec la présence de température l'augmentation de porosité dans tous les BAP (avec et sans fibre) et minimum à la température 20°C (ambiante) et maximum à la température 600°C.

La masse du béton diminue à cause de l'évaporation de l'eau et la déshydratation progressive des hydrates de la pâte de ciment. La perte de masse sert à quantifier l'eau sortant du matériau.

La perte de masse de BAP et BAPF augmente en fonction de la température, l'utilisation des fibres diminue légèrement la perte de masse jusqu'à la température de 450°C.

Perspectives :

Nous proposons une suite à notre travail sur les points suivants :

- Des études approfondies sur la microstructure, pour expliquer le comportement des bétons.
- Utiliser d'autres types de fibres pour voir le comportement à hautes températures.

Bibliographies :

- [1] 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.
- [2] Mohamed Rissel khelifa «effet de l'attaque sulfatique externe sur la durabilité des bétons autoplaçants», thèse doctorat, université Constantine et Orleans soutenue le 20 juin 2009.
- [3] Stéphan assié« durabilité des bétons autoplaçants», thèse doctorat, l'institut national des sciences appliquées de Toulouse soutenue le 29 octobre 2004.
- [4] 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.
- [5] BENSEBTI S.E, "Formulation et propriétés des bétons autoplaçants à base de matériaux locaux", Thèse de Doctorat, Université de Constantine 2008.
- [6] ASSOCIATION FRANCAISE DE GENIE CIVIL, " Recommandations pour l'emploi des Bétons autoplaçants ",2008.
- [7] Association Française de Génie Civil, "Bétons autoplaçants - Recommandations provisoires", documents scientifiques et techniques, AFGC, juillet 2000.
- [8] TURCRY PH, "Retrait et Fissuration des Bétons Autoplaçants : Influence de la formulation", Thèse de Doctorat, Ecole Centrale de Nantes, Février 2004.
- [9] Hanaa Fares, «Propriétés mécaniques et physico-chimiques de Bétons Autoplaçants exposés à une Température élevée», Thèse de Doctorat de l'Université de Cergy-Pontoise Décembre 2009,
- [10] Okamura.H, Ozawa.K and ouchi.M, self-compacting concrete, Structural Concrete, Marsh - 2000
- [11] Abib.Z, "formulation et caractérisation des bétons autoplaçants", thèse de magister USTHB, 2004
- [12] Boukni.B, "tenue au feu des bétons autoplaçants", thèse de magister UMC, 2007.
- [13] OKAMURA H, OZAWA K, OUCHI M, "Self-compacting concrete. Structural Concrete", (1):3_17, March 2000.
- [14] 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.

- [15] 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.
- [17] Oh 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.
- [18] 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.
- [19] DE LARRARD F, HU C., and SEDRAN, T., “Best Packing and Specified Rheology: Two Key Concepts in High-Performance Concrete Mix-Design”, Adam Neville Symposium, Advances in Concrete Technology, Las Vegas, June 1995.
- [20] IGARASHI S, BENTUR A, KOVLER K, “Stresses and creep relaxation induced in restraining autogenous shrinkage of high-strength pastes and concretes”, Advances in Cement Research, 11:169_177, 1999.
- [21] IGARASHI S, BENTUR A, KOVLER K, “Autogenous shrinkage and induced restraining stresses in high-strength concretes”. Cément and Concrete Research, 30 :1701_1707, 2000.
- [22] CHANVILLARD G, “ Analyse expérimentale et modélisation micromécanique du comportement des fibres d’acier tréfilées ”, ancrées dans une matrice cimentaire. Etudes et Recherches des LPC, série Ouvrages d’art, OA12, 1993.
- [23] SEDRAN T, DE LARRARD F, « Manuel d'utilisation de RENE-LCPC », Logiciel d'optimisation granulaire, version 6.1d. LCPC, 2000.
- [24] TRUDEL A, « Maniabilité, Uniformité et Comportement Structural du Béton Autonivelant à Haute Performance », Mémoire de Maîtrise ès Sciences Appliquées, Spécialité : Génie Civil. Université de Sherbrooke, CANADA, Avril, 1996.
- [25] SEDRAN T, « Les Bétons Autonivelants (BAN) », Synthèse Bibliographique, Bull. Liaison Lobo. P et Ch. -196 -, Réf. 3889 mars-avr, 1995.
- [26] BENKECHKACHE G, « Etude de comportement diffère des bétons autoplaçants Influence des paramètres de composition et de chargement », thèse de magister, Université Mentouri Constantine, novembre 2007.
- [27] 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.
- [28] 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.
- [29] Rossi .P, Les Bétons de Fibres Métalliques, Ponts et Chaussées, Paris, 309p. . (1998)

