

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي و البحث 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 و التكنولوجيا
قسم الهندسة المدنية و الري
المرجع 2020/2019

Mémoire de Master

Filière : Génie Civil

Spécialité : Matériaux en génie civil

Thème

**EFFETS DES HAUTES TEMPÉRATURES SUR LE
COMPORTEMENT DU BÉTON DE POUDRE
REACTIVE A BASE DES DECHETS DE BRIQUE
ROUGE**

Nom et Prénom de l'étudiant :
ILHAM HIRECHE

Encadreur :
Dr :MOUNIRA CHADLI

Année universitaire : 2019 – 2020

REMERCIEMENT :



Remerciement :

Il n'est jamais facile de faire des remerciements, toujours peur d'oublier quelques noms ou des proches alors que je vous prie de bien vouloir m'excuser si les lignes qui vont suivre vous paraissent incomplètes. Les gens qui m'entourent savent bien à quel point je les remercie. Je tiens à remercier avant tous ALLAH de m'avoir guidé dans la réalisation de ce modeste travail jusqu'au Dernier moment. Ainsi que mes parents qui m'ont toujours encouragé et soutenu durant toute la durée de mes études. J'adresse, en premier lieu, mes vifs remerciements et ma profonde gratitude à Mme CHADLI MOUNIRA mon encadreur pour les conseils et les encouragements pendant toute la durée de cette mémoire. Je tiens aussi à exprimer toutes mes gratitudes et mes remerciements à aux membres du jury dans ma discussion de fin d'études aussi à tous les enseignants de département de Génie Civil et d'Hydraulique de l'Université de Biskra. Mes plus sincères remerciements vont aussi à MADIHA, MARAM , et AYA HADIL ET SAFA. Je ne voudrais pas oublier de remercie mes collègues étudiants, avec qui j'ai eu à partager les bons et les pires moments. J'exprime mes reconnaissances à tous qui m'ont aidé, et j'ai oublié de citer. Je leurs dis désolé. Merci.

Dédicace



Dédicace :

Par-dessus tout, je voudrais remercier ALLAH, le Compatissant, le Miséricordieux, qui m'a donné la volonté et le courage de faire et de terminer cet humble travail.

Pour ceux qui cultivent l'amour de la connaissance pour moi, mon père bien-aimé, que ALLAH le protège, le secret de ma supériorité et de mon succès, ma chère mère, que ALLAH le protège de mes chers frères KARIM et YACINE et de leurs petites familles et mes sœurs AYA HADIL ,SAFA et NAWAL et leur famille à tous mes amis MARAM et MADIHA , et ceux qui m'ont aidé et qui ont pris contact avec des étudiants du Département de génie civil et hydraulique et tous les étudiants intéressés par le service scientifique. Ce qui est bon pour tout le monde, dédiez cet humble travail.

ILHAM HIRECHE.



Résumé

EFFETS DES HAUTES TEMPÉRATURES SUR LE COMPORTEMENT DU BÉTON DE POUDRE REACTIVE A BASE DES DECHETS DE BRIQUE ROUGE

Résumé

L'objectif principal de cette étude expérimentale est d'étudier le comportement du béton de poudre réactive à partir d'ajout de matières premières de déchets locaux finement broyés. Dans cette étude en utilisant des déchets locaux (poudre de brique, déchets de poudre de marbre) avec du ciment Portland, du sable fin, quartz poudre, un super plastifiant, et de l'eau par le remplacement complet de la fumée de silice, Les échantillons d'essai ont été soumis à des températures élevées allant de 200 °C 500 à 800 ° C. Après exposition, les pertes de poids ont été déterminées, puis des tests de résistance à la compression, à la flexion et la porosité ont été effectués.

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. Les effets du rapport eau / ciment (E / C) et du type de l'addition sur les pertes de poids ne se sont pas avérés significatifs. Les résultats ont également révélé que la résistance du béton diminuait à mesure que la température d'exposition augmentait. L'effet des températures élevées sur la résistance du béton était plus prononcé pour les mélanges de béton produits par de déchets de briques rouges.

Mots clés : Béton de poudre réactive, Résistance à la compression, Résistance à la flexion, Déchets de brique rouge, Poussière de marbre, Haute température.

Abstract

EFFECTS OF HIGH TEMPERATURES ON THE BEHAVIOR OF REACTIVE POWDER CONCRETE BASED ON RED BRICK WASTE

Abstract:

The main objective of this experimental study is to study the behavior of reactive powder concrete from finely ground local waste raw materials. In this study using local waste (brick powder, marble powder waste) with Portland cement, fine sand, super plasticizer, and water by the complete replacement of silica fume and quartz powder. The test samples were subjected to elevated temperatures ranging from 200 ; 500 to 800 ° C. After exposure, the weight losses were determined, then compression, flexural and porosity strength tests were performed.

The test results indicated that the sample weight was significantly reduced with an increase in temperature. This reduction was very marked above 500 ° C. The effects of the water / cement ratio (W / C) and of the type of addition on the weight losses were not found to be significant. The results also revealed that the strength of the concrete decreased as the exposure temperature increased. The effect of high temperatures on concrete strength was more pronounced for concrete mixes produced by waste red brick.

Keywords: Reactive powder concrete, Compressive strength, Flexural strength, Red brick waste, Marble dust, High temperature.

آثار درجات الحرارة العالية على سلوك الخرسانة المتفاعلة المعتمدة على نفايات الطوب الأحمر.

الملخص

الهدف الرئيسي من هذه الدراسة التجريبية هو دراسة سلوك مسحوق الخرسانة التفاعلي اعتمادا على إضافات من النفايات المحلية المطحونة بدقة. في هذه الدراسة ، تم استخدام النفايات المحلية (مسحوق الطوب ، نفايات مسحوق الرخام) مع الأسمنت البورتلاندي ، والرمل الناعم ، والملدنات الفائقة ، والماء عن طريق الاستبدال الكامل لأبخرة السيليكا وكذلك الكوارتز مسحوق. تم إخضاع عينات الاختبار لدرجات حرارة مرتفعة تتراوح من 200,500 إلى 800 درجة مئوية بعد التعرض ، تم تحديد فقد الوزن ، ثم تم إجراء اختبارات الضغط والانحناء وقوة المسامية .

أشارت نتائج الاختبار إلى انخفاض وزن العينة بشكل كبير مع زيادة درجة الحرارة. كان هذا التخفيض ملحوظاً جداً فوق 500 درجة مئوية. لم يتم العثور على تأثيرات نسبة الماء / الأسمنت (E / C) ونوع الإضافة على فقدان الوزن لتكون معنوية. كما أوضحت النتائج أن مقاومة الخرسانة تتناقص مع زيادة درجة حرارة التعرض. كان تأثير درجات الحرارة المرتفعة على مقاومة الخرسانة أكثر وضوحاً في الخلطات الخرسانية الناتجة عن نفايات الطوب الأحمر .

الكلمات المفتاحية: مسحوق الخرسانة التفاعلي ، قوة الانضغاط ، قوة الانحناء ، نفايات الطوب الأحمر ، غبار الرخام ، درجة حرارة عالية.

TABLE DES MATIERES

Table des matières :

Remerciements	i
Dédicace	ii
Résumé	iii
Abstract	iv
الملخص	v
Table des matières	x
Liste des figures	xv
Liste des tableaux	xiiiv
Symboles	xv
INTRODUCTION GENERALE	01

CHAPITRE I GENERALITES SUR LES BETONS ET LES BETONS DE POUDRES REACTIVE (BPR).

I.1 Généralité sur Béton	06
I.1.1 Introduction	06
I.1.2. Structure de Béton	06
I.1.3 Définition de béton	06
I.2. Béton à ultra haute performance	07
I.2.1 Introduction	07
I.2.2. Historique de Béton à ultra hautes performance	07
I.2.3 Différents types de Béton à ultra performance	07
I.3 Généralité sur les Bétons de Poudre Réactive (BPR)	08
I.3.1 Introduction de les Bétons de Poudre Réactive (BPR)	08
I.3.2 Historique de BPR	09
I.3.3 Définition de Béton de Poudre Réactive (BPR)	10
I.3.4 Concept du Béton de Poudre Réactive (BPR)	10
I.3.5 Domaine d'utilisation des Béton de Poudre Réactive (BPR)	11
I.3.6 Les avantages et les inconvénients des Béton de Poudres Réactive(BPR)	13
I.3.6.1 Les avantages de BPR	13

TABLE DES MATIERES

I.3.6.2 les inconvénients de BPR	13
I.3.7 Constituants d'un BPR	14
I.3.8. Caractérisation d'un Béton BPR	20
I.3.8.1 Les caractéristiques rhéologiques	20
I.3.8.2 Les caractéristiques mécaniques et physiques	23
I.3.8.2.1 Introduction	23
I.3.8.2.2 Résistance à la compression	23
I.3.8.2.3 Résistance à la traction	26
I.3.8.2.4 La durabilité	26
I.3.8.2.5 Porosité	27
I.3.8.2. La résistance au feu	27
I.3.9 Microstructure des BPR	28
I.3.10 Principe de formulation de BPR	29
I.4 Conclusions	31

CHAPITRE II

COMPORTEMENT DES BETONS A HAUTE

TEMPERATURE.

