

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Mohamed Khider –Biskra
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie civil et d'Hydraulique
Référence : 2019/2020



جامعة محمد خيضر بسكرة
كلية العلوم والتكنولوجيا
قسم الهندسة المدنية والري
المرجع 2020/2019

Mémoire de Master

Filière : Génie Civil

Spécialité : Matériaux en génie civil

Thème

**Etude de l'influence des fibres métalliques sur le
comportement du béton de poudre réactive soumis à
des températures élevées**

Nom et Prénom de l'étudiant :
KHINECHE MADIHA

Encadreur :
Mme. CHADLI MOUNIRA

Année universitaire : 2019 - 2020



REMERCIEMENTS

Au début, je remercie **ALLAH** qui m'a donné la force et la patience tout au long de la période d'étude.

Je remercie vivement **Mme CHADLI MOUNIRA** mon encadreuse pour avoir accepté d'encadrer ce travail, pour sa confiance, ses encouragements et précieux conseils au cours de la réalisation de ce mémoire.

J'exprime mes vifs remerciements aux membres de jury pour l'honneur qu'il me faisait en participant à ce jury et de bien vouloir juger ce travail.

Je tiens aussi à remercier le chef de département du génie civil **Mr ISSAM ABDESSALAM** et tous les enseignants de département de Génie Civil et d'Hydraulique de l'Université de Biskra.

Enfin, je tiens à remercier sincèrement le responsable du laboratoire de génie civil et tous mes amis et collègues pour leurs aides pendant la durée de mes travaux.

DEDICACE



Je dédie ce modeste travail à:

Ceux qui se sont donné toutes les peines et les sacrifices, Pour me voir
réussir dans la vie Les deux personnes les plus chères à mon cœur,
mon père et ma mère.

A Mes chers frères Oussama, Akram, Haithem et Iyad et ma sœur
Hizia.

A mon grand-père et ma grand-mère qui les ont perdus cette année que
dieu ait pitié d'eux.

A mes très chers amis.

A ma copine au travail Ilham.

A tous ceux qui m'aiment et qui m'ont soutenue tout au long de mon
cursus.

Résumé

Cette étude visait à étudier les propriétés physico-mécaniques du béton de poudre réactive (BPR) à base des ajouts riches en silice (sable broyé (quartz) et le poudre de marbre) et renforcé de fibres d'acier (2% en vol.) Lorsqu'il est exposé à des températures élevées. La résistance à la compression, à la flexion, la perte de masse et la porosité ont été évalués après exposition des échantillons à différentes températures élevées allant de 200° C, 500 à 800 ° C. Les propriétés mécaniques du BPR ont été évaluées pour des échantillons séchés pendant 24 heures à 65°C. En général, les propriétés mécaniques du BPR ont considérablement diminué avec l'augmentation de l'exposition à la température. Le taux de diminution avec la température des résistances à la compression, à la flexion, étaient plus élevés pour des températures d'exposition supérieures à 500 °C. De plus, Les résultats des tests ont indiqué que le poids de l'échantillon était considérablement réduit avec une augmentation de la température. Cette réduction était très nette au-delà de 500 ° C. L'ajout des fibres métalliques dans le béton entraîne d'une façon générale une amélioration des propriétés mécaniques à la température 200°C jusqu'au 500°C.

Mots-clés: Béton de poudre réactive (BPR), Fibres métalliques, Haute température, Poudre de marbre, Propriétés physico-mécaniques.

Abstract

This study aimed to study the physico-mechanical properties of reactive powder concrete (RPC) based on additions rich in silica (crushed sand (quartz) and marble powder) and reinforced with steel fibers (2% by vol.) When exposed to high temperatures. Compressive strength, flexural strength, mass loss and porosity were evaluated after exposing the samples to various high temperatures ranging from 200 ° C, 500 to 800 ° C. The mechanical properties of RPC were evaluated for samples dried for 24 hours at 65°C. In general, the mechanical properties of RPC decreased considerably with increasing exposure to temperature. The rate of decrease with temperature of compressive and flexural strengths was greater for exposure temperatures above 500 °C. In addition, the test results indicated that the weight of the sample was significantly reduced with increasing temperature. This reduction was very clear above 500 ° C. The addition of metal fibers in concrete generally results in an improvement in mechanical properties from 200 ° C up to 500 ° C.

Keywords: Reactive powder concrete (RPC), Metallic fibers, High temperature, Marble powder, Physico-mechanical properties.

ملخص:

تهدف هذه الدراسة إلى دراسة الخصائص الفيزيائية الميكانيكية للخرسانة المسحوق المتفاعل (BPR) بالاعتماد على الإضافات الغنية بالسيليكا (الرمال المسحوق (الكوارتز) ومسحوق الرخام) والمدعومة بألياف الصلب (2% بالحجم). عند التعرض لدرجات حرارة عالية. تم تقييم مقاومة الانضغاط وقوة الانحناء وفقدان الكتلة والمسامية بعد تعريض العينات لدرجات حرارة عالية مختلفة تتراوح من 200 درجة مئوية ، 500 إلى 800 درجة مئوية. تم تقييم الخواص الميكانيكية لـ BPR للعينات المجففة لمدة 24 ساعة عند 65 درجة مئوية. بشكل عام ، انخفضت الخصائص الميكانيكية لـ BPR بشكل كبير مع زيادة التعرض لدرجة الحرارة. كان معدل الانخفاض مع درجة حرارة مقاومة الانضغاط والانحناء أعلى في درجات حرارة التعرض فوق 500 درجة مئوية. بالإضافة إلى ذلك ، أشارت نتائج الاختبار إلى انخفاض وزن العينة بشكل كبير مع زيادة درجة الحرارة. كان هذا التخفيض واضحًا جدًا فوق 500 درجة مئوية. تؤدي إضافة الألياف المعدنية في الخرسانة عمومًا إلى تحسين الخواص الميكانيكية من 200 درجة مئوية إلى 500 درجة مئوية.

الكلمات المفتاحية: الخرسانة المسحوق المتفاعل (BPR)، الألياف المعدنية ، درجات الحرارة العالية ، مسحوق الرخام ، الخواص الفيزيائية الميكانيكية.

Table des matières

Remerciements	i
Dédicace	i
Résumé	ii
Abstract	iii
الملخص	iv
Table des matières	v
Liste des figures	x
Liste des tableaux	xv
Liste des abréviations	xvii
Introduction générale	1
Chapitre I : Généralités sur le béton à poudre réactive	
I.1.Introduction	6
I.2. Historique sur les bétons	6
I.3.Définition	8
I.4.Les constituants du BPR	8
I.4.1.Le ciment	8
I.4.2. Les Granulats	8
I.4.3. les additions	9
I.4.4.les adjuvants	12
I.4.5.Les fibres	13
I.4.6.Rapport Eau/Liant	13
I.5.Propriétés des BPR	13
I.5.1. Propriétés rhéologiques	13
I.5.2 Propriétés mécaniques des BPR	14

I.5.2.1. Résistance en compression et module d'élasticité	14
I.5.2.2. Résistance à la traction	15
I.5.2.3. Résistance à la flexion	15
I.6. La durabilité	16
I.6.1. Porosité	16
I.6.2. Perméabilité, Résistance au gel-dégel et Abrasion	17
I.6.3. Résistance à la corrosion	17
I.6.4. La résistance aux agents agressifs	18
I.6.5. Résistance au feu	18
I.7. Principe de formulation	18
I.7.1. introduction	18
I.7.2. Méthode proposé par BONNEAU	18
I.7.3. Méthode empirique de formulation	20
I.7.4 En laboratoire	21
I.7. 4.1. Exemple de formulation	21
I.8. domaine d'application des BPR	21
I.9. Les avantage de BPR	22
I.10. Les inconvénients du BPR	23
I.11. Conclusions	23

Chapitre II : Généralités sur les fibres

II.1. Introduction	25
II.2. Définition de la fibre	25
II.3. Définition d'un béton de fibre	25
II.4. Critère de choix du type des fibres	25
II.5. Les différentes nature des fibres	26
II.6. Différents types de fibre	27

II.7. Les caractéristiques et les propriétés des fibres	30
II.8.Rôles des fibres dans le béton	30
II.9.Domains d'application des fibres	31
II.10. Les avantages et les inconvénients des fibres	32
II.11. Facteurs influant sur le comportement d'un béton renforcé de fibres	33
II.11.1.Nature des fibres	33
II.11.2.Distribution des fibres et leur orientation	33
II.11.3.Forme et Longueur et de la fibre	34
II.11.4. Dosage en fibre	35
II.12. Le comportement de BFM à l'état Frais	36
II.13. Comportements des BFM à l'état durci	37
II.13.1. Comportement en compression	37
II.13.2.Comportement en Traction	39
II.13.3 .Comportement en flexion	39
II.13.4. Module de Young	40
II.14.Conclusion	41
Chapitre III : Comportement de béton soumis à haute température	
III.1. Introduction	43
III.2. Evolution des propriétés physiques du béton	43
III.2.1. Dégradation de l'interface pâte-granulats	43
III.2.2. Transformations physico-chimiques de la pâte de ciment durcie	43
III.2.3. Evolution de la porosité	44
III.2.4 .Evolution de la masse volumique	45
II.2.5.Perte de masse	45
III.2.6. Evolution de la perméabilité	46
III.3.Evolution des propriétés mécaniques avec la température	46

III.3.1. Résistance en compression à haute température	46
III.3.2. Résistance en traction à haute température	47
III.3.3. Module d'élasticité	48
III.4. Evolution des propriétés thermiques du béton avec la température	49
III.4.1. La conductivité thermique	49
III.4.2. Chaleur spécifique	50
III.5. Mécanisme du phénomène d'écaillage et de l'éclatement du béton chauffé	50
III.6. Paramètres favorisant l'instabilité thermique	51
III.7. Déformation thermique du béton à hautes températures	52
III.7.1. Différentes formes d'endommagement thermique	52
III.7.2. Déformation thermique des granulats	53
III.8. Conclusion	54

Chapitre IV : Matériaux et Technique expérimentales

IV.1. Introduction	56
IV.2. Ciment	56
IV.2.1. Descriptions du produit NA442- CEM I 52,5 R	56
IV.2.2. Caractéristiques du ciment NA442- CEM I 52,5 R	57
IV.3. Sable d'oued LIWA	58
IV.3.1. Origine de sable	58
IV.3.2. Caractéristiques physiques des sables utilisés	58
IV.3.2.1. Masse volumique (absolue)	58
IV.3.2.2. Masse volumique apparente	59
IV.3.2.3. Porosité	59
IV.3.2.4. Compacité	60
IV.3.2.5. L'indice des vides	60
IV.3.2.6. Teneur en eau	60

Table des matières

IV.3.2.7. Degré d'absorption d'eau	61
IV.3.2.8. Equivalent de sable	61
IV.3.2.9. Analyse granulométrique	63
IV.3.2.10 : Le module de finesse	65
IV.4.les additions	66
IV.4.1.Poudre de marbre	66
IV.4.2.Le quartz broyé	66
IV.4.3.Les fibres	68
IV.4.4.L'adjuvantes	68
IV.4.5.L'eau de gâchage	69
IV.5.Techniques expérimentales	70
IV.5.1.Formulation de BPRF	70
IV.5.2.Choix de l'éprouvette	70
IV.5.3.Préparation Des Eprouvettes	71
IV.5.4.Malaxage de BPRF	71
IV.5.5.Confection des éprouvettes	71
IV.5.6.Conservation des éprouvettes	72
IV.6.Essais sur béton	72
IV.6.1.Essai de chauffage	72
IV.6.2.Perte de masse	72
IV.6.3.porosité accessible à l'eau	73
IV.6.4. Essai de traction par flexion (3 points)	74
IV.6.5.Essai de compression	74
IV.7.Conclusion	75

Chapitre V : Analyse des résultats et discussions

V .1.Introduction	77
V .2.Caractéristiques instantanées à l'état durci	77
V.2.1 L'effet de hautes températures sur les propriétés physiques et mécaniques	77
V.2.1.1 : La perte de masse	78
V.2.1.2 : La résistance de compression	79
V.2.1.3 .La résistance de traction par flexion (3point)	80
V.2.1.4.Porosité à l'eau	81
V.3.Observations de l'endommagement des bétons soumis à haute température	82
V .4.Conclusion	83
Conclusion générale	85
Référence Bibliographique	88
Annexe	96

Liste des figures

Chapitre I : Généralités sur le béton à poudre réactive

Figure I.1 : Passerelle de Sherbrooke, Canada. [Malik, 2007]	7
Figure I.2 : Evolution des bétons depuis les années 1960 [Cherkaoui, 2010]	7
Figure I.3 : Différents ajouts cimentaires.[Dehbi et Chaïbet, 2019]	10
Figure I.4 : l'action «réduction d'eau» ou «l'effet fluidification». [Dakhmouche, 2009]	12
Figure I.5 : Courbe contrainte-déformation du BPR200 en compression. [Dugat et al, 1995]	15
Figure I.6 : Courbe contrainte-déformation du BPR550 en compression.[Dugat et al, 1995]	15
Figure I.7 : Courbe contrainte de traction - ouverture de fissure de béton, à 7 % en volume de fibres métalliques. [Tafraoui, 2009]	16
Figure I.8 : différent éléments structurels en BPR. [Malik, 2007]	22

Chapitre II : Généralités sur les fibres

Figure II.1 : nature de fibre. [Chafi, 2005]	27
Figure II.2 : la représentation de la fibre de cellulose. [Belghanem et Dib, 2017]	27
Figure II.3 : Fibre de verre. [Chouiter, 2016]	28
Figure II.4 : Les fibres de polypropylènes. [Djelouahi, 2017]	29
Figure II.5 : Géométrie des fibres métalliques [Azizi et Aïssou, 2016]	29
Figure II.6 : Différentes forme de fibres.[Azizi et Aïssou, 2016]	29
Figure II.7 : Illustration de l'apport du renfort par des fibres. [Fritih, 2009]	31
Figure II.8 : Différents facteurs influant sur le comportement mécanique d'un béton renforcé de fibres. [Meddah, 2014]	33
Figure II.9 : Influence de la direction du carottage sur le comportement en traction d'un béton fibré [Casanova, 1996].	34
Figure II.10 : Effet de la taille des granulats sur la distribution de fibres. [Fritih, 2009]	36
Figure II.11 : Corrélations exponentielles entre le temps V_e - B_e et la teneur en fibres des bétons avec différents rapports d'aspect des fibres. [Antonio, 2015]	37
Figure II.12 : Courbes " contrainte-déformation" en compression. [Chafi, 2005]	37

Figure II.13 : Évolution du gain de résistance compression du béton renforcé de fibres. [Setti et al, 2012]	38
Figure II.14 : Courbes charge-flèche des bétons testés. [Boulekbache, 2013]	38
Figure II. 15 : Comportements en traction directe en fonction du pourcentage en fibres [Meddah, 2014]	39
Figure II.16 : Résistance à la flexion du béton renforcé de fibres en fonction du temps. [Setti F. 1, Ezziane K. 1, Setti B.]	40
Figure II.17 : Exemple de diagramme contrainte - déformation en compression (E0 module de Young). [Meddahi et al, 2016]	40
Figure II.18 : Évolution de la résistance en compression et du module de Young expérimental en fonction de la teneur en fibre [Djebali, 2013].	41
Chapitre III : Comportement de béton soumis à haute température	
Figure III.1 : Porosité totale à l'eau en fonction de la température de conditionnement. [Kaouane, 2011]	44
Figure III.2 : Variations de la masse volumique de différents types de bétons en fonction de la température. [Kaouane, 2011]	45
Figure III.3 : Perte de masse durant l'échauffement et vitesse de perte de masse en fonction de la température. [Gharbi et Fali, 2019]	45
Figure III.4 : Evolution de la perméabilité intrinsèque résiduelle des bétons en fonction de la température. [Hachemi, 2015]	46
Figure III.5 : Évolution de la résistance résiduelle relative à la compression des BO et BHP [Van Thai Nguyen, 2013]	47
Figure III.6 : Evolution de la résistance résiduelle relative à la traction avec la température. [Kessal, 2017]	48
Figure III.7 : Rapport du module d'élasticité à chaud et à froid sur le module initial en fonction de la température [Belouadah, 2018]	49
Figure III.8 : Evolution de la conductivité thermique en fonction de la température selon les normes (EUROCODE4). [Kaouane, 2011]	49
Figure III.9 : Influence des types de granulats sur la chaleur massique de béton [Rahmani, 2019]	50
Figure III.10 : Illustration du mécanisme d'éclatement [Allal, 2015]	51

Figure III.11 : Evolution avec la température de la dilatation longitudinale de différents types de roches 1.siliceux 2.grès 3.calcaire 4.basaltes 5.argiles expansées 6.pate du ciment [Toumi, 2010] 53

Chapitre IV : Matériaux et Technique expérimentales

Figure IV.1 : Sac de ciment Malaki « Lafarge ».	56
Figure IV.2 : Sable de LIWA.	58
Figure IV.3 : les matériels de l'essai d'équivalent de sable.	62
Figure IV.4 : La tamiseuse utilisée.	64
Figure IV.5 : courbe granulométrique de sable LIWA.	65
Figure IV.6 : la poudre de marbre.	66
Figure IV.7 : Quartz broyée.	67
Figure IV.8 : les Broyeur utilisée.	67
Figure IV.9 : fibres métalliques «SIKA METAL FIBRES RL-45/50-BN».	68
Figure IV.10 : Super plastifiant utilisée.	68
Figure IV.11 : Moules utilisés pour la confection des éprouvettes.	70
Figure IV.12 : malaxeur normalisé pour pâte et mortier.	71
Figure IV.13 : appareil à chocs, moules et éprouvettes utilisés pendant les essais.	71
Figure IV.14 : bac de conservation et armoire humide.	72
Figure IV. 15 : Cycle chauffage/ refroidissement.	72
Figure IV.16 : dispositif de la mesure de porosité du béton.	74
Figure IV.17 : Dispositif pour l'essai de résistance à la flexion.	74
Figure IV.18 : Dispositif de rupture en compression.	75
Figure IV.19 : machine d'essais à la pression avec dispositif de compression et de traction.	75

Chapitre V : Analyse des résultats et discussions

Figure V.1 : disposition des éprouvettes dans le four.	77
Figure V.2 : Evolution de la perte de masse pour les éprouvettes prismatiques avec température.	78
Figure V.3 : Evolution de la perte de masse pour les éprouvettes cubiques avec température.	78
Figure V.4 : Evolution de la résistance de compression avec température.	79
Figure V.5 : Evolution de la résistance de traction par flexion avec température	80

Figure V.6 : des étapes d'essai de porosité.	81
Figure V.7. Observations à l'œil nu de l'évolution de la dégradation des bétons (BT, BPRF) après les cycles de chauffage de 200°C, 500°C, 800°C	82

Liste des tableaux

Chapitre I : Généralités sur le béton à poudre réactive

Tableau I.1 : composition chimique et caractéristiques physiques de la fumée de silice [Olga, 1996]	10
Tableau I.2 : Influence de la fumée de silice sur les propriétés des matériaux cimentaires. [Khetta, 2015]	11
Tableau I.3 : Malaxage de BPR fabriqué en laboratoire. [Ladour, 2014]	14
Tableau I.4 : Caractéristiques mécaniques des BPR.[Dugat et al, 1995]	15
Tableau I.5 : Principales caractéristiques de durabilité du BPR 200. [Zenati ,2007]	17
Tableau I.6 : Formules types de BUHP. [Tafraoui, 2009].	21

Chapitre II : Généralités sur les fibres

Tableau II.1 : Les caractéristiques et les propriétés des fibres. [Khetta, 2015]	30
Tableau II.2 : domaines d'application privilégiée par type des fibres. [Chouiter, 2016]	32
Tableau II.3 : Résultats des essais de compression et le module de Young des BFM. [Ellouze, 2005]	40

Chapitre III : Comportement de béton soumis à haute température

Tableau III.1 : Coefficient de dilatation thermique des roches par granulats [Toum 2010]	54
--	----

Chapitre IV : Matériaux et Technique expérimentales

Tableau IV.1 : caractéristiques physiques de ciment CEM I 52,5 R	57
Tableau IV.2 : analyse chimique et composition minéralogique de ciment CEM I 52,5 R	57
Tableau IV.3 : caractéristiques mécaniques de ciment CEM I 52,5 R	57
Tableau IV .4 : Masse volumique absolue du sable de liwa.	59
Tableau IV .5 : Masse volumique apparente du sable de liwa.	59
Tableau IV.6 : Porosité, compacité et indice des vides du sable de Liwa.	60
Tableau IV.7 : Teneur en eau du sable de LIWA.	61
Tableau IV.8 : Coefficient d'absorption du sable de LIWA	61
Tableau IV.9 : Résultats d'essais d'équivalent de sable de LIWA.	63

Tableau IV.10 : Qualité du sable en fonction des valeurs d'équivalent de sable E SV et ESP	63
Tableau IV.11 : Analyse granulométrique de sable d'OUED LIWA	64
Tableau IV.12 : classification de sable en fonction du module de finesse	65
Tableau IV.13 : Caractéristiques physiques de la poudre de marbre.	66
Tableau IV.14 : Analyse chimique de la poudre de marbre.	66
Tableau IV.15 : Analyse chimique du quartz broyé en %.	67
Tableau IV.16 : Les caractéristiques physiques du quartz broyé	67
Tableau IV.17 : Les Caractéristiques des fibres métalliques	68
Tableau IV.18 : Caractéristiques du MEDAFLOW SR20	69
Tableau IV.19 : La composition de béton à poudre réactive BPR.	70

Liste des abréviations

BAP : Béton auto plaçant.

BFM : Béton renforcé de fibres métallique.

BFUP : Béton fibré ultra performant.

BHP : Béton à haute performance.

BHR : Béton à haute résistance.

BO : Béton ordinaire.

BPR : Béton de poudre réactive.

BPRF : Béton de poudre réactive fibré.

BT : Béton « témoin ».

BTHP : Béton à très haute performance.

BUHP : Béton à ultra haute performance.

C : Ciment.

CR2.5: Béton sans fumée de silice et 2,5% (en poids de ciment) de l'adjuvant chimique.

E / C:Rapport eau / ciment

E / L:Rapport eau / liant

FM : Fibre métallique.

FS : La fumée de silice.

LB : Laitier broyé.

MPa : Miga Pascal.

QB : Quartz broyé.

SF : Sable fins.

SP : Super plastifiant.



Introduction générale

Introduction générale

Le béton de poudre réactive (BPR) est la dernière génération de béton ayant des propriétés supérieures aux types de béton traditionnels. Il a été initialement développé au début des années 1990 par le laboratoire de Bouygues. Le secret de sa résistance élevée, de sa durabilité remarquable et de son excellente ténacité réside dans sa microstructure dense et l'utilisation de fibres. De plus, l'utilisation d'une teneur élevée en ciment, l'élimination des agrégats grossiers, l'ajout de sable de quartz réactive, la réduction du rapport eau / liant (E / L) à moins de 0,2, l'ajout de matières pouzzolanique et l'ajout de microfibres le rendent supérieur à d'autres [Chadli et al, 2018].

Il est principalement utilisé comme béton à ultra haute performance (BUHP) en raison de ses propriétés mécaniques supérieures, de sa faible perméabilité et de son excellente durabilité. La demande de BPR a augmenté au cours des deux dernières décennies, en particulier dans l'industrie de la production de béton préfabriqué. De plus, il est largement utilisé dans les bâtiments tels que les immeubles de grande hauteur, les ponts à longue portée, les tunnels et les structures nucléaires, les pieux et les constructions souterraines profondes, en raison de sa haute résistance qui réduit considérablement la charge permanente et la section transversale des éléments de structure [Abid et al, 2019].

Cependant, le BPR reste un matériau quasi cassant. L'inclusion de fibre d'acier peut améliorer considérablement la ténacité du BPR et surmonter son inconvénient de grande fragilité. Les fibres d'acier jouent un rôle clé dans la diminution de l'initiation des fissures, le contrôle de la propagation des fissures et l'augmentation efficace de la résistance à la compression, à la traction et à la flexion [Guangyao et al, 2019].

Comprendre le comportement du BPR dans différentes conditions de chargement est essentiel avant ses applications pratiques. [Chengdong et al, 2019].

[Khuzaie et Atea, 2019] ont utilisé du béton de poudre réactive pour investir des poutres en T creuses en béton armé. Ils ont utilisé 0 à 2% de fibres d'acier dans les mélanges de béton pour améliorer le couple ultime des poutres en béton. Néanmoins, l'utilisation croissante du BPR dans les projets de construction a soulevé des inquiétudes concernant le comportement au feu du béton, en particulier le phénomène d'éclatement. Par conséquent, plusieurs chercheurs ont recommandé l'ajout de fibres de polypropylène (PP) ou de fibres d'acier (PPF) pour éviter l'écaillage dans les BPR.

Le terme «béton de poudre réactive» a été utilisé pour décrire un mélange de superplastifiant, de fumée de silice, de ciment et de sable très fin (<0,6 mm) avec un rapport eau-ciment extrêmement faible [Sung-HoonKang et al, 2019]. De nombreuses études sur le BPR se sont

concentrées sur ses propriétés mécaniques à température ambiante, d'autres études sur les propriétés du BPR ont été menées à haute température. Par exemple, [Sung-HoonKang et al, 2019] ont utilisé des cendres de balle de riz pour améliorer les propriétés mécaniques du BPR à température ambiante, en particulier aux âges de durcissement à long terme. Ces auteurs ont obtenus une force de compression à 28 jours de 145 MPa.

[Sanchayan et Foster, 2016] ont atteint une résistance à la compression élevée (plus de 200 MPa) après avoir exposé des échantillons de béton à 20 ° C, 100 ° C, 400 ° C, 700 ° C et 900 ° C pendant 3 h. Lorsque les BPR sont soumis à des températures élevées (feu), de nombreuses réactions physico-chimiques complexes se produisent et détériorent par conséquent les propriétés mécaniques. Les principaux effets du feu sont la réduction de la résistance à la compression, la fissuration et l'écaillage du béton [Alyaa et al, 2020].

[YangJu et al, 2015] a montré que l'utilisation de fibres d'acier est une procédure réalisable pour réduire le risque d'écaillage ; ces fibres affectent légèrement les propriétés mécaniques du BPR, mais réduisent considérablement la tendance à l'écaillage du BPR à des températures élevées. Les fibres d'acier fondent sous 170 ° C et créent des canaux par lesquels la pression de vapeur d'eau s'accumule dans le BPR avec une augmentation de la température.

[Hiremath et Yaragal ,2018] ont étudié les performances du BPR à des températures élevées entre 200 ° C et 800 ° C en enregistrant les propriétés mécaniques résiduelles après exposition à des températures élevées. Les résultats ont démontré que 0,1% de la teneur en fibres est suffisant pour contrôler l'écaillage du BPR à des températures atteignant 800 ° C. La présence de fibres d'acier peut sensiblement améliorer les résistances à la compression et à la traction du BPR à température ambiante ; par conséquent, les fibres d'acier peuvent augmenter la résistance du béton aux contraintes thermiques et surmonter l'accumulation de pression de vapeur à des températures élevées.

[Sanchayan et Foster, 2016] ont étudiés BPR lorsque est mélangé avec des fibres de polypropylène et des fibres d'acier, ses propriétés mécaniques peuvent être améliorées et l'écaillage peut ainsi être évité. La performance du BPR dans le cadre d'une structure à des températures élevées doit être évaluée.

[Guangyao et al, 2019] ont étudiés les effets du type, de la teneur et de la géométrie des fibres d'acier sur les propriétés mécaniques du BPR. On a constaté que l'addition de 4% de fibre de micro-acier industriel permettait d'obtenir l'augmentation la plus élevée de la résistance à la compression et de la résistance à la traction. La ténacité a été augmentée en augmentant la teneur en volume des fibres d'acier. L'ajout de 4% de fibre de micro-acier industriel et de 3%

de fibre d'acier usagée individuellement a permis d'augmenter la ténacité typique du BPR de 249,8% et 158,8%, respectivement.

[Wu et al, 2016] ont rapportés que la teneur et la forme des fibres d'acier avaient des effets significatifs sur le comportement en compression et en flexion du BPR. La teneur en fibres d'acier avait un effet limité sur la résistance et la déformation à la première fissure, mais a montré des effets considérables sur la charge de pointe de la courbe charge-déformation en flexion.

[Sovjak et al, 2017] ont observés que le volume des fibres d'acier et les conditions de durcissement influencent le comportement en flexion du BPR.

[Mostofinejad et al, 2016] ont étudiés les effets de différents mélanges et traitements de cure pour déterminer les paramètres optimaux pour l'amélioration de la résistance à la compression du BPR. La poudre de marbre est l'un des plusieurs matériaux affectent les problèmes d'environnement et de santé. Il est produit du processus de sciage, de façonnage et de polissage. L'élimination de la poudre de marbre de l'industrie du marbre est aujourd'hui l'un des problèmes environnementaux mondiaux. L'utilisation de poudre de marbre dans le béton n'a pas trouvé une attention adéquate. Caractérisation de la poudre de marbre utilisés dans le mortier et le béton ont été largement étudiés [Talah et al, 2015].

Objectif du travail

Ce travail est une recherche expérimentale sur l'évaluation de la qualité des bétons de poudre réactive (BPR) soumis à de hautes températures avec l'ajout de ciment portland, sable broyé (quartz) et le remplacement complet de la fumée de silice par la poudre de marbre avec de pourcentage de fibres métallique (2%) .

Étude de l'influence des fibres d'acier, sur les propriétés du béton de poudre réactive (BPR) soumis à haute température (200, 500, et 800 ° C.).Les propriétés mécaniques considérées sont la résistance à la compression, la résistance à la traction par flexion, et les propriétés physiques (perte de masse et la porosité).