- [30] BONAVENTTI V, DONZA H, MENINDEZ G, CABRERA. O., IRASSAR E.F., "Limestone filler cement in low w/c concrete: a rational use of energy", *Cement and Concrete Research*, 33(6): 865–71, 2003.
- [31] LIU M, "Self-compacting concrete with different levels of pulverized fuel ash", *Construction and Building Materials*, 24:1245–52, 2010.
- [32] JACER KATZER, Steel fibers and steel fibers in reinforced Concrete, *The pacific journal of science and technology*, vol 7 number 1,2006.
- [33] 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.
- [34] HARROUCHE. N ; "Formulation et comportement à la fissuration des de fibres métalliques", thèse de doctorat, Université de Pierre et Marie Curie Paris VI, 1989.
- [35] SACI. R ; "Prise en compte de l'orientation des fibres dans une poutre continue à matrice de béton", mémoire de magistère, Université Mohamed Boudiaf M'sila, 2004.
- [36] HAMEED. R ; "Apport d'un Renfort de Fibres sur les Performances des Structures en Béton Armé pour les Applications Parasismiques", thèse de doctorat, Université de Toulouse INSA, 2010.
- [37] 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.
- [38] 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 et23 Novembre 2009.
- [39] 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
- [40] Rossi. P, Tunnels et Espace Souterrain, *Revue Béton[s]*- n°218 - pp. 154-154, Avril 2010
- [41] Swamy et Mangat P.S, Inuence of Fibre-aggregate interaction on some properties of steel-fibre reinforced Concrete. *Materials and Structures*, 7(41):307-314, 1974.
- [42] Grünewald, S: Performance-based design of self-compacting Fibre reinforced Concrete. Thèse de Doctorat, Delft University of Technology, Pays-Bas, 2004
- [43] Koiman A.G: Modelling steel -ber reinforced concrete for Structural design. Thèse de Doctorat, Delft University of Technology, Pays-Bas, 2000.
- [44] Markovic, I: High-performance Hybrid-Fibre Concrete: development and utilisation. Thèse de Doctorat, Delft University of Technology, Pays-Bas, 2006

- [45] Bui, V. K. Geiker M.R. et Shah S, P.: Rheology of fiber-reinforced Cementitious Materials. Michigan, 4th Conference on High Performance Fiber Reinforced Cement Composites (Hpfrc4), Rilem publications. 2003
- [46] YADEGARAN I, MAHOUTIAN M., SHEKARCHI M, LIBRE N A. (2007) “Effect of Polypropylene Fibers on Shrinkage of Self-Compacting Concrete”, 5th International RILEM Symposium on SCC, Ghent, Belgium vol. 2, p. 707-713.
- [47] DREUX J, FESTA, J. (Mai, 2002) « Nouveau Guide du Béton et de ses Constituants », 8^e édition, Eyrolles, Paris, France.
- [48] SAHMARAN M, YURTSEVEN A, YAMAN I.-O. (Dec. 2005) “Workability of Hybrid Fiber Reinforced Self-Compacting Concrete”, Building and Environment Journal, vol. 40, n° 12, p. 1672–1677.
- [49] BANTHIA N, DUBEY A (2000a) “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.
- [50] ZHANG M H, CHEVRIER R L, MALHOTRA V M, MIRZA J (1997.) “ 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.
- [51] AHMAD S H, SHAH S.P (Nov 1982) “Stress-Strain Curves of Concrete Confined by Spiral Reinforcement”, ACI Journal, vol. 79, n° 6, p. 484-490.
- [52] BALAGURU P N, SHAH S P (1992) “Fiber Reinforced Cement Composites”, McGraw-Hill, Inc., 530 p.
- [53] LUO X, SUN W, CHAN S Y N (Apr. 2001) “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.
- [54] 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.
- [55] 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.
- [56] 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.