II.1. Introduction	33
II.2. Terminologie feu et incendie	33
II.3. Evolution des propriétés physiques du béton au cours de l'échauffement	35
II.3.1 Densité apparente	35
II.3.2 Perméabilité	36
II.3.3 Perte de masse	37
II.3.4 Evolution de la porosité	39
II.4 Effet de la température sur le comportement mécanique des béton	40
II.4.1 Résistance en compression à hautes températures	41
II.4.2 Résistance en traction à hautes températures	43
II.4.3 Module d'élasticité à hautes températures	45
II.5 Comportement au feu du béton à haute performance éclatement ultra haute performance et écaillage du béton	47
II.5.1 Phénomène d'éclatement et d'écaillage du béton	47
II.5.2 Mécanisme du phénomène	49
II.6 Conclusion	51

TABLE DES MATIERES

CHAPITRE III LE BRIQUE ET L'EMPLOI DES DECHETS DE BRIQUE DANS LE DOMAINE GENIE CIVIL

III.1 Le brique	53
III.1.1 Définition du brique	53
III.1.2 Principaux constituants de la brique et caractéristiques chimique	53
III.1.3 Les Processus de fabrication	54
III.1.4 Quel type de brique en terre cuite pour quel usage ?	57
III.1.5 Types de brique	58
III.2 L'emploi des déchet de brique dans le domaine de génie civil	58
III.2.1 Définitions	58
III.2.2 Définition et classifications des déchets	59
III.2.3 Exemple de déchet peut être recyclée	59
III.2.4 Déchets de brique	60
III.2.5 Bétons des déchets de brique utilisé comme granulats	60
III.2.6 Propriétés de béton à base de déchets de brique	61
III.2.7 Domaine d'utilisation du béton de déchets de briques	62
III. 3 Les avantages et les inconvénients des briques en terre cuite	62
III.3.1 Les avantages	62
III.3.2 Les inconvénients	63
III.4 recyclage de déchet de brique terre cuite dans le domaine de génie civil	63
III.5 Conclusion	65

CHAPITRE IV CARACTERISATION ET METHODOLOGIE . D'ESSAIS EXPERIMENTALE

IV.1 Caractéristique des matériaux utilisés	67
IV.1.1 Introduction	67
IV.1.2 Matériaux utilisés	67
IV.1.2.1 Le ciment	67
IV.1.2.2 SABLE D'OUED (LIWA)	69
IV.1.2.3 Les additions	79

TABLE DES MATIERES

IV.1.2.4 L'eau de gâchage	82
IV.1.2.5 L'adjuvant	83
IV.2 Essais réalisés	84
IV.2.1. Techniques expérimentales	84
IV.2.2 Formulation de BPR	84
IV.2.3 Equipement nécessaire	84
IV.2.4. Principe de l'essai	85
IV.2.5. Conduite de l'essai	86
IV.2.6 Essais sur BPR	87
A/ Essais microstructuraux : les pertes de masses et le porosité	87
B/ Essais Macrostructuraux : Mesure des résistances à la compression et à la traction par flexion 3 point	89
IV.3. Conclusion	91

CHAPITRE V

PRESENTATION ET

INTERPRETATION

DES RESULTATS

V.1 : Introduction	93
V.2 : Les résultats expérimentaux obtenus	93
V.2.1 Essai De Chauffage	93
V.2.2 L'effet de hautes températures sur les propriétés physiques et mécaniques	95
V.2.2.1 Essai de perte de masse en fonction de la température	95
V.2.2.2 La porosité	97
V.2.2.3: La résistance à la compression	99
V.2.2.4: La résistance à la traction par flexion	101
V.2.3 Quelques photos de résultats	103
V.3 Conclusion	104
CONCLUSION GENIRAL	106
REFIRENCE BIBIOGRAPHIQUE	109
ANNEX	118

LISTE DES FIGURES

CHAPITRE I

GENERALITE SUR LES BETONS

ET LES BETONS DE POUDRE REACTIVE (BPR)

Figure I.1 : Contraintes et hétérogénéité du matériau	09
Figure I.2 : Evolution des bétons depuis les années 1960	10
Figure I.3 : différent éléments structurels en BPR	12
Figure I.4 : comparaison entre la section de BPR et autre béton	12
Figure I.5 : Principe de la pouzzolanique	17
Figure I.6 : Courbe granulométrique laser comparative ciment /fumée de silice	17
Figure I.7: Résistance des bétons aux attaques chimiques	18
Figure I .8: l'action «réduction d'eau» ou «l'effet fluidification»	19
Figure I.9: Représentation du comportement rhéologique des BPR	21
Figure I.10: Cas de mauvaise formulation (a) mélange trop sec (b) formation des grumeaux	22
Figure I.11 : état successif lors de malaxage	22
Figure I.12 : Evolution de la résistance à la compression respectivement (pour les histogrammes de gauche à droite) à 5 heures, 8 heures, 7 jours et 28 jours d'un BFUP ayant subi ou non un traitement thermique de premier type	24
Figure I.13: Courbe contrainte-déformation du BPR200 en compression	25
Figure I.14 : Courbe contrainte-déformation du BPR800 en compression	25
Figure I.15:essai de compression	25
Figure I.16 : essai de flexion 3 points	26
Figure I.17: microstructure de BPR après 1 jour	28
Figure I.18: microstructure de BPR après 7jours	28
Figure I.19: microstructure de BPR après	29
Figure I.20 : microstructure de BPR après 180 jours	29

CHAPITRE II

COMPORTEMENT DES BETONS

A HAUTE TEMPERATURE

Figure II.1 : Triangle du feu	34
Figure II.2 : Phases de développement d'un incendie	34

LISTE DES FIGURES

Figure II.3 : Effet de la température sur la masse volumique de bétons confectionnés avec des granulats de type a– argile expansé (granulats léger), b– silico- calcaire, c– quartzite et d– basalte	35
Figure II.4 : Perméabilité intrinsèque résiduelle en fonction du traitement Thermique	36
Figure II.5 : :Perméabilité apparente au gaz en fonction de la température de conditionnement	37
Figure II.6 : : Perte de masse des bétons de différents types de granulats en fonction de la température	38
Figure II.7 : Perte de masse des bétons testés en fonction de la température de chauffage: une plus faible perte de masse pour les BHP que les BO	39
Figure II.8 : Évolution de la porosité totale d'un béton ordinaire ($R_c=36$ MPa) et d'un béton à haute performance ($R_c=110$ MPa)	40
Figure II.9 : Evolution de la résistance en compression relative des bétons avec la température	41
Figure II.10 : Évolution de la résistance résiduelle à la compression (en MPa) des BO (a) et BHP (b) avec différents granulats	42
Figure II.11 : Résultats des essais de résistance en traction relative	43
Figure II.12 : : Evolution de la résistance à la traction à chaud d'un béton à hautes performances	44
Figure II.13 : Evolution de la résistance résiduelle à la traction des pâtes de ciment avec la température	45
Figure II.14 : : Evolution du module d'élasticité relatif pour les bétons M30C, M75C, M75SC, M100C	46
Figure II.15 : Modules d'élasticité en fonction de la température d'exposition; la zone grisée indique les valeurs expérimentales prises en compte pour l'établissement du DTU (les courbes extrêmes représentant déjà des moyennes d'après leurs auteurs)	47
Figure II.16 : Mécanisme d'écaillage du béton	48
Figure II.17 : Ecaillage lors de l'incendie du tunnel mont blanc	49
Figure II.18 :Eclatement d'un poteau durant l'essai au feu	49

LISTE DES FIGURES

CHAPITRE III

LE BRIQUE ET L'EMPLOI DES

DECHETS

DE BRIQUE DANS LE DOMAINE GENIE CIVIL

Figure III.1 : l'Extraction d'argile pour le fabrication de brique rouge	54
Figure III.2 : Préparation de l'argile pour fabriquer le brique rouge	54
Figure III.3 : Dosage et mélange les constituants pour fabriquer le brique rouge	55
Figure III.4 : le Façonnage de brique rouge	55
Figure III.5 : le Séchage et le Cuisson de brique rouge	56
Figure III.6: l'Emballage de brique rouge	56
Figure III.7: Les différents processus de fabrication de brique (rouge)terre cuite	57
Figure III.8 : Un exemple d' usage de brique terre cuite	58
Figure III.9 : Les différents types de déchets	59
Figure III.10 : Exemple de valorisation de déchets de brique rouge comme un poudre	64
Figure III.11: le brique de terre dans les routes le brique de terre dans les routes	64
Figure III.12 : le brique de terre dans les Courts de tennis le brique de terre dans les routes	65

CHAPITRE IV

CARACTERISTIQUE ET METHODOLOGIE

D'ESSAI EXPERIMENTALS.