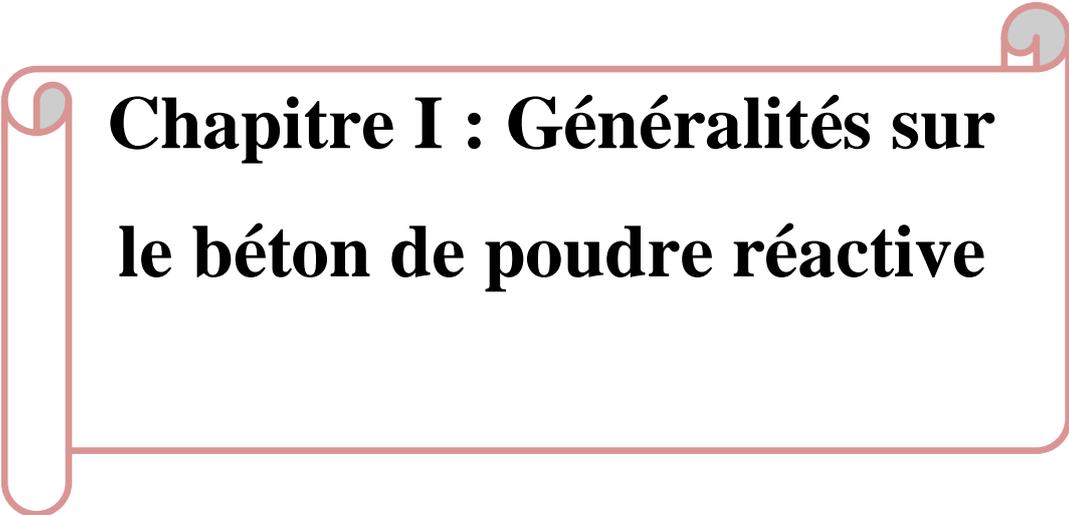
L'âge de durcissement choisis est: 206 jours de durcissement dans un milieu humide.

Méthodologie du travail :

Ce mémoire est composé de cinq chapitres :

- ❖ Le premier chapitre renferme des généralités sur le béton de poudre réactive (définition, composition et propriétés de BPR).
- ❖ Le deuxième chapitre comporte généralité sur les fibres et rôle de fibre, domaine d'application de la fibre, béton fibré.

- ❖ Le troisième chapitre est une analyse bibliographique des travaux de recherche sur le comportement du béton à haute température.
 - ❖ Le quatrième chapitre présente les caractéristiques des matériaux utilisés et les matériels et la méthode de la formulation les techniques de conservation et finalement les essais effectués sur le béton.
 - ❖ Le cinquième chapitre présente l'analyse des résultats et discussions.
- Enfin, la conclusion générale résume les résultats obtenus dans cette étude.



Chapitre I : Généralités sur le béton de poudre réactive

I.1.Introduction

La famille des bétons s'enrichit régulièrement depuis quelques années avec des bétons aux nouvelles performances, tels que les bétons à hautes performances (BHP), les bétons autoplaçants (BAP) et les bétons fibrés ultra performants (BFUP) et les béton de poudre réactive (BPR). [Arab et Rafai, 2017].

Récemment, un composite à base de ciment à très haute résistance et à haute ductilité appelé béton en poudre réactive (BPR) a été développé à Bouygues, France [Richard et Cheyrezy, 1994], maintenant étiqueté et classé comme béton à ultra haute résistance (BUHP). Le BPR concept est basé sur le principe qu'un matériau avec un minimum de défauts tels que des microfissures et des vides pourra atteindre une plus grande capacité de charge et une plus grande durabilité. [Abtan et al, 2019].

Ce chapitre propose une synthèse bibliographique sur les bétons de poudre réactive (BPR). Par rapport aux objectifs de l'étude, cette synthèse s'articule autour de la mise au point des formulations de BPR, des propriétés à l'état frais et à l'état durci. Cette bibliographie doit ensuite nous permettre d'orienter le plan d'étude par rapport aux objectifs fixés.

I.2. Historique sur les bétons

Dans les années 60, des petits échantillons de pâte, de ciment et de mortier ont été réalisées par pressage et chauffage en atmosphère saturé, c'est-à-dire en conditions hydrothermales. On a alors mesuré sur les échantillons ainsi obtenus des résistances en compression allant jusqu'à 650 MPa [Richard, P., Cheyrezy, M, 1994]. Ces expériences ont permis de démontrer que la résistance des pâtes cimentaires n'était que faiblement utilisée dans les bétons traditionnels et même dans les bétons dits à haute performance. [Khetta, 2015].

Au cours des années 1970, le béton ayant une résistance à la compression de 50 à 60 MPa a commencé à être spécifié pour les colonnes des immeubles de grande hauteur, car la réduction des sections transversales des colonnes offrait un espace de location supplémentaire [Aïtcin, 2000]. Au fil du temps, le nom de ces bétons à haute résistance a été changé en béton haute performance (BHP) car il a été réalisé qu'ils offrent non seulement une résistance élevée, mais aussi une durabilité élevée et d'autres propriétés souhaitables. Au cours des trois dernières décennies, BHP a démontré ses performances supérieures dans les applications d'ingénierie.

En 1973, « Water Tower Place » (Chicago, USA) Atteint 260 mètres avec une résistance du béton de 60 MPa). [Malik, 2007].

Les études menées depuis les années 80 sur la formulation et la fabrication des bétons utilisant des additions réactives ainsi que des super plastifiants hauts réducteurs d'eau ont conduit à la mise au point des Bétons à Ultra Hautes Performances (BUHP).

Ces bétons présentent des propriétés mécaniques et de durabilité exceptionnelles par rapport aux bétons ordinaires. [Amanjean, 2015].

Au milieu des années 1990, un mortier cimentaire à ultra haute résistance, appelé béton de poudre réactive (BPR), a été développé avec des résistances de béton pouvant atteindre 200 MPa. Le béton en poudre réactive offre de nombreuses améliorations de propriétés par rapport au béton conventionnel. La technologie offre la possibilité d'allier innovation, légèreté et durabilité extrême et est optimisée pour répondre aux critères rhéologiques (bonne ouvrabilité), mécaniques (très haute résistance à la compression et non cassant) et de durabilité (invulnérabilité quasi-totale à toutes les agressions conventionnelles). Ces spécifications entraînent des écarts majeurs par rapport à la sagesse conventionnelle dans le domaine des structures en béton.

En 1997, la première passerelle au monde en composite de tube d'acier rempli de BPR a été construite à Sherbrooke au Canada. La superstructure de 60 mètres est un pont à treillis ouvert post-tension composé de six segments préfabriqués en fonte d'allumettes construits avec 200 MPa BPR (Figure I.1). [Malik, 2007].



Figure I.1 : Passerelle de Sherbrooke, Canada. [Malik, 2007]

En 1996-1999, EDF a utilisé des BFUP pour la rénovation de poutres en béton dans des aéroréfrigérants de centrales nucléaires (milieu particulièrement agressif).

Les contrôles réalisés ces dernières années confirment la durabilité de la solution retenue. [Lanez, 2005].

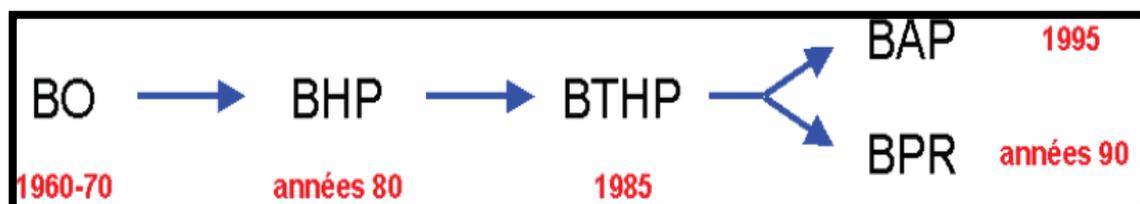


Figure I.2 : Evolution des bétons depuis les années 1960 [Cherkaoui, 2010]

I.3. Définition

Les Bétons de Poudre Réactive (BPR) sont des micros bétons armés de micro armatures, dans lesquels la taille de tous les constituants est divisée par 100 par rapport à un béton ordinaire. Pour obtenir des performances exceptionnelles, la porosité des BPR est réduite à l'extrême ; ils contiennent un sable très fins (max. 600 μm), de forts dosages en ciment et fumée de silice, du quartz broyé, une teneur en eau très faible et un superplastifiant. Pour augmenter encore leurs performances, certains BPR subissent un traitement thermique : au-dessus de 90°C, le quartz broyé réagit alors par réaction pouzzolanique ; au-dessus de 200°C, l'espacement des feuillettes de C-S-H (porosité nanométrique) diminue et on observe une augmentation de la cristallinité de ces hydrates. On peut encore presser les BPR traités thermiquement avant et pendant prise la prise pour augmenter leur compacité. [Courtial et al, 2011].

I.4. Les constituants du BPR**I.4.1. Le ciment**

Le ciment, comme le plâtre (sulfate de calcium hémi hydraté), possède la propriété intéressante d'être un liant hydraulique, c'est-à-dire qu'il suffit de lui ajouter de l'eau pour produire un solide possédant les propriétés de cohésion et de résistance propice à son usage comme colle des matériaux, plus résistants par ailleurs, constituant le béton. [Cherkaoui, 2010].

Comme pour le béton classique, le ciment utilisé pour la confection d'un béton BUHP est conforme à la norme NF EN 197-1 [AFNOR NF EN 197-1, 2001]. Le choix du ciment est fait à partir de sa classe de résistance, de ses caractéristiques d'hydratation, de l'agressivité du milieu et, d'une façon plus générale, de la composition du béton et de l'usage auquel on le destine. Pour bénéficier pleinement de l'activité pouzzolanique des fines d'addition, on privilégie souvent les ciments sans ajouts (CEM I) par rapport aux ciments avec ajouts. [Tafraoui, 2009].

I.4.2. Les Granulats**a. Sable fin**

Le sable constitue le plus gros granulat du BPR, sa taille moyenne est inférieure à 600 μm . Un meilleur choix de ce composant garantirait une bonne interface pâte granulat. Ceci faciliterait le contrôle de la rhéologie et améliorerait les performances mécaniques du matériau. En effet, l'utilisation des grains de forme arrondie, présentant une faible adsorption d'eau, favorise la rhéologie du béton. [Cherkaoui, 2010].

I.4.3.les additions

Dans le domaine du génie civil, le terme « Addition » désigne, à partir des années 1990 une catégorie de produits minéraux utilisés dans la confection des bétons et des mortiers. La plus récente norme européenne EN 206 -1 définit les additions comme matériaux minéraux finement divisés et pouvant être ajoutés au béton pour améliorer certaines de ses propriétés ou pour lui conférer des propriétés particulières. [Boudjemaa et Djilani, 2019].

Ce sont des produits de dimension granulaire inférieure à 80 μm , obtenus par broyage fin, récupération des déchets des centrales thermiques ou pulvérisation de certaines roches (calcaire, silice, etc.). D'après la norme précédente, toutes les additions présentant une finesse supérieure à celle du ciment peuvent être utilisées en substitution d'une partie du ciment. [Dehbi et Chaibet, 2019].

Les additions minérales se substituant au ciment peuvent être classées en fines actives telles que la fumée de silice et la pouzzolane naturelle sont en fines inertes telles que le calcaire. Par ailleurs, le cadre normatif français propose six matériaux minéraux répondant à la définition « Additions pour béton hydraulique » à savoir :

➤ **Additions du type I (Les ajouts minéraux inertes) selon la norme EN 206-1 :**

L'objectif dans leur utilisation est d'améliorer la compacité du béton et donc sa résistance.

- Les additions calcaires (NF P 18-508)
- Les additions siliceuses (NF P 18-509)
- Les fillers « fillers siliceux de classe B, C » (NF P 18-501)

➤ **Additions de type II (Les ajouts minéraux actifs) selon la norme EN 206-1 :**

Sont des particules de faibles diamètres qui, ajoutées en quantités de l'ordre de 10 % du poids de ciment, améliorent notablement les performances de résistances et de durabilité du béton grâce à leurs propriétés pouzzolanique

- La fumée de silice (NF P 18-502)
- Les cendres volantes de houille (NF P 18-505)
- Le laitier vitrifié moulu de haut fourneau (NF P 18-506)
- La pouzzolane naturelle (EN 197-1). [Gharbi et Fali, 2019].

Concernant le BFUP, les additions les plus utilisées sont : la fumée de silice, le quartz broyé.

Les additions ont trois fonctions essentielles dans la matrice cimentaire du BFUP : par effet filler, elles comblent les vides entre les grains de ciment, les fibres et le sable elles améliorent la rhéologie du mélange et enfin, elles forment des produits d'hydratation par leur effet pouzzolanique. [Chadli, 2019].



Figure I.3 : Différents ajouts cimentaires.[Dehbi et Chaibet, 2019]

a.la Fumée de silice

Les fumées de silice sont des particules très fines (taille moyenne des graines environ $1\mu\text{m}$) présentant une très forte teneur en silice amorphe, est un sous- produit de l'industrie de silicium et de ses alliages ou de zircon. par des fours à arc électrique, ou de très hautes températures sont atteintes ($1500\text{-}2000\text{ }^\circ\text{C}$) pour réduire le quartz en présence de charbon ,un composé gazeux SiO , se forme , se refroidit, se condense et s'oxyde sous forme de particules ultrafines qui sont récupérées dans des système de dépoussiérage.

La fumée de silice est essentiellement composée de silice (SiO_2).la teneur de cette dernière varie selon le type d'alliage produit.la fumée de silice contient des oxydes métalliques dérivant des composées secondaires de l'alliage, des alcalins et des déchets de carbone .les particules de la fumée de silice se présentent sous forme de sphères vitreuses ($0.1\text{à}2\mu\text{m}$). Ces particules sont lisses et sphériques (100000 billes de fumées recouvrent entièrement un grain de ciment). Leur couleur est le plus souvent gris clair.[Lanz, 2005].

Tableau I.1 : composition chimique et caractéristiques physiques de la fumée de silice
[Olga, 1996]

COMPOSITION CHIMIQUE	(%)	Couleur	Bleu gris
SiO_2	93	Densité	2,22
Al_2O_3	0,59	Masse volumique (kg/m^3)	280 (en vrac)
FeO	0,70	Fuseau granulométrique	
MgO	0,52	(μm)	0,04 i 0,28
CaO	0,51	Diamètre moyen (μm)	
Na_2O	0,17	Surface spécifique	0,18
K_2O	0,59	théorique (m^2/kg)	20 000
S	0,16	Surface spécifique, B.	
Perte au feu	2,20	E.T. (m^2/kg)	17 500

❖ Effet de la fumée de silice

Tableau I.2 : Influence de la fumée de silice sur les propriétés des matériaux cimentaires.
[Khetta, 2015]

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> • Accroissement des résistances mécaniques • Affinement de la structure poreuse • Diminution des coefficients de diffusion • Diminution du pH et de la concentration en alcalins de la solution interstitielle 	<ul style="list-style-type: none"> • Allongement du temps de malaxage afin d'assurer une dispersion homogène de la fumée de silice • Accroissement de la demande en eau • Accroissement du retrait endogène

b. Poudre de marbre

La poudre de marbre est une matière calcaire d'une blanc pur, au grain légèrement plus gros que la craie dans les temps anciens elle à été utilisée comme fond, pour les fresques en raison de son imperméabilité parfaite elle a aussi servie comme matière de charge pour apprêts, pates de modelage et pigments. Pour le béton, des travaux ont vu le jour ces dernières années sur l'utilisation de cette poudre comme addition au béton .Granulométrie très fine: 0-25 µm. [Belaid, 2013].

❖ l'effet de poudre de marbre

- La poudre de marbre peut être employée comme remplissage dans le béton et les aires de pavage.
- Le remplacement partiel du ciment par la poudre de marbre mène à l'augmentation du temps de maintien d'ouvrabilité
- la poudre de marbre peut être employée dans le béton pour augmenter la résistance.
- Des bétons contenant la poudre de marbre présentent une rhéologie améliorée
- Nous pouvons réduire la pollution environnementale en utilisant la poudre de marbre pour fabriquer les autres produits.
- la poudre de marbre est également employée pour faire la couche de fond pour des peintures de toile, et comme remplisseur de peinture.
- Elle est utilisée comme composant pour la fabrication du ciment blanc Il a été prouvé que la poudre de marbre agissait comme charge. [Dehbi et Chaibet, 2019]
- les résistances mécanique de béton formulé à base de fume de silice (10%) comparées à celle de poudre de marbre (10%) sont presque similaire à 7 jour .de plus, la pénétration d'eau de ces deux béton et presque la même.

- L'introduction de la poudre de marbre soit par substitution ou par addition entraîne une augmentation de la résistance mécanique à la compression par rapport au béton témoin au delà de 90 jours. [Belaid, 2013]

c. Quartz broyé

Le quartz broyé est une poudre, issue de broyage d'un sable très riche en silice ($\text{SiO}_2 > 98\%$), pour les BPR Nous avons utilisé du quartz commercial broyé ayant un diamètre moyen de l'ordre de $10\mu\text{m}$. Il est considéré comme inerte ou faiblement réactif en absence de traitement thermique. Son incorporation dans le béton pourrait être d'un très grand intérêt en cas de traitement thermique. [Cherkaoui, 2010].

I.4.4. les adjuvants

Les adjuvants est un produit chimiques incorporé au moment du malaxage du béton à un dosage inférieur ou égal à 5 % de la masse de ciment du béton, pour modifier les propriétés du mélange à l'état frais et / ou à l'état durci. [Aboutair, 2019].

a. Les super-plastifiants

Les super-plastifiants sont des dispersants qui fonctionnent sur le même principe que les plastifiants réducteurs d'eau mais d'une façon plus efficace, telle qu'il est possible en principe de dé flocculer complètement les grains. Ce sont des polymères de synthèse fabriqués spécialement pour l'industrie du béton. [Chadli, 2019].

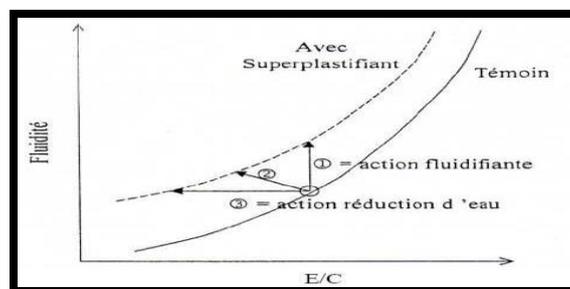


Figure I.4 : l'action «réduction d'eau» ou «l'effet fluidification». [Dakhmouche, 2009]

❖ Influence du dosage en super plastifiant

L'incorporation du super plastifiant dans le ciment conduit à une augmentation de la fluidité des pâtes de ciment. L'augmentation de la fluidité est plus marquée pour de faibles dosages en super plastifiant, ont mis en évidence l'existence des trois plages de dosages influençant le maintien de la maniabilité du béton :

Une plage de faibles pourcentages d'adjuvant inférieurs à 1% extrait sec, soit environ 5% de produit commercialisé. Dans cette plage, le maintien de la maniabilité est faible, sa durée maximale étant de 15mn.

Une plage de pourcentages élevés en adjuvant, en fonction des dosages en super plastifiant supérieurs à 1% et pouvant atteindre jusqu'à 3% en extrait sec. On constate ici un phénomène de fluidification du matériau hydraulique en fonction du temps. Cette fluidification passe par un dosage optimal en adjuvant lorsque la durée de maniabilité décroît, elle est accompagnée d'une désorption de super plastifiant ou encore d'une augmentation de la concentration de ce produit dans la solution interstitielle du mortier. Une plage de pourcentages très élevés en adjuvant. Les valeurs sont supérieures à 3 ou à 4% d'extrait sec. Dans cette plage, le maintien de la maniabilité est très faible. [Dakhmouche, 2009].

I.4.5. Les fibres

L'ajout des fibres dans la pâte du béton lors du gâchage permet d'augmenter la ductilité du matériau durci. En effet, lors de la mise en traction du matériau, les efforts seront repris par les fibres et non pas seulement par la matrice solide. Les propriétés du mélange peuvent varier en fonction de la nature des fibres, leur dimension ainsi que leur dosage. [Ladour, 2014].

I.4.6. Rapport Eau/Liant

Pour atteindre des résistances de l'ordre de 150 MPa, il est nécessaire de réduire le rapport Eau/Liant (E/L) à des valeurs inférieures à 0,2 [Richard et Cheyrezy, 1995]. Pour de telles valeurs, la quantité d'eau n'est pas suffisante pour hydrater la totalité du ciment, ce qui implique qu'une part importante du ciment demeure non hydratée et joue le rôle d'un filler, mais demeure suffisante pour procurer une cohésion et structurer le matériau. Les grains de ciment anhydre sont plus résistants que les principaux hydrates du ciment (la Portlandite ou les gels silico-calciques). Ainsi, ils peuvent contribuer à l'augmentation des performances mécaniques et confèrent au matériau une capacité d'auto-cicatrisation en présence d'eau . [Amanjean, 2015].

I.5. Propriétés des BPR

I.5.1. Propriétés rhéologiques

Il a été observé que, dans certaines conditions, les BPR avaient un comportement rhéologique Binghamien. Cela signifie qu'ils peuvent être caractérisés par un seuil de cisaillement et une viscosité relative. Ces caractéristiques sont obtenues par une mesure avec un rhéomètre spécialement adapté au matériau. Il s'agit en fait de mesurer le couple développé pour une gamme de vitesses de rotation d'un élément géométrique immergé dans le béton. Le seuil de cisaillement représente l'effort qui doit être fourni pour mettre en mouvement le béton frais. La viscosité caractérise la résistance que le béton offre au mouvement lorsque celui-ci est déjà amorcé. Plusieurs paramètres importants ont ainsi été mis en évidence comme la composition et la finesse du ciment, la provenance et la finesse de la fumée de silice et le type

de superplastifiant .La composition du mélange, le temps de malaxage, le dosage optimal en superplastifiant et la température affectent le comportement rhéologique des BPR.

L'évaluation de la maniabilité des BPR, sans le recours à un rhéomètre spécialement conçu à cette fin, est particulièrement difficile étant donné le caractère fortement thixotropique des BPR.[Zenati ,2007]

❖ Malaxage

La durée du malaxage est définie pour chaque formule, à partir des épreuves d'étude et de convenance.

La séquence de malaxage proposé par Bonneau pour un BPR mélangé dans un malaxeur classique à faible cisaillement est présentée dans le tableau I.4. Le temps de malaxage peut varier selon le rapport E/C, le dosage en ciment et en ultrafines et l'efficacité du superplastifiant utilisé. [Ladour, 2014].

Tableau I.3 : Malaxage de BPR fabriqué en laboratoire.[Ladour, 2014]

2min	Homogénéisation des matériaux secs
3min	Ajout de l'eau et de la moitié du superplastifiant
4min	Ajout de l'autre moitié du superplastifiant Malaxage à grande vitesse.
1min	ajout des fibres et fin de mélange simultané

I.5.2 Propriétés mécaniques des BPR

I.5.2.1. Résistance en compression et module d'élasticité

La résistance en compression représente une qualité de référence pour les BFUP tant elle est considérablement augmentée par rapport au béton ordinaire. Le comportement en compression des BFUP est caractérisé par leurs résistances en compression et leurs modules d'élasticité. La résistance caractéristique à la compression à 28 jours est comprise entre 150 et 250 MPa. Le module d'élasticité varie selon les formulations entre 40 et 80 GPa. [Aboutair, 2019].

[Dugat et al, 1995] ont pu fabriquer en laboratoire des BPR200 et des BPR800 dont les caractéristiques mécaniques mesurées sur des éprouvettes cylindriques (respectivement 90 ´ 180 mm et 70 ´ 140 mm) sont présentées dans le tableau I.4.

Tableau I.4 : Caractéristiques mécaniques des BPR. [Dugat et al, 1995]

Caractéristiques	BPR 200	BPR 800
Traitement thermique	90 °C	Pressage 60 MPa (90°C + 250°C)
Résistance à la compression(MPa)	190-200	420-520
Module d'élasticité E (GPa)	60-66	60-74
Coefficient de Poisson n	0.22-0.24	0.28
Limite d'élasticité linéaire (% de la résistance ultime)	60%	85%

Les figures I.5 et I.6 présentent respectivement les comportements mécaniques en compression des BPR200 et BPR550.

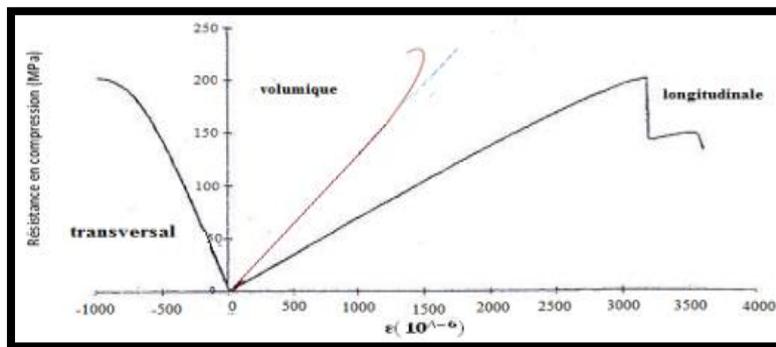


Figure I.5 : Courbe contrainte-déformation du BPR200 en compression. [Dugat et al, 1995]

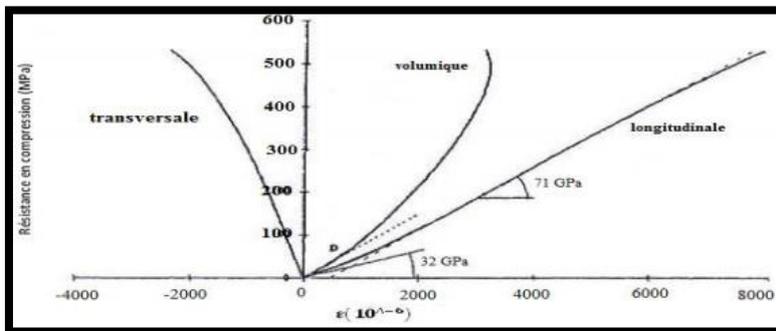


Figure I.6 : Courbe contrainte-déformation du BPR550 en compression. [Dugat et al, 1995]

I.5.2.2.Résistance à la traction

Peu de données sur la résistance à la traction directe sont disponibles dans la littérature (on caractérise surtout la résistance à la traction par l'essai de flexion : résistance à la traction par flexion).

[Behloul, 1996] présente des résultats sur la traction directe du BPR200, renforcé avec 2% de fibres métallique de 13 mm de longueur, compris entre 8 et 10 MPa.

[Rossi et al,1996] ont mené une campagne d'essais sur la traction directe d'un matériau renfermant 7% en volume de fibres métalliques dont 5% de fibres 5 mm et 2% de fibres 25

mm sur des éprouvettes cylindriques (74 -150 mm) entaillées sur une profondeur de 15 mm. Les résultats des contraintes de traction-ouverture de fissure sont présentés sur la (Figure I.7).

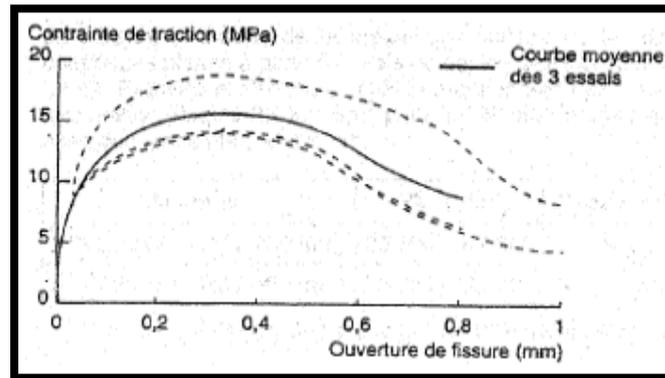


Figure I.7 : Courbe contrainte de traction - ouverture de fissure de béton, à 7 % en volume de fibres métalliques. [Tafraoui, 2009]

L'augmentation du volume de fibres et la combinaison de fibres courtes et de fibres longues a permis d'obtenir un comportement ductile jusqu'à une ouverture de fissure de 400 μm selon. [Tafraoui, 2009].

I.5.2.3. Résistance à la flexion

[Richard et Cheyrezy, 1995] ont mesuré les résistances en flexion des BPR 200 et BPR 800. Ces résistances varient entre 30 et 60 MPa pour le BPR 200, et entre 45 et 141 MPa pour le BPR 800.

En 1996, [Dugat, 1996] est mesuré une résistance en flexion d'une éprouvette 4x4x16 d'un BPR 200 de 32 MPa. [Cherkaoui, 2010].

I.6. La durabilité

La durabilité d'un matériau cimentaire dépend bien évidemment de l'environnement dans lequel il est situé mais aussi de la qualité de sa microstructure. Ainsi, d'après [Baron et al, 1992], un béton est durable si sa composition et son assemblage minéralogique sont choisis en fonction des caractéristiques de l'environnement de l'ouvrage.

I.6.1. Porosité

La porosité est un paramètre essentiel pour la durabilité des matériaux à base cimentaire car la taille des pores et leur connectivité déterminent la résistance du matériau à la pénétration d'agents agressifs.

La porosité entre 6 nm et 100 μm a été mesurée à l'aide d'un prosimètre à mercure. On observe pour le BPR une absence totale de porosité capillaire, celle qui est à l'origine des principaux mécanismes de diffusion dans les matériaux à matrice cimentaire.

La porosité accessible à l'eau du BPR, mesurée selon le mode opératoire AFREM, vaut 2 % [Technique de l'ingénieur, 2009].

I.6.2. Perméabilité, Résistance au gel-dégel et Abrasion

La très faible porosité et l'absence d'eau libre dans les pores capillaires ont une influence directe sur les caractéristiques de perméabilité à l'air, de résistance au gel-dégel et de résistance à l'abrasion (voir le tableau I.5).

Le BPR est plus résistant au gel-dégel qu'un BHP à air entraîné spécialement formulé à cet effet, et trois fois plus résistant à l'abrasion qu'un béton classique (suivant l'essai CNR). [Zenati ,2007].

Tableau I.5 : Principales caractéristiques de durabilité du BPR 200. [Zenati ,2007]

Porosité	< 2 %
Perméabilité à l'azote	1 à 5 10^{-20} m ²
Gel-dégel :	
• module résiduel après 300 cycles	100 %
• perte de masse après 300 cycles	< 10 g/cm ²
• Abrasion (coefficient CNR)	1.3
Carbonatation :	
- constante de carbonatation K_c	0.1 mm/an ^{0.5}
- pénétration sur 15 mm	> 12 000 ans
Corrosion :	
• coefficient de diffusion apparent	Non mesurable 0.02
coefficient de diffusion effectif	

I.6.3. Résistance à la corrosion

Trois processus peuvent potentiellement être à l'origine de la corrosion dans le BPR :

- la pénétration d'ions chlore.
- la carbonatation.
- la propagation de la corrosion des fibres métalliques à partir de la surface.

Des essais de diffusion et de migration accélérée des ions chlores ont montré une parfaite imperméabilité du BPR à ces agents.

La carbonatation est insignifiante. Enfin, le réseau de fibres n'étant pas continu, la corrosion ne peut se propager aux fibres incluses dans la masse [Khetta, 2015].