- [57] DING Y, LIU S, ZHANG Y, THOMAS A, “The investigation on the workability of fiber cocktail reinforced self-compacting high performance concrete”. *Construction and Building Materials*. No.22 (2008) 1462-1470.
- [58] 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.
- [59] 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.
- [60] TABET N. BENMOUNAH A. « 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). Thèse Magister, Université de Boumerdès, Faculté des sciences de l'ingénieur, Département génie des matériaux, 2012.
- [61] GRÜNEWALD, S. (2004) Performance-Based Design of Self-Compacting Fiber Reinforced Concrete, Ph. D. thesis, Delft University of Technology, Netherlands, 165 p.
- [62] KASSIMI, F. (Sep. 2008) Optimisation and Mechanical and Structural Performance of Fiber-Reinforced Self-Consolidating Concrete, M.Sc.A memory (in French), Université de Sherbrooke, Québec, Canada, 205 p.
- [63] CHANVILLARD G, “ Analyse expérimentale et modélisation micromécanique du comportement des fibres d'acier tréfilées ”, ancrées dans une matrice cimentaire. *Etudes et Recherches des LPC, série Ouvrages d'art, OA12*, 1993.
- [64] Alonso, C. and L. Fernandez. 2004. “Dehydration and Rehydration Processes of Cement Paste Exposed to High Temperature Environments.” *Journal of Materials Science* 39:3015–24.
- [65] Alarcon-Ruiz, L., G. Platret, E. Massieu, and A. Ehrlicher. 2005. “The Use of Thermal Analysis in Assessing the Effect of Temperature on a Cement Paste.” *Cement and Concrete Research* 35 :609–13.
- [66] Noumowé, A. 1995. “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
- [67] Schneider, U., U. Diederichs, and C. Ehm. 1982. “Effect of Temperature on Steel and Concrete for PCRV's.” *Nuclear Engineering and Design* 67 :245–58.
- [68] Nguyen, VT. 2013. “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.
- [69] Laneyrie, C. 2014. “Valorisation Des Déchets de Chantiers Du BTP : Comportement à Haute Température Des Bétons de Granulats Recyclés.” Thèse de doctorat, Université de Cergy

Pontoise. De Larrard, F. 2002. *Construire En Béton : L'essentiel Sur Les Matériaux*. Ecole nationale des ponts et chaussées.

[70] Menou, A. 2004. "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.

[71] Piasta, J. 1989. "Heat Deformation of Cement Phases and Microstructure of Cement Paste, Materials and Structures: Research and Testing." RILEM 17:415–20.

[72] Al Nahhas, F. 2004. "Comportement Thermo-Mécanique Des Murs En Maçonnerie de Blocks Creux En Béton Sous L'action D'un Feu Conventionnel." Thèse de doctorat, Université de Marne-La-Vallée.

[73] Hager, I. 2004. "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.

[74] Tsimbrovska, M. 1997. "Dégradation Des Bétons à Hautes Performances Soumis à Des Température élevées." Thèse de doctorat, Université de Grenoble 1.

[75] Khoury, G. A. 1992. "Compressive Strength of Concrete at High Temperatures: A Reassessment." Magazine of Concrete Research (161):291–309.

[76] Pliya, P. 2010. "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.

[77] Hager, I. and P. Pimienta. 2004. Mechanical Properties of HPC at High Temperature. Fib Task Group 4.3 "Fire Design of Concrete Structures." Milan, Italy.

[78] Kanema, T. M. 2007. "Influence Des Paramètres de Formulation Sur Le Comportement à Haute Température Des Bétons." Thèse de doctorat, Université de Cergy Pontoise.

[79] Lau, A. and M. Anson. 2006. "Effect of High Temperatures on High Performance Steel Fibre Reinforced Concrete." Cement and Concrete Research 36(9):1698–1707.

[80] Xing, Z. 2011. "Influence de La Nature Minéralogique Des Granulats Sur Leur Comportement et Celui Du Béton à Haute Température." Thèse de doctorat, Université de Cergy Pontoise.

[81] BENSEBTI S.E, "Formulation et propriétés des bétons autoplaçants à base de matériaux locaux", Thèse de doctorat, université de Constantine 2008.

[82] P. Kalifa and M. Tsimbrovska. Comportement des bhp a` hautes températures Etat de la question et résultats expérimentaux. Cahier du CSTB, no 3078, 1998.

[83] WPS. Dias, GA. Khoury and PJE. Sullivan. Mechanical properties of hardened cement paste exposed to temperatures up to 700 °c. ACI Material Journal, no87:160–166, 1990.