Figure IV.01 : ciment utilisé	68
Figure IV.2 : Le sable utilisé	70
Figure IV.3: La tamiseuse utilisée	70
Figure IV.4 : courbe granulométrique de sable	71
Figure IV.5 : essai d'équivalent se sable	74
Figure IV.6 : les matériels de l'essai d'équivalent de sable	75
Figure IV.7 : les matériels de l'essai la masse volumique apparente	76
Figure IV.8 : le marbre et le poudre de marbre utilisé	79
Figure IV.9 : Quartz broyée	80
Figure IV.10: Concasseur de los Anglos	81

LISTE DES FIGURES

Figure IV.11:Les 11 boules de l'appareil los Anglos	81
Figure IV.12 :Le brique concassé	81
Figure IV.13: Concasseur	81
Figure IV.14: Le broyeur utilisé	82
Figure IV.15 : Le tamis utilisé	82
Figure IV.16 : le brique fin obtenons utilisé	82
Figure IV.17 : l'adjuvant utilisé.	83
Figure IV.18 : malaxeur normalisé pour pâte et mortier	84
Figure IV.19 : bag de conservation	85
Figure IV.20 : Armoire humide	85
Figure IV.21 : Moules pour éprouvettes 4×4×16	86
Figure IV.22 : appareil à chocs	86
Figure IV.23 : machine d'essais de flexion 3 points	90
Figure IV.24 : Dispositif pour l'essai de résistance à la flexion	90
Figure IV.25 : machine d'essais à la pression avec dispositif de compression et de traction	91
Figure IV.26 : Dispositif de rupture en compression	91

CHAPITRE V

PRESENTATION ET INTERPRETATION

DES RESULTATS

Figure V.1 : les four électrique et les éprouvette utiliser	95
Figure V.2 : Evolution de la perte de masse pour les éprouvettes prismatiques en fonction de la température	96
Figure V.3 : Evolution de la perte de masse BPR pour les éprouvettes cubiques en fonction de la température	96
Figure V.4 : les éprouvettes de porosité après le chauffage	97
Figure V.5 :L'essai de porosité	98
Figure V.6 : Evolution de la résistance à la compression des BPR en fonction de la température	100
Figure V.7 : Eprouvette mise en place sur la presse hydraulique pour déterminer la résistance en compression	101
Figure V.8 : Evolution de la résistance à la traction par flexion des BPR en fonction de la température	101

LISTE DES FIGURES

Figure V.9 : Eprouvette mise en place sur la presse hydraulique pour déterminer la résistance en traction par flexion 3 points	102
Figure V.10 : Résultats de résistance a la compression obtenue par la presse hydraulique.	103
Figure V.11 : Résultats de résistance a la traction par flexion 3point obtenue par la presse hydraulique	103

LISTE DES TABLEAUX

CHAPITRE I

GENERALITE SUR LES BETONS

ET LES BETONS DE POUDRE

REACTIVE (BPR).

Tab I.1: composition chimique et caractéristiques physiques de la fumée de silice	15
Tab I.2 : Influence de la fumée de silice sur les propriétés des matériaux cimentaires	16
Tab 1.3 : Dosage en adjuvants par rapport au poids du ciment	20
Tab I.4 : Malaxage de BPR fabriqué en laboratoire	21
Tab I.5 : Caractéristiques mécaniques des BPR	23
Tab I.6 : principales caractéristiques (propriété) de durabilité du BPR 200	27

CHAPITRE III

LE BRIQUE ET L'EMPLOI DES

DECHETS DE BRIQUE DANS LE DOMAINE GENIE

CIVIL

Tab III.1 : Les composants chimiques de brique terre cuite (rouge)	53
Tab III.2: Composition chimique de la poudre de marbre	60

CHAPITRE IV

CARACTERISTIQUE ET

METHODOLOGIE D'ESSAI EXPERIMENTALS

Tab IV.1 : Composition chimique pour un CEM I 52.5R MALAKI	68
Tab IV.2 : Composition minéralogique pour un CEM I 52.5R MALAKI	69
Tab IV.3 : Temps de prise pour un CEM I 52.5 MALAKI	69
Tab IV.4 : Résistance à la compression pour un CEM I 52.5R MALAKI	69
Tab IV.5 : Propriétés physiques pour un CEM I 52.5R MALAKI	69
Tab IV.6: Tamis utilisés pour le tamisage de sable	70
Tab IV.7 : Analyse granulométrique de sable d'OUED LIWA	71
Tab IV .8 : Modules de finesse du sable	72
Tab IV .9: Qualité du sable en fonction des valeurs d'équivalent de sable E SV et ESP	75
Tab IV.10: Résultats d'essais d'équivalent de sable du sable de dune testé	75
Tab IV.11: Masse volumique apparente du sable de LIWA à l'état lâche	77
Tab IV.12 : Masse volumique absolue du sable de LIWA	78

LISTE DES TABLEAUX

Tab IV.13 : la compacité et porosité et l'indice du vide de sable LIWA	78
Tab IV.14 : la teneur en eau du sable LIWA	78
Tab IV.15 : le coefficient d'absorption du sable LIWA	78
Tab IV.16: Analyse chimique du poudre de marbre	79
Tab IV.17: Caractéristiques générales du poudre de marbre	79
Tab IV.18 : Analyse chimique du Quartz broyé	80
Tab IV.19 : Caractéristiques générales du quartz broyé	80
Tab IV.20 : Caractéristiques générales du Brique rouge	82
Tab IV.21 : Les caractéristiques principales de l'adjuvant utilisé	83
Tab IV.22 : Formulation de BPR utilisé	84
Tab IV.23 : Temps de malaxage de béton étudié	87

Symboles

Symboles :

BHP : béton à haute performance

BTHP : béton à très haute performance

BO : Béton ordinaire

BAP : Béton auto plaçant

BFUP : Béton fibré ultra haute performance

BPR : Béton de poudre réactive

BT : Béton de poudre réactive Témoin

BPRF : Béton de poudre réactive fibré

BUHP : Béton ultra haute performance

PB : Poudre de brique

C :Ciment

SF : sable fins

SP :Super plastifiant

PB : Poudre de marbre

QB : quartz barye



INTRODUCTION GENERALE

Introduction générale

Le béton de poudre réactive (BPR) est un béton constitué de matériaux en poudre qui subissent une deuxième réaction de liaison, après avoir lié l'eau avec du ciment. Une comparaison des données physiques, mécaniques et de durabilité du BPR et du BHP (Béton à Haute Performance) montre que le BPR a une meilleure résistance (à la fois à la compression et à la flexion) et a une perméabilité qui est plus petite que le BHP.

Le BPR a été développé en 1994 en France comme une nouvelle catégorie de béton composite à haute résistance. Le BPR a une résistance à la compression de 120 à 200 MPa et une résistance à la flexion de 30 à 60 MPa. Si nécessaire, le BPR peut atteindre des résistances de 200 MPa avec des conditions spéciales, telles qu'un traitement à haute température et des pressions externes avant et lors du réglage [Widodo et al, 2015].

De plus, le béton à ultra-haute performance (BUHP) est devenu un nouveau centre d'intérêt pour les chercheurs et l'industrie du béton car il se caractérise par une résistance à la compression élevée et d'excellentes propriétés de durabilité.

De nos jours, le BUHP le plus utilisé est le béton dit réactif de poudre (BPR) et ses dérivés [Cwirzen, Penttala et Vornanen, 2008]. Il est devenu un sujet de préoccupation en tant qu'alternative au béton conventionnel et même à l'acier qui a été largement utilisé dans la pratique de l'ingénierie en tant que nouveau type de matériau de structure. Pour améliorer la résistance, l'aptitude au service et la sécurité des (BUHP), les principes de la nanotechnologie ont été appliqués.

De plus, pour réduire les coûts et améliorer l'esthétique structurelle, des améliorations de la résistance à la compression ont permis de réduire considérablement la taille des éléments structurels en béton et le poids propre. Ultra-haute résistance le béton (BUHP) et le béton réactif en poudre (BPR) figuraient parmi les nombreux (BUHP) actuellement disponibles sur le marché [Yi, Kim, Han, Cho et Lee, 2012].

Le béton de poudre réactif en (BPR) est d'abord développé en France en tant que nouveau type de béton à ultra haute résistance pour offrir des avantages mécaniques et liés à la durabilité du quartz concassé (à l'exclusion des agrégats grossiers), du ciment, de la poudre de quartz, de la fumée de silice, du superplastifiant et de la fibre d'acier. Son

INTRODUCTION GENERALE

application a augmenté pour les travaux qui nécessitent un béton de haute qualité, comme les ponts et les ouvrages de génie militaire [Long, Shi, Ma, & Xie, 2016].

Le BPR est fabriqué à partir d'une matrice fine avec des fibres d'acier courtes et se caractérise par des doses élevées de ciment à grains fins et un faible rapport eau-ciment. Par rapport aux matériaux ordinaires à base de ciment, les principales améliorations du BPR comprennent l'homogénéité de la taille des particules, la porosité et les microstructures.

Selon [Cheyrezy et al. (1995)], le BPR se caractérise par une teneur élevée en fumée de silice et un très faible rapport eau / ciment.

[Belachew et al, 2018] ont également expliqué que le béton de poudre réactif est développé grâce à l'effort combiné de trois sociétés à savoir Bouygues, Lafarge et Rhodia travaillant en France avec une résistance à la compression de 170 à 230 MPa et une résistance à la flexion de 25 à 60 MPa à l'aide de fibres d'acier, aspect très durable et esthétiquement agréable.

Sous l'action d'une température élevée, la microstructure et les propriétés des produits d'hydratation du ciment changent, ce qui modifie directement ou indirectement les propriétés macroscopiques du substrat et affecte le comportement global du béton durci. En raison de la faible porosité du côté de l'BUHP, la libération de la pression de vapeur sous le feu et à haute température peut être facilement entravée. Par conséquent, les structures (BUHP) peuvent être plus sensibles aux incendies et aux températures élevées, entraînant des dommages tangibles. Cependant, l'utilisation de fibres de polypropylène (PP) peut éviter des dommages broyés ou des éclats [How-Ji Chen et al, 2020].

La littérature montre que l'ajout de 0,6% de PP (rapport volumique) peut améliorer la résistance au feu de l'BUHP, empêchant l'écaillage. Ceci est attribué au PP, après avoir fondu à des températures élevées, fournissant un passage d'échappement pour que la vapeur libère la pression accumulée. Cependant, à la surface de l'échantillon, des fissures de 0,3 à 0,5 mm ont été observées. De plus, en raison de la déshydratation du colloïde d'hydrates de silicate de calcium (C – S – H) et de la décomposition chimique et des dommages dus à la dilatation thermique des matériaux BUHP, les propriétés mécaniques de l'BUHP se sont dégradées.