I.6.4. La résistance aux agents agressifs

La résistance aux agents agressifs tels que l'eau de mer, l'eau distillée, le sulfate de calcium, l'acide acétique ou le sulfate de sodium a été évalué à partir d'essais de flexion 3 points sur des échantillons conservés pendant 12 mois en permanence dans ces solutions agressives. Elle se concrétise par une baisse de 5 à 25 % des performances par rapport au matériau sain. [Ladour, 2014].

I.6.5. Résistance au feu

Compte tenu de sa très faible porosité, le BPR ne présente pas une aussi bonne résistance au feu que les bétons traditionnels. Sans traitement particulier, il présente une tenue au feu d'environ 15 min.

Une formulation particulière peut être utilisée qui porte cette valeur à 60 min pour une structure non chargée et à 30 min pour une structure chargée. Pour obtenir une tenue aux feux supérieurs anti-feu additionnels. [Zenati, 2007].

I.7. Principe de formulation

I.7.1. Introduction

Formuler un béton consiste à déterminer les proportions des différents constituants permettant de satisfaire des propriétés rhéologiques et mécaniques exigées par l'utilisation du matériau. Dans le cas d'un BUHP, l'optimisation du squelette granulaire constitue la phase primordiale de la formulation. Elle a pour objectif de combler la porosité de cet empilement avec la pâte afin d'obtenir l'ouvrabilité désirée, cette pâte étant elle-même déterminée par le rapport eau/ciment pour viser une résistance et une durabilité données. [Taфраoui, 2009].

I.7.2. Méthode proposée par BONNEAU

Le problème de la formulation d'un béton se pose en termes d'optimisation de la compacité du squelette granulaire. Cette compacité est définie comme le rapport du volume solide sur le volume total et correspond au complément à l'unité de la porosité.

Bonneau pu établir, à partir de résultats expérimentaux, une relation mathématique entre le volume des vides (V) d'un mélange granulaire et son étendue granulaire (d/D) :

$$V = V_0 (d / D)^{0,2} \quad (1.2)$$

Où V_0 : constante empirique

d : dimension du tamis retenant 90% du granulat

D : dimension du tamis retenant 10% du granulat

La répartition des grains à l'intérieur de cette étendue granulaire est telle que le mélange présente une porosité minimale. Selon Caquot, la constante expérimentale V_0 prend une valeur de l'ordre de 0,5.

Le dosage en fines (ciment et additions) d'un béton de sable est estimé par Caquot par la formule :

$$[\text{Fines}] = [V] \quad (1.3)$$

Où $[V]$: volume de vide associé à l'empilement des fines du sable

$[\text{Fines}]$: volume de l'ensemble de particules inférieures à 80 μm

La porosité PS, définie par la formule de Caquot, est donnée par la formule suivante :

$$PS = 0,75 (0,08/ D)^{0,2}(\% \text{ volumique}) \quad (1.4)$$

Ainsi, le dosage volumique optimal en fines s'écrit combinant des équations (1.3) et (1.4) :

$$[\text{Fines}] = 0,38(0,08/ D)^{0,2}(\% \text{ volumique}) \quad (1.5)$$

On estime qu'une précision de l'ordre de $\pm 10\%$ est raisonnable.

Cette formule montre que le dosage en fines dépend de la dimension du plus gros granulat D .

En admettant que la porosité du squelette granulaire se décompose en la somme d'un volume d'eau (e) et d'un volume de vide piégé (V), la porosité minimale théorique du béton est :

$$(e+v)_{\min} = 0,8[d/D]^{0,2} \quad (1.6)$$

Où d/D : étendue granulaire en tenant compte de celle des fines

Le volume de vides est déterminé à partir du volume d'eau selon la formule :

$$[\text{vides}] = k \times [\text{eau}] \text{ (l/m}^3\text{)} \quad (1.7)$$

Où $K = 0,2$ à $0,25$.

L'estimation du dosage en sable est donnée par la relation :

$$[\text{Sable}] = 1000 - [\text{fines}] - [\text{eau}] - [\text{vide}] \text{ (l/m}^3\text{)} \quad (1.8)$$

Dans le cas des bétons formulés avec une fine potentiellement réactive, la formule de FERET permet de prédire la valeur de la résistance en compression à 28 jours R_b :

$$R_b = \frac{K_f \times R_c}{\left[1 + \frac{3,1 \times (e+v)}{c(1+K_1+K_2)} \right]} \quad (1.9)$$

Où R_b : Résistance du béton à 28 jours (MPa)

K_f : Coefficient granulaire (ordre de grandeur 4,5 à 5)

R_c : Classe vraie du ciment (MPa)

e : Dosage en eau totale (l/m³)*8

v : Air piégé (l/m³)

c : Dosage en ciment (kg/m³)

K_1 : Coefficient pouzzolanique

K2 : Coefficient d'activité du filler calcaire

Le coefficient pouzzolanique K1 est donné par l'équation suivante :

$$K_1 = K_{cv} \times C_v / c + K_{fs} \times F_s / c \quad (1.10)$$

Avec $0,2 < K_{cv} < 0,4$

$2 < K_{fs} < 3,3$

$K_1 \leq 0,5$

K_{cv} et K_{fs} sont les coefficients d'équivalence en ciment des cendres volantes et de la fumée de silice.

C_v et F_s sont les dosages en cendres volantes et fumée de silice (kg/m³).

Le coefficient d'activité du filler calcaire K2 est donné par l'équation suivante :

$$K_2 = K_{fil} \times \frac{f_{fil}}{c} \quad (1.11)$$

Avec $0 < K_{fil} < 0,4$

$K_2 < 0,2$.

K_{fil} et f_{fil} sont respectivement le coefficient d'équivalence en ciment et le dosage (kg/m³) du filler calcaire. Cette formule permet de prendre en compte l'activité pouzzolanique des additions telles que les cendres volantes ou les fumées de silice et l'activité des fillers calcaires au niveau des résistances en compression. Il est sous-entendu dans la formulation de Feret [Ohama et al, 1986] que la formulation du béton est basée sur l'utilisation d'un ciment au clinker pur, type CEM I. L'utilisation d'un ciment composé type CEM II ou CEM III peut introduire un conflit dans la gestion des additions par cette formule. [Chadli, 2019].

I.7.3. Méthode empirique de formulation

L'expérimentation peut permettre de formuler un béton sans expliquer ou formaliser les phénomènes qui entrent en jeu dans la formulation des bétons. Les travaux menés par [Richard, 1995] ont abouti au début des années 90 à une nouvelle génération de bétons, dit Bétons à Ultra Hautes Performances, dépassant les 150 MPa en compression.

Les principes généraux de formulation peuvent être présentés comme suit :

- amélioration de l'homogénéité macroscopique du béton par réduction du diamètre du plus gros granulat.
- amélioration de la compacité par optimisation du squelette granulaire.
- réduction du rapport eau/liant.
- amélioration de la microstructure par traitement thermique après la prise.
- choix de constituants de très grandes qualités (dureté du sable, indice d'activité de la fumée de silice, classe vraie du ciment, pouvoir défloculant du superplastifiant).

Une compacité élevée du squelette granulaire est obtenue en augmentant l'étendue granulaire du squelette par adjonction d'ultrafines pouzzolanique (Bache, 1981) dont la dimension des particules est inférieure à celles des ciments. Selon le volume et la nature des fibres utilisées (acier ou carbone), la masse volumique des BFUP varie entre 2300 et 3000 kg/m³, la teneur en air est inférieure à 4% (généralement 2%).

Avec un pressage, la teneur en air peut atteindre un chiffre inférieur à 1%.

Deux formules types de BUHP sont présentées sur le (tableau I.6) avec ou sans quartz broyé et renforcé de fibres d'acier.

L'optimisation du dosage en superplastifiant des BUHP dépend généralement de la maniabilité souhaitée et de la facilité de mise en place dans les moules (coulabilité). Le dosage en superplastifiant est compris entre 1,8 et 3% en extrait sec par rapport au ciment. [Tafraoui, 2009].

I.7.4 En laboratoire

I.7.4.1. Exemple de formulation

Tableau I.6 : Formules types de BUHP. [Tafraoui, 2009].

Matériau	Sans quartz broyé		Avec quartz broyé	
	Proportions de la masse du ciment	kg/m ³	Proportions de la masse du ciment	kg/m ³
Ciment	1	934	1	740
Fumée de silice	0,25	234	0,32	240
Quartz broyé	-	-	0,30	220
Sable	1,10	1030	1,40	1050
Eau	0,23	215	0,20	150
Super plastifiant (% E.S)	1,40	13	1,80	13
Fibres d'acier (% en volume de béton)	2,4	187	2	150

I.8. domaine d'application des BPR

Les caractéristiques du BPR en font un matériau unique avec des possibilités d'utilisation dans une large gamme d'applications structurelles et non structurelles en raison de sa résistance supérieure et de son excellente durabilité. Ses applications dépassent alors le simple cadre du bâtiment et du génie civil.

❖ Génie civil et bâtiment

- structures triangulées : la passerelle de Sherbrooke est une structure triangulée de 60 m de portée. Elle illustre un des modes d'emploi du BPR

- poutres et poutrelles légères ;
- poteaux confinés ;
- dalles de ponts mixtes ;
- panneaux de façade ;
- voussoirs de tunnels.

❖ **Industrie**

- bâtis pour machines-outils ;
- dalles d'usure ;
- pièces pour l'emboutissage.

❖ **Traitement des déchets. Environnement**

- container pour le stockage de déchets radioactifs ;
- dalles filtres pour l'épuration des eaux usées ;
- coulis de blocage de déchets.

❖ **Protection. Sécurité**

- blindages légers
- coffres-forts. [Technique de l'ingénieur, 2009].



Figure I.8 : différent éléments structurels en BPR. [Malik, 2007]

I.9. Les avantages de BPR

Le BPR présente de nombreux avantages, résumé comme suit :

- ✓ Meilleure alternative au BHP.
- ✓ Le mécanisme de défaillance ductile haute tension élimine le besoin d'acier d'armature.
- ✓ Durabilité et durée de vie allongée.
- ✓ Amélioration des performances sismiques en réduisant l'inertie charges avec des membres plus légers.
- ✓ Une porosité faible et non interconnectée diminue la masse transfert.

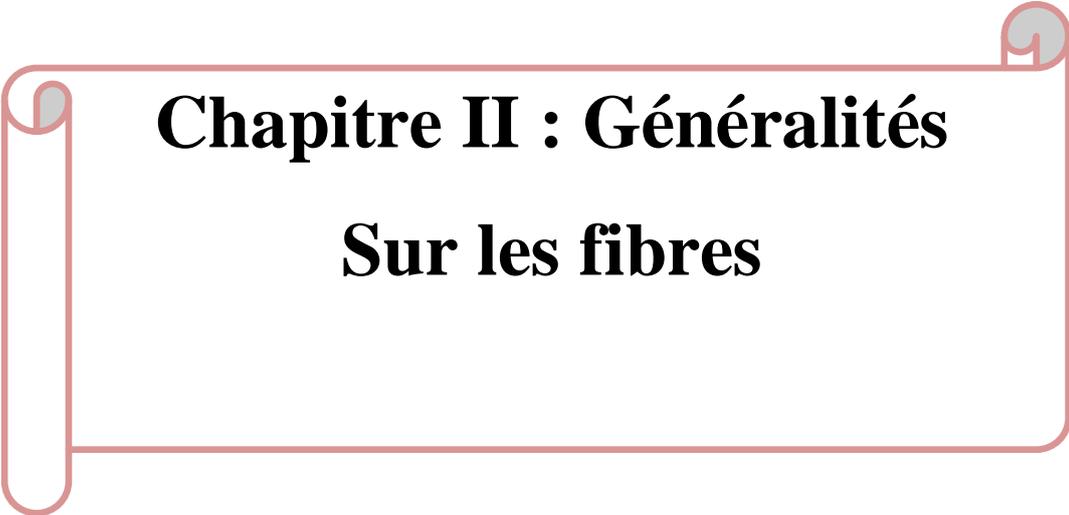
- ✓ Le principal avantage du RPC par rapport à la norme le béton est sa haute résistance à la compression.
- ✓ La construction RPC nécessite de faibles coûts de maintenance durée de vie.
- ✓ Meilleure performance aux chocs et à l'abrasion.
- ✓ Impact minimal sur l'environnement. [Abtan et al, 2019].

I.10. Les inconvénients du BPR

- ✓ La principale raison de ne favoriser pas l'utilisation du BPR est la nécessité d'utiliser des super plastifiants et des poudres fines, ce qui entraîne des coûts plus élevés.
- ✓ Tous ces avantages ont un coût et il est évalué à 15 voire 20 fois plus cher que le béton ordinaire

I.11. Conclusions

Ce chapitre est un recherche bibliographique avait pour objectif de faire de description des BPR, dans lequel nous avons collecté des informations sur le béton de poudre réactive : son histoire, sa définition, sa composition principale, ces propriétés mécaniques et domaines d'application, et on a parlé aussi d'une façon générale sur les additions minérales. Ensuite nous avons détaillé les performances mécaniques de cette nouvelle génération de béton, qui peuvent être encore améliorées par ajout de fibres et traitement thermique.



Chapitre II : Généralités
Sur les fibres

II.1. Introduction

Aujourd'hui, le béton fibré est une nouvelle approche dans le domaine des matériaux composites, et son champ d'application est très large. Les fibres jouent un rôle de renforcement qui compense la fragilité du béton par la réduction de la microfissuration et de la macro fissuration et le renforcement du béton avec des fibres constitue un bon moyen pour leur conférer une meilleure ductilité, réduit le retrait et s'oppose bien à l'apparition des fissures en les limitant au maximum.

Dans ce chapitre, nous présentons l'intérêt de la fibre dans le béton, ainsi qu'une présentation des différents types de fibre existant avec leurs caractéristiques géométriques, mécaniques, avantages, inconvénients et domaine d'application.

II.2. Définition de la fibre

Le terme "Fibre" se rapporte à un corps solide flexible, de forme sensiblement cylindrique, d'un diamètre de quelque centimètre dont la longueur égale à quelques milliers de fois ce diamètre. Ce terme est généralement aussi utilisé pour définir le constituant élémentaire des structures textiles. Par ailleurs, on distingue la fibre de longueur réduite ou fibre courte, de 20 à 150 mm, de la fibre de grande longueur ou filament continu. [Benali, 2010].

II.3. Définition d'un béton de fibre

Le béton de fibre est un matériau composite constitué d'une matrice béton et d'un renfort par incorporation d'une armature par inclusion directe de fibres isolées au moment du gâchage ou de la projection. Les fibres peuvent être comparées à un granulats spécial de forme allongée et avec une bonne résistance à la traction, capable d'augmenter la résistance à la traction d'un matériau et de freiner la propagation des fissures.

L'incorporation des fibres au sein du béton ne nécessite pas une matrice spécifique. En effet, la matrice d'un béton courant convient parfaitement à l'intégration des fibres. D'autre part, la forme et la nature de certaines fibres nécessitent un ajustement du rapport eau/liant. Chaque type de fibres est utilisé pour le renforcement d'un béton pour des fins précises. En effet, suivant la forme ou la teneur de fibre incorporée, des propriétés spécifiques sont assimilées au béton de fibre par la suite. [Benouadah, 2019].

II.4. Critère de choix du type des fibres

Il existe différents types de fibres dont les caractéristiques chimiques, physiques et mécaniques diffèrent selon leurs natures ou leurs géométries. Les fibres couramment utilisées pour la fabrication de bétons renforcés de fibres sont généralement métalliques, synthétiques, de verre ou naturelles. Selon leur utilisation, ces différents types de fibres présentent des

avantages ou des inconvénients. Certaines sont affectées par des dégradations chimiques dans les matériaux cimentaires ou présentent un mauvais comportement dans les milieux alcalins (certaines fibres de verre ou fibres naturelles).

Leur géométrie est très variable. 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. [Djelouahi, 2017].

Il existe des fibres à crochets. Leurs extrémités recourbées développent un ancrage et dissipent une énergie de fissuration par plastification de la fibre 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.

L'élanement ou le rapport longueur / diamètre joue un rôle prépondérant dans la maniabilité d'un béton renforcé de fibres (notamment métallique) pour un dosage en fibre donné plus l'élanement est important, plus la maniabilité du béton diminue. [Tabet, 2012].

II.5. Les différentes nature des fibres

Les fibres sont classées selon leur origine (naturelle, ou artificielle), leur forme (droite, lisses, crantées, ondulées, bi-ondulées, crochet, munies de cônes aux extrémités ondulée, aiguille...etc.), leur dimension (macro ou microfibrés), et aussi par leur propriété mécanique. [Saoudi, 2016].

Les différentes fibres actuellement disponibles peuvent être classées selon leur origine en trois grandes familles de fibres :

- Fibres naturelles minérales et végétales : amiante, cellulose
- Fibres artificielles organique : polyamides, polypropylène, acrylique, kevlar, aramide.
- Fibres artificielles minérales : les fibres d'acier, les fibres de fonte, les fibres de verres, les fibres de carbone, amianteetc. Ces fibres sont utilisées dans le domaine industriel et particulièrement dans le domaine de génie civil. [Nassah, 2017].

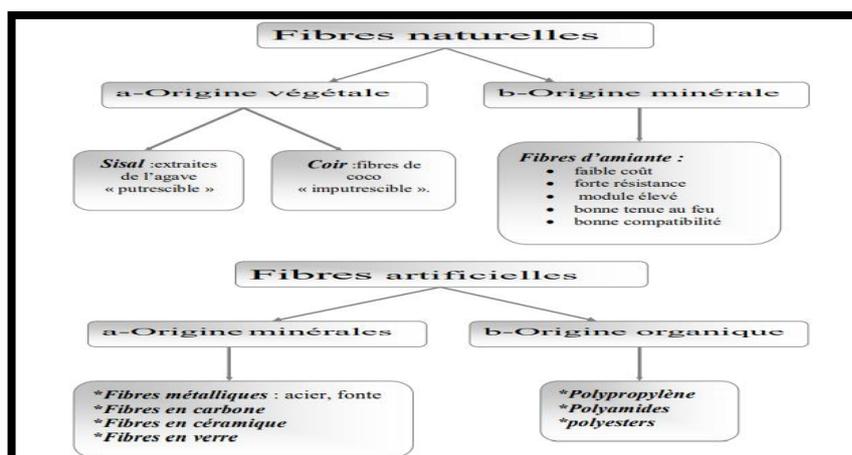


Figure II.1 : nature de fibre. [Chafi, 2005]

II.6. Différents types de fibres

a. Les fibres de cellulose

La principale fibre naturelle végétale utilisée est la cellulose (Figure I.1), ces fibres sont obtenues à partir du bois par différents processus chimiques et mécaniques. Elles étaient utilisées pendant des années comme additif au ciment d'amiante. Aujourd'hui, elles sont utilisées principalement pour renforcer les matrices cimentaires destinées à la fabrication des plaques minces utilisées dans l'isolation phonique et thermique des murs [Belghanem et Dib, 2017].



Figure II.2 : la représentation de la fibre de cellulose. [Belghanem et Dib, 2017]

b. Les fibres de verre

Ces fibres sont fabriquées à partir de verre fondu qui passe dans une filière, chauffé par effet Joule, qui comporte 50 à 800 trous d'un diamètre de l'ordre de 10 à 100 μm . Elles sont disponibles dans le commerce sous forme de bobines (découpage à la demande) ou sous forme de morceaux prédécoupés de 3, 6, 12, et 50 mm de long. Ils sont regroupés en trois types : La fibre de verre classique (silice, soude, chaux), la fibre de verre au zirconium et la fibre de verre au borosilicate.

Ces fibres sont généralement caractérisées par les propriétés suivantes :

- bonne adhérence avec la matrice,
- disponibilité sous toutes les formes (coupées, continues ...).
- bonne résistance à l'humidité et à la corrosion.
- conductivité thermique relativement faible. [Arab et Rafai, 2017].



Figure II.3 : Fibre de verre. [Chouiter, 2016]

d. Les fibres de polypropylène

Les fibres de polypropylène sont fabriquées depuis 1954 par l'industrie textile. Le polypropylène est un polymère cristallisable de la famille des polyoléfinés des produits chimiques. Où ils apportent les avantages suivants :

- Disponibilité à prix relativement faible.
- Résistance aux attaques en milieux alcalins et corrosifs.
- Augmentation notable de la résistance aux chocs.
- Limite l'ouverture des fissures.

Ces fibres sont fréquemment utilisées dans le bâtiment, en particulier dans la réalisation des panneaux décoratifs, revêtement de façades, de tuyaux et pieux [Haddadou, 2015].

Les fibres de polypropylène sont en général assez longues (30 à 60 mm), légères et ne sont pas attaquées par le ciment. Leur module d'élasticité est plus faible que la pâte durcie. Il convient de les utiliser de préférence pour les pièces minces devant résister, soit à l'action corrosive de certaines ambiances dans lesquelles l'acier pourrait se corroder rapidement, soit aux chocs mécaniques.

Comme la plupart des matières plastiques, les fibres de polypropylène sont peu résistantes au feu : leur température de fusion est d'environ 160 °C mais leur fusion n'affecte pas la résistance du béton. [Meddahi et al, 2016].



Figure II.4 : Les fibres de polypropylènes. [Djelouahi, 2017]

f. Les fibres métalliques

Ce type de fibres, qui regroupe les fibres d'acier et les fibres de fonte amorphe, a été et reste encore l'objet de recherches très importantes dans le monde. Dans la présente étude, nous nous sommes intéressés à la fibre métallique (acier) qui est sans doute les plus utilisées dans le domaine du génie civil. Vu 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. L'adhérence fibres-matrice (béton) est ainsi meilleure.

Il existe sur le marché, une panoplie de fibres métalliques d'acier, voici quelques types de fibres :

- fibres ondulées - crantées - torsadées-droites ;
- fils, rubans ;
- fibres à extrémités aplaties, à crochets, à têtes coniques, etc.... [Azizi et Aissou, 2016].

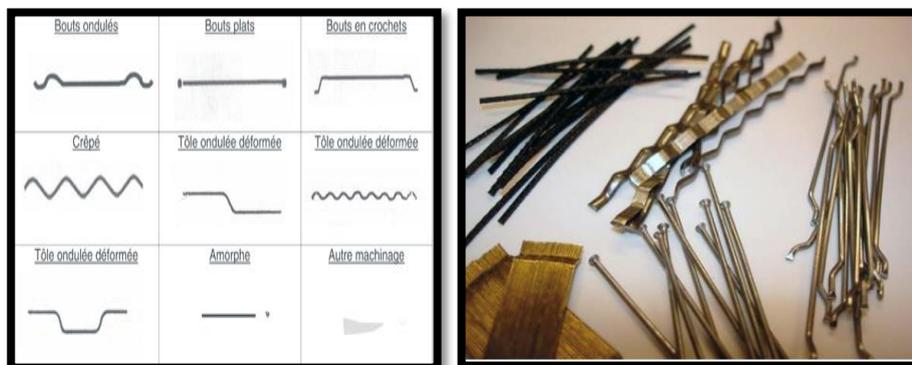


Figure II.5 : Géométrie des fibres métalliques Figure II.6 : Différentes forme de fibres.

[Azizi et Aissou, 2016]

II.7. Les caractéristiques et les propriétés des fibres

Pour faciliter leur utilisation, les fibres doivent :

- Être faciles à incorporer dans le béton et ne pas perturber le malaxage (leur dispersion dans le béton doit être rapide) ;
- Se répartir de manière homogène lors du malaxage au sein du béton (pas d'agglomération de fibres) lors du bétonnage.
- L'influence des fibres sur la maniabilité du béton dépend de leur dimension et de leur dosage.

Pour améliorer les performances mécaniques des bétons (ductilité, résistance en flexion, résistance aux chocs, etc.), elles doivent :

- Être déformables sans être fragiles
- Être relativement longues et fines et présenter une grande surface spécifique
- offrir une bonne capacité de déformation
- Posséder un module d'élasticité plus élevé que celui de la matrice cimentaire
- Présenter une bonne adhérence avec la pâte de ciment [Djelouahi, 2017].

Chaque famille de fibres présente des caractéristiques et des propriétés spécifiques

Tableau II. 1 : Les caractéristiques et les propriétés des fibres. [Khetta, 2015]

Caractéristiques et propriétés spécifiques de chaque famille de fibres					
	Masse volumique (en g/cm ³)	Diamètre moyen (en µm)	Résistance à la traction (en N/mm ²)	Module d'élasticité (en GPa)	Allongement à la rupture (en %)
Fibres métalliques	7,85	50 - 1 000	1 000 - 2 500	150 - 200	3 - 4
Fibres de verre	2,6	9 - 15	2 000 - 3 000	80	2 - 3,5
Fibres polypropylène	0,9	> 4	500 - 750	5 - 10	10 - 20

II.8. Rôles des fibres dans le béton

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

- Le contrôle de la propagation d'une fissure dans un matériau en état de service en réduisant l'ouverture des fissures, comme schématiquement illustré par (la Figure II.7.a).
- La transformation du comportement fragile d'un matériau en un comportement ductile qui accroît la sécurité lors des états de chargement ultimes (Figure II.7.b).

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.

En réalité, les fibres ont des effets sur les performances mécaniques des bétons dans tous les modes de rupture. [Fritih, 2009].

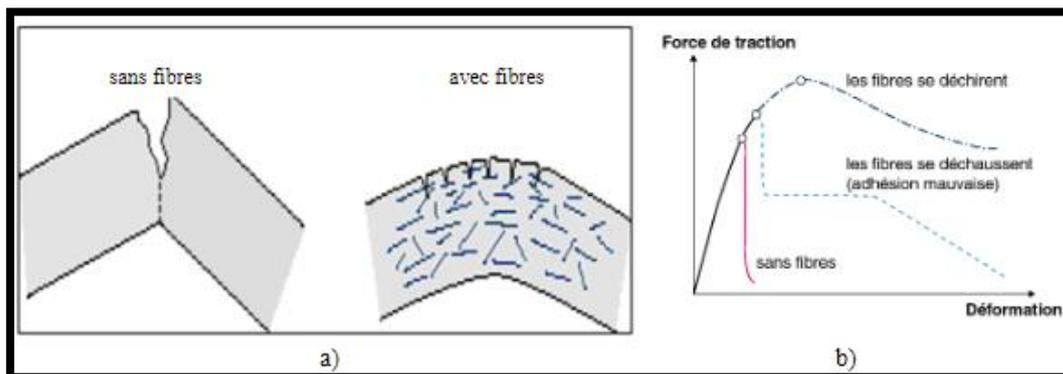


Figure II.7 : Illustration de l'apport du renfort par des fibres. [Fritih, 2009]

II.9. Domaines d'application des fibres

La recherche et le développement ont permis d'appliquer un concept de renforcement structural à différents types d'ouvrages en béton. De par leurs propriétés, les fibres trouvent un vaste domaine d'applications où il faut réduire les risques de fissuration, augmenter la résistance aux impacts et tirer parti de l'amélioration de la performance du béton pour optimiser le dimensionnement des ouvrages. Le béton fibré est utilisable dans tous les domaines du génie civil, aussi bien dans les constructions industrielles, commerciales et institutionnelles que résidentielles. [Azizi et Aissou, 2016].

Tableau II.2 : domaines d'application privilégiée par type des fibres. [Chouiter, 2016]

<i>Domaines d'application privilégiés par type de fibres</i>			
<i>Type de fibres</i>	<i>Dosage courant</i>	<i>Domaine d'application privilégié</i>	<i>Exemples d'application</i>
Fibres métalliques	0,5 à 2 % en volume 40 à 160 kg/m ³	Renfort pour bétons structurels et armature structurelle	<ul style="list-style-type: none"> - Dallages, sols industriels, planchers, dalles de compression - Éléments préfabriqués – voussoirs de tunnels, poutres, conteneurs, tuyaux - Bétons projetés en travaux souterrains, stabilisation de pente et ouvrages d'assainissement - Pieux de fondation, semelles filantes
Fibres polypropylène	0,5 à 2 % en volume 0,5 à 2 kg/m ³	Limitation de la fissuration liée au retrait Amélioration de la tenue au feu des bétons	<ul style="list-style-type: none"> - Dallage - Voussoirs de tunnels - Revêtement d'ouvrages souterrains - Mortiers projetés - Parements esthétiques
Fibres de verre	1 à 2 %	Réalisation d'éléments préfabriqués très minces	<ul style="list-style-type: none"> - Parements architectoniques - Panneaux de façade - Éléments décoratifs

II.10. Les avantages et les inconvénients des fibres

➤ Les avantages

- Ils ne rouillent pas : ils ne sont pas corrosifs Toutes les fibres sont désirables dans des environnements carbonatés. Ils sont résistants aux environnements agressifs, comme les ions chlorurent.
- Ils sont insensibles aux courants électromagnétiques, à un degré moindre pour les fibres de carbone.
- Ils ont une bonne résistance en traction et un faible poids.
- Ces qualité font des fibres un substitut idéals dans la structure est exposée à des agents corrosifs (sel de déverglaçage, environnements marins, gaz carbonique, gaz corrosifs, produits chimiques) [Belaribi, 2007]

➤ les inconvénients

- Coût trop élevé (2 à 50 fois celui de l'acier).
- Un module d'élasticité relativement faible, sauf pour les fibres de carbone.
- Absence de déformation plastique.
- Grand rapport de la résistance axiale sur la résistance latérale.
- Perte de résistance sous charges retenues.
- Dégradation au contact des rayons Ultra-violet.
- Réaction des fibres de verre avec les alcalis.
- Un manque d'expérience d'utilisation des fibres.[Belaribi, 2007]

II.11. Facteurs influant sur le comportement d'un béton renforcé de fibres

On observe une différence de comportement sous sollicitation du béton renforcé de fibre et du béton traditionnel. Leurs courbes effort-déformation sont très différents. Il en résulte certaines modifications dans les propriétés du béton.

Les principaux paramètres qui ont un effet sur le comportement de béton sont les suivants :

- Pourcentage des fibres,
- longueur des fibres (rapport, longueur sur le diamètre),
- forme des fibres (ondulée, droite, plate ...).
- nature des fibres, (métallique, synthétique ...).
- Distribution des fibres et leur orientation vis-à-vis de la direction de l'effort et béton (formation, dimension des granulats, teneurs, ciment maniabilité). [Hemil, 2018].