Résumé :

Les bétons autoplaçants (BAP) sont des bétons très fluides dont la mise en place sans vibration présente plusieurs avantages tant au niveau environnemental, humain, technologique qu'économique qui intéressent de plus en plus les industriels.

Les dégradations des éléments structuraux soumis à des conditions accidentelles telles que les incendies dans les tunnels, le béton et influencé fortement par ces incendies.

La fibre métallique est ajoutée au béton pour améliorer ses propriétés mécaniques.

Le but de ce travail de recherche est d'étudier l'effet de fibre métallique sur le comportement physique et mécanique du BAP soumis à température élevée.

Pour cela des éprouvettes cubique et prismatique ont subi un traitement thermique d'un chauffage à 10°C/min. après le traitement thermique et après refroidissement de 3 heures, les éprouvettes de béton ont subi des essais de compression, de traction par flexion 3 points, mesure de la perte de masse et l'essai de porosité à l'eau.

A travers cette étude les BAP avec fibre métallique présentent une meilleure résistance mécanique à la compression et à la flexion que le BAP sans fibre.

En revanche l'incorporation de la fibre métallique dans le béton diminue la porosité, et diminue la perte de masse de béton engendrée par l'évaporation de l'eau et la déshydratation progressive des hydrates de la pâte de ciment.

Mots clés : béton autoplaçant, fibres métalliques, propriétés rhéologiques, propriétés mécaniques.

Abstract :

Self-placing concretes (BAP) are very fluid concretes, the vibration-free installation of which has several environmental, human, technological and economic advantages that are increasingly of interest to industrialists.

Damage to structural elements subjected to accidental conditions such as fire in tunnels, concrete and heavily influenced by these fires.

The metal fiber is added to the concrete to improve its mechanical properties.

The aim of this research is to study the effect of metallic fibers on the physical and mechanical behavior of BAP subjected to high temperature.

For this purpose, cubic and prismatic specimens have undergone a heat treatment of a heating at 10 ° C. /min. After the heat treatment and after cooling for 3 hours, the concrete specimens were subjected to compression tests, 3-point bending tests, mass loss measurement and water porosity test.

Through this study, BAPs with metallic fibers have better mechanical resistance to compression and bending than BAP without fiber.

On the other hand, the incorporation of the metallic fiber in the concrete reduces the porosity and reduces the loss of concrete mass caused by the evaporation of the water and the progressive dehydration of the hydrates of the cement paste.

Key words: self - compacting concrete, metallic fibers, rheological properties, mechanical properties.

ملخص:

الخرسانة ذاتية القولبة (SCC) هي خرسانة سائلة جدا تتموضع بدون اهتزاز ولديها العديد من المزايا البيئية والبشرية والتكنولوجية والمصالح الاقتصادية الصناعية على نحو متزايد.

تدهور العناصر الهيكلية عند التعرض للحوادث مثل الحرائق في الأنفاق والتي تتأثر بشدة من جراء هذه الحرائق.

والغرض من هذا البحث هو دراسة تأثير الألياف المعدنية على السلوك المادي والميكانيكي للخرسانة ذاتية القولبة (SCC) عند التعرض لدرجة حرارة مرتفعة. وتضاف الألياف المعدنية الملموسة لتحسين خواصه الميكانيكية.

تطبق على هذه العينات المكعبة والمنشورية معالجة حرارية عن طريق التسخين ب 10 ° C / دقيقة. بعد المعالجة الحرارية والتبريد بعد 3 ساعات، يتم إخضاع عينات الخرسانة لاختبارات الضغط والانحناء، وقياس فقدان كتلة واختبار المسامية المياه.

من خلال هذه الدراسة للخرسانة ذاتية القولبة مع الألياف المعدنية نستنتج أن لديها مقاومة ميكانيكية أفضل للضغط والانحناء من الخرسانة ذاتية القولبة دون الألياف.

في المقابل إدماج الألياف المعدنية في الخرسانة يقلل المسامية ويقلل من فقدان كتلة الخرسانة سببها تبخر المياه والجفاف التدريجي لعجينة الأسمنت.

كلمات مفتاحية: الخرسانة ذاتية القولبة والألياف المعدنية، وخصائص الانسيابية، الخواص الميكانيكية. الخصائص الريولوجية.