À une température élevée de 1000 ° C, l'BUHP additionné de 0,6% de PP a démontré une perte de poids inférieure à 9%. Les résultats de [Tai et al., 2011] ont montré

INTRODUCTION GENERALE

que la résistance à la compression de l'BUHP continuait d'augmenter avec l'augmentation de la température jusqu'à 300 °C; cependant, une fois que la température a dépassé 300 °C, la résistance à la compression a montré une tendance à la baisse.

A hautes températures, la dégradation mécanique de l'BUHP se produit principalement en raison de la diminution de la microstructure interne. Cependant, l'addition de fibres d'acier à l'BUHP a amélioré leur comportement à des températures élevées. Le béton ordinaire et le béton à haute performance Lorsqu'ils sont exposés à des températures élevées, suivent des tendances similaires en matière de microstructure, mais l'BUHP se comporte différemment. Lorsqu'il est exposé à des températures élevées, l'BUHP est sujet à l'écaillage explosif en raison de sa densité de tassement accrue [How-Ji Chen et al, 2020].

Récemment, des études pour l'utilisation des déchets céramiques comme SCM, c'est-à-dire comme partie d'un liant mélangé, les changements dans les fluctuations de composition et les matières premières doivent être pris en compte. Cependant, toutes les briques modernes n'ont pas des propriétés pouzzolaniques. Certains sont cuits dans un four à haute température mais peuvent avoir une faible teneur en minéraux argileux. Ensuite, les déchets céramiques de différents fabricants qui ont la même apparence peuvent différer dans leur composition en fonction de l'origine géologique des matières premières et du procédé thermique utilisé. Plusieurs chercheurs ont proposé des alternatives pour utiliser les déchets céramiques, en particulier les tuiles, les briques et les tuiles de sol [Viviana et al, 2019].

Objectifs de l'étude

L'objectif principal de cette étude est d'étudier l'effets des hautes température sur le comportement du béton de poudre réactives a base des déchets de brique rouge .

Méthodologie du travail

Le premier chapitre de ce travail est destiné à l'étude bibliographique .dans cette partie, nous avons exposé les travaux effectués par différents auteurs, notamment sur les bétons à ultra haute performance et les bétons de poudre réactive. Influence de température sur ce type de béton.

Le deuxième chapitre est consacré à Comportement des bétons à haute température. Le troisième chapitre parle sur Le brique et l'emploi des déchets de brique dans le domaine Génie Civil.

INTRODUCTION GENERALE

Le quatrième chapitre est consacré à l'expérimentation .Nous présentons dans cette partie, les essais effectués sur matériaux utilisés.

Le cinquième chapitre présente les résultats expérimentaux obtenus et les discussions tirées lors de cette étude.

Enfin, Une conclusion générale reprend les résultats dégagés lors de cette étude. Elle ouvre également de nouvelles perspectives en termes d'expérimentation pour une meilleure caractérisation de béton de poudre réactives.

CHAPITRE I :

Généralités sur les bétons et les béton de poudres réactive (BPR) .

I.1 Généralité sur Béton :

I .1.1 : introduction :

Le béton est un mélange en proportion convenables de granulats, de liant et de l'eau. Il est utilisé seul (béton ordinaire), ou associé à des armatures d'acier (béton armé). Le béton est fabriqué et mis en œuvre avec une consistance plus ou moins plastique qui dépend de la quantité d'eau de gâchage. après emploi et au bout d'un temps plus ou moins long , qui dépend de la nature du liant , il fait prise et durci pour acquérir finalement une résistance plus ou moins élève qui dépend de la résistance propre du liant , du temps du durcissement , des proportions du mélange ,divers matériaux , du mode de mise en œuvre , etc..... Outre la résistance, qui est qualité essentielle, on demande au béton beaucoup d'autres qualités, certaines correspondant à des caractéristiques définitives, d'autres à des caractéristiques provisoires (qui se rencontrent lors de la mise en œuvre, de la prise et du durcissement du béton) .En plus de la résistance, qui est une qualité essentielle et important , dans le béton est nécessaire. On demande au béton de nombreuses autres fonctionnalités ont des normes élevées, dont certaines correspondent à des caractéristiques spécifiques, Autres avec des propriétés temporaires (rencontrées lors de la mise en œuvre Béton, pose durcissement du béton).

I. 1.2 Structure du béton :

D'après sa structure, le béton durci est considéré comme un conglomérat naturel dans lequel les grains de granulat fin (sable) s'arrangent dans les vides entre les grains de gros granulats (gravier ou pierre concassé), les grains sont liés les unes aux autre par des couches minces de la pierre du ciment. Les gros granulats servent de squelette pour le béton, ce qui permet à ce dernier de résister aux charges [Zitouni, 1995].

I .1.3 Définition de béton:

Le béton est l'un des matériaux les plus utilisés dans l'industrie de la construction hier et reste le même aujourd'hui et restera sans aucun doute demain il est composé essentiellement de granulats à 80% environ tel que le sable , le gravier et même certaines fines, d'eau de gâchage d'une quantité minimale de ciment et adjuvants pour acquérir certaines caractéristiques désirées comme par exemple la plasticité, une prise et un durcissement rapide , des résistance mécanique élèves pour ne citer que cela les

Chapitre I : Généralités Sur Les Bétons Et Les Bétons De Poudre Réactive

caractéristique du béton ne cessent d'évaluer grâce au développement de science et la technique qui a donné naissance à plusieurs types de béton.

I.2. Béton à ultra haute performance :

I.2.1 Introduction :

Les premiers matériaux cimentaires à ultra hautes performances sont apparus dans les années 1970 (pâtes de ciment "Compacts" à 640 MPa, de E/C = 0,21 avec cure thermique à 250 °C et pressage à 345 MPa, par Roy et al [Roy et al, 1973]), puis développés au Danemark dans les années 1980 ("Densified Small Particles" par Bache à 270 MPa [Bache, 1981], avec un E/C de 0,18, suivi du "Compact Cement Composite" en 1987 qui conduisit à la technologie CRC ["Compact Reinforced Concrete"].

I.2.2 Historique de Béton à ultra hautes performance :

Les lois du béton liant la résistance à la composition sont énoncées dès la fin du XIX^e siècle avec en particulier l'ingénieur français Féret, mais ne sont pas exploitées immédiatement. Jusqu'à la fin des années 1940, la formulation du béton était d'une grande simplicité : 800 litres de gravillons, 400 litres de sable, de 4 à 8 sacs de ciment et de l'eau en abondance, cette recette ne devait pas correspondre toujours exactement à un mètre cube, mais elle faisait prise et durcissait. Avec des coefficients de sécurité à la rupture de l'ordre de trois dans des ouvrages simples, les risques étaient minimes. Dans les années 1940, on sait que pour obtenir un béton, il faut minimiser le pourcentage de vides. M. Duriez précise ainsi qu'il convient d'aboutir à une ossature dont la surface spécifique soit minimale tout en donnant un béton qui, mis en place avec le dosage en ciment prescrit et le minimum d'eau nécessaire au mouillage de tous les grains, ciment compris, forme un ensemble homogène sans vide. Dans les années 1980, on découvre le moyen de réduire ces vides avec l'ajout de microparticules et d'adjuvants de types plastifiants, ainsi naissent les bétons hautes performances. [Lakhal, 2011] .

I.2.3 Différents types de Béton à ultra performance :

- **Béton auto plaçant (BAP) :**

Développé dans les années 80 par des chercheurs de l'université de Tokyo au Japon, le béton auto plaçant est un béton fluide, très déformable, homogène et stable qui se met en place par gravitation et sans l'utilisation d'un moyen de vibration, il épouse

Chapitre I : Généralités sur les bétons et les bétons de poudre réactive

parfaitement les formes des coffrages les plus complexes, il ne doit pas subir de ségrégation et doit présenter des qualités comparables à celles d'un béton vibré classique. Ils se caractérisent en général par une formulation contenant au moins un adjuvant chimique et un ajout minéral en proportions bien précises pour satisfaire les exigences en matière de maniabilité et de stabilité. [Zohir et mou, 2013].

- **Bétons de hautes performances (BHP) :**

C'est alors qu'apparurent les bétons dits à hautes performances qui se caractérisent par grande résistance mécanique allant de 60 MPa à 80 MPa soit le double d'un béton ordinaire [Dalila B, 2011]. Les Bétons à Hautes Performances (BHP) ont d'abord été utilisés pour leur haute résistance. Cette caractéristique facilement mesurable a fait des progrès spectaculaires à partir des années quatre-vingt.[Tome2,2011].

- **Béton à très hautes performances BTHP :**

C'est dans souci croissant d'amélioration de la résistance mécanique des bétons virent le jour les bétons à hautes performances .le démarche suivie dans leur conception est la même que celle adoptée dans le cas des BHP [Chaid.R, 2006] .

- **Béton fibré ultra haute performance BFUP :**

Un béton fibré est un béton dans lequel sont incorporées des fibres. À la différence des armatures traditionnelles, les fibres sont réparties dans la masse du béton, elles permettent de constituer un matériau qui présente un comportement plus homogène.

- **Béton à poudre réactive BPR :**

Les bétons de poudre réactive (BPR) de résistance supérieure à 150MPa, ne sont encore fabriqués que dans un laboratoire. Un béton de 280MPa a été obtenu dans un laboratoire avec un E/C=0.16 [Oudjit et Lanez ,2005].