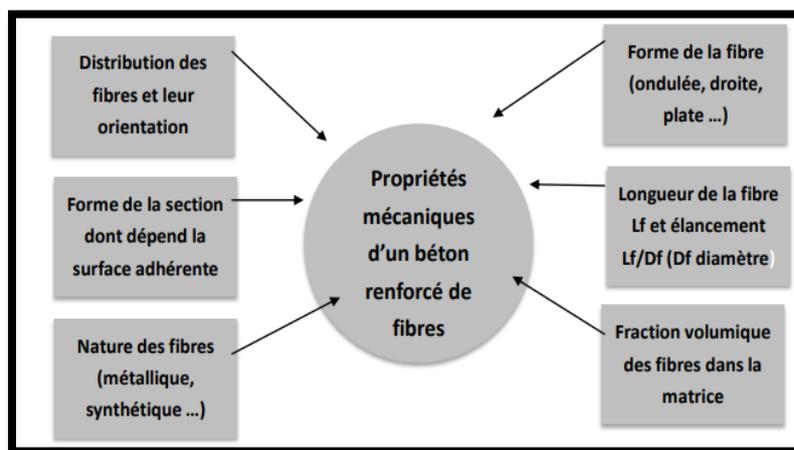


Figure II.8 : Différents facteurs influant sur le comportement mécanique d'un béton renforcé de fibres. [Meddah, 2014]

II.11.1. Nature des fibres

Généralement, l'amélioration des propriétés de béton fibrés est fonction de type de fibre incorporé dans le béton. En effet, la prénorme matériaux BFUP (PR NF P18-470) préconise l'utilisation des fibres métalliques pour les BFUP structuraux, et les fibres synthétiques dans le cas de BFUP non structuraux. Par rapport à nos objectifs de formuler des BFUP structuraux, nous traitons ici uniquement le cas des fibres métalliques. [Chadli, 2019].

II.11.2. Distribution des fibres et leur orientation

La principale cause qui affecte l'orientation préférentielle des fibres est la mise en place du béton lors de coulage, en effet lors de coulage de béton les fibres s'orientent suivant l'axe de l'écoulement puis parallèlement aux parois au fur et à mesure que le béton remplit le coffrage. Aussi la vibration peut causer une orientation préférentielle des fibres suivant l'axe de

vibration. Les travaux menés par [Casanova, 1996] ont montré une parfaite corrélation entre l'orientation préférentielle des fibres et le comportement mécanique en traction suivant les trois directions. Quand les fibres sont orientées perpendiculairement au plan de la fissure (carottes horizontales), les éprouvettes présentent un bon comportement à la traction, avec une meilleure résistance résiduelle. Dans ce cas, les fibres assurent un transfert optimal des contraintes à travers la fissure. A l'inverse, lorsque les fibres sont orientées préférentiellement parallèlement au plan de la fissure (carottes verticales), ce comportement est semblable à celui d'un béton sans aucun renfort de fibres. Dans le cas intermédiaire (carottes diagonales), le comportement post pic est amélioré, mais de façon limitée en raison de l'orientation des fibres intermédiaire (Figure II.9).

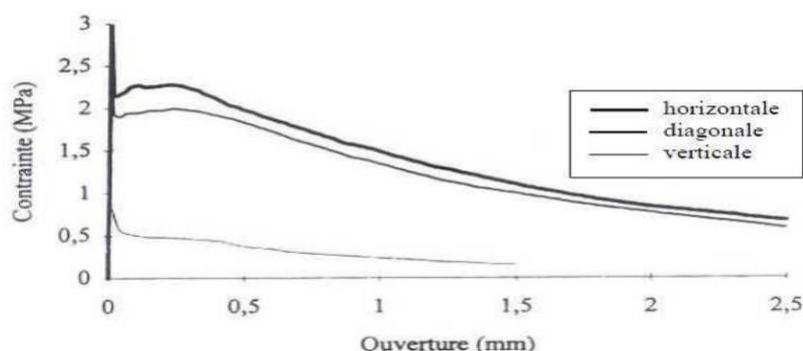


Figure II.9 : Influence de la direction du carottage sur le comportement en traction d'un béton fibré [Casanova, 1996].

Ainsi, plusieurs auteurs ont montré que les fibres orientées perpendiculairement à l'axe de la sollicitation reprennent efficacement la fissuration, alors qu'une orientation préférentielle parallèle à l'axe entraîne une baisse de l'effort maximum. [Meddahi et al, 2016].

II.11.3. Forme et Longueur et de la fibre

Pour la majeure partie des applications industrielles actuelles ou potentielles, L'élanement ou le rapport longueur/diamètre joue un rôle primordial dans la maniabilité d'un béton renforcé de fibres (notamment métalliques BFM). Pour un dosage en fibre donné, plus l'élanement est important, plus la maniabilité du béton diminue. On peut essayer d'expliquer cette constatation empirique de la manière suivante :

- Si on raisonne à longueur de fibre donnée et pour un même dosage, plus la fibre aura un diamètre petit, plus la surface spécifique de la fibre sera importante, et plus le nombre de fibres sera grand. La surface spécifique plus grande conduit à des frottements plus importants entre la fibre et la matrice, alors que le plus grand nombre de fibres conduit à

une probabilité plus élevée de contacts entre fibres. Ces deux facteurs expliquent parfaitement la perte de maniabilité observée lorsque le rapport longueur /diamètre de la fibre donné et pour un dosage donné, plus le diamètre de la fibre est petit, plus la fibre doit être courte et inversement.

- Si on raisonne à rapport longueur /diamètre de fibre donné et pour un dosage donné, plus le diamètre de la fibre est petit, plus la fibre doit être courte et inversement.

Dans ce cas, si on se réfère au raisonnement précédent, on aboutit à la conclusion que plus la fibre est courte, plus elle perturbe la matrice du point de vue rhéologique, et donc une diminution de la maniabilité, ce qui constitue un résultat inverse de réalité expérimentale, car il est connu que, pour des rapports longueur /diamètre voisins, une fibre courte conduit à une meilleure maniabilité qu'une fibre longue. [Chafi, 2005].

En fait, il intervient un autre facteur, qui est le poids unitaire de la fibre. En effet, 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. [Meddahi et al, 2016].

II.11.4. Dosage en fibre

Le taux de fibre incorporé a une influence directe sur les propriétés de béton à l'état frais et durci. En effet les travaux menés par [Abdul Ghaffar, 2014] ont montré que :

- l'ouvrabilité diminue avec l'augmentation de la teneur en fibres métallique
- La résistance à la compression et à la flexion augmente avec l'augmentation du pourcentage des fibres pour arriver à un maximum correspond à un dosage respectivement de 3,0% et 4,0%, des fractions volumiques de fibres.
- En général, l'amélioration satisfaisante dans différents dosages est observée avec l'inclusion de fibre en acier dans le béton ordinaire. Cependant, le gain maximal de la résistance du béton se trouve à dépendre de la quantité de teneur en fibres.
- La ductilité du béton se trouve à augmenter avec l'inclusion de fibres à teneur élevée en fibres.[Meddahi et al,2016].
- D'après (Yang et al. 2009), un dosage en fibres de 2% volumique procure un rapport performances mécaniques/prix optimal. Selon des recommandations récentes (AFGC 2013 et PR NF P18-470), la teneur volumique minimale en fibres garantissant la non-fragilité du matériau doit être équivalente ou supérieure à 2% [Chadli, 2019].

II.12. Le comportement de BFM à l'état Frais

La maniabilité des bétons est affectée de manière significative par l'addition de fibres : la porosité du squelette granulaire est d'autant plus grande que le volume de fibres est important. Pour que les fibres soient efficaces à l'état durci, il est recommandé de choisir des fibres plus longues que la taille du plus gros granulat (Johnston, 1996) suivant des proportions supérieures de 2 à 4 fois. Si le béton est destiné à être pompé, il préconise de réduire le volume de granulats bruts de 10% par rapport au béton ordinaire pour faciliter l'opération.

L'introduction de fibres entraînant une diminution de l'affaissement estimé entre 50 et 75 mm, l'ajout d'un superplastifiant est donc fortement conseillée afin de remédier à cette perte d'ouvrabilité. [Fritih, 2009].

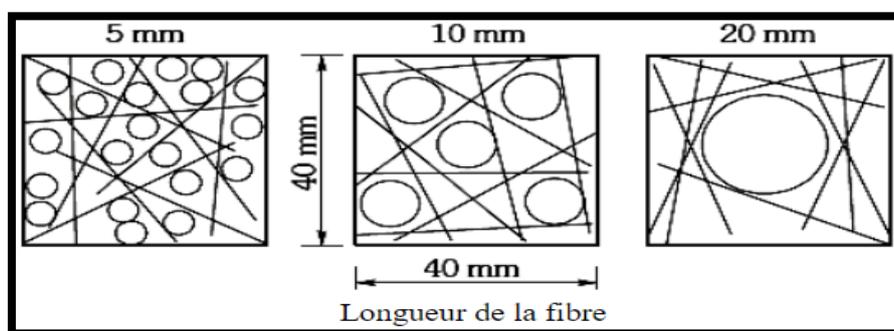


Figure II.10 : Effet de la taille des granulats sur la distribution de fibres. [Fritih, 2009]

Les travaux de [Antonio, 2015] Sur le l'influence des fibres métallique sur la maniabilité de béton montrent que l'ajout de fibres dans le béton plastique modifie sa mobilité, même si ces teneurs sont inférieures à celles étudiées dans les travaux précédents. La perte de mobilité se produit principalement par le fait que les fibres bloquent le mouvement relatif des agrégats qui est moins intense lors de la réduction du rapport d'aspect de la fibre, ce qui provoque une réduction de la résistance post-fissuration FRC durcie. Une meilleure solution pourrait être obtenue en réduisant la taille maximale de l'agrégat ou en augmentant la teneur en mortier dans le béton. Ainsi, l'utilisation d'une méthode de conception de mélange appropriée, compte tenu de l'effet des fibres, est nécessaire pour garantir des conditions de maniabilité adéquates pour le béton renforcé de fibre.

AR60 : fibre de longueur 60 mm et $\varnothing= 1\text{mm}$, AR80 : fibre de longueur 80 mm et $\varnothing=0.75\text{mm}$.
AR100 : fibre de longueur 100 mm et $\varnothing=0.6\text{mm}$.

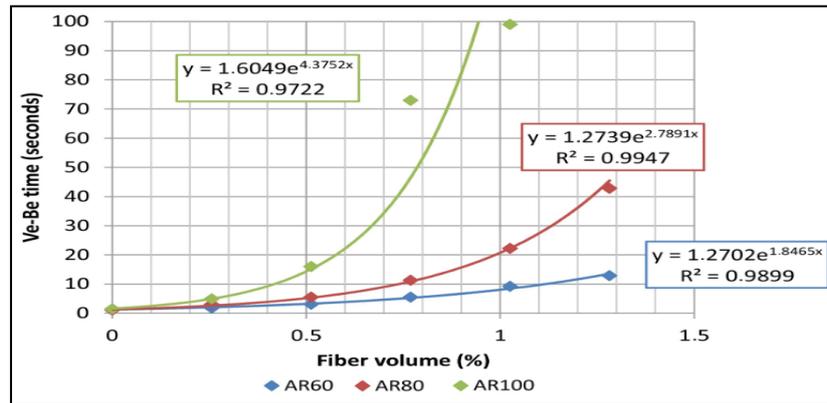


Figure II.11 : Corrélations exponentielles entre le temps Ve-Be et la teneur en fibres des bétons avec différents rapports d'aspect des fibres. [Antonio, 2015]

II.13. Comportements des BFM à l'état durci

II.13.1. Comportement en compression

Les résultats mis en évidence par différents chercheurs sur l'effet des fibres sur la résistance à la compression du béton renforcé de fibres montrent quelques divergences. Cependant ils sont d'accord pour dire que les fibres n'apportent pas d'amélioration appréciable en compression. Dans certains cas, on a une légère augmentation de la contrainte ultime, dans d'autres une légère diminution.

Les fissures créées ne permettent pas aux fibres d'être sollicitées suffisamment pour améliorer significativement le comportement du béton. [Meddah, 2014].

Les résistances à la compression de béton de fibres métalliques sont inférieures à celles de bétons sans fibres. Et que la présence des fibres dans la matrice permet d'améliorer la ductilité des éprouvettes. Cet effet est dû aux fibres qui continuent à "coudre" les fissures qui se produisent. Ainsi, la rupture fragile caractéristique du béton traditionnel n'est plus observée en présence des fibres. [Chafi, 2005].

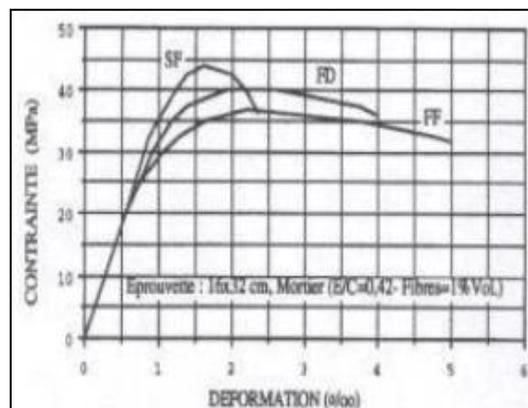


Figure II.12 : Courbes " contrainte-déformation" en compression. [Chafi, 2005]

[Setti et al, 2012] a constate que la résistance à la compression évolue en fonction du temps ; quel que soit le dosage des fibres utilisées. Ce gain dépend de la concentration et de la géométrie de ces fibres et atteint à 7 jours, une valeur maximale de 11, 21 et 29 % pour un dosage volumique en fibres respectivement de 0.5, 1 et 1.5%. Cette amélioration peut être attribuée à l'adhérence mécanique des fibres qui permet d'augmenter la capacité à retarder la formation des fissures et arrêter leur propagation .Les bétons fibrés âgés de 3, 28 et 90 jours présentent des gains de résistances semblables vis-à-vis de la présence des fibres. Pour un béton de 1% de fibres métalliques, on voit que la résistance à la compression à 28jours augmente de 15 %. La longueur des fibres utilisées est de 50 mm et 0.75mm d'épaisseur.

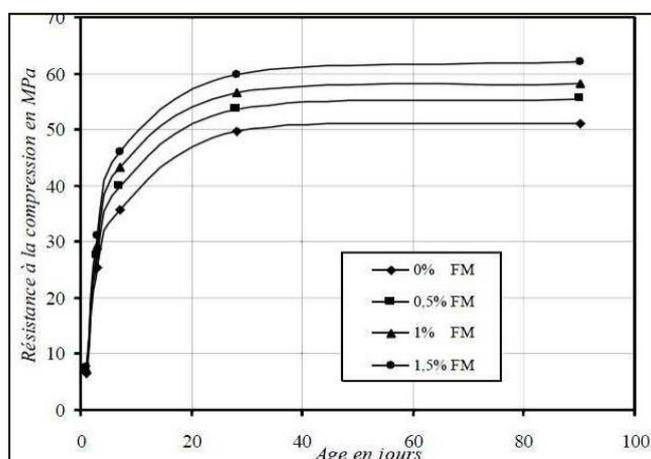


Figure II.13 : Évolution du gain de résistance compression du béton renforcé de fibres.

[Setti et al, 2012]

[Boulekbache, 2013] a constate que le matériau avec 1 % de fibres présente un comportement mécanique très amélioré par rapport au matériau avec 0,5 % surtout au niveau du pic. Les deux bétons (avec 1% et 0.5 % de fibre) présentent une résistance nettement plus grande que le béton témoin voir Figure II.14.

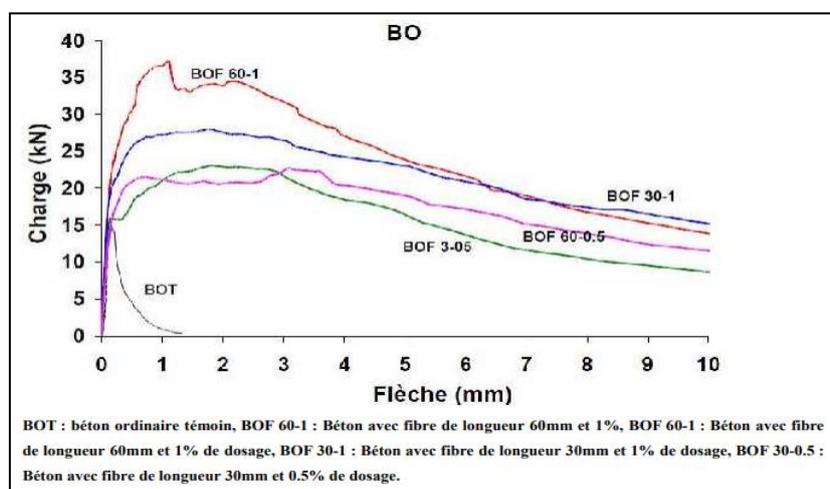


Figure II.14 : Courbes charge-flèche des bétons testés. [Boulekbache, 2013]

II.13.2. Comportement en Traction

Peu d'essais ont été réalisés en traction directe, car l'essai est délicat et coûteux. D'après la littérature, les augmentations de résistance en traction dues aux fibres sont variables. D'une manière générale, on peut dire que les améliorations constatées dépendent essentiellement de la forme des éprouvettes, du type d'essais, de paramètres liés à la géométrie et au pourcentage volumique des fibres utilisées, et bien sûr au béton témoin retenu.. L'effet des fibres est donc surtout perceptible en traction. Un béton sans renforts, une fois fissuré, n'est capable de supporter que de faibles efforts par endommagement. Ceci se traduit par une chute brutale de contraintes reprises, comme le montre la courbe de comportement en traction directe correspondant à une teneur en fibre de 0% sur la figure II. 15. Avec un renfort de fibres, les contraintes dans la fissure sont transmises au béton. Les fibres, en cousant la fissure, assurent une continuité structurale et permettent au béton d'avoir un comportement ductile en lui conférant une capacité portante post-fissuration. [Meddah, 2014].

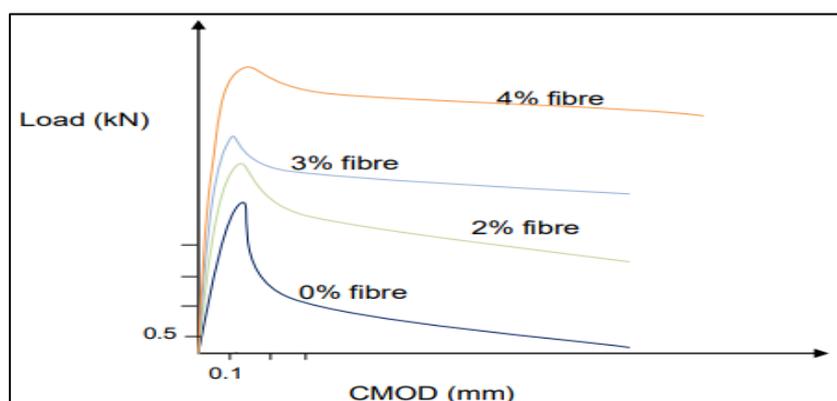


Figure II. 15 : Comportements en traction directe en fonction du pourcentage en fibres.

[Meddah, 2014]

II.13.3. Comportement en Flexion

Le renforcement par des fibres métalliques est utilisé pour améliorer la ductilité et fournir un contrôle du mécanisme de fissuration. L'amélioration de la résistance de première fissuration est ordinairement un gain secondaire. En flexion, contrairement à ce qui est généralement observé en traction directe avec ce type de fibres, la structure fissurée peut reprendre des efforts bien supérieurs à ceux relevés lors de l'apparition de la première fissure. Un peu comme en béton armé classique, la déformation de flexion s'accompagne du développement d'une fissuration et du déplacement vers le haut de l'axe neutre. [Bentalha, 2007].

[Setti et al, 2012] ont constatés que la résistance à la flexion du béton augmente en fonction du temps, et que l'ajout de fibres d'acier engendre une nette augmentation telle qu'on obtient une résistance qui double de valeur en présence de 1.5% de fibres (Figure II.16).

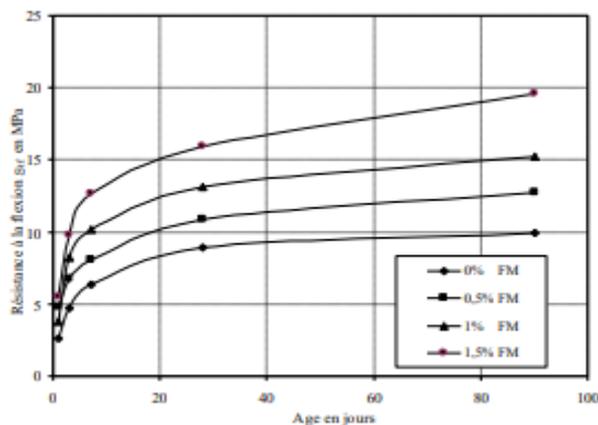


Figure II.16. Résistance à la flexion du béton renforcé de fibres en fonction du temps. [Setti et al, 2012]

II.13.4. Module de Young

Le module de Young est une caractéristique qui conditionne la rigidité de matériaux. Il est défini comme étant la pente de la partie droite de diagramme contrainte déformation. Voir Figure ci-dessous.

[Ellouze, 2005] a constaté que le module de Young augmente avec l'ajout des fibres métalliques par rapport au béton sans fibre, L'amélioration du module de Young peut s'expliquer à l'aide de la loi des mélanges.

Tableau II. 3: Résultats des essais de compression et le module de Young des BFM. [Ellouze, 2005]

Essais	BA	BFC	BFL	BFC + L
Résistance f_{c28} (Mpa)	48,2	53,8	53,2	58,9
Module E (MPa)	33025	46275	45862	49000

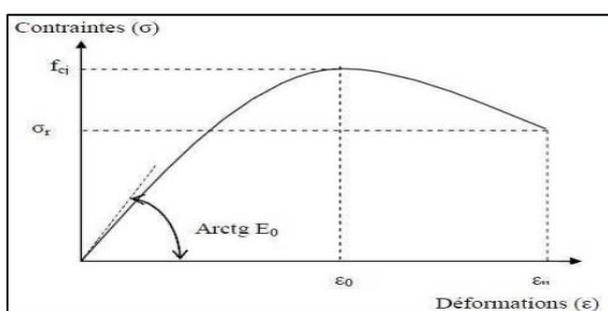


Figure II.17 : Exemple de diagramme contrainte - déformation en compression (E0 module de Young). [Meddahi et al, 2016]

Selon les travaux [Djebali, 2013] l'ajout des fibres (type spiral et de 30 à 40 mm de longueur) en faible pourcentage apporte une légère augmentation de la rigidité (3% à 4%) en compression, néanmoins avec l'augmentation du volume des fibres le module tend à baisser, cette diminution peut être expliquée par la baisse de compacité du matériau. La teneur optimale en fibre pour un module max est 4% voir Figure II.18.

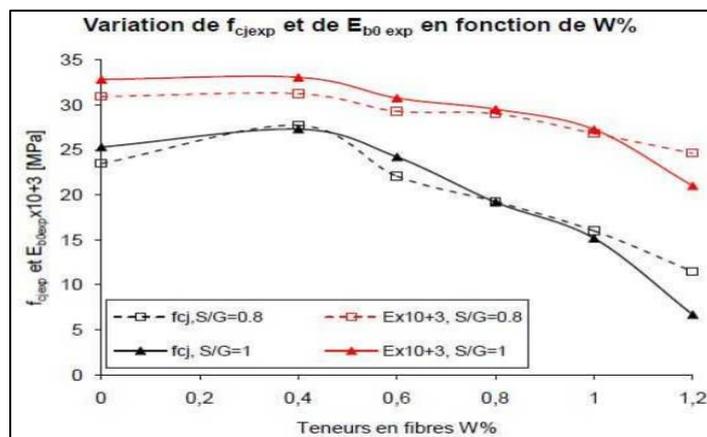
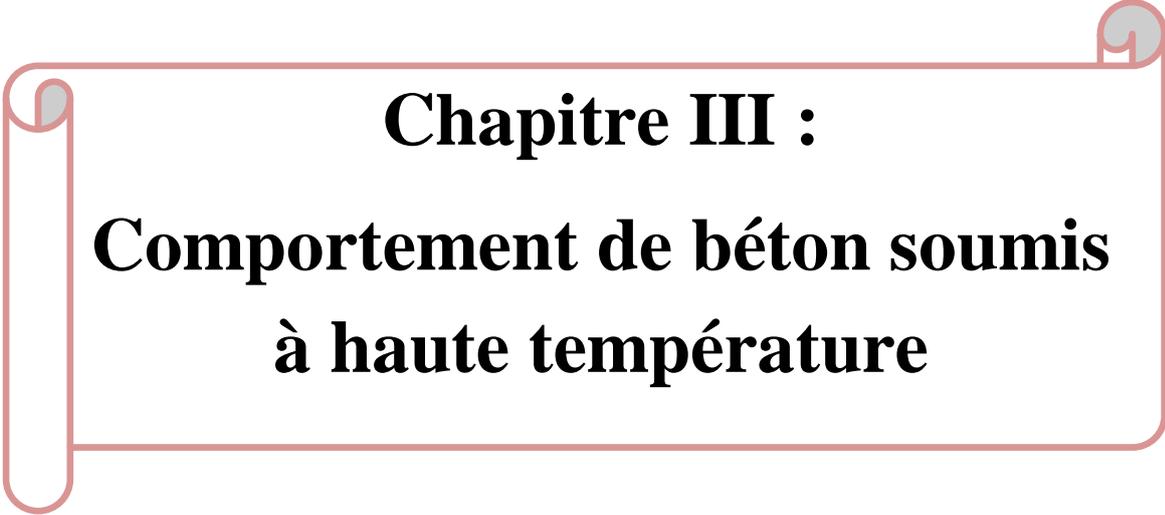


Figure II.18 : Évolution de la résistance en compression et du module de Young expérimental en fonction de la teneur en fibre [Djebali, 2013].

II.14. Conclusion

Dans ce chapitre, nous résumons l'état des connaissances sur l'histoire et le comportement mécanique du béton fibré, les types, avantages et inconvénients de chaque type de fibre, ainsi que l'effet de la présence de fibres dans le béton.

En conclusion, l'introduction de fibres dans le béton a un effet positif d'un point de vue économique et technique, donc la géométrie des fibres, leur adhésion à la matrice du béton et sa proportion et son orientation jouent un rôle important dans le béton.



Chapitre III :
**Comportement de béton soumis
à haute température**

III.1. Introduction

Le béton est un matériau qui s'endommage sous l'effet de la température, il subit de fortes modifications physico-chimiques qui influencent l'évolution de ses propriétés mécaniques et modifie sa microstructure.

L'intérêt de ce chapitre est de faire un aperçu sur les connaissances et les résultats expérimentaux requis par différents chercheurs sur le comportement du béton à des hautes températures. Cette étude portera d'une part sur l'évolution des propriétés physiques, thermiques ainsi que les propriétés mécaniques, les phénomènes de transfert de chaleur et de masse du béton lorsqu'il est soumis à une température élevée et d'autre part sur les mécanismes de l'instabilité thermique du béton avec les paramètres pouvant influencer cette dernière.

III.2. Evolution des propriétés physique du béton**III.2.1. Dégradation de l'interface pâte-granulats**

Dans le béton, l'interface pâte/granulats est la partie la plus poreuse et la plus fragile. A haute température, cette partie se dégrade progressivement. Ceci est dû au départ de l'eau adsorbée entourant les granulats, qui favorise le développement des fissures au niveau de cette zone, et à la dilatation différentielle entre la pâte de ciment et les granulats.

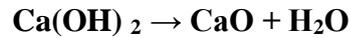
La pâte de ciment se dilate jusqu'à la température de 150°C. Cette dilatation est supérieure à celle des granulats, donc les fissures se développent à l'interface pâte/granulats par décohesion (fissures tangentielles). Au-delà de 150°C, la matrice cimentaire subit un retrait tandis que les granulats subissent une expansion. Cette dilatation différentielle engendre des fissures radiales au sein de la matrice cimentaire. [Hachemi, 2015].

III.2.2. Transformations physico-chimiques de la pâte de ciment durcie

Au sein du matériau béton se déroulent de nombreuses réactions chimiques avec des cinétiques plus ou moins rapides. Ainsi tout au long de la vie du béton, celui-ci est sensible aux conditions d'humidité et de température de son environnement qui modifient ses caractéristiques macroscopiques (durabilité, résistance...), nous présentons maintenant les intervalles de température pour lesquels se produisent des changements physico-chimiques de la pâte de ciment et du béton ordinaire. L'élévation de la température entraîne les processus suivants :

- Entre 30° C et 120° C : l'eau libre et une partie de l'eau adsorbée s'évaporent, et aussi une décomposition de l'étringite et son élimination complète avant 100° C.
- Entre 130° C et 170° C : le gypse se décompose.

- En dessous de 100° C jusque 400° C le gel C-S-H se déshydrate essentiellement en β -C₂S, β -CS et en eau.
- Entre 450° C et 550° C : décomposition de la Portlandite selon l'équation :



- Autour de 570° C : transformation des granulats quartziques de la phase α a la phase β . Ceci s'accompagne d'un gonflement.
- entre 600° C et 700° C : deuxième phase de déshydratation du gel C-S-H. - a partir de 650° C : décomposition endothermique du calcaire selon l'équation :



- A partir de 1300° C : début de fusion de la pâte et des granulats, éliminations des sulfates et évaporations des alcalins. [Missemer, 2011].

III.2.3. Evolution de la porosité

La porosité C'est l'un des importants paramètres caractérisant la microstructure des bétons. Celle-ci peut se définir comme les espaces vides d'un matériau qui se présentent entre les phases solides. Quand le béton est soumis à de hautes températures, les changements physiques et chimiques se produisant au sein des phases solides, engendrent des changements dans la porosité totale et également dans la distribution de tailles des pores. La mesure de la porosité à l'eau ou au mercure de bétons chauffés a fait l'objet de plusieurs études. Il est intéressant de noter que les mesures de la porosité à l'eau sont supérieures à celles de la porosité mesurée par intrusion de mercure. Les résultats ont montré une augmentation de la porosité avec la température pour le béton ordinaire ou le béton à hautes performances en présence ou non de fibres. [Rahmani, 2019].