I.3 Généralité sur les bétons de poudre réactive (BPR) :

I.3.1 Introduction de les bétons de poudre réactive (BPR) :

Les béton de poudre réactive (BPR) sont apparus en 1995 pour satisfaire aux exigences de résistance tout en conservant une bonne ouvrabilité. Leurs caractéristiques exceptionnelles résultent de l'application de quatre principes fondamentaux [Richard_1994] et [Richard_1995] :

- ❖ Amélioration de l'homogénéité par suppression de gros granulats
- ❖ Amélioration de la capacité par optimisation du mélange granulaires et éventuellement par pressage avant et pendant la prise.

Chapitre I : Généralités sur les bétons et les bétons de poudre réactive

- ❖ Amélioration de la microstructure par traitement thermique.
- ❖ Amélioration de la ductilité par ajout microfibrilles métalliques

Pour ce qui est l'homogénéisation du matériau, du problème rencontré avec les bétons dits *classiques* réside dans l'hétérogénéité de leurs constituants.[Cherkaoui ,2010].

Cette hétérogénéité a deux origines distinctes :

- Une hétérogénéité de résistance mécanique due à la grande différence entre les granulats et la pâte .le module de Young des granulats est 3 fois plus grand que celui du liant. [Cherkaoui ,2010].
- Une hétérogénéité chimique conduisant des fissures dites *fissures de retrait bloqué*.causés par le retrait de la pâte de ciment au contact des granulats rigides. [Cherkaoui ,2010].

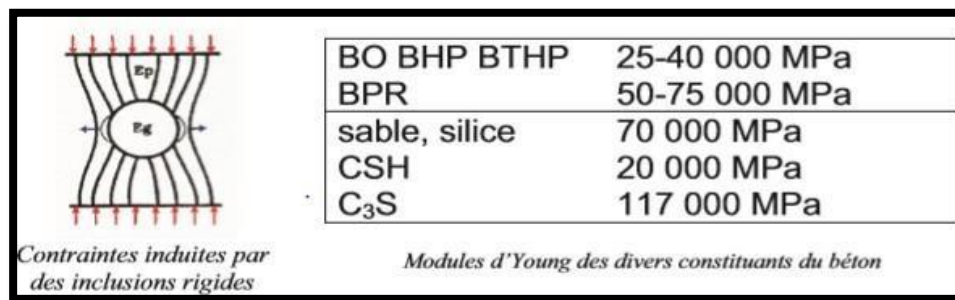


Figure I.1 : Contraintes et hétérogénéité du matériau .[Cherkaoui,2010].

I.3.2 Historique de BPR :

Le béton, matériau de base de la construction depuis plus d'un siècle, n'a évolué de façon significative qu'à partir des années 80 avec la mise au point des Bétons à Hautes Performances (BHP). Précurseur de la formulation de ces nouveaux bétons, la Direction Scientifique de Bouygues a été la première à les mettre en œuvre à grande échelle lors de la construction de l'Arche de la Défense ou du Pont de l'Île de Ré. Dès 1990, sous l'impulsion de Pierre Richard, directeur scientifique de Bouygues, elle a franchi un nouveau seuil en créant un béton aux performances inédites : le Béton de Poudres Réactives (BPR), deux fois plus résistant qu'aucune roche naturelle connue, étanche à l'eau et aux gaz, employé sans armatures passives. Ce matériau ductile à ultra-haute résistance se substitue au béton traditionnel et à l'acier ainsi qu'à d'autres matériaux high-tech utilisés pour des applications industrielles ou militaires. [Olga ,1996].

Chapitre I : Généralités sur les bétons et les bétons de poudre réactive

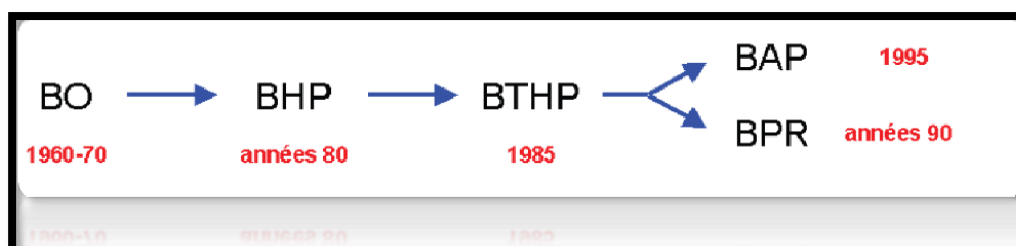


Figure I.2 : Evolution des bétons depuis les années 1960 [Cherkaou, 2010] .

I.3.3 Définition de Béton de Poudre Réactive (BPR) :

Les Béton de Poudre Réactive (BPR) sont apparus en 1995 pour satisfaire aux exigences de résistance tout conservant une bonne ouvrabilité. Le BPR est un matériau à matrice cimentaire pour lequel le nombre, la nature, la morphologie et le dosage des différents composants granulaires ont été optimisés afin d'obtenir des performances mécaniques élevées et une durabilité améliorée. Alors les bétons de poudre réactive (BPR) de résistance supérieure à 150MPa, ne sont encore fabriqués que dans un laboratoire. Un béton de 280MPa a été obtenu dans un laboratoire avec un $E/C=0.16$.

I.3.4 Concept du Béton de Poudre Réactive (BPR) :

La formulation du BPR est guidée par le concept des principes suivants :

- les effets mécaniques induits par l'hétérogénéité des composants granulaires des bétons usuels sont fortement réduits par la suppression des gros granulats et par l'amélioration importante des propriétés mécaniques de la pâte liante ;
- l'introduction de composants de différentes classes granulaires respectant le principe de desserrement, suivant lequel les granulats fins occupent un volume supérieur à l'indice des vides des granulats de classe supérieure, permet de minimiser l'indice des vides global du matériau et la quantité d'eau nécessaire au gâchage ;
- l'emploi de fibres métalliques de petites dimensions et de haute limite élastique permet d'utiliser pleinement les qualités de la matrice du BPR en terme de contrainte d'adhérence ;
- les techniques de fabrication et de mise en place sont celles utilisées pour les bétons traditionnels avec pour seule contrainte particulière un allongement important du temps de malaxage.

Chapitre I : Généralités sur les bétons et les bétons de poudre réactive

Enfin, il est possible de supprimer tout retrait en appliquant après prise un traitement thermique à 90°C, qui permet par ailleurs une amélioration supplémentaire des propriétés mécaniques. [Adeline , 2014].

I.3.5 Domaine d'utilisation des Béton de Poudre Réactive (BPR):

Le BPR peut également être utilisé pour la réalisation de structures précontraintes par pré- ou post-tension La ductilité que l'ajout de fibres métalliques confère au BPR le rend apte à être utilisé dans de nombreuses applications sans aucune armature passive. En exploitant de façon optimale une ou plusieurs propriétés du matériau – résistance mécanique, durabilité, capacité de moulage, stabilité dimensionnelle, gain de poids – il est possible de développer des applications où le BPR se présente comme un concurrent de nombreux matériaux, dont l'acier, l'aluminium et la fonte. Ses applications dépassent alors le simple cadre du bâtiment et du génie civil.

- **Génie civil et bâtiment :**

- structures triangulées : est une structure triangulée de 60 m de portée. Elle illustre un des modes d'emploi du BPR : recherche de la légèreté alliée à une grande rigidité, sans sacrifier à l'esthétique ;
- 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.

Chapitre I : Généralités sur les bétons et les bétons de poudre réactive

- **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.[Adeline ,2014].

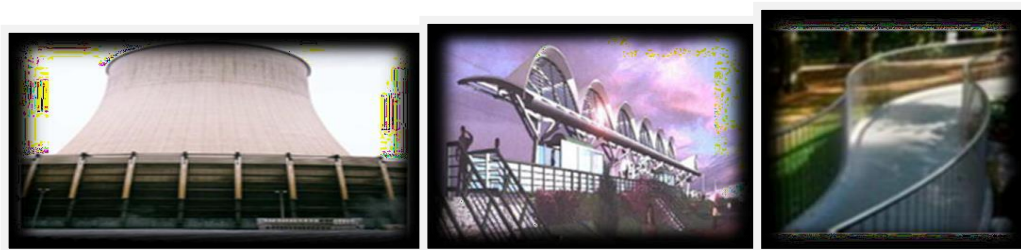


Figure I.3 : différent éléments structurels en BPR.[Ladour ,2014].

-Peut être réalisée sans utiliser d'armature passive (armature en acier).
Il en résulte des éléments de plus petite taille et des délais de construction plus rapides.

-Peuvent être préfabriqués en usine et transportés jusqu'au site ou, dans certains cas, peuvent être coulés sur place. [Lafarge, 2013].



Figure I.4 : comparaison entre la section de BPR et autre béton [Lafarge, 2013].

Chapitre I : Généralités sur les bétons et les bétons de poudre réactive

I.3.6 Les avantages et les inconvénients des Béton de Poudres Réactive (BPR) :

I.3.6.1 Les avantage de BPR :

Le BPR répond plus particulièrement aux exigences suivantes :

- Durabilité et durée de vie allongée.
- Meilleure performance aux chocs et à l'abrasion.
- Délai rapide et temps d'arrêt de la circulation minimal.
- Construction l'hiver par la résistance au gel dégel et ;
- Performance sismique grâce à ses propriétés de ductilité
- Impact minimal sur l'environnement.
- Finitions personnalisées, aspect élancé.
- Une durée de vie optimisée pour les décennies.
- Un excellent choix pour la fabrication d'éléments structurels durables et nécessitant peu d'entretien. [Ladour , 2014].