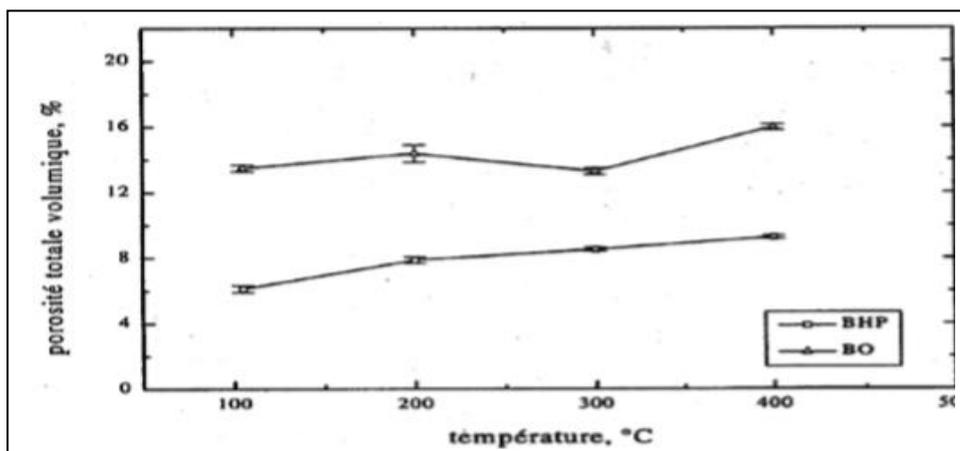


Figure III.1 : Porosité totale à l'eau en fonction de la température de conditionnement.

[Kaouane, 2011]

III.2.4 .Evolution de la masse volumique

A haute température, ce paramètre dépend fortement de la nature des granulats dans le béton. La Figure III.2 montre les variations de la masse volumique de différents types de bétons en fonction de la température. On observe une diminution quasi-linéaire jusqu'à 800°C, or le béton à granulats calcaires présente une forte diminution de la densité au-delà de 800°C. Cette baisse de la masse volumique est liée à deux phénomènes à savoir l'hydratation complémentaire des anhydres et la carbonatation de la Portlandite. [Kaouane, 2011].

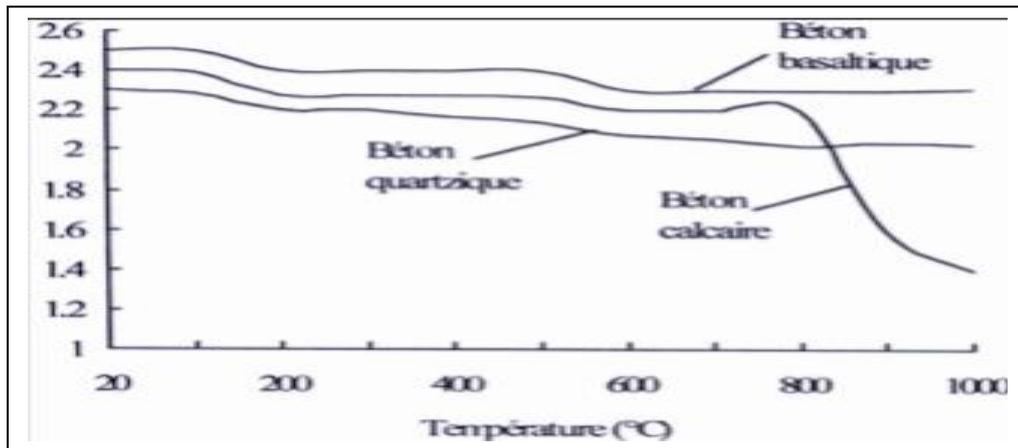


Figure III.2 : Variations de la masse volumique de différents types de bétons en fonction de la température. [Kaouane, 2011]

II.2.5.Perte de masse

Durant l'échauffement du béton, sa masse est soumise à une variation due à l'évaporation de l'eau et la déshydratation progressive du gel CSH. Sur la Figure III.3 nous pouvons observer une courbe caractéristique de la perte de masse durant l'échauffement, ainsi que la courbe de la vitesse de la perte de masse [Gharbi et Fali, 2019].

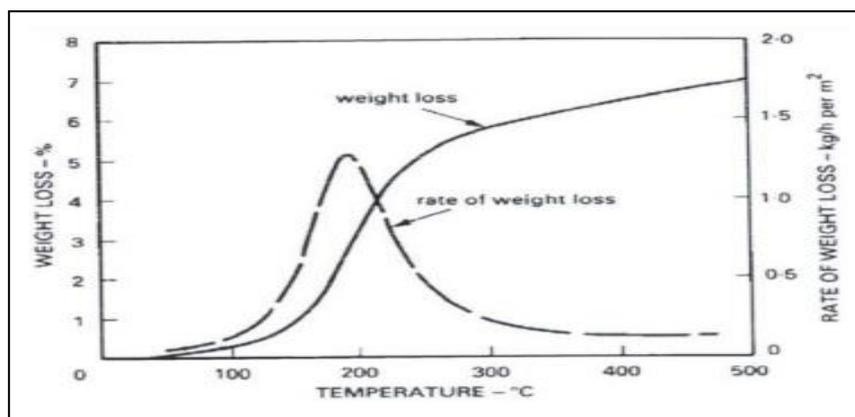


Figure III.3 : Perte de masse durant l'échauffement et vitesse de perte de masse en fonction de la température. [Gharbi et Fali, 2019]

III.2.6. Evolution de la perméabilité

La perméabilité d'un milieu poreux caractérise la capacité que possède ce milieu à se laisser traverser par un fluide sous un gradient de pression. Bien que cette perméabilité dépend fortement de la porosité du milieu poreux et d'autres paramètres, tel que la connectivité, la tortuosité ainsi que la constructivité du réseau poreux liée à la taille des pores. La perméabilité du béton dépend également de ses constituants.

Elle est fonction du rapport E/C, qui est directement lié à la porosité capillaire, de la nature et de la quantité des granulats, qui peuvent modifier la tortuosité par la création de l'auréole de transition.

La perméabilité du béton subit un accroissement significatif quand la température dépasse 100°C. [Hachemi, 2015].

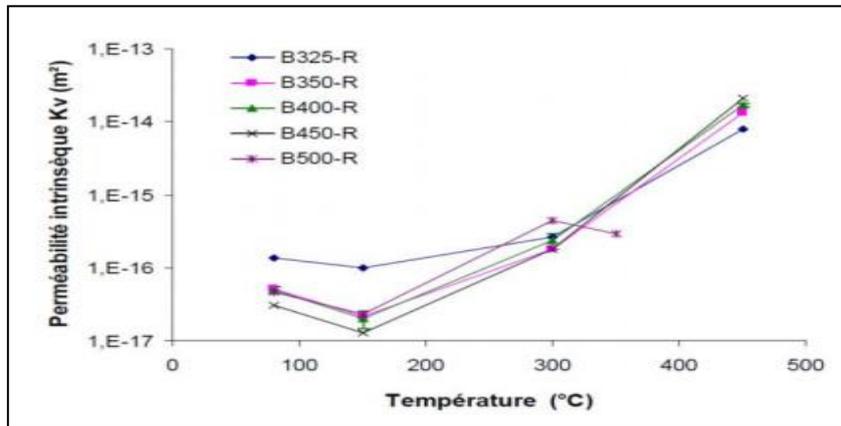


Figure III.4 : Evolution de la perméabilité intrinsèque résiduelle des bétons en fonction de la température. [Hachemi, 2015]

III.3. Evolution des propriétés mécaniques avec la température

L'action des hautes températures sur le béton provoque une diminution graduelle de ses propriétés mécaniques, qu'elles soient mesurées à chaud ou après refroidissement (propriétés résiduelles). La perte en propriétés mécaniques varie selon le type de béton (la nature des constituants, la teneur en eau), la température atteinte et la vitesse de montée en température.

Les principales caractéristiques mécaniques présentées sont la résistance à la compression, la résistance à la traction et le module d'élasticité. [Allal, 2015].

III.3.1. Résistance en compression à haute température

La figure III-5 montre l'évolution des résistances résiduelles en compression de bétons autoplaçants, de bétons ordinaire et à hautes performances. D'une manière générale, les résultats de la littérature montrent que la résistance à la compression du béton (à chaud ou après refroidissement) baisse avec l'élévation de la température. L'analyse de la courbe d'évolution permet de grouper le comportement de résistance en deux domaines. – Le premier

domaine, de la température ambiante à 300°C - 400°C, est caractérisé par une légère baisse, un maintien ou une augmentation de résistance. La baisse de résistance est observée autour de 100°C – 150°C suivant les auteurs. Cette légère baisse de résistance est liée au départ de l'eau qui, lors de la montée en température, se dilate et entraîne un écartement des feuilletts du gel. Cet écartement occasionne ainsi une baisse des forces de cohésion. Jusqu'à la température de 300°C - 400°C, un gain de résistance est remarqué et peut être retardé avec les BHP compte tenu de leur faible perméabilité qui ralentit le départ de l'eau. Le départ de l'eau peut entraîner une augmentation des forces de liaison entre les hydrates avec un accroissement des énergies de surface.

- Le second domaine, au-delà de la température 300°C – 400°C, est caractérisé par une baisse continue de la résistance à la compression liée aux différentes transformations physico-chimiques. [Van Thai Nguyen, 2013].

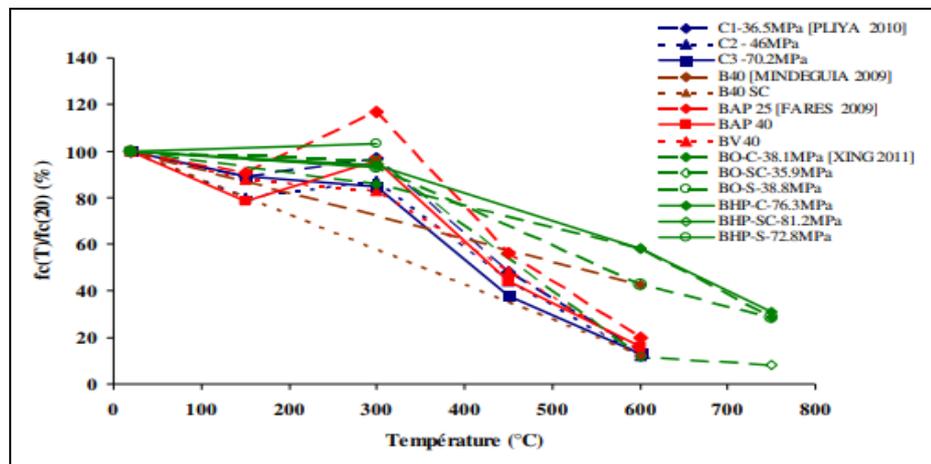


Figure III.5 : Évolution de la résistance résiduelle relative à la compression des BO et BHP.

[Van Thai Nguyen, 2013]

III.3.2. Résistance en traction à haute température

Peu de résultats de comportement en traction directe du béton à haute température sont disponibles dans la littérature, vu la complexité de la réalisation des essais. La plupart des observations sur la résistance en traction porte sur des essais après refroidissement. Une compilation des résultats des résistances en traction directe à chaud déterminées par fendage et par traction directe comparés avec les valeurs proposées par l'EUROCODE 2 et le DTU Feu-Béton est représentée sur la figure (III.6).

À partir de ce graphe, comme pour la variation de la résistance en compression, la résistance en traction chute avec l'élévation de la température. La résistance résiduelle à la traction normalisée montre une diminution de cette dernière avec la température. Ils soulignent que la baisse de résistance en traction est beaucoup plus rapide que celle de la

résistance en compression, pour des températures supérieures à 400°C. Il apparaît, au vu de ses résultats, que la résistance en traction initiale des bétons n'a aucune incidence sur l'évolution de la résistance avec la température. [Kessal, 2017].

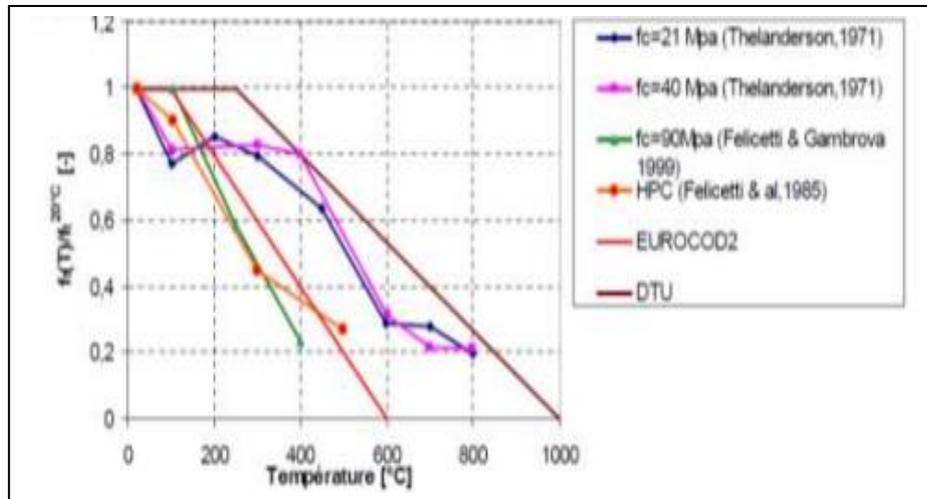


Figure III.6 : Evolution de la résistance résiduelle relative à la traction avec la température.

[Kessal, 2017]

III.3.3. Module d'élasticité

Le comportement des structures dépend souvent du module d'élasticité du béton qui exprime la rigidité du matériau. Il lie la contrainte normale à la déformation instantanée longitudinale lorsque le béton est soumis à des sollicitations uni axiales. Les différents résultats expérimentaux montrent que le module d'élasticité du béton est fortement affecté par la température. Les variations du module d'élasticité avec la température dépendent principalement de la microstructure de la pâte de ciment d'une part et des paramètres expérimentaux d'autre part (la vitesse de chauffage, la teneur en eau, la nature des granulats ...). [Gharbi et Fali, 2019].

La (figure III.7) montre les évolutions des modules élastiques à chaud et après refroidissement. Dans la série I, les éprouvettes sont chauffées sans chargement à 1 °C/min à la température désirée puis maintenue à cette température avant d'être chargées. Dans la série II, les éprouvettes sont chauffées jusqu'à la température désirée, puis elles sont refroidies avec une vitesse de 0,5 °C/min avant d'être chargées. Ces essais montrent que la rigidité du matériau baisse généralement en fonction de la température jusqu'à 120 °C. Entre 200 °C et 300 °C, les résultats de la (figure III.7) montrent que le module est à peu près constant. [Belouadah, 2018].

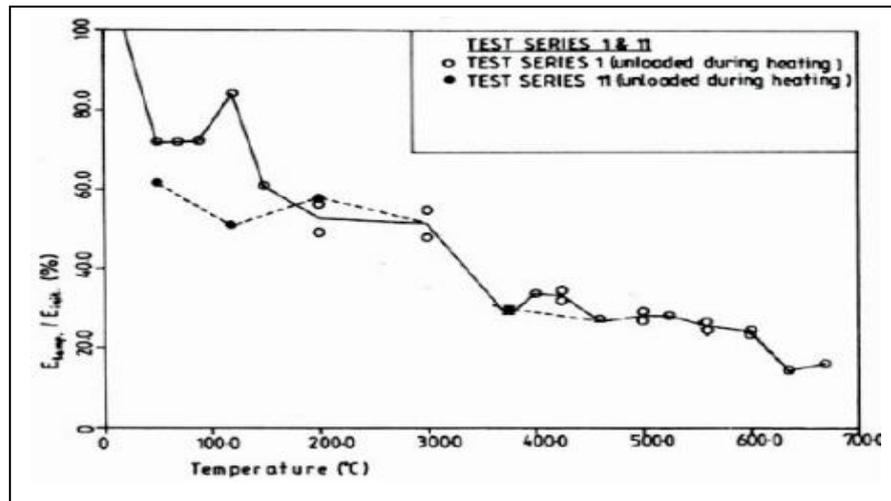


Figure III.7 : Rapport du module d'élasticité à chaud et à froid sur le module initial en fonction de la température. [Belouadah, 2018]

III.4. Evolution des propriétés thermiques du béton avec la température

L'évolution de la distribution de température dans une structure est gouvernée en grande partie par les propriétés thermiques du matériau, particulièrement la capacité calorifique et la conductivité thermique. Cependant, la détermination de ces propriétés avec exactitude, dans le cas du béton, est très difficile, en raison de nombreux phénomènes qui se produisent au sein de la microstructure du béton. [Hachemi, 2015]

III.4.1. La conductivité thermique

La conductivité thermique est l'aptitude d'un matériau à conduire la chaleur. Elle dépend, pour le béton, de nombreux paramètres : la porosité, la température, le degré d'hydratation, la teneur en eau, le type de granulats. Cette propriété diminue, d'une manière générale, lorsque la température augmente. Ce comportement met en évidence la détérioration de la microstructure : les microfissures limitent les transferts de la chaleur. [Kaouane, 2011].

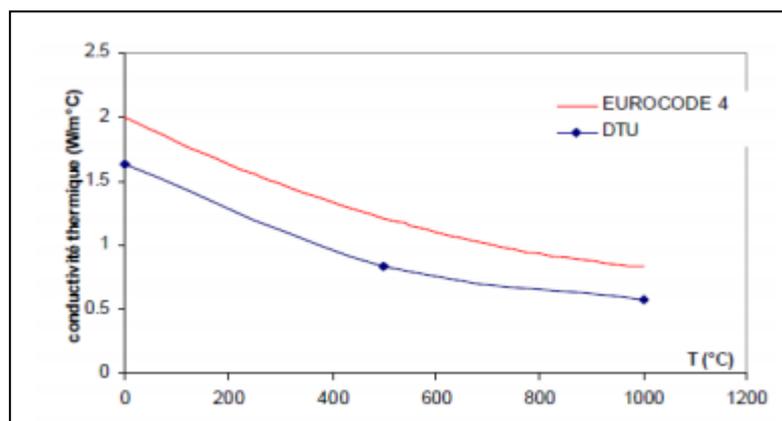


Figure III.8 : Evolution de la conductivité thermique en fonction de la température selon les normes (EUROCODE4). [Kaouane, 2011]

III.4.2. Chaleur spécifique

La chaleur spécifique d'un matériau est la quantité d'énergie nécessaire pour élever d'un degré une masse unitaire de matière ou on peut la définir par la quantité d'énergie nécessaire pour faire monter de 1°C la température d'un kilogramme de matériau. La chaleur spécifique augmente d'une manière générale avec la température. Dans le béton elle dépend de la teneur en eau, du type de granulats et de sa densité. Puisque l'eau joue un rôle important dans l'évolution de la chaleur massique du béton. La présence de l'eau influence la chaleur massique du béton à des températures inférieures à 200°C. Le béton saturé présente une chaleur massique deux fois plus élevée que celle du béton sec, cette évolution dépend des différentes réactions endothermiques

La figure (III.9) montre que la chaleur spécifique des bétons calcaires et bétons siliceux augmente avec la température. [Rahmani, 2019].

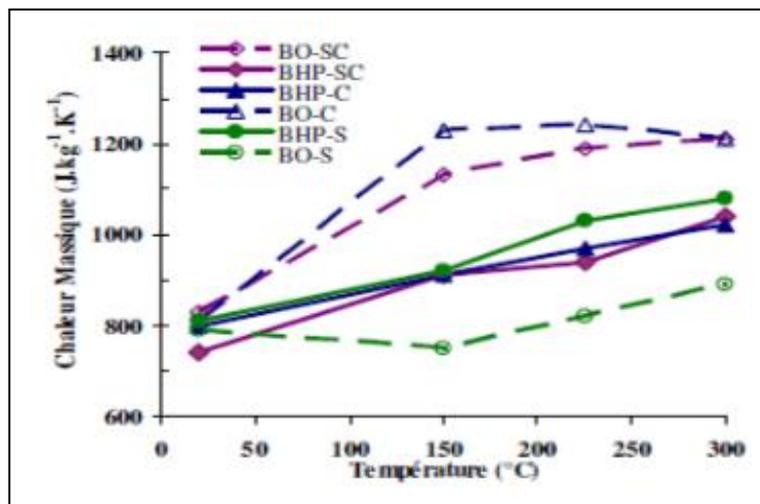


Figure III.9 : Influence des types de granulats sur la chaleur massique de béton. [Rahmani, 2019]

III.5. Mécanisme du phénomène d'écaillage et de l'éclatement du béton chauffé

L'éclatement des bétons résulte de deux principaux processus concomitants, le processus thermomécanique et le processus thermo-hydrique :

- **Le processus thermomécanique** : il est lié à la température au sein du béton. Le gradient thermique crée une dilatation thermique, et lorsqu'elle est empêchée, elle génère des contraintes de compression parallèles à la face chauffée. De plus, au cours du chauffage, les granulats se dilatent, tandis que la pâte de ciment se rétracte en raison de sa déshydratation. La pâte de ciment est ainsi soumise à des contraintes de traction et les

granulats, à des contraintes de compression. Lorsque les contraintes thermiques sont importantes, le phénomène d'écaillage peut se produire.

- **Le processus thermo-hydrique** : il est associé au transfert de masse qui engendre de fortes pressions de vapeur dans le réseau poreux. La figure III.10 montre le mécanisme d'éclatement lié à la pression de vapeur. Lorsque le béton est exposé à une haute température, l'eau qui se trouve dans les pores sous forme libre ou liée commence à s'évaporer. Une partie de cette eau vaporisée s'évacue vers la surface chauffée et une autre partie migre vers les zones froides à l'intérieur puis se condense. Une accumulation de l'eau liquide dans les pores aux zones froides crée un bouchon saturé qui gêne la migration de l'eau vaporisée. Le bouchon saturé provoque une élévation de la pression interne des pores du côté le plus chaud. Ces pressions de vapeur associées aux fortes contraintes thermiques aboutissent à l'apparition du phénomène d'instabilité thermique. Dans le cas de béton de forte densité et de faible perméabilité, l'augmentation de pression pourrait engendrer l'éclatement. [Allal, 2015].

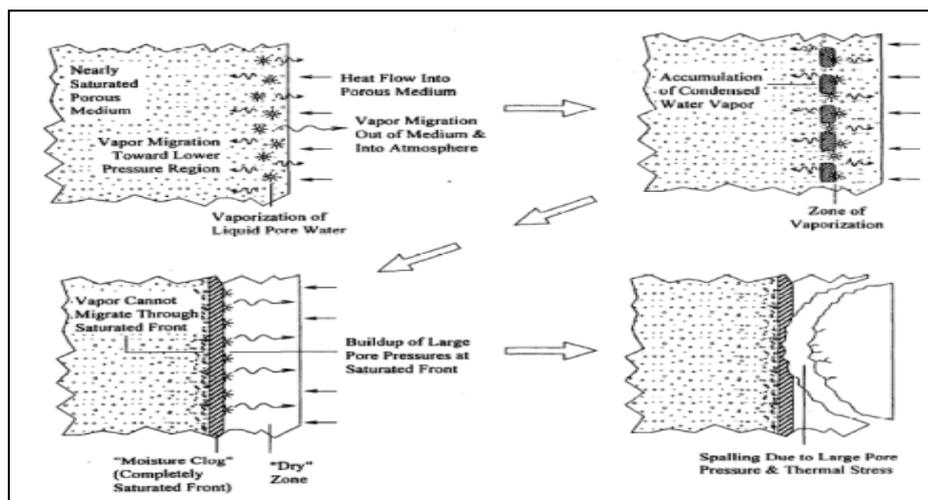


Figure III.10 : Illustration du mécanisme d'éclatement. [Allal, 2015]

III.6. Paramètres favorisant l'instabilité thermique

Plusieurs paramètres peuvent influencer l'éclatement du béton sous l'effet de l'élévation de la température :

- **L'eau présente dans le béton** : elle constitue le facteur majeur qui est à l'origine du phénomène d'éclatement, car elle est à l'origine de la formation des pressions internes. Des études ont montré que l'éclatement n'apparaît pas si le matériau est sec et qu'une teneur en eau massique inférieure à 3% limiterait le risque d'éclatement.
- **Les propriétés physico-mécaniques du matériau** : Le rôle du rapport eau/ciment, qui, plus il est faible, plus le béton est sensible à l'instabilité thermique, de même pour la

densité, la porosité et la perméabilité car, un composite dense, de porosité et de perméabilité réduites, rend difficile le transfert des fluides qui peut provoquer une augmentation des pressions internes lors de la montée de température.

- **Dimensions des éprouvettes :** des études faites sur deux types d'éprouvettes cylindriques, le 11x22 cm et les 16x32 cm ont montré que lors de la montée en température, plus la taille des échantillons est grande, plus le risque d'éclatement est grand.
- **La nature des granulats :** les granulats calcaires se dilatent moins que les granulats de silex, ce qui leur confère une meilleure stabilité thermique, d'où l'influence de la nature chimique et minéralogique des granulats lors de la montée de température sur la stabilité thermique du béton.
- **La vitesse de chauffage :** Le risque d'instabilité thermique et d'éclatement d'un béton sous l'élévation de la température est proportionnelle à la vitesse du chauffage, plus cette dernière est élevée, plus le risque d'éclatement est important.
- **Présence d'un chargement mécanique :** la charge mécanique et particulièrement celle de la précontrainte favorise parfois l'éclatement du béton. [Khelifa, 2017].

III.7. Déformation thermique du béton à hautes températures

III.7.1. Différentes formes d'endommagement thermique

En cas d'incendie de bâtiments, de tunnels, le béton peut présenter une instabilité thermique au-delà d'une certaine température. L'instabilité thermique du béton peut se présenter sous diverses formes :

- **Eclatement explosif :** (explosive spalling en anglais) correspondant à un détachement brutal de petits ou gros morceaux de béton, accompagné d'un bruit fort. Ce type d'éclatement se produit pendant les trente premières minutes du feu ou d'un essai standard. Il peut se produire à une température supérieure à 100°C.
- **Eclatement de surface (appelé aussi écaillage et en anglais surface spalling):** correspondant à un détachement progressif et continu, plus ou moins rapide, de petits morceaux (jusqu'à 20 mm environ) du parement exposé au feu. Ce phénomène se produit généralement dans la première phase de l'élévation de température. Il est moins violent que l'éclatement explosif.
- **Eclatement de granulats :** cet éclatement est provoqué par la dilatation thermique des granulats proches de la surface à cause de la montée en température. Les principales causes de ce phénomène sont la conversion de quartz à 570 °C. Les dommages engendrés par l'éclatement de granulats ne sont que superficiels.

- **Eclatement d'angle** : il s'observe dans les stades avancés du feu lorsque le béton est affaibli et que les fissures se développent en raison des contraintes de traction le long des bords et coins de l'ouvrage.
- **Eclatement par détachement des granulats** : ce type d'instabilité est issu de la modification de la microstructure de la pâte de ciment avec la montée en température et aussi des fissures internes engendrées par la dilatation thermique différentielle entre la pâte de ciment et les granulats.
- **Eclatement en phase de refroidissement** : il est non violent et sans bruit. Ce phénomène est causé par la présence de granulats calcaires et de la réhydratation de la chaux lors de la phase de refroidissement. [Van Thai Nguyen, 2013].

III.7.2 .Déformation thermique des granulats

Les granulats occupent environ 70% du volume du béton. La dilatation thermique des bétons est, principalement liée à leur dilatation. On peut limiter la déformation du béton aux hautes températures en jouant sur la nature des granulats. Le Tableau 1, regroupe les valeurs du coefficient de dilatation thermique (α_T) des roches fréquemment utilisées comme granulats dans le béton.

La (figure III.11) regroupe les courbes d'évolution de la déformation thermique de différentes roches. Nous soulignons que le coefficient de dilatation thermique est plus faible pour les granulats calcaires que pour ceux de nature siliceuse.[Toumi, 2010].

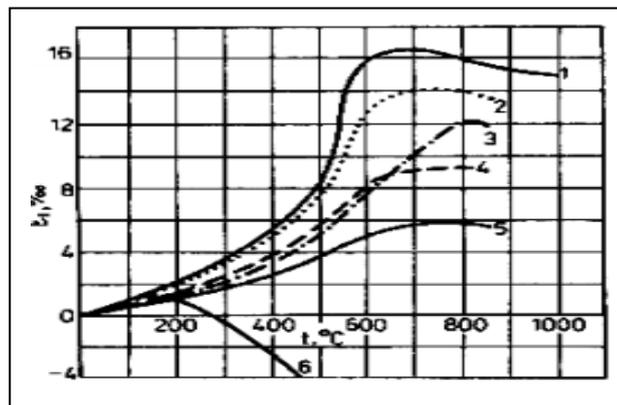


Figure III.11 : Evolution avec la température de la dilatation longitudinale de différents types de roches 1.siliceux 2.grès 3.calcaire 4.basaltes 5.argiles expansées 6pate du ciment. [Toumi, 2010]

Tableau III.1 : Coefficient de dilatation thermique des roches par granulats. [Toumi, 2010]

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

III.8. Conclusion

D'après ce chapitre, on peut conclure que :

- ❖ Lorsque le béton est soumis à une température élevée, il subit diverses transformations physico-chimiques conduisant à la modification de la microstructure et de ses propriétés mécaniques.
- ❖ Représente la principale cause de perte de masse, d'augmentation de la porosité et de la perméabilité et la destruction de la matrice cimentaire.
- ❖ Une baisse des propriétés mécaniques (résistance à la compression, à la traction, module d'élasticité) est remarquée sous l'effet de l'augmentation de la température.



Chapitre IV : Matériaux et Techniques Expérimentales

IV.1. Introduction

La présentation et la caractérisation des différents matériaux et matériels utilisés jouent un rôle très important dans la composition d'un béton et ses propriétés et ses performances.

Dans ce chapitre, on va présenter des essais menés pour caractériser les matériaux (ciment, sable et les additions et l'eau) utilisés dans cette étude, à travers leurs propriétés physiques, chimiques, mécaniques, et minéralogiques.

Après nous allons présenter les formulations des bétons confectionnés ainsi que la mise en œuvre et le programme expérimental destiné à évaluer le comportement de béton sous hautes températures du point de vue mécanique, physique.

IV.2. Ciment

IV.2.1. Descriptions du produit NA442- CEM I 52,5 R (selon la fiche technique)

Ciment Portland blanc provenant de la cimenterie « Lafarge » pour béton de haute performance, destiné à la construction des ouvrages d'art esthétiques, éléments décoratifs, mortiers et fabrication de carreaux.

Est certifié conforme à la norme Algérienne (NA442-2013) et Européenne (EN197-1), et CE (0099/CPR/A33/001025) par un organisme de certification.



Figure IV.1 : Sac de ciment Malaki « Lafarge ».

❖ Les avantages

- Ciment développant des performances initiales et finales très élevées.
- Le mieux adapté pour votre ligne de production de bicouche et monocouche.
- Permet de réaliser des éléments en béton avec un niveau de finitions inégalé.
- Favorise l'obtention d'une gamme importante de couleurs.
- Idéal pour la structure en béton apparent.
- Idéal pour les mortier et colles à base de ciment.