Différent éléments structurels en BPR :

- Peut être réalisée sans utiliser d'armature passive (armature en acier). Il en résulte des éléments de plus petite taille et des délais de construction plus rapides.
- Peuvent être préfabriqués en usine et transportés jusqu'au site ou, dans certains cas, peuvent être coulés sur place [Lafarge, 2013].

I.3.6.2 Les inconvénients de BPR :

- le cout des constituants sont très chère surtout quand on utilise le matériaux (fumées de silice) .
- l'obligation de main d'ouvre qualifier.
- l'obligation de vérifier la formulation de BPR avant de malaxage pour chaque dosage.
- L'obligation l'existence de matériel qualifier (le broyeur) .
- Le prix d'un mètre cube de BPR mis en place est 10 à 12 fois plus cher que le béton ordinaire ou à hautes performances.

I.3.7 Constituants d'un BPR :

a. 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 et al, 2009].

b. Granulats :

b.1 Sable fin

Le sable constitue le plus gros granulats du BPR, sa taille moyenne est inférieure à 600 μm . Un meilleur choix de ce composant garantirait une bonne interface pâte granulats. 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].

c. Additions :

Conformément à la norme (NF EN 206, 2014), toutes les additions présentant une finesse supérieure à celle du ciment peuvent être utilisées en substitution d'une partie du ciment. Concernant le BFUP, les additions les plus utilisées sont : la fumée de silice, le quartz broyé, et, plus récemment, le méta kaolin [Tafraoui, 2009]. Les additions ont deux fonctions essentielles dans la matrice cimentaire du BHUP ; elles améliorent la rhéologie du mélange et enfin, elles forment des produits d'hydratation par leur effet pouzzolanique. L'action des additions concerne aussi bien l'état frais que l'état durci du béton. En premier lieu, à l'état frais, la présence des additions modifie la structure du squelette granulaire du matériau et les frictions entre les composants de la suspension solide dans la phase liquide. [Salhi K, 2007].

Chapitre I : Généralités sur les bétons et les bétons de poudre réactive

c.1: La fumée de silice :

La fumée de silice est un produit minéral amorphe obtenu essentiellement lors de la fabrication du silicium et de ses alliages. Le silicium est obtenu par réduction du quartz en présence de carbone à 2 000 °C dans des fours à arc électrique. Les fumées contiennent du monoxyde gazeux (SiO_2) qui s'oxyde et se condense en particules vitrifiées amorphes extrêmement fines. Ces particules sont lisses et sphériques (100000 billes de fumées recouvrent entièrement un grain de ciment)[Chadli, 2019]. Leur couleur est le plus souvent gris clair [Cherkaoui, 2010]. [Parant, 2003] et [Wille et al. 2012] ont montré que le pourcentage optimal de substitution en masse de ciment est de 25%.

Tab 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 ₂ O ₃	0.59	Masse volumique	280 en
FeO	0.70	(kg/m ³) Fuseau	(vrac)
Mg	0.52	granulométrique (µm)	0.04 i
O	0.51	Diamètre moyen (µm)	0.28
CaO	0.17	Surface spécifique	0.18
Na ₂	0.59	théorique	20 000
O	0.16	(m ² /kg)	17 500
K ₂ O	2.20	Surface spécifique ,	
S		B,E,T(m ² /kg).	
Perte au feu			

c.2 Effet de la fumée de silice :

Le Tableau I.2 dresse un récapitulatif de l'influence de la fumée de silice sur les propriétés des matériaux cimentaires Tableau I.2 : Influence de la fumée de silice sur les propriétés des matériaux cimentaires [Olga, 1996].

Chapitre I : Généralités sur les bétons et les bétons de poudre réactive

Tab I.2 : Influence de la fumée de silice sur les propriétés des matériaux cimentaires [Olga, 1996].

Avantages	Inconvénient
<ul style="list-style-type: none">• Accroissement des résistances mécaniques.• Affinement de la structure poreuse.• Diminution des coefficients de diffusion.• Diminution du pH et des concentrations en alcalins de 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 en dogène.

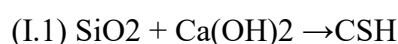
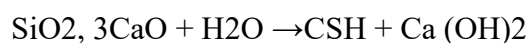
La fumée de silice, historiquement considérée comme l'ultrafine la plus efficace, est toujours la plus utilisée. Parmi les autres ultrafines potentiellement utilisables en remplacement de la fumée de silice, ayant également ou non une activité pouzzolanique, il est possible de citer notamment les méta kaolins, la phonolithe, la cendre volante pulvérisée ou les micro-fillers calcaires [Rougeau, 2004].

c.3 Mode d'action :

La fumée de silice est utilisée dans les bétons pour améliorer leurs propriétés mécaniques et leur durabilité . [Chadli ,2019.].

c.4 Réaction pouzzolanique :

La fumée de silice réagit avec la chaux durant l'hydratation du ciment et favorise-la formation des silicates de calcium hydratés (gel C-S-H). Cette phase C-S-H lie les différents composants entre eux pour créer une matrice cimentaire dense et compacte. Sa finesse et ses propriétés pouzzolaniques confèrent à la fumée de silice une forte réactivité avec les Ca(OH)_2 produits durant l'hydratation du béton [Chadli ,2019.]:



(I.2) Sa haute réactivité augmente l'homogénéité du mélange et réduit la porosité et la perméabilité du béton(figure I.5).

Chapitre I : Généralités sur les bétons et les bétons de poudre réactive

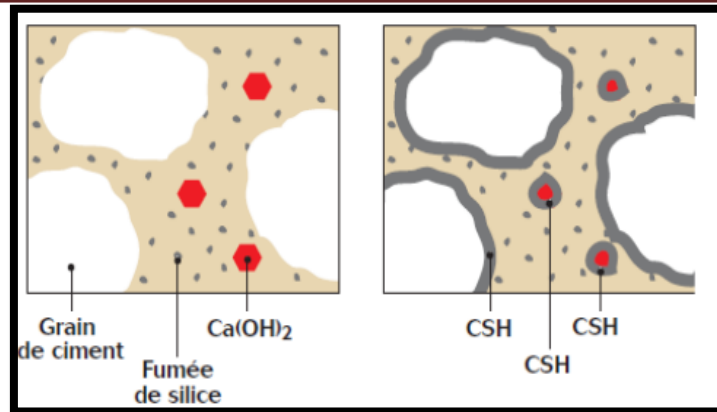


Figure I.5 : Principe de la pouzzolanique [Patricia Bredy Tuffe et al ,2011].

c.5 Effet d'optimisation de l'empilement granulaire :

La fumée de silice est 100 à 150 fois plus fine qu'une particule de ciment et peut remplir les vides interstitiels entre les fines et les grains de ciment.

Cet empilement granulaire optimal contribue ainsi à réduire fortement la porosité et la perméabilité du béton (figure I.6).

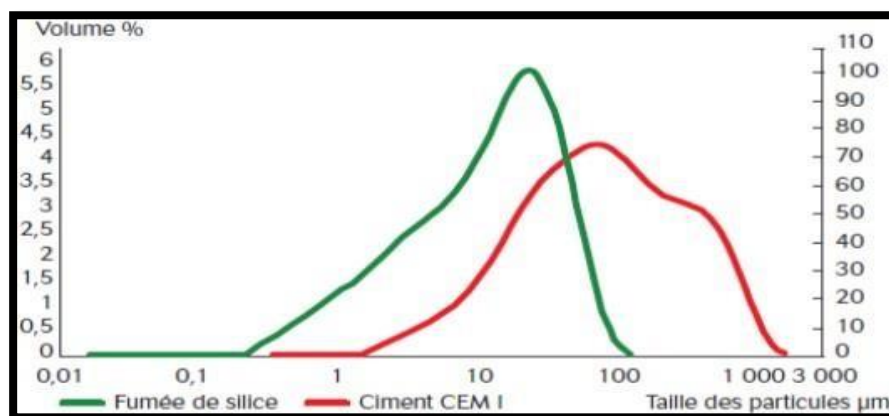


Figure I.6 : Courbe granulométrique laser comparative ciment /fumée de silice [Patricia Bredy Tuffe et al ,2011].

c.6 Performances à l'état durci :

- **Durabilité :**

L'utilisation de fumée de silice limite la porosité des bétons en réduisant la taille des pores. Cette baisse de la porosité et de la perméabilité empêche la pénétration d'agents agressifs comme notamment les acides, les sulfates, le dioxyde de carbone et les chlorures marins. L'utilisation de la fumée de silice est un atout pour prévenir la corrosion dans un environnement contraignant : ports, aéroports, plateformes industrielles, ouvrages en bord de mer [Chadli , 2019.]. (figure I.7).