❖ Domaine d'applications

- Construction des ouvrages d'art esthétiques et éléments décoratifs.
- Carreaux de dalle ; monocouche et bicouche.

- Mortiers et colles à base de ciment
- Idéal pour la préfabrication légère et lourde.

IV.2.2. Caractéristiques du ciment NA442- CEM I 52,5 R

Les caractéristiques de ciment sont présentées dans les tableaux suivants :

➤ **Les Caractéristiques physiques**

Tableau IV.1 : caractéristiques physiques de ciment CEM I 52,5 R

Caractéristique physique	Masse volumique apparente (g/cm ³)	0.89
	Masse volumique absolue (g/cm ³)	2.68
	Consistance normale (%)	28±3
	Finesse suivant la méthode de Blaine (cm ² /g)	4000-5000
	Retrait à 28 jours (µm/m)	≤1000
	Blancheur (γ)	84±4

➤ **Les Analyses chimiques et les Compositions minéralogique de clinker**

Tableau IV.2 : analyse chimique et composition minéralogique de ciment CEM I 52,5 R

Analyses chimiques	Perte au feu (%) (NA5042)	3±2.5
	Teneur en sulfates (SO ₃) (%)	2.8±0.8
	Teneur en oxyde de magnésium MgO (%)	1.8±0.8
	Teneur en chlorure (NA5042) (%)	<0.1
Composition minéralogique du clinker	C3S (%)	55±3
	C3A (%)	9.0±1

➤ **Les caractéristiques mécaniques**

Tableau IV.3 : caractéristiques mécaniques de ciment CEM I 52,5 R

Temps de prise	Début de prise (min)	140±40
	Fin de prise (min)	200±40
Résistance à la compression	2 jours (MPa)	≥30
	28 jours (MPa)	≥55

IV.3. Sable d'oued LIWA

IV.3.1. Origine de sable

Le sable de base de notre recherche provient : des abords d'Oued LIWA (Biskra) Origine de sable

IV.3.2. Caractéristiques physiques des sables utilisés

Le sable utilisé dans le cadre de notre étude expérimentale est un sable de dune passe au tamis de 0.5mm donc le plus gros diamètre est de 500 μm . Le sable a été soumis à plusieurs essais au laboratoire de MDC-Biskra suivant les normes françaises AFNOR.



Figure IV.2 : Sable de LIWA.

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

C'est le rapport entre la masse et l'unité de volume de matière qui constitue l'échantillon, sans tenir compte des vides, Elle est exprimée en (g/cm^3 ; Kg/m^3 ; t/m^3).

Mode opératoire

- Rempli l'éprouvette gradué avec un volume d'eau V_1 .
- Peser un échantillon sec de sable $M_s = 220\text{g}$
- Introduire le sable dans l'éprouvette gradué en prenant soin d'éliminer toutes les bulles d'air.
- Le liquide monte dans l'éprouvette, lire le nouveau volume V_2 .
- Cette opération est répétée 3 fois.
- La masse volumique absolue et déterminer par la formule suivante :

$$\rho_{abs} = \frac{M}{V_2 - V_1}$$

Tableau IV .4 : Masse volumique absolue du sable de liwa.

N° essai	M ₁ (g)	V ₁ (g)	V ₂ (g/cm ³)	ρ _{abs} (g/cm ³)	ρ _{abs} ^{moy} (g/cm ³)
01	220	200	287	2.52	2.53
02	220	200	288	2.50	
03	220	200	285	2.58	

IV.3.2.2. Masse volumique apparente : NF P 18-554

- peser le récipient vide M₁.
- Ensuite, placer le récipient sous l'entonnoir à une distance de 10 à 15 cm après avoir fermé l'ouverture par le bas.
- passer une quantité de sable sec sur le tamis pour mesurer la masse volumique virtuelle et être en quantités successives.
- ouvrir l'entonnoir par le bas pour permettre le passage du sable.
- Une fois le récipient est rempli, on nivelle la surface du sable avec une règle en fer pour éliminer l'excès.
- peser le récipient avec du sable M₂.
- La masse volumique apparente est déterminée par la formule suivante : $V=1L$

$$\gamma_{app} = \frac{M_2 - M_1}{V}$$

Tableau IV .5 : Masse volumique apparente du sable de liwa.

N° essai	M ₁ (g)	M ₂ (g)	γ _{app} (g/cm ³)	γ _{app} ^{moy} (g/cm ³)
01	299.48	1836.52	1.54	1.56
02	299.48	1840.6	1.54	
03	299.48	1890.3	1.59	

D'après les résultats on conclut que la masse volumique apparente de sable de LIWA est =1.56 g/cm³ dans l'intervalle acceptable [1.5-1.65].

IV.3.2.3. Porosité : (NF P 18-554) :

La porosité est le rapport du volume des vides (pores) contenu dans le grain au volume absolu des grains, est calculée par la relation suivante :

$$P (\%) = \left[1 - \frac{\gamma_{app}}{\gamma_{abs}} \right] \times 100$$

γ_{app} : La masse volumique apparente

ρ_{abs} : La masse volumique absolue

IV.3.2.4. Compacité :

C'est le rapport entre le volume des grains solides et le volume total du matériau, déterminé par la relation suivante :

$$C(\%) = \frac{V_s}{V_t} \times 100$$

Aussi par : $C(\%) = 100 - P$

IV.3.2.5. L'indice des vides

C'est le rapport entre le volume du vide et le volume de solide des grains, est définie par les formules suivant :

$$e(\%) = \frac{V_v}{V_s}$$

Aussi par :

$e(\%) = P/100 - P$

Tableau IV.6 : Porosité, compacité et indice des vides du sable de LIWA.

Porosité P(%)	Compacité C(%)	L'indice de vide e(%)
39.13	60.87	0.64

IV.3.2.6. Teneur en eau : NF P 18-555

La teneur en eau d'un matériau est le rapport du masse d'eau contenu dans ce matériau au masse du même matériau sec

Mode opératoire

- on prend un échantillon humide du sable et on pèse $M_h = 300g$.
- Sécher l'échantillon en l'insérant dans une étuve à une température de 105 à 110 ° C dans les 24 heures.
- Après dessiccation, on pèse l'échantillon et le nouveau poids de l'échantillon sec est M_s .
- On calcule le teneur en eau depuis cette relation :

$$w(\%) = \frac{M_h - M_s}{M_s} \times 100$$

M_h : masse de l'échantillon humide en (g).

M_s : masse de l'échantillon sec (24 heures à l'étuve) en (g).

Tableau IV.7 : Teneur en eau du sable de LIWA.

N° essai	M _h (g)	M _s (g)	W (%)	W _{moy} (%)
01	300	297.6	0.8	0.65
02	300	298	0.6	
03	300	298.3	0.56	

IV.3.2.7. Degré d'absorption d'eau : NF P 18-555

Le rapport entre l'augmentation de la masse immergée et la masse sèche de l'échantillon, elle est exprimée en pourcentage, et déterminé par la formule suivante :

$$A(\%) = \frac{M_2 - M_1}{M_1} \times 100$$

M₁: masse de l'échantillon sec (l'étuve) en (g).

M₂: masse de l'échantillon saturé superficiellement sec (immersion dans l'eau 24H) en (g)

Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau suivant :

Tableau IV.8 : Coefficient d'absorption du sable de LIWA

N° essai	M ₁ (g)	M ₂ (g)	A (%)	A _{moy} (%)
01	300	307.96	2.65	2.79
02	300	308.38	2.79	
03	300	308.84	2.95	

Selon le mode opératoire défini dans les normes NF P18- 554 et NF P18- 555, la limite supérieure du coefficient d'absorption d'eau du granulat est fixée à 5%, c'est -à- dire $A_b < 5\%$. Donc, dans notre cas, cette propriété est vérifiée.

IV.3.2.8. Equivalent de sable : NF P 18-598

But d'essai

Cet essai, est utilisé pour évaluer la propreté de sable utilisés et permet de déterminer la proportion d'impuretés argileuses contenues dans le sable et le pourcentage de poussières nuisibles qui diminuent la qualité du béton et mortier.

Mode opératoire

- remplir le éprouvette avec la solution lavant, jusqu'au premier trait
- peser un échantillon de sable $m=120g+w$ (1%) et le déversons dans l'éprouvette à l'aide de l'entonnoir

- frapper l'éprouvette avec la paume de la main pour éliminer les bulles d'air et laissez-le reposer pendant 10 minutes
- boucher l'éprouvette à l'aide du bouchon de caoutchou, puis fixer l'éprouvette sur la machine d'agitation, et agiter l'éprouvette (90cycles en 30 secondes)
- Retirer ensuite le bouchon, le rincer avec la solution lavant au dessus l'éprouvette
- insérez le tube de lavage dans l'éprouvette et nettoyez les cotes avec la solution lavant, puis enfoncez le tube jusqu'au fond de l'éprouvette.
- Remplir l'éprouvette avec la solution lavant jusqu'au trait supérieur
- début de la décantation
- mesure à vue de la hauteur de sable h_2 et de hauteur h_1 de l'ensemble sable plus floculat après 20 minutes de décantation
- mesure de la hauteur de sable h_2' au piston

A / Equivalent de sable visuel (E_{SV})

$$E_{sv} = \frac{h_2}{h_1} \cdot 100$$

- Avec : h_1 : hauteur du sable plus floculat.
 h_2 : hauteur du sable.

B / Equivalent de sable au piston (E_{SP})

$$E_{sp} = \frac{h_2'}{h_1} \cdot 100$$

- Avec : h_1 : hauteur du sable plus floculat.
 h_2' : hauteur du sable.



Figure IV.3 : les matériels de l'essai d'équivalent de sable

➤ Résultats obtenus

Tableau IV.9 : Résultats d'essais d'équivalent de sable de LIWA.

N°essai	h ₁ (cm)	h ₂ (cm)	h' ₂ (cm)	E _{SV} (%)	E _{SP} (%)
01	11.8	8.5	7.5	72	63.55
02	12.1	8.7	8.7	71.9	71.9
03	12.4	9.1	9.4	73.39	75.81

Le sable testé donne les résultats suivants :

$$E_{SV\text{Moye}}(\%) = 72.43\%$$

$$E_{SP\text{Moye}}(\%) = 70.40\%$$

Le sable de LIWA est un Sable propre à faible pourcentage de farine argileux.

Tableau IV.10 : Qualité du sable en fonction des valeurs d'équivalent de sable E SV et ESP

ESV	ESP	OBSERVATIONS
ES < 65	ES < 60	Sable argileux : Risque de retrait ou de gonflement à rejeter pour des bétons de qualité.
65 < ES < 75	65 < ES < 70	Sable peu argileux : Sable légèrement argileux de propriété admissible pour des bétons de qualité courante quand on ne craint pas particulièrement le retrait.
75 ≤ ES ≤ 85	70 ≤ ES ≤ 80	Sable propre : Sable propre à faible pourcentage de farine argileux convient parfaitement pour des bétons de haute qualité.
E.S ≥ 85	E.S > 80	Sable très propre : L'absence totale de fines argileuses risque d'entraîner un défaut de plasticité du béton qu'il faudra rattraper par une augmentation du dosage en eau.

IV.3.2.9. Analyse granulométrique : (NF P 18-560)

But de l'essai

L'analyse granulométrique a pour but de déterminer la grosseur et les pourcentages respectifs des différentes familles de grains constituant l'échantillon et spécifier les vides dans l'échantillon et déduire le module de finesse.

Préparation de l'échantillon pour l'essai

L'échantillon doit être préparé suivant les prescriptions de la norme P 18-553. La masse M de l'échantillon pour essai doit être supérieure à 0,2 D, avec M exprimé en kilogrammes et D plus grande dimension spécifiée en millimètres.

Mode opératoire

- Prendre un échantillon lavé et séché de sable M=2000g.
- Peser chaque tamis à vide.
- Monter la colonne de tamis par l’emboîtement des tamis, en les classant de haut en bas dans l’ordre démailles décroissantes : 5-2,5-1,25-0,63-0,315-0,16 -0,08 mm,
- Ajouter un fond pour recueillir les éléments passant au dernier tamis un couvercle pour éviter la dispersion des poussières.
- Verser le matériau (sable sec) sur la colonne de tamis et la fixer soigneusement sur la machine d'agitation mécanique, agité pendant 7 minutes.
- Arrêter l'agitateur, puis séparer avec soin les différents tamis.
- peser des échantillons obtenus dans chaque tamis.



Figure IV.4 : La tamiseuse utilisée.

Les résultats de l’analyse granulométrique de sable sont représenté dans le tableau suivant :

Tableau IV.11 : Analyse granulométrique de sable d’OUED LIWA

Diamètre des tamis (mm)	Refus partiel (g)	Refus cumulés		Tamisât cumulés (%)
		(g)	(%)	
5	1,82	1,82	0,091	99,909
2.5	111,49	113,31	5,6655	94,3345
1.25	92,41	205,72	10,286	89,714
0.63	207,52	413,24	20,662	79,338
0.315	1166,67	1579,91	78,9955	21,0045
0.16	297,12	1877,03	93,8515	6,1485
0.08	100,03	1977,06	98,853	1,147
Le fond	11,97	1989,03	99,4515	0,5485

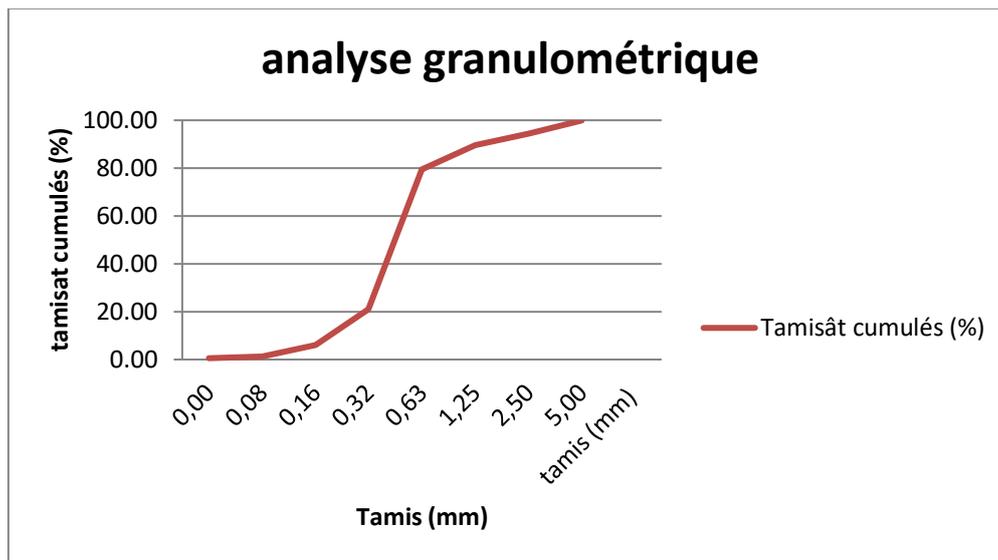


Figure IV.5 : courbe granulométrique de sable LIWA.

IV.3.2.10 : Le module de finesse

Le module de finesse est caractéristique très importante qui nous permet de donner une estimation sur la qualité du sable, il est égale au 1/100 de la somme des refus, exprimé en pourcentage sur les défèrent tamis de la série suivante : 5 – 2.5 – 1.25 – 0.63 – 0.315 – 0.16 – 0.08

$$M_f = \frac{1}{100} \sum (\text{refus cumulés en \% des tamis} \{0,16 - 0,315 - 0,63 - 1,25 - 2,5 - 5\})$$

$$M_f = \frac{0,091 + 5,6655 + 10,286 + 20,662 + 78,9955 + 93,8515}{100}$$

$$M_f = 2,09$$

Les normes française donner la classification suivante :

Tableau IV.12 : classification de sable en fonction du module de finesse

Qualité de sable	Module de finesse
Sable gros	$M_f > 2.5$
Sable moyen	$2 < M_f < 2.5$
Sable fin	$1.5 < M_f < 2$
Sable très fin	$1 < M_f < 1.5$

A base de cette classification, on trouve le résultat suivant :

Pour le Sable de LIWA : $2 < M_f < 2.5$ c'est sable moyen.

IV.4.les additions

IV.4.1.Poudre de marbre

L'addition minérale qu'on a utilisée dans nos essais est la poudre de marbre. La poudre du marbre utilisée est le déchet des marbreries dues au découpage des pièces en marbre blanc.



Figure IV.6 : la poudre de marbre.

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

➤ Les Caractéristiques physiques

Tableau IV.13 : Caractéristiques physiques de la poudre de marbre.

Couleur	Blanche
Masse volumique apparente (g/cm ³)	0.97
Masse volumique absolue (g/cm ³)	2.65
surface spécifique (cm ² /g)	5150

➤ Les Caractéristiques chimique

Tableau IV.14 : Analyse chimique de la poudre de marbre.

Elément	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	SO ₃	P ₂ O ₅	Na ₂ O	ZnO	SrO	ZrO ₂
%	39.43	1.24	0.382	0.174	2.55	0.18	0.005	0.096	0.021	0.002	0.005

IV.4.2.Le quartz broyé

Le quartz broyé est une poudre, de diamètre moyen entre 10 et 15 µm, issue du broyage d'un sable très riche en silice (SiO₂ > 98 %) généralement utilisé dans la verrerie.

Il est employé principalement dans la formulation des BUHP traité à une température supérieure à 90 °C comme complément chimique. Pour le béton non traité thermiquement, le quartz broyé peut être considéré comme inerte et son utilisation n'est pas obligatoire.

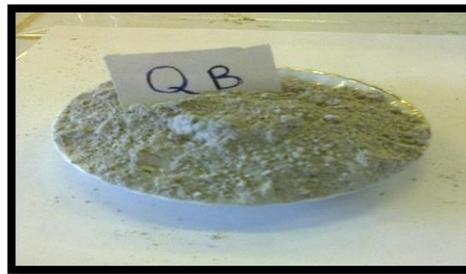


Figure IV.7 : Quartz broyée.

Elle est introduite une quantité de sable environs 250 g dans le broyeur et on procède au broyage pendant 10 minutes environs chaque tour, après nous tamisons le quartz sur le tamis de 80 μ jusqu'a l'obtention de la finesse désirée, le sable doit être sec pour éviter le colmatage de la poudre sur les parois intérieurs de broyeur, nous avons utilisé deux types de broyeur disponibles dans le laboratoire de génie civil à l'université de Biskra.



Figure IV.8 : les Broyeur utilisée.

- Les caractéristiques chimiques sont données dans le tableau suivant :

Tableau IV.15 : Analyse chimique du quartz broyé en %.

Les éléments	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	Lol	Cl
Quartz broyé%	94.333	1.171	1.044	1.622	0.184	0.037	0.386	0.001	1.582	0.02

- Les caractéristiques physiques de quartz broyé :

Tableau IV.16 : Les caractéristiques physiques du quartz broyé

Masse volumique apparente (g/cm ³)	0.8
Masse volumique absolue (g/cm ³)	2.64
surface spécifique (cm ² /g)	5714.7

IV.4.3. Les fibres

Les fibres utilisés sont des fibres métalliques «SIKA METAL FIBRES RL-45/50-BN», elles sont fabriquées à partir de fil d’acier tréfilé. La fibre comporte à chacune de ses extrémités un façonnage en forme de baïonnette appelé « crochet » destiné à favoriser son ancrage dans le béton. Produit par la société SIKA implanté à Alger. Elles sont présentées en sacs papier de 20kg. (Selon la fiche technique)



Figure IV.9 : fibres métalliques «SIKA METAL FIBRES RL-45/50-BN».

Les principales caractéristiques dimensionnelles et physiques sont les suivantes :

Tableau IV.17 : Les Caractéristiques des fibres métalliques.

Nature	Longueur	Diamètre	Elancement	Résistance en traction	Nombre de fibres
Fil d’acier tréfilé sans revêtement	50mm	1.05mm	48	1000MPA (sur fil)	2800 fibre/kg

IV.4.4.L’adjuvantes

Le MEDAFLOW SR20 est un super plastifiant haut Réducteur d’eau. Il est conçu à base de polymères de synthèse et son utilisation dans le béton permet L’obtention d’un rapport E/C très bas suivi d’un Maintien d’ouvrabilité remarquable.

Le MEDAFLOW SR 20 permet d’obtenir des bétons Et mortiers de très haute qualité. Conforme à la norme EN 934-2 (la fiche technique de GRANITEX 2019)



Figure IV.10 : Super plastifiant utilisée

❖ **Domaine d'application**

- Bétons à hautes performances
- Bétons autoplaçants
- Bétons pompés sur de longues distances
- Bétons précontraints
- Bétons architecturaux
- Bétons transportés

❖ **Les Propriétés**

Grâce à ses propriétés le MEDAFLOW SR20 permet :

➤ **Sur béton frais**

- Obtention d'un rapport E/C très bas
- Amélioration considérable de la fluidité
- Faciliter la mise en œuvre du béton
- Décoffrage rapide.

➤ **Sur béton durci**

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

❖ **Dosage**

Plage de dosage recommandée : 1,0 à 2,5 % du poids de ciment soit 1 litre à 2,50 litres pour 100 kg de ciment. Le dosage optimal doit être déterminé sur chantier en fonction du type de béton et des effets recherchés.

- Les Caractéristiques du MEDAFLOW SR20 sont regroupées dans le tableau suivant :

Tableau IV.18 : Caractéristiques du MEDAFLOW SR20.

Aspect	Couleur	pH	Densité	Teneur en chlore	Extrait sec
Liquide	Brun claire	6.0/6.5	1.05±0.01	<0.1 g/l	20%

IV.4.5.L'eau de gâchage

L'eau de gâchage utilisé est une eau potable (du robinet) et ne contenir aucune impureté nuisible du laboratoire de génie civil à l'université de Mohamed Khider –Biskra.

IV.5. Techniques expérimentales

Toutes les formulations des BPRF étudiées ont été confectionnées suivant le même mode opératoire, Ces techniques expérimentales seront menées conformément aux normes [NFEN 196-1].

IV.5.1. Formulation de BPRF

Tableau IV.19 : La composition de béton à poudre réactive BPRF.

Mélange au ciment « kg/m ³ »	BPRF	BT
C	945	450
SF	1039.5	1350
PM	94.5	/
QB	217.35	
SP/C	27	
E/C	0.25	0.6
FM	2%	/

IV.5.2. Choix de l'éprouvette

Pour réaliser les essais, nous utiliserons des moules cubiques de dimensions 5x5x5cm et des moules prismatiques de dimensions 4x4x16cm.

- **Les éprouvettes cubiques :** Ce type d'éprouvettes a été conçu pour l'essai de la porosité et essai de perte de masse avant et après exposition aux cycles thermiques.
- **Les éprouvettes prismatiques :** Ces éprouvettes sont réalisées pour les essais de traction par flexion et les essais de compression.



a) Moule prismatique (4x4x16) cm b) Moule cubique (5x5x5) cm

Figure IV.11 : Moules utilisés pour la confection des éprouvettes.

IV.5.3.Préparation Des Eprouvettes

On prépare les moules des épreuves du béton de dimension 4×4×16cm et 5×5×5cm. Les moules sont ensuite recouverts par une huile avant le coulage pour faciliter le démoulage du béton après 24 heures.

IV.5.4.Malaxage de BPRF

- Mettez le ciment, les additions et le sable sec dans le malaxeur,
- Malaxer les matériaux secs durant 2 minutes,
- Ajouter de l'eau et de la moitié du superplastifiant et malaxage durant 3 minutes à vitesse lente
- Ajouter de la seconde partie du superplastifiant, et malaxer pendant 6 à 8 min jusqu'à fluidification à vitesse rapide
- Ajouter des fibres métalliques, et malaxer pendant de 1 minute à faible vitesse.



Figure IV.12 : malaxeur normalisé pour pâte et mortier.

IV.5.5.Confection des épreuves

Après malaxage des mélanges, on remplit les moules à trois compartiments de 4 x 4 x 16 cm et 5×5×5cm. Le serrage dans le moule est obtenu en introduisant le mélange en deux couches et en appliquant 30 chocs à chaque couche. Après quoi le moule est arasé et recouvert par un film plastique d'éviter toute évaporation d'eau.ont été démoulées Après 24 heures.



Figure IV.13 : appareil à chocs, moules et épreuves utilisés pendant les essais.

IV.5.6. Conservation des éprouvettes

Une fois démoulés, les éprouvettes sont immergées et conservées dans un bac d'eau à une température ambiante $20^{\circ}\text{C}\pm 2$ pendant 206 jours. Après 206 jours de cure à l'eau et après passage à l'étuve pour 24h les éprouvettes ont été exposées à une température élevée variante de 200°C , 500°C , 800°C . Le procédé expérimental appliqué repose sur un chargement thermique puis mécanique.



Figure IV.14 : bac de conservation et armoire humide.

IV.6. Essais sur béton

IV.6.1. Essai de chauffage

Pour étudier le comportement à haute température du béton, il est nécessaire de lui faire subir différents cycles thermique. Les éprouvettes de béton subissent un pré-séchage en étuve à 65°C jusqu'à stabilisation de leur masse et Pour éviter le risque de l'éclatement des éprouvettes dans le four. Les cycles des chauffage/refroidissement pour le traitement thermique des éprouvettes composés d'une phase de montée en température , une deuxième phase de stabilisation à température constante d'une heure pour chaque palier de 200 - 500 - 800°C et une troisième phase de refroidissement jusqu'à la température ambiante.

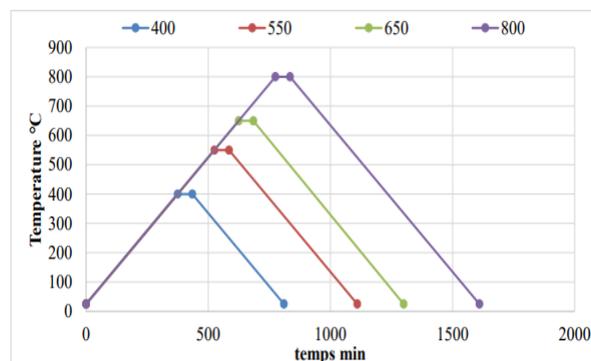


Figure IV. 15 : Cycle chauffage/ refroidissement.

IV.6.2. Perte de masse

Pendant le chauffage, la masse des échantillons de béton peut changer en raison de l'évaporation de l'eau et des réactions chimiques du béton.

La perte de masse est un indicateur important de la dégradation dans le matériau, en particulier la perte d'eau. Il permet de suivre l'évolution du poids du béton après application des cycles thermiques, et donc l'essai consiste à déterminer la perte de matériaux auxquels les éprouvettes ont été exposées lors du chauffage par rapport à l'état initial (l'état avant chauffage). La perte de masse est exprimée en pourcentage de la formule suivante :

$$dm = \frac{m_i - m_t}{m_i} \times 100\%$$

- d_m : perte de masse (%).
- m_i : masse initiale (g).
- m_t : masse après chauffage (g).

IV.6.3. porosité accessible à l'eau

L'essai de porosité accessible à l'eau a consisté à mesurer la porosité des éprouvettes de béton afin de déterminer le pourcentage de vide pouvant être occupé par l'eau.

Pour évaluer la porosité, nous allons poursuivre les étapes suivantes :

- Sécher les éprouvettes dans une étuve à 65 ° C jusqu'à obtention d'une masse constante.
- L'immersion des éprouvettes dans l'eau jusqu'à saturation complète.
- Les mesures de la masse saturée sont effectuées dans le temps jusqu'à saturation complète (2 poids espacés de 24 heures sans dépasser 0,05%)
- Une fois l'échantillon saturé, une pesée en état saturé immergé est réalisée puis elle est suivie de la pesée en état saturé après avoir essuyé l'échantillon avec un chiffon pour éliminer l'excès d'eau de la surface.
- Les échantillons testés sont ceux qui sont chauffés à 65 ° C, 200 ° C, 500 °, 800 ° C, en plus des échantillons non chauffés.
- La porosité P exprimée en pourcentage volumique est donnée par l'équation suivante :

$$P = \frac{m_{sat} - m_{sec}}{m_{sat} - m_{sat}^{imm}} \rho_e$$

Avec :

- m_{sat} : la masse d'échantillon saturé séché en surface.
- m_{sec} : la masse de l'échantillon sec après étuvage.
- m_{sat}^{imm} : la masse de l'échantillon saturé immergé.
- ρ_e : la masse volumique de l'eau.



Figure IV.16 : dispositif de la mesure de porosité du béton.

IV.6.4. Essai de traction par flexion (3 points) : norme [NFP15- 451]

Le dispositif de flexion comporte deux appuis à section semi-cylindrique de 10mm de diamètre, distant de 100 ou 106.7 mm, sur lesquels repose l'éprouvette prismatique suivant une force latérale de moulage, et un troisième appui de même diamètre, équidistant de deux premiers et transmettant de la charge F , pour faire une répartition uniforme des efforts sur l'éprouvette, deux des appuis doivent pouvoir légèrement tournés autour de leur centres, dans le plan vertical perpendiculaire aux axes des éprouvettes. 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.

$$\sigma_t = (0.6 \times \sigma_{Rf})$$

La résistance à la flexion est calculée suivant la formule :

$$Rf = \frac{3PL}{2bh^2} [\text{KgF}/\text{cm}^2]$$

P : force appliquée en [Kgf].

b : largeur de l'éprouvette.

h : hauteur de l'éprouvette.

L : distance entre les appuis (cm).

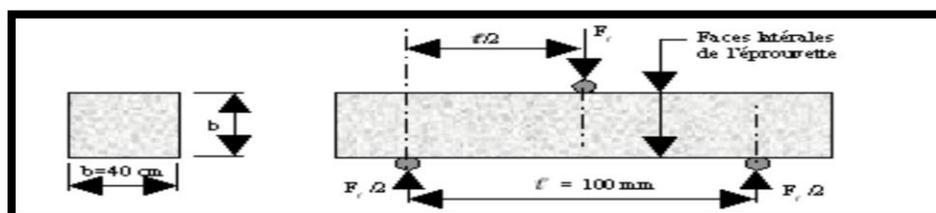


Figure IV.17 : Dispositif pour l'essai de résistance à la flexion.

IV.6.5. Essai de compression : norme [NFP 15-451]

Chaque demi-éprouvette est essayée en compression sur ces faces latérales de moulage, sous une section de $4 \times 4 \text{ cm}^2$, entre deux plaques de métal dur d'au moins 10mm d'épaisseur, de $40\text{mm} + 0.1\text{mm}$ de largeur, ces plaques sont en carbure de tungstène, la demi-éprouvette est

placée entre elle de manière que son extrémité intacte dépasse d'au moins 1cm et que les arrêtes longitudinaux d'éprouvettes soient perpendiculaires à celle des plaques. Les plaques sont guidées sans frottement appréciable au cours de l'essai, de manière à avoir la même projection horizontale, l'une d'elles peut s'incliner légèrement pour permettre le contact parfait, plaque – faces d'éprouvette.