Chapitre I : Généralités sur les bétons et les bétons de poudre réactive

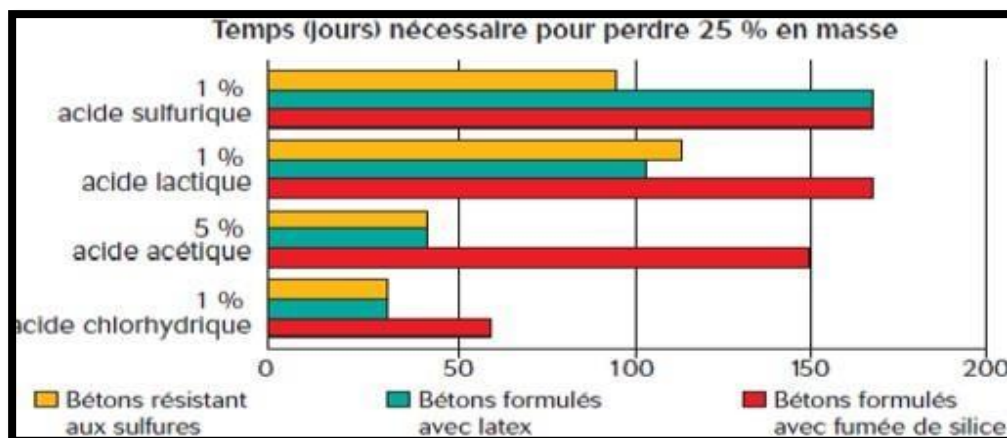


Figure I.7: Résistance des bétons aux attaques chimiques [T.Patricia Bredy et al ,2011].

d. Quartz broyer :

Le quartz broyé est une poudre de diamètre moyen compris entre 10 et 15 μm , issue du broyage d'un sable très riche en silice ($\text{SiO}_2 > 98\%$) généralement utilisé dans la fabrication du verre. Selon [Richard et Cheyrezy, 1995], le quartz broyé est indispensable pour les traitements thermiques, que nous expliciterons ultérieurement, d'un BPR (Béton de Poudres Réactives assimilable aux BUHP). La réactivité optimale est obtenue avec une taille maximale des grains comprise entre 5 et 25 μm . La quantité utilisée en substitution correspond à un rapport stœchiométrique optimal afin de convertir les hydrates amorphes en tobermorite qui se caractérise par un rapport molaire C/S de 0,83. Ceci correspond à un rapport silice/ciment de 0,62 [Richard et Cheyrezy, 1995].

d.1 Effet de Quartz broyé :

Une étude de [Tafraoui, 2009] a montré que l'ajout de quartz broyé dans les BFUP traité thermiquement ne conduit pas à une augmentation significative des résistances à la flexion (+2,6%) mais favorise remarquablement les résistances en compression (+8,2%), grâce à l'apparition de nouvelles phases hydratées sous haute température. Du point de vue, les effets sont opposés entre les résistances à la flexion et les résistances à la compression :

-en flexion, les effets sont légèrement positifs lorsqu'on associe le quartz broyé et les fibres métalliques (+3.3%) et plus fortement négatifs lorsqu'on associe le quartz broyé et le traitement thermique (-5.0% pour le traitement à 150°C).

-en compression, les effets sont vraiment négatifs lorsqu'on associe le quartz broyé et les fibres métalliques (-8.5%) et vraiment positifs lorsqu'on associe le quartz broyé et le traitement thermique (+8.6% pour le traitement à 150°C)[Tafraoui, 2009].

Chapitre I : Généralités sur les bétons et les bétons de poudre réactive

e . Adjuvants :

L'adjuvant est un produit 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 [Tafraoui A et al, 2009].

e.1 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-floculer complètement les grains. Ce sont des polymères de synthèse fabriqués spécialement pour l'industrie du béton [Olga ,1996].

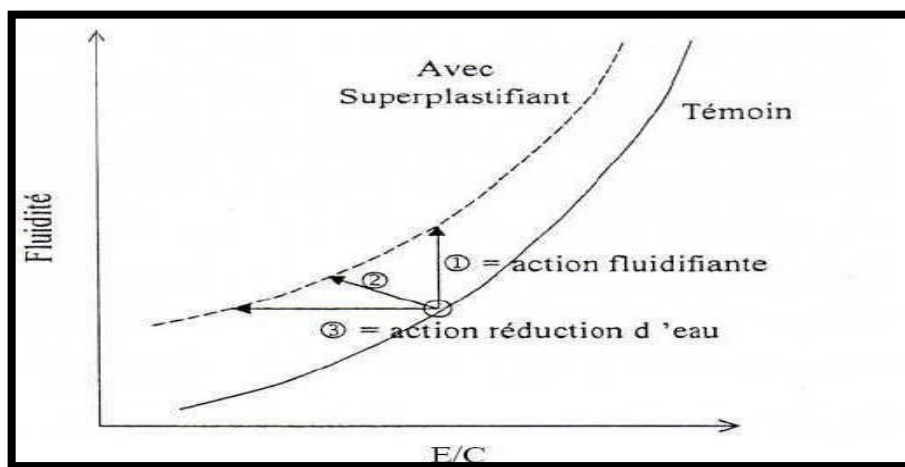


Figure I .8: l'action «réduction d'eau» ou «l'effet fluidification»[Dalila B, 2011].

e.2 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 mise n'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 15min. 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 inters titi elle 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 [Dalila B, 2011].

Chapitre I : Généralités sur les bétons et les bétons de poudre réactive

e.3 Les différents types d'adjuvants :

Plusieurs adjuvant sont utilisés dans le béton, chacun selon son rôle. Ce tableau présente les plus utilisés en termes de Dosage en adjuvants par rapport au poids du ciment :

Tab 1.3 :Dosage en adjuvants par rapport au poids du ciment

[Patrick Guiraud, 2018] .

ADJUVANTS	DOSAGE EN %
Plastifiants	0.15 à 1.2
Superplastifiants	0.6 à 2.5
Accélérateurs de prise	1 à 3
Accélérateurs de durcissement	0.8 à 2
Retardateurs de prise	0.2 à 0.8
Hydrofuges	0.5 à 2
Entraîneur d'air	0.05 à 3
Rétenteurs d'eau	0.1 à 2

I.3.8. Caractérisation d'un Béton BPR :

I.3.8.1 Les caractéristiques rhéologiques :

La rhéologie des BPR étant fortement liée à la réactivité du ciment utilisé, il apparaît que l'emploi de ciment à faible teneur en C3A et à faible surface spécifique permet d'augmenter l'ouvrabilité des BPR. Selon [Bonneau, 1997], un ciment CEM I 52,5 conduit à de très bonnes performances rhéologiques et mécaniques. En effet, ce ciment se caractérise par une faible teneur en C3A et un pourcentage en C3S qui favorise le développement de haute résistance mécanique. Cependant, certains ciments CEM I 42,5 peuvent également conduire à des résistances élevées.

En pratique, on utilise un rhéomètre, appareil qui sert à étudier les propriétés rhéologiques des substances, pour évaluer le comportement rhéologique des BPR. [Bonneau ,1997].

Chapitre I : Généralités sur les bétons et les bétons de poudre réactive

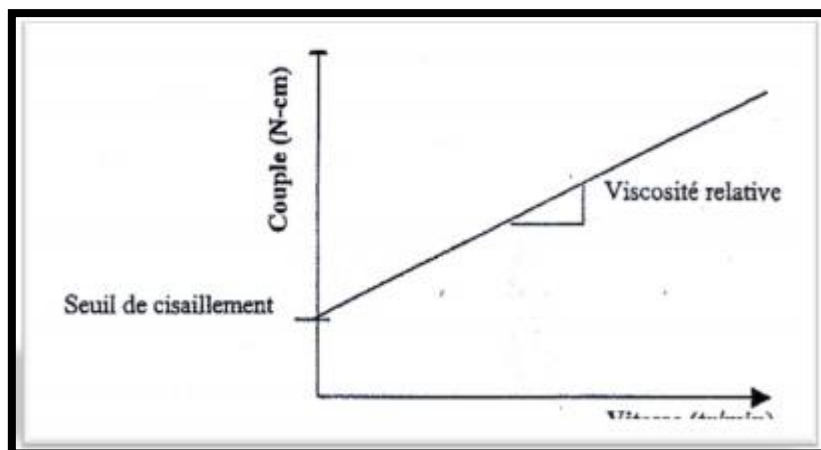


Figure I.9: Représentation du comportement rhéologique des BPR [Bonneau ,1997].

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 super plastifiant utilisé : Tab I.4 : Malaxage de BPR fabriqué en laboratoire.

Tab I.4 : Malaxage de BPR fabriqué en laboratoire .[Ladour ,2014].

3 min	Homogénéisation des matériaux secs.
2 min	Ajout de l'eau et de la moitié du super plastifiant
5 min	Ajout de l'autre moitié du super plastifiant Malaxages à grande vitesse

- **Effet de temps de malaxage :**

La raison principale du grand affaiblissement de la cohésion des grains et du fait de l'écoulement des matériaux est la présence d'une très petite quantité d'eau dans nos mélanges .L'ajout d'un super plastifiant super supérieur peut être une bonne alternative au traitement .Il est interdit à condition d'avoir une force de mélange suffisante. Ce L'aérodynamisme a permis de mieux que la pâte finale. Pour contrôler ce paramètre, L'inspection visuelle peut être très utile. La figure I.10 illustre .Le mélange est très sec et la condition ne changera pas même s'il est temps Le mélange. Cette condition est caractéristique d'un très mauvais mélange dans

Chapitre I : Généralités sur les bétons et les bétons de poudre réactive

l'eau pour assurer entre les liens granuleux. La figure I.10 illustre un autre cas assez différent du premier, quel que soit le temps de mélange. Ce Au lieu de cela, il distingue un surdosage de super plastifiant plus élevé, ce qui entraînera formation des grumeaux.



(a)

(b)

Figure I.10: Cas de mauvaise formulation (a) mélange trop sec (b) formation des grumeaux[Ladour , 2014].