La résistance à la compression et calculer suivant la formule :

$$R_c = \frac{F}{S} [\text{KgF}/\text{cm}^2]$$

F : charge appliquée en Kgf.

S : section latérale de l'éprouvette égale à 16 cm².

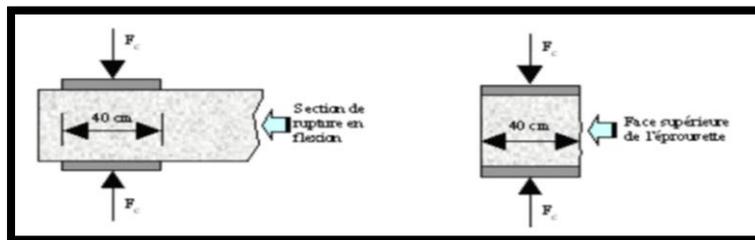


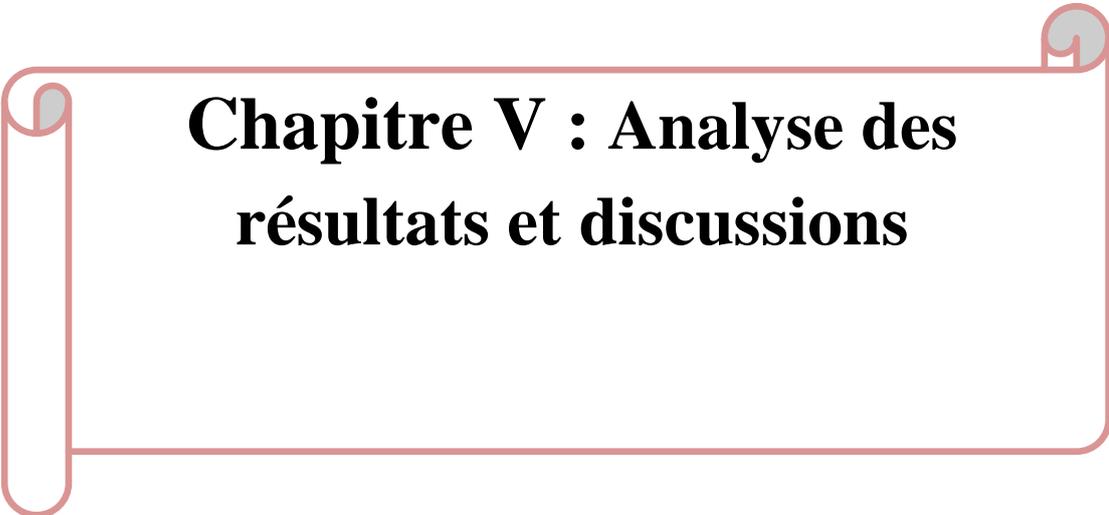
Figure IV.18 : Dispositif de rupture en compression.



Figure IV.19 : machine d'essais à la pression avec dispositif de compression et de traction.

IV.7.Conclusion

Dans cette étude, nous avons présentée dans un premier part les caractéristiques physiques et chimiques des matériaux utilisés pour la formulation de béton élaboré et d'autre part l'effet des additions sur le comportement de béton soumis à haute température à travers de nombreux essais (physique et mécanique) comme les essais de résistance à la compression et à la traction par flexion, ainsi que les essais à effectuer selon les normes et les modes opératoires en vigueur.



Chapitre V : Analyse des résultats et discussions

V.1.Introduction

Cette étude a pour objectif d'évaluer les propriétés physico-mécaniques d'un béton de poudre réactive avec l'ajout de ciment portland, sable broyé (quartz), un super plastifiant et eau, et par le remplacement complet de la fumée de silice par le poudre de marbre, avec de pourcentage de fibres métallique (2%), pour voir l'influence des fibres métalliques sur les propriétés du béton de poudre réactive à l'état durci et l'évaluation de la qualité de béton exposé à haute température.

Les formulations des bétons réalisés sont les suivantes :

BT → Béton « témoin ».

BPRF → Béton de poudre réactive avec l'ajout de fibre métallique 2%.

V.2.Caractéristiques instantanées à l'état durci**V.2.1 L'effet de hautes températures sur les propriétés physiques et mécaniques**

- Les formulations des bétons ont été confectionnées en éprouvettes prismatiques ($40 \times 40 \times 160 \text{ mm}^3$) et cubiques ($50 \times 50 \times 50 \text{ mm}^3$).
- Les éprouvettes ont été conservées à l'eau pendant 206 jours à une température ambiante de 20° C .
- Après 206 jours, nous prélevons les échantillons de l'eau et passage de tous les éprouvettes à l'étuve jusqu'à la stabilisation de leur masse à une température de 65° C . Exposition des éprouvettes à des températures de, 200° C , 500° C et 800° C avec une vitesse de montée en température de $5^\circ \text{ C}/\text{min}$ et un maintien en température dans le four à moufle pendant 1heure. Le procédé expérimental appliqué repose sur un chargement thermique puis mécanique (l'écrasement).



Figure V.1 : disposition des éprouvettes dans le four

V.2.1.1 : La perte de masse

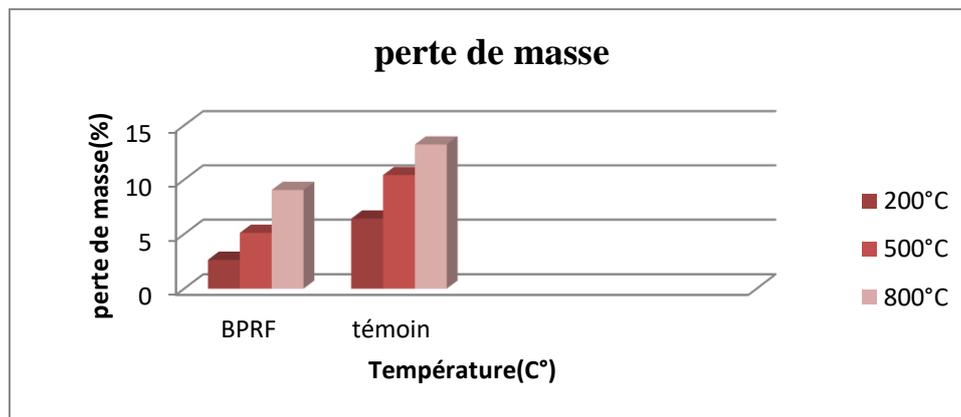


Figure V.2 : Evolution de la perte de masse pour les éprouvettes prismatiques avec température.

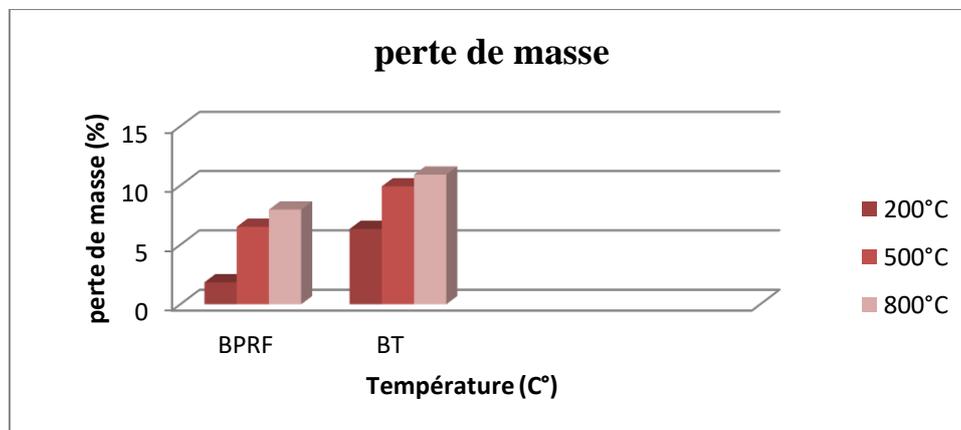


Figure V.3 : Evolution de la perte de masse pour les éprouvettes cubiques avec température.

Les résultats des (Figure de V.2 à V.3) nous permettent de dire que la perte de masse n'est pas influencée par la forme et les dimensions des éprouvettes.

On remarque l'augmentation brusque de la perte de masse, et la perte de masse commence à partir des températures supérieures à 65°C. Cette perte est due à l'évaporation de l'eau et la déshydratation Progressive du gel CSH. Les histogrammes obtenus montrent que la cinétique de la perte de masse augmente brusquement entre 200 et 500°C. Elle est due au départ de l'eau absorbée et liée (décomposition des hydrates).

À 800°C, la perte de masse devient très importante à cause de la seconde étape de la déshydratation des silicates de calcium hydratés qui engendre lui-même l'évaporation d'une nouvelle quantité de l'eau liée chimiquement. Plusieurs auteurs ; Noumowé et al, Confirment qu'au-delà de 500 ° C, il n'y a plus d'eau dans le spécimen de béton [Noumowé, 2001 ; Tsybrovska, 2015 ; Tebbal et al, 2017].

V.2.1.2 : La résistance de compression

La résistance à la compression des mélanges de bétons à température ambiante et après chauffage à 200 °C, 500 °C et 800 °C est illustrée par la figure V.4.

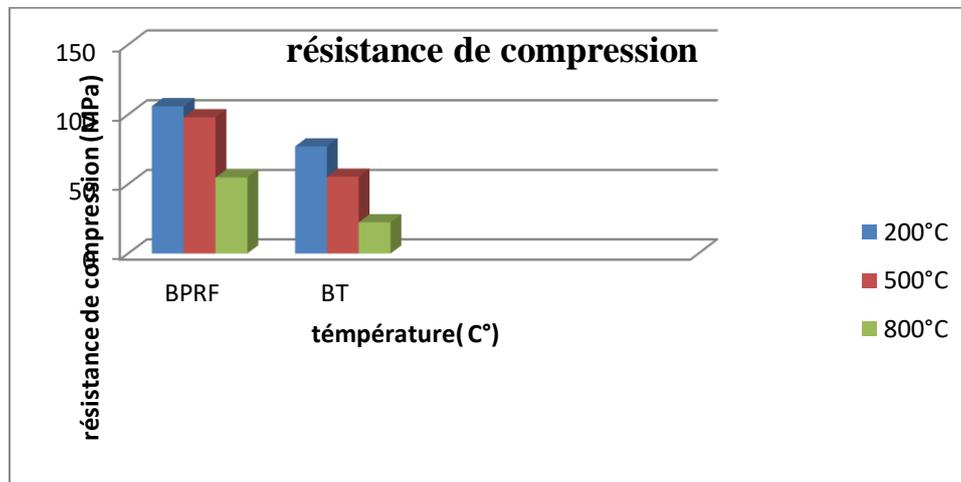


Figure V.4 : Evolution de la résistance de compression avec température.

La température élevée entraîne des changements physiques et chimiques significatifs et diminue la résistance à la compression du BPR.

Comme le montre la (Figure V.4). Le comportement de BPRF exposés aux hautes températures diffère de celui du BT (témoin). En comparant la résistance à la compression de BPRF et BT on voit clairement que la résistance de BPRF est supérieure à l'autre résistance de BT, on peut noter que pour des températures allant jusqu'à 200°C, La résistance à la compression du BPRF et BT augmente progressivement, mais commence à diminuer à mesure que les températures augmentent continuellement. , lorsque la température atteignait 500 ° C, sa résistance à la compression commença à décliner .La décomposition des hydrates de C-S-H et de CH dans la plage de 500 °C a entraîné une diminution de la résistance. [Abid et al, 2019].

De plus, à 800 ° C, les valeurs de la résistance sont faible les liaisons entre le ciment passé, les granulats et les fibres d'acier étaient gravement détériorées en raison d'une expansion inégale entre eux.

La diminution de la résistance a été attribuée à divers facteurs dans la section analyse de la microstructure (déshydrations, fissuration...). La porosité du béton a un effet direct sur la résistance lorsque l'eau libre est éliminée.[Kalifa et al, 2001 ;Tebbal et al, 2017].

V.2.1.3. La résistance de traction par flexion (3point)

La résistance de traction par flexion des mélanges de bétons à température ambiante et après chauffage à 200 °C, 500 °C et 800 °C est illustrée par la figure V.5.

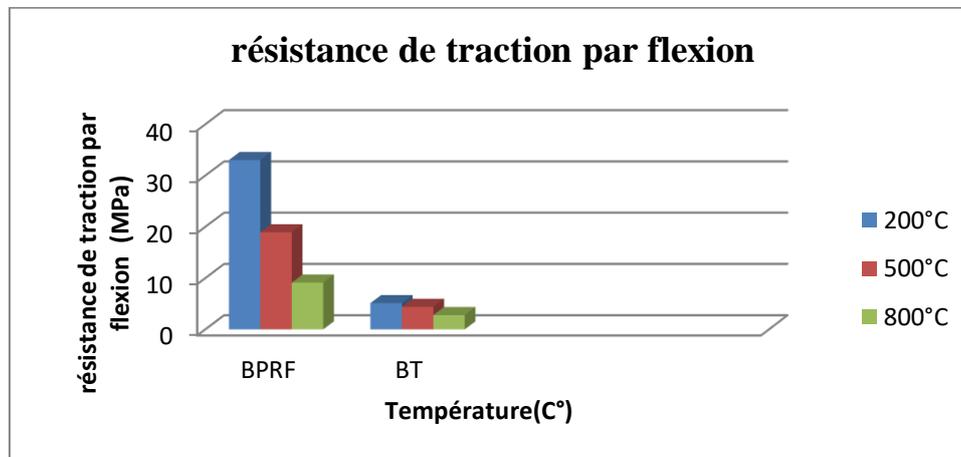


Figure V.5 : Evolution de la résistance de traction par flexion avec température.

Des essais de flexion 3 points ont été réalisés sur trois éprouvettes prismatiques avant et après chauffage à différentes températures. Les résultats sont présentés sur la figure V.5 qui représente les valeurs d'évolution de la résistance de traction par flexion des BPRF et BT des bétons en fonction de la température du cycle de chauffage-refroidissement à différentes températures cibles (200°C, 500°C, 800°C).

Les valeurs de la résistance de traction par flexion des bétons testés diminuent de manière continue avec l'élévation de la température.

À 200°C, on observe une baisse de la résistance de traction par flexion des bétons BPRF et BT. Ceci est cohérent avec les résultats de résistance à la traction fractionnée et l'incorporation de fibres d'acier a augmenté la résistance par rapport le BT sans fibre en raison de la résistance supplémentaire fournie par les fibres métallique contre la propagation des fissures. Au-delà de 500°C, on observe une diminution de la résistance pour tous les bétons.

À 800°C, les valeurs de la résistance de traction par flexion de BPRF et BT sont très faibles.

L'évolution des résistances en compression et en flexion en fonction de la température de chauffage des bétons de fibres métalliques peuvent être regroupées en deux domaines comme pour les bétons sans fibres et les bétons de fibres. L'ajout des fibres métalliques dans le béton entraîne d'une façon générale une amélioration des propriétés mécaniques à la température 200°C jusqu'au 500°C. Le gain sur la résistance en traction est meilleur que sur la résistance en compression après le chauffage à 500°C. Les fibres métalliques sont utilisées dans le béton pour améliorer sa ductilité à différentes températures. Les essais réalisés en compression comme en traction montrent un bon comportement ductile du béton contenant les fibres

métalliques non seulement à température ambiante mais aussi à la suite des différents cycles de chauffage-refroidissement. [Abid et al, 2019].

V.2.1.4.Porosité à l'eau

La mesure de la porosité permet de caractériser la microstructure poreuse du béton. Les résultats sont obtenus par l'essai de pesée hydrostatique pour tous les bétons (BPRF et BT)

Cet essai a nécessité au moins 8 jours à 12 jours pour que la masse se stabilise, il faute de temps, nous n'avons pas pu le terminer, et c'est un ensemble d'étapes que nous avons fait :



Figure V.6 : des étapes d'essai de porosité.

Selon les travaux de [Abid et al. 2019] la porosité du BPR augmentait progressivement avec l'augmentation de la température. De plus, le BPR a un diamètre de pore et une porosité médians à toutes les températures cibles. Le diamètre extérieur médian des BPR ne change pas significativement à 500 ° C, mais il augmente fortement au-dessus de 700 ° C.

Les travaux de [Tebbal et al, 2017] ont montré que : Entre 20 et 200 ° C, la porosité augmente très peu. Le BHP montre une diminution de 0,26%.

Kalifa [Kalifa et al, 2001] explique que la diminution de la porosité du BHP est associée à la densification due à l'hydratation complémentaire du BHR. Entre 200 ° C et 400 ° C, la porosité augmente de 4,5% pour le. Cette croissance est associée au rejet d'eau, qu'elle soit présente dans le réseau d'eau ou liée chimiquement.

Kalifa [Kalifa et al, 2001] explique que la diminution de la porosité du CR entre 200 ° C et 300 ° C par rapport au BHP est associée à une densification due à une hydratation et une carbonatation complémentaires de la Portlandite dans des conditions d'autoclavage interne; c'est-à-dire sous une pression supérieure à la pression atmosphérique. En revanche, cette densification n'est pas observable dans le BHP qui contient très peu de Portlandite, grâce à la présence de fumée de silice. À 600 ° C, la valeur de porosité a considérablement augmenté de 6,1% par rapport à celle de 20 ° C. Pour le CR 2.5 et c'est presque 6,33% pour le BHP.

L'évaluation de la porosité à 900 ° C est pratiquement impossibles car les éprouvettes ont subi de graves dommages et se sont désintégrées.

V.3.Observations de l'endommagement des bétons soumis à haute température

À 200 ° C, l'apparence et la couleur des échantillons BPRF étaient les mêmes que ceux à température ambiante. Lorsque la température atteint 500 ° C les spécimens ont viré au brun grisâtre, les réactions chimiques se sont produites et l'eau liée s'est séparée.

À 800 ° C, petites fissures ont commencé à apparaître et le spécimen a viré à une couleur gris foncé.

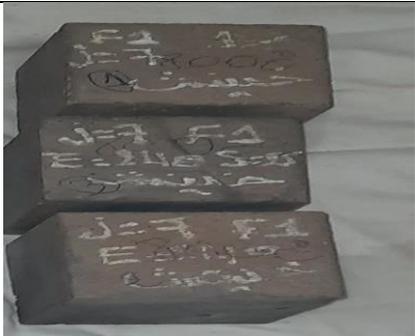
Température (C°)	BPRF	BT
200°C		
500°C		
800°C		

Figure V.7. Observations à l'œil nu de l'évolution de la dégradation des bétons (BT, BPRF) après les cycles de chauffage de 200°C, 500°C, 800°C.

V.4.Conclusion

Ce chapitre présente, dans un premier temps, une analyse comparée des propriétés mécaniques et physiques des différents bétons « béton témoin et béton de poudre réactive » avant et après leur exposition à différents cycles de chauffage-refroidissement 200 ° C, 500 ° C et 800 ° C.

Les résultats obtenus permettent de constater que :

- La température critique, qui entraîne des propriétés d'atténuation maximales de différentes résistances à la compression, à la flexion et la perte de masse est comprise entre 200 ° C et 500 ° C.
- Au-delà de 500 ° C le béton peut perdre la majorité de ces propriétés c'est à dire qu'il y a des propriétés qui peuvent s'annuler. On peut dire que le béton est devenu fragile.
- Les bétons avec super plastifiant sont affectés par des températures élevées en particulier à 500 ° C et plus par rapport à un dosage inférieur au super plastifiant ;
- Pour des bétons plus résistants, l'ajout de poudre de marbre conduit à une résistance plus faible (24%) dans la plage de température testée, entre 200 et 500 ° C.
- Les échantillons BPR contenant de la poudre de marbre ont une contrainte de compression élevée par rapport aux échantillons BPR sans poudre de marbre.
- En général, la porosité du BPR augmentait progressivement avec l'augmentation de la température.
- Le BPR fonctionne mieux que les types de béton traditionnels en raison de sa microstructure supérieure et du rôle efficace des fibres.
- Des changements de couleur ont été observés sur le béton sous l'effet des températures élevées.



Conclusion générale

Conclusion générale

Les conclusions suivantes ont été obtenues à partir des résultats expérimentaux :

- ❖ la perte de masse augmente brusquement entre 200 et 500°C. Elle est due au départ de l'eau absorbée et liée (décomposition des hydrates), à 800°C, la perte de masse devient très importante à cause de la seconde étape de la déshydratation des silicates de calcium hydratés.
- ❖ La résistance à la compression du BT témoin est nettement inférieure à celle du BPRF en raison de la moindre résistance des fibres d'acier.
- ❖ La réduction de la résistance à la compression du béton était significativement plus importante pour les échantillons exposés à des températures supérieures à 500 C. La décomposition des gels de Ca (OH) 2 et C-S-H, en particulier à 800 C, a conduit à la détérioration totale du béton. Ce résultat est l'un des résultats de la diminution de la résistance à la compression.
- ❖ Le BT témoin a la plus faible résistance à la flexion par rapport au BPRF. le BPRF fonctionne mieux que les types de béton traditionnels en raison de sa microstructure supérieure et du rôle efficace des fibres.
- ❖ La dégradation de la résistance à la rupture pour tous les types de BPRF est graduelle avec l'augmentation de la température.
- ❖ Généralement, la porosité du BPRF augmentait progressivement avec l'augmentation de la température. De plus, le BPRF a un diamètre de pore et une porosité médians à toutes les températures cibles. Le diamètre extérieur médian des BPRF ne change pas significativement à 500 ° C, mais il augmente fortement au-dessus de 800 ° C [Chen How-Ji et al. 2020 ; Abid et al, 2019].
- ❖ La résistance à la compression du BPRF augmente progressivement lorsque les échantillons sont chauffés à 200 °C, mais commence à diminuer lorsque les températures augmentent continuellement. Les échantillons contenant 2% de fibres d'acier augmentent considérablement la résistance à la compression à 200 ° C ; leur résistance à la compression diminue progressivement à mesure que les températures atteignent 500 °C et plus.
- ❖ Les échantillons BPRF qui ont été séchés à une température de 65 °C pendant la même période de durcissement n'ont pas présenté de rupture par éclats explosifs, même à des températures de 800 °C

- ❖ On peut dire que le BPRF est un matériau prometteur pour les structures à haut risque d'incendie en raison de son comportement non explosif et de sa moindre récession de résistance.
- ❖ L'addition des fibres métalliques est utilisée dans le béton pour limiter la propagation des fissures et produire ainsi un matériau plus ductile. L'utilisation des fibres métalliques dans le béton porté à des températures élevées a aussi fait l'objet d'une étude. La composition de béton testée a été confectionnée en utilisant un dosage en fibres de 2%, en proportion volumique.
- ❖ Le renforcement par les fibres métalliques est très important dans la traction qu'en compression, à cause de la géométrie des fibres, la teneur et la forme de ces derniers

Perspectives et recommandations :

En perspective nous proposons les travaux futurs suivants :

- ✓ l'influence de finesse et le dosage l'addition et les propriétés chimiques...etc. sur la performance des BPR et sa comportement soumis à de hautes températures.
- ✓ L'utilisation d'un ciment de classe supérieur, afin d'avoir des résistances plus élevées.
- ✓ L'utilisation d'autres additions actifs tel que le cendres volantes, laitier ...etc. ou inertes comme le calcaire bien broyé.
- ✓ L'introduction d'autres fibres avec un changement de dimensions et de nature.
- ✓ Augmenter le pourcentage de l'addition pour augmenter la compacité du béton.
- ✓ utiliser d'autres alternatives pour les adjuvants, l'addition, afin qu'ils soient des alternatives économiques mais aient le même effet.



References bibliographiques

References bibliographiques

- [Abid et al, 2019]: Muhammad Abid 1, 2, Xiaomeng Hou 1, 2,, Wenzhong Zheng 1, 2 and Raja Rizwan. Hussain 3, “Effect of Fibers on High-Temperature Mechanical Behaviour and Microstructure of Reactive Powder Concrete”, Materials 2019,
- [Aboutair, 2019] :Aboutair Amel, « Caractérisation Physico-mécanique Et Microstructurale Des Bétons Fibrés A Matrices Ultra Haute Performance », Thèse De Doctorat, Université M’hamed Bougara-BoumerdeS, 2019
- [Abtan et al, 2019]:Abtan, Yaarub G.and, Hassan Falah Hassan. "Flexural Strength of Modified Reactive Powder Concrete One Way Slabs." The Open Civil Engineering Journal 13.1 ,2019.
- [Allal, 2015] :Allal Ishaq, Tenue Et Comportement Au Feu Des Bétons Université Des Frères Mentouri Constantine, Matériaux Génie Civil, 2015.
- [Alrekabi et al. 2017]: Alrekabi, T. K., Cunha, V. M., & Barros, J. A., «Reactive powder concrete reinforced with steel fibres exposed to high temperatures”. In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering (Vol. 246, No. 1, p. 012020). IOP Publishing, 2017.
- [Alyaa et al, 2020]:AlyaaA.Al-AttarMazin B.AbdulrahmanHussein M.Hamada^cBassam A.Tayeh^d., “Investigating the behaviour of hybrid fibre-reinforced reactive powder concrete beams after exposure to elevated temperatures”, Journal of Materials Research and Technology, Volume 9, Issue 2, March–April 2020, Pages 1966-1977.
- [Amanjean, 2015] : Amanjean, Elsa Nguyen Phuong, « Développement De Bétons Fibrés Ultra Performants Pour La Réalisation D'éléments De Structure Préfabriqués », Thèse Doctorat, Université De Toulouse, 2015.
- [Antonio, 2015]: Antonio Domingues de Figueiredoa, Marcos Roberto Ceccatob, “Workability Analysis of Steel Fiber Reinforced Concrete Using Slump and Ve- Be Test Mat”. Res. vol.18 no.6 São Carlos Nov. /Dec. 2015 Epub Nov. 03, 2015.
- [Arab et Rafai, 2017] : Arab azedine, rafai hichem, « élaboration et étude des caractéristiques physico-mécaniques des Bétons fibrés à ultra hautes performances avec ajouts de pouzzolane naturelle et de fumées de silice », Mémoire master, université m’hamed bougara boumerdeS, 2017.
- [Azizi et Aissou, 2016] : Azizi Moussa, Aissou Lyes, « Les Bétons De Fibres Métalliques », Mémoire de Master Académique, Université de Tébessa, 2016

[Belaid, 2013] :Belaid, Rachid. « Etude De Bétons A Hautes Performance A Base De Poudre De Marbre Et De Cendre », Thèse De Doctorat, université de science et de la technologie houari Boumediene, 2013

[Belaribi, 2007] : Belaribi Hassiba, « L'évaluation De La Qualité Du Béton De Fibres In Situ Par Les Essais Non Destructifs (Méthode Combinée Ultrason Et Scléromètre) », Mémoire De Magister, Université Mohamed Khider - Biskra, 2007.

[Belghanem et Dib, 2017]: Belghanem Abdelkader & Dib Tarik, « Etude Des Propriétés Mécaniques Et De Durabilité Des Bétons Aux Fibres Polypropylènes », Mémoire Master, Université Aboubakr Belkaïd – Tlemcen, 2017.

[Belouadah, 2018]: Belouadah Messaouda, « Etude De L'influence De La Nature Des Fillers Sur Les Propriétés Des Béton Sà Base Des Matériaux Locaux A L'état Frais Et A L'état Durci Et Soumis Aux Hautes Températures », Thèse Doctorat, Université Mohamed Boudiaf - M'sila,2018.

[Benali, 2010] : Benali Redha, « Etude Du Comportement Mécanique Et Rhéologique De La Pate Du Ciment, Mortier Et Béton Avec Différentes Fibres », Mémoire De Magister, Université Mohamed Khider Biskra ,2010.

[Benouadah, 2019] : Benouadah Abdelatif, « Étude Du Comportement D'un Béton Compacté Au Rouleau Armé De Fibres », Thèse De Doctorat, Université De M'sila Faculté De Technologie, 2019

[Bentalha, 2007]: Mme Bentalha Née Malou Malika, « Influence de l'introduction de Fibres Métalliques sur le Comportement Différé d'une Matrice Cimentaire. Caractérisation - Comportement monotone – Microstructure », Thèse Doctorat D'état, Université Mentouri-Constantine, 2007.

[Boudjema et Djilani, 2019] : Boudjema. Yamina, Djilani. Souad, « Micro-Béton A Base De Sable Mixte (Sable De Dune Et Sable Concassée) Avec Poudre De Marbre Et Adjuvant », Mémoire Master, Université Mohamed Boudiaf- M'sila, 2019.

[Boulekbache, 2013]: Bensaïd Boulekbache1, Mustafa Hamrat, Mohamed Chemrouk, Sofiane. Amziane. Comportement Des Bétons Fibrés A La Flexion : Influence Des Fibres Et De La Résistance A La Compression. 31èmes Rencontres De L'augc, E.N.S. Cachan, 29 Au 31 Mai 2013.

[Casanova, 1996] : Casanova P. «Bétons renforcés de fibres métalliques du matériau à la structure», LCPC, 1996.

- [**Chadli et al, 2018**] :chadli.M ,Mekki.M and Mezghiche, "Formulation and study of metal fiber-reinforced reactive powder concrete", world journal of engineering , (2018), Vol. 15 No. 4, pp. 531-539.
- [**Chadli, 2019**]: Mounira Chadli, « Etude Des Performances Des Bétons De Poudres Réactives Fibrés », Thèse De Doctorat, Université Mohamed Khider – Biskra, 2019.
- [**Chafi, 2005**]: Chafi Nardjes, « matrice cimentaire renforcée de fibres », Mémoire de magister Université Mentouri Constantine ,2005.
- [**Chen How-Ji et al, 2020**]:Chen, How-Ji, Yu, Yi-Lin, Tang, Chao-Wei. “Mechanical Properties of Ultra-High Performance Concrete before and After Exposure to High Temperatures. Materials”, 2020, Vol. 13, No 3, P. 770.
- [**Chengdong et al, 2019**]:C. Su, Q. Wu, L. Weng, X. Chang,”Experimental investigation of mode I fracture features of steel fiber-reinforced reactive powder concrete using semi-circular bend test”, Eng Fract Mech, 209 (2019), pp. 187-199.
- [**Cherkaoui, 2010**] :Cherkaoui Khalid. « Caractérisation de la microstructure et comportement à court et long terme d'un Béton de Poudre Réactive Extrudable », Thèse de doctorat, Université Evry-Val d'Essonne, 2010.
- [**Chouiter, 2016**]: Chouiter Youcef, « Etude Du Comportement D'un Béton A Haute Performance (BHP) Avec Des Fibres De Verre Soumis A Haute Température », Mémoire Master, Université Mohamed Boudiaf - M'sila, 2016.
- [**Courtial et al, 2011**] : Courtial, M., Khelidj, A., Cherkaoui, K., de Noirfontaine, M. N, Dunstetter, F., & Mounanga, P. « Microstructure d'un Béton de Poudre Réactive Extrudable », Université d'Artois, France, 2011.
- [**Dakhmouche, 2009**]: Dakhmouche Fatima-Zohra, « Carbonatation de bétons adjuvantes a base de ressources locales Algériennes », Thèse Doctorat, Université d'Orléans et de l'Université Mentouri de Constantine, P240, 2009.
- [**Dehbi et Chaibet, 2019**] : Dehbi Nacera Melissa, and Cylia Chaibet. « Comportement rhéologique et physico-mécanique des mortiers autoplaçants avec ajouts minéraux », Mémoire master, Université Mouloud Mammeri Tizi-Ouzou, 2019.
- [**Djebali, 2013**]: Djebali Saïd«caractérisation des éléments de structures en béton de fibre métallique» Thèse doctorat, Université Mouloud Mammeri, 2013.
- [**Djelouahi, 2017**] : Djelouahi Hayet, « Influence des fibres végétales sur les propriétés physico-mécaniques d'un béton », Mémoire master, Université M'hamed Bougara-boumerdeS, 2017

- [Dugat et al, 1995]** :Dugat J., Roux N., Bernier G., « Etude expérimentale de la déformation sous contrainte et du comportement à la rupture du béton de poudre réactive (BPR) ». Annales de l'ITBTP, n°.532, mars avril 1995, p. 112-121.
- [Ellouze, 2005]** : Ali Ellouze, Mongi Ben Ouezdou1, Mohamed Ali Karray, Aouicha Beddey, « Etude Des Bétons A Fibres Renforcés Par Des Fibres Métalliques A Base De Matériaux Locaux. Colloque Cmedimat ».2005.
- [Fritih, 2009]**: Youcef Fritih, « Apport d'un renfort de Fibres sur le comportement d'éléments en Béton autoplaçant armé », Thèse de Doctorat, L'université de Toulouse, 2009
- [Gharbi et Fali, 2019]** : Gharbi Fayza, Fali Malika, « Evaluation De La Qualité Des Bétons Auto -Plaçant (Bap) Exposés A Haute Température Aux Moyens Des Essais Non-Destructifs (End) Et Essais Direct », Mémoire Master, Université Mohamed Boudiaf - M'sila, 2019.
- [Guangyao et al, 2019]** :Guangyao Yang, Jiangxiong Wei,*Qijun Yu, Haoliang Huang, and Fangxian Li., “Investigation of the Match Relation between Steel Fiber and High-Strength Concrete Matrix in Reactive Powder Concrete”, Materials (Basel). 2019.
- [Hachemi, 2015]** : Hachemi Samia « étude du comportement du béton soumis à haute température », Thèse de Doctorat, Université de Mohamed Khider Biskra, 2015.
- [Haddadou, 2015]**: Naamaoui née Haddadou Naima, « Elaboration et caractérisation de béton autoplaçant fibré avec ajout de poudre de marbre », Thèse de Doctorat, Université M'hamed Bougara-Boumerdes ,2015.
- [Hemil, 2018]** : Hemil Samir, « Effet Combiné Des Billes Du Polystyrène Et Les Fibres Plastique Sur Les Mortiers Au Ciment Blanc », Mémoire Master, Université Mohamed Boudiaf - M'sila ,2018.
- [Hiremath et Yaragal, 2018]** :P.N. Hiremath, S.C. YaragalPerformance, “evaluation of reactive powder concrete with polypropylene fibers at elevated temperatures”,Constr Build Mater, 169 (2018), pp. 499-512.
- [Kalifa et al, 2001]**: Kalifa, P., Chene, G., Galle, C, “High-temperature behaviour of HPC with polypropylene fibres from spalling to microstructure”, Cement and Concrete Research, Vol 31, Issue 10, 2001, 1487-1499.
- [Kaouane, 2011]** :Melle. Kaouane Malika, « Analyse Des Contraintes Mécaniques Et De La Fissuration Des Eléments En Béton Armé Sous L'effet Thermomécanique », Mémoire De Magister, Université Mouloud Mammeri-Tizi Ouzou, 2011.
- [Kessal, 2017]** :Oussama Kessal, « Étude Multi Echelle De L'influence Des Granulats Sur Le Comportement De Béton Soumis A Haute Température », Thèse Doctorat, Université Mohamed Khider – Biskra, 2017.

References bibliographiques

[Khelifa, 2017]:Khelifa, Mohammed Rissel « Formulation Et Caractérisation D'éco-Bétons Renforcés Aux Fibres D'alfa Pour Des Bâtiments Verts Et Durables », Thèse De Doctorat, Cergy-Pontoise, 2017.

[Khetta, 2015] : Khetta walida, « Etude de l'influence des fibres métalliques sur le comportement mécanique d'un béton a poudre reactive », Mémoire de master, Université Mohamad Khider-biskra, 2015.

[Khuzai et Atea, 2019]:H.M.A.A. Khuzai, R.S. Atea,"Investigation of torsional behaviour and capacity of reactive powder concrete (RPC) of hollow T-beam",J Mater Res Technol, 8 (2019), pp. 199-207.

[Ladour, 2014] :Ladour Ilyes, « Etude Des Performance Des Bétons De Poudres Réactives Fibres (Bpr-F) », Mémoire Master, Université Mohamed Khider – Biskra, 2014.

[Lanez, 2005] :Lanez Madiha « Contribution a l'étude des bétons de poudres réactives », Mémoire magister, Université des sciences et de la technologie Houari Boumediene, 2005.

[Malik, 2007]: Malik, Adnan R."An investigation into the behaviour of reactive powder concrete columns." The University of New South Wales, Sydney, Australia: a dissertation in School of Civil and Environmental Engineering, 2007.

[Meddah, 2014]: Meddah Hayat, « L'apport Mécanique Des Fibres Métalliques Dans Le Renforcement D'un Tablier D'un Pont Caisson », Magister, Université Abdelhamid Ibn Badis – Mostaganem, 2014.

[Meddahi et al, 2016]: Meddahi Kamel Mme Meddahi Nacira Née Rezgui, « Comportements Des Bétons Renforcés Par Des Fibres Métalliques, Méthodologie Et Hypothèse De Recherche », Mémoire Master, Université Akli Moand Oulhadje-Bouira, 2016.

[Missemer, 2011]: Ludovic Missemer, « Etude Du Comportement Sous Très Hautes Températures Des Bétons Fibrés A Ultra Hautes Performances : Application Au Bcv », Thèse De Doctorat, Université De Grenoble, 2011

[Mostofinejad et al, 2016]:Mostofinejad D., Nikoo M.R., Hosseini S.A. "Determination of optimized mix design and curing conditions of reactive powder concrete», Constr. Build. Mater, 2016.

[Nassah, 2017] : Nassah Dalila, « Influence de la quantité de fibres naturelles (alfa) et commerciales (polypropylène) sur les propriétés physicomécaniques des mortiers fibrés », Mémoire master, Université M'hamed Bougara –BoumerdeS, 2017.

[Noumowé, 2001]: Noumowé. A., "Study of high strength concretes at raised temperature up to 200°C: thermal gradient and mechanical behaviour, 16th International Conference on

Structural Mechanics in Reactor Technology”, (smirt 16), Vol 1, Washington, DC, USA, 2001.

[Olga, 1996] :Olga-mehaela S, «La Production Des Eléments Fabriqués En Béton De Poudres Réactives», Mémoire de maitrise ès sciences appliquées spécialité génie civil, canada, 1996

[Rahmani, 2019] :Rahmani hassiba, « l’influence des types de fibres sur le comportement du béton à haute température », Thèse de doctorat, Université de Mohamed Khider, biskra ,2019.

[Sanchayan et Foster, 2016]:S. Sanchayan, S.J. Foster, “High temperature behaviour of hybrid steel–PVA fibre reinforced reactive powder concrete”,Mater Struct, 49 (2016), pp. 769-782.

[Saoudi, 2016] : Saoudi Souhila, « Élaboration Et Caractérisation D’un Béton Réfractaire Fibré (À Base Du Déchet Réfractaire) », Mémoire Master, Université Akli Moand Oulhadje-Bouira, 2016.

[Setti et al, 2012] : Setti F. 1, Ezziane K. 1, Setti B.] F. Setti 1, K. Ezziane 1, B. Setti 2, F. Merzoug, « Étude Du Comportement Des Poutres En Béton Renforce De Fibres Métalliques Sous Chargement Monotone Croissant. Colloque international «réduction du risque sismique», chlef les 10 et 11 octobre 2012.

[Sovjak et al, 2017]: Sovjak R., Maca P., Imlauf T. “Effect of fibre length on the fracture energy of UHPFRC”, Procedia Eng, 2017.

[Sung-HoonKang et al, 2019]:S.-H. Kang, S.-G. Hong, J. Moon, “The use of rice husk ash as reactive filler in ultra-high performance concrete”,Cem Concr Res, 115 (2019), pp. 389-400.

[Tabet, 2012] : Tabet Nesrine, « contribution à l’étude de l’influence de la nature et dimensions des fibres sur le comportement physico-mécanique des bétons autoplaçants fibrés (BAPF) », Mémoire de magistère, Université M’hamed Bougara –Boumerdes, 2012.

[Tafraoui, 2009] : Tafraoui Ahmed, « Contribution à la valorisation du sable de dune de l’erg occidental (Algérie) ». Thèse de doctorat, Université Paul Sabatier-Toulouse III, 2009.

[Tai Yuh-Shiou et al, 2011]: TAI, Yuh-Shiou, PAN Huang-Hsing, KUNG, and Ying-Nien. “Mechanical properties of steel fiber reinforced reactive powder concrete following exposure to high temperature reaching 800° C”. Nuclear Engineering and Design, 2011, vol. 241, no 7, p. 2416-2424.

[Talah et al, 2015]:A. Talah 1, AF. Kharchi 2, b R.Chaid3, c., “Influence of Marble Powder on High-performance Concrete Behaviour”, Procedia Engineering 114 (2015) 685 – 690.

[Tebbal et al, 2017] : Tebbal Nadia, Zine El Abidine Rahmouni, Mekki Maza, “Combined effect of silica fume and additive on the behaviour of high performance concretes subjected to high temperatures”, Mining Science, vol. 24, 2017, 129–145.

[**Technique de l'ingénieur, 2009**] :Technique de l'ingénieur par Régis ADELIN ingénieur des Ponts et Chaussées Chef de service adjoint à la Direction scientifique Bouygues BTP, 2009.

[**Toumi, 2010**] :Toumi belkacem « Étude de l'influence des hautes températures sur le comportement du béton », Thèse de doctorat, Matériaux, Université Mentouri Constantine, 2010.

[**Tsymbrovska, 2015**] :Tsymbrovska, “Effect of heating–cooling cycles on transient creep strain of high performance, high strength and ordinary concrete under service and accidental conditions materials and structures, Vol. 48, Issue 5, 2015, 1561-1579,1998.

[**Van Thai Nguyen, 2013**] : « Van Thai Nguyen, « Comportement Des Bétons Ordinaire et a Hautes Performances Soumis A Haute Température : Application A Des Eprovettes De Grandes Dimensions », Thèse De Doctorat, L'université De Cergy-Pontoise, 2013.

[**Wu et al, 2016**] : Wu Z., Shi C., He W., Wu L. “Effects of steel fiber content and shape on mechanical properties of ultra high performance concrete”. Constr. Build. Mater. 2016

[**YangJu et al, 2015**] :Y. Ju, L. Wang, H. Liu, K. TianAn, “experimental investigation of the thermal spalling of polypropylene-fibered reactive powder concrete exposed to elevated temperatures», Science bulletin, 60 (2015), pp. 2022-2040.

[**Yermak, 2015**] : Yermak Nonna « Comportement à hautes températures des bétons additionnés de fibres », Thèse de doctorat, Université de Cergy Pontoise, 2015.

[**Zenati ,2007**] : Zenati Abdelfattah, « Contribution A L'étude Des Bétons De Poudres Réactives A Base De Fibres », Mémoire Magister, Université Des Sciences Et De La Technologie Houari Boumediene, 2007.



LES ANNEXES



50kg

ملكي
Malaki
Super
Ciment Blanc

ALGÉRIE

LAFARGE
لافارج

Malaki Super Blanc 52,5
Ciment Portland
NA 442 - CEM I 52,5 R

Malaki Super Blanc Ciment blanc pour béton de haute performance; destiné à la construction des Ouvrages d'Art esthétiques, éléments décoratifs, mortiers et fabrication de carreaux.

Malaki Super Blanc
NA 442 - CEM I 52,5 R

Malaki Super Blanc est certifié, conforme à la norme Algérienne (NA442 - 2013), Européenne (EN197-1) et CE(0099/CPR/A33/001025) par un organisme de certification.



AVANTAGES PRODUIT



- Ciment développant des performances initiales et finales très élevées.
- Le mieux adapté pour votre ligne de production de bicouche et monocouche.
- Permet de réaliser des éléments en béton avec un niveau de finitions inégalé.
- Favorise l'obtention d'une gamme importante de couleurs.
- Idéal pour les structures en béton apparent.
- Idéal pour les mortiers et colles à base de ciment.

L A member of
LafargeHolcim

APPLICATIONS RECOMMANDÉES ✓

- Construction des Ouvrages d'Art esthétiques et éléments décoratifs.
- Carreaux de dalle: monocouche et bicouche.
- Mortiers et colles à base de ciment.
- **Idéal pour la préfabrication légère et lourde.**



FORMULATION CONSEILLÉE 🪣

	Ciment 	Sable Moyen (sec) 0/4 	Gravillons (sec) 4/8mm 10/20mm 20/40mm 	Eau (litres) 
Dosage pour béton CBS30	X 1 	X 7 	X 5  + X 8 	25 L

Remarque: un bidon = 10 Litres

Cette formule est proposée en l'absence d'une formulation étudiée et dérivée par un laboratoire spécialisé.

CARACTÉRISTIQUES TECHNIQUES 🔍

• Analyses chimiques

	Valeur
Perte au feu (%) (NA5042)	3 ± 2,5
Teneur en sulfates (SO3) (%)	2,8 ± 0,8
Teneur en oxyde de magnésium MgO (%)	1,8 ± 0,8
Teneur en Chlorures (NA5042) (%)	< 0,1

• Composition minéralogique du Clinker (Bogue)

	Valeur
C3S (%)	55 ± 3
C2S (%)	9,0 ± 1

• Propriétés physiques

	Valeur
Consistance normale (%)	28 ± 3
Finesse suivant la méthode de Blaine (cm ² /g) (NA231)	4000 - 5000
Béton à 28 jours (µm)	< 1000
Blancheur (Y)	84 ± 4

• Temps de prise à 20° (NA 230)

	Valeur
Début de prise (min)	140 ± 40
Fin de prise (min)	200 ± 40

• Résistance à la compression

	Valeur
2 jours (MPa)	≥ 30
28 jours (MPa)	≥ 55

Ces données sont communiquées à titre informatif et sont susceptibles d'être modifiées en fonction des paramètres de production.

Conditionnement: Sac, Vrac et Big bag

CONSIGNES DE SÉCURITÉ ⚠

1- **PROTÉGEZ VOTRE PEAU** : Portez les équipements adaptés dans vos chantiers: casques, lunettes, gants, genouillères, chaussures et vêtements de sécurité.

2- **MANUTENTION** : Lavez le sac en plant les genoux et en gardant le dos droit.



A member of LafargeHolcim

CONSEILS DE STOCKAGE ✓

- Dans un endroit couvert.
- Ne pas entreposer directement au sol.

LAFARGE ALGÈRE.
Centre commercial Bab Ezzouar, Tour n°02,
Etages 05 & 06, Bab Ezzouar Alger, Algérie
Tel: + 213 (0) 21 98 54 54
Fax: + 213 (0) 25 02 42 94
www.lafargealgerie.com
cs.satisfaction-clients@lafargeholcim.com
Tel: 021 98 54 54



Avril 2019

Notice technique
Edition 02/2010
Numéro 2.45
Version n°2010.049
SIKA® METAL FIBRES RL-45/50-BN

SIKA® METAL FIBRES RL-45/50-BN

Fibres métalliques pour le renforcement des bétons.



Présentation Les fibres SIKA® METAL FIBRES RL-45/50-BN sont fabriquées à partir de fil d'acier trellé. Elles comportent un ancrage mécanique constitué de crochets aux extrémités. Elles sont fibres non encochées. Elles sont présentées en sac papier de 20 kg.

Domaines d'application

- Sois industriels.
- Dalles sur colonnes ballastées.

Caractères généraux Grâce à la nature de l'acier qui les constitue et au système d'ancrage mécanique dont elles sont dotées aux extrémités, les SIKA® METAL FIBRES RL-45/50-BN présentent des caractéristiques de grande résistance à l'arrachement et à la traction.

Incorporées dans les bétons, les SIKA® METAL FIBRES RL-45/50-BN leur confèrent les propriétés suivantes :

- ductilité grâce à la capacité des matériaux à se déformer pour des efforts élevés sans diminution significative de la résistance,
- tenacité liée à la redistribution des contraintes et l'amélioration de l'absorption d'énergie nécessaire à la rupture,
- accroissement de la résistance à la fatigue et aux chocs,
- contrôle de la fissuration grâce à la reprise des contraintes qui permet de maîtriser l'ouverture des fissures en s'opposant à leur propagation.

Les SIKA® METAL FIBRES RL-45/50-BN, utilisées dans les bétons pour dalages industriels via une note de calcul renseignée par le demandeur.

Caractéristiques

Nature Fil d'acier trellé sans revêtement

Longueur 50 mm

Diamètre 1,05 mm

Ecartement 48

Nombre de fibres 2600 fibres/kg

Résistance en traction 1000 MPa (sur fil)



Resistance	<p>Les caractéristiques de résistance équivalente en flexion, au cisaillement et en traction axiale du béton dépendent du dosage de fibres et de la classe de résistance du béton.</p> <p>Les valeurs de ductilité sont données dans le tableau ci-dessous :</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Dosage en kg/m³</th> <th>R_{el,3} (%)</th> <th>R_{el} (%)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>20</td><td>38</td><td>33</td></tr> <tr><td>25</td><td>43</td><td>38</td></tr> <tr><td>30</td><td>48</td><td>40</td></tr> <tr><td>35</td><td>52</td><td>45</td></tr> <tr><td>40</td><td>57</td><td>50</td></tr> <tr><td>45</td><td>62</td><td>53</td></tr> <tr><td>50</td><td>67</td><td>57</td></tr> </tbody> </table> <p>Valeurs basées sur une résistance moyenne en flexion de la matrice de 4,5 N/mm² à utiliser jusqu'à C40/50</p>	Dosage en kg/m ³	R _{el,3} (%)	R _{el} (%)	20	38	33	25	43	38	30	48	40	35	52	45	40	57	50	45	62	53	50	67	57																																																																																												
Dosage en kg/m ³	R _{el,3} (%)	R _{el} (%)																																																																																																																			
20	38	33																																																																																																																			
25	43	38																																																																																																																			
30	48	40																																																																																																																			
35	52	45																																																																																																																			
40	57	50																																																																																																																			
45	62	53																																																																																																																			
50	67	57																																																																																																																			
Conditionnement	<ul style="list-style-type: none"> ■ Sacs papier de 20 kg ■ palette de 60 sacs (1200 kg) ■ Big-bag de 900 kg 																																																																																																																				
Stockage	Ne pas gerber les palettes.																																																																																																																				
Conservation	Protéger les palettes de la pluie.																																																																																																																				
Conditions d'application	<p>■ Pour les calculs de dimensionnement le tableau suivant donne la résistance équivalente en flexion pour des défibres de 1,5 mm ou 3 mm suivant la norme NBN B 15-238, 239, JSCE-SF4 et CUR31.</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th rowspan="2">Dose en kg/m³</th> <th colspan="2">1,5 mm</th> <th colspan="2">3 mm</th> <th colspan="2">1,5 mm</th> <th colspan="2">3 mm</th> <th colspan="2">1,5 mm</th> <th colspan="2">3 mm</th> </tr> <tr> <th>30</th> <th>35</th> <th>40</th> <th>45</th> <th>30</th> <th>35</th> <th>40</th> <th>45</th> <th>30</th> <th>35</th> <th>40</th> <th>45</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>20</td><td>1,8</td><td>1,9</td><td>2,1</td><td>2,2</td><td>1,8</td><td>1,9</td><td>2,1</td><td>2,2</td><td>1,8</td><td>1,9</td><td>2,1</td><td>2,2</td></tr> <tr><td>25</td><td>1,9</td><td>2,0</td><td>2,2</td><td>2,3</td><td>1,9</td><td>2,0</td><td>2,2</td><td>2,3</td><td>1,9</td><td>2,0</td><td>2,2</td><td>2,3</td></tr> <tr><td>30</td><td>2,0</td><td>2,1</td><td>2,3</td><td>2,4</td><td>2,0</td><td>2,1</td><td>2,3</td><td>2,4</td><td>2,0</td><td>2,1</td><td>2,3</td><td>2,4</td></tr> <tr><td>35</td><td>2,1</td><td>2,2</td><td>2,4</td><td>2,5</td><td>2,1</td><td>2,2</td><td>2,4</td><td>2,5</td><td>2,1</td><td>2,2</td><td>2,4</td><td>2,5</td></tr> <tr><td>40</td><td>2,2</td><td>2,3</td><td>2,5</td><td>2,6</td><td>2,2</td><td>2,3</td><td>2,5</td><td>2,6</td><td>2,2</td><td>2,3</td><td>2,5</td><td>2,6</td></tr> <tr><td>45</td><td>2,3</td><td>2,4</td><td>2,6</td><td>2,7</td><td>2,3</td><td>2,4</td><td>2,6</td><td>2,7</td><td>2,3</td><td>2,4</td><td>2,6</td><td>2,7</td></tr> <tr><td>50</td><td>2,4</td><td>2,5</td><td>2,7</td><td>2,8</td><td>2,4</td><td>2,5</td><td>2,7</td><td>2,8</td><td>2,4</td><td>2,5</td><td>2,7</td><td>2,8</td></tr> </tbody> </table> <p>■ Pour les applications de renforcement du béton dans les ouvrages en béton autoportant, les SIKAB METAL FIBRES RL-45/50-BN sont employées au dosage minimum de 20 kg/m³.</p>	Dose en kg/m ³	1,5 mm		3 mm		1,5 mm		3 mm		1,5 mm		3 mm		30	35	40	45	30	35	40	45	30	35	40	45	20	1,8	1,9	2,1	2,2	1,8	1,9	2,1	2,2	1,8	1,9	2,1	2,2	25	1,9	2,0	2,2	2,3	1,9	2,0	2,2	2,3	1,9	2,0	2,2	2,3	30	2,0	2,1	2,3	2,4	2,0	2,1	2,3	2,4	2,0	2,1	2,3	2,4	35	2,1	2,2	2,4	2,5	2,1	2,2	2,4	2,5	2,1	2,2	2,4	2,5	40	2,2	2,3	2,5	2,6	2,2	2,3	2,5	2,6	2,2	2,3	2,5	2,6	45	2,3	2,4	2,6	2,7	2,3	2,4	2,6	2,7	2,3	2,4	2,6	2,7	50	2,4	2,5	2,7	2,8	2,4	2,5	2,7	2,8	2,4	2,5	2,7	2,8
Dose en kg/m ³	1,5 mm		3 mm		1,5 mm		3 mm		1,5 mm		3 mm																																																																																																										
	30	35	40	45	30	35	40	45	30	35	40	45																																																																																																									
20	1,8	1,9	2,1	2,2	1,8	1,9	2,1	2,2	1,8	1,9	2,1	2,2																																																																																																									
25	1,9	2,0	2,2	2,3	1,9	2,0	2,2	2,3	1,9	2,0	2,2	2,3																																																																																																									
30	2,0	2,1	2,3	2,4	2,0	2,1	2,3	2,4	2,0	2,1	2,3	2,4																																																																																																									
35	2,1	2,2	2,4	2,5	2,1	2,2	2,4	2,5	2,1	2,2	2,4	2,5																																																																																																									
40	2,2	2,3	2,5	2,6	2,2	2,3	2,5	2,6	2,2	2,3	2,5	2,6																																																																																																									
45	2,3	2,4	2,6	2,7	2,3	2,4	2,6	2,7	2,3	2,4	2,6	2,7																																																																																																									
50	2,4	2,5	2,7	2,8	2,4	2,5	2,7	2,8	2,4	2,5	2,7	2,8																																																																																																									
Mise en oeuvre	<p>Il est recommandé d'ajouter les SIKAB METAL FIBRES RL-45/50-BN directement dans le malaxeur de la centrale à béton, simultanément au sable et au gravillon dans la bécasse à granulats.</p> <p>Ne pas introduire les fibres en premier et ne pas jeter les sacs en papier dans le malaxeur.</p> <p>Malaxer le mélange (béton + fibres) pendant 20 secondes avant l'introduction de l'eau de gâchage. Le temps de malaxage total est de 75 secondes.</p>																																																																																																																				

Construction

Précautions d'emploi Lors de l'ouverture des sacs ou la manipulation des sacs ouverts, il est conseillé de porter des gants.
Consulter la fiche de données de sécurité accessible sur internet www.sika.fr

Mentions légales Produit réservé à un usage strictement professionnel.
Nos produits bénéficient d'une assurance de responsabilité civile.
«Les informations sur la présente notice, et en particulier les recommandations relatives à l'application et à l'utilisation finale des produits Sika, sont fournies en toute bonne foi et se fondent sur la connaissance et l'expérience que la Société Sika AG a acquises à ce jour de ses produits lorsqu'ils ont été commercialement étudiés, manipulés et appliqués dans des conditions normales. En pratique, les différences entre matériaux, substrats et conditions spécifiques sur site sont telles que ces informations ou toute recommandation écrite ou conseil donné n'impliquent aucune garantie de qualité marchande autre que la garantie légale contre les vices cachés. Nos agences sont à votre disposition pour toute précision complémentaire. Notre responsabilité ne saurait d'aucune manière être engagée dans l'hypothèse d'une application non conforme à nos renseignements. Les droits de propriété détenus par des tiers doivent impérativement être respectés. Toutes les commandes sont acceptées sous réserve de nos Conditions de Vente et de Livraisons en vigueur. Les utilisateurs doivent impérativement consulter la version la plus récente de la fiche technique correspondant au produit concerné, qui leur sera remise sur demande.»



Sikab France S.A.
84, rue Edouard Vaillant - BP 104 Tél. : 01 49 83 60 00
91391 Le Bourget Cedex Fax : 01 49 83 60 21
France www.sika.fr

MEDAFLOW SR20

Conforme à la norme EN 934-2: TAB 1, TAB 3.1
ET TAB 3.2 NA 774.

Super plastifiant – haut réducteur d'eau

DESCRIPTION

Le **MEDAFLOW SR20** est un super plastifiant haut réducteur d'eau. Il est conçu à base de polymères de synthèse et son utilisation dans le béton permet l'obtention d'un rapport E/C très bas suivi d'un maintien d'ouvrabilité remarquable.

Le **MEDAFLOW SR 20** permet d'obtenir des bétons et mortiers de très haute qualité.

DOMAINES D'APPLICATION

- Bétons à hautes performances
- Bétons auto-plaçants
- Bétons pompés sur de longues distances
- Bétons précontraints
- Bétons architecturaux
- Bétons transportés

PROPRIÉTÉS

Grâce à ses propriétés le **MEDAFLOW SR20** permet:

Sur béton frais :

- Obtention d'un rapport E/C très bas
- Amélioration considérable de la fluidité
- Faciliter la mise en œuvre du béton
- Décoffrage rapide

Sur béton durci :

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

Résistances mécaniques en compression
(Béton durci à 500 kg/m³)

Désignation	Rc (MPa)			
Jours	1	3	7	28
Témoin	7	22	30	45
MEDAFLOW SR 20 (1,25%)	17,3	38,5	51,0	60,5

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

CARACTÉRISTIQUES

- Aspect Liquide
- Couleur Brun clair
- pH 6,0/ 6,5
- Densité 1,05 ± 0,01
- Teneur en chlore < 0,1 g/l
- Extrait sec 20%

MODE D'EMPLOI

Il est recommandé d'ajouter le **MEDAFLOW SR20** dans le béton après que les 3/4 de l'eau de gâchage ait déjà été introduit.

Il est conseillé de réaliser des essais dans les conditions de chantier afin de déterminer le dosage fournissant les résultats recherchés.

Il peut être aussi ajouté directement dans le camion malaxeur (toupie), puis malaxer à grande vitesse : 1mn/m³

Par temps chaud, le **MEDAFLOW SR20** peut être combiné à un retardateur de prise **MEDARETARD GR**.

DOSAGE

Plage de dosage recommandée :

1,0 à 2,5 % du poids de ciment soit 1 litre à 2,50 litres pour 100 kg de ciment.

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

CONDITIONNEMENT ET STOCKAGE

Le **MEDAFLOW SR20** est conditionné en bidons de 11 Kg, fûts de 210 Kg et de 240 kg, et cubitonaire de 1100 kg.

Délai de conservation :

12 mois dans son emballage d'origine, à l'abri du gel et de la chaleur (5°C < T < 35°C).

Homogénéiser le produit avant l'emploi.



Granitex

Zone Industrielle Oued Smar - BP85 Oued Smar - 16270 Alger

Tél : (213) 021 51 66 81 & 82

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

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



63

MEDAFLOW SR20

Lors d'une exposition du produit au soleil, sa couleur est sujette à changer de ton.

PRÉCAUTIONS D'EMPLOI

Manipulation non dangereuse.

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

PV d'essais conforme aux normes, établi par le CNERIB en Septembre 2006

NB : Les produits à base de Polycarboxylates d'Ether (PCE), exposé aux UV, changent dans la couleur mais sans aucun incident sur les propriétés et les effets de l'adjuvant.

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

64



Granitex

Zone Industrielle Oued Smar - BP85 Oued Smar - 16270 Alger

Tel : (213) 021 51 66 81 & 82

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

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