Ces deux mêmes états peuvent être rencontrés comme phase intermédiaire avant l'obtention d'une pâte cohésive. En effet le premier état est obtenu après un temps de malaxage de cinq minutes (Figure I.11. a). Le prolongement de ce temps apporte une énergie de malaxage supplémentaire qui induit des ponts liquides et des liaisons supplémentaires entre particules formant ainsi des grumeaux. Ceci est observé après dix minutes de malaxage (Figure I.11. b). En ramenant ce temps à vingt minutes, la majorité des points de contact entre particules seront reliés par des ponts liquides et la porosité inter- particulaire des agglomérats formés disparaîtra progressivement. On obtient ainsi une pâte cohésive et maniable (Figure I-11). [Taфраoui, 2009].



Figure I.11 : état successif lors de malaxage [Ladour ,2014].

Chapitre I : Généralités sur les bétons et les bétons de poudre réactive

I.3.8.2 Les caractéristiques mécaniques et physiques :

I.3.8.2.1 Introduction :

Les BPR présentent des performances exceptionnelles aussi bien en compression qu'en traction et flexion. Cette famille de matériau a une microstructure très dense, qui leur confère des propriétés d'étanchéité et de durabilité intéressantes. On distingue deux classes de BUHP selon leurs comportements mécaniques à la compression, à savoir les BUHP fragiles (sans fibres) et les BUHP ductiles (fibrés) ou BFUP à la traction.

I.3.8.2.2 Résistance à la compression:

Dans ce tableau 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) [Dugat et al, 1995] sont présentées dans le tableau I.5.

Tab I.5 : 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
Limites d'élasticité linéaire (% de la résistance ultime)	60 %	85%

Une des propriétés exceptionnelles des BFUP et change complètement par contre un BPR son fibre alors leur résistance caractéristique en compression à 28 jours, généralement supérieure à 150 MPa, et pouvant aller jusqu'à 250 MPa (AFGC, 2013). L'optimisation du squelette granulaire permet de diminuer le volume des vides et par conséquent d'augmenter la résistance en compression. Le traitement thermique permet de modifier la structure des hydrates pour les rendre encore plus performants. L'ajout de fibres peut améliorer la résistance en compression si le dosage volumique est supérieur à 2%.

Chapitre I : Généralités sur les bétons et les bétons de poudre réactive

Dans le cas de BFUP ayant subi ou non un traitement thermique, des travaux antérieurs [Rougeau, 2005] ont notamment permis de comparer l'évolution de la résistance à la compression respectivement à 5 heures, 8 heures, 7 jours et 28 jours (figure I.12). Le démoulage des éprouvettes de dimensions 40 x 40 x 160 mm³ a eu lieu respectivement à 5 heures, 8 heures, et 20 heures. Pour celles ayant subi un échauffement, ce dernier a été appliqué juste après le coulage à une température de l'ordre de 50 °C pendant une quinzaine d'heures. Après démoulage, elles ont été conservées dans l'eau à 20 °C jusqu'à l'échéance de mesure. Les résultats montrent une augmentation forte de la résistance à la compression pendant la phase de traitement thermique. La résistance à la compression est équivalente à l'échéance de 7 jours. A 28 jours, l'écart est de l'ordre de 8 % en faveur du BFUP non traité thermiquement.

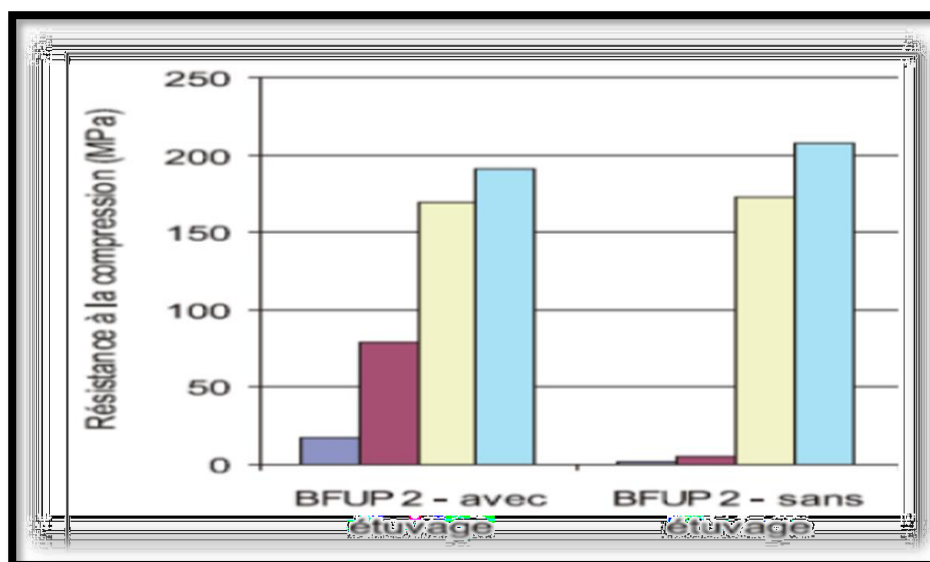


Figure I.12 : Evolution de la résistance à la compression respectivement (pour les histogrammes de gauche à droite) à 5 heures, 8 heures, 7 jours et 28 jours d'un BFUP ayant subi ou non un traitement thermique de premier type [Rougeau, 2005].

- Les Figure I.13 : présente respectivement les comportements mécaniques en Compression des BPR200 et BPR800.

Chapitre I : Généralités sur les bétons et les bétons de poudre réactive

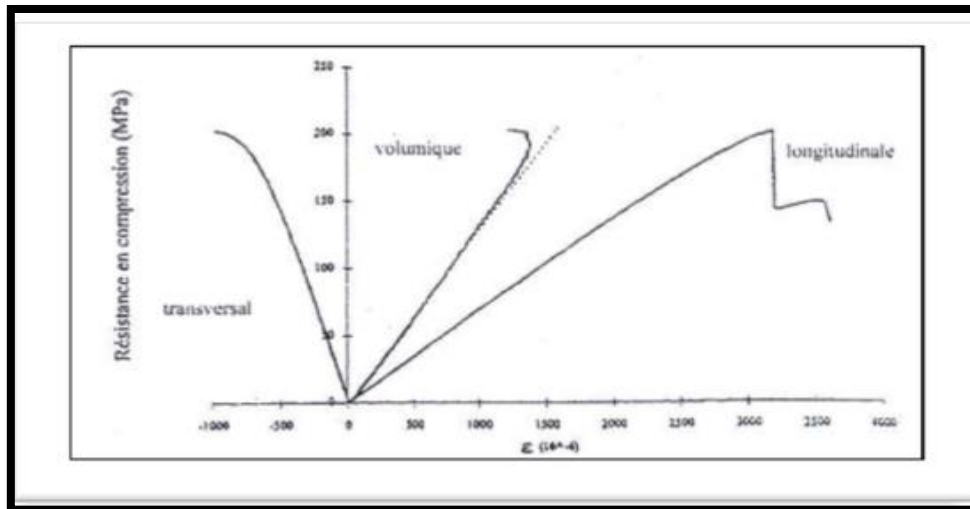


Figure I.13: Courbe contrainte-déformation du BPR200 en compression [Dugat et al, 1995].

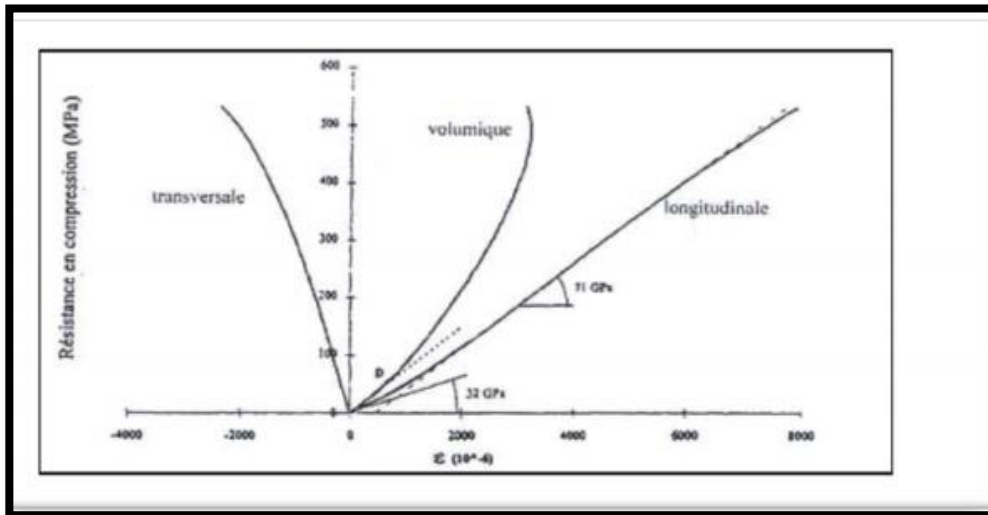


Figure I.14 : Courbe contrainte-déformation du BPR800 en compression [Dugat et al, 1995].



Figure I.15: essai de compression [Ladour, 2014].

I.3.8.2.3 Résistance à la traction :

- **Traction par flexion :**

Dans le cas des BUHP non fibrés, la résistance aux efforts de flexion ne dépasse pas les 20 MPa et présente une rupture fragile. De ce fait, leur comportement mécanique est linéaire élastique jusqu'à la rupture. [Chadli, 2019]. 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 [Richard et Cheyrezy, 1995]. En 1996, est mesuré une résistance en flexion d'une éprouvette 4x4x16 d'un BPR 200 de 32 MPa. Dans son rapport, l'équipe de Lafarge [Lafarge_2003] a rapporté une résistance en flexion de 48 MPa pour un matériau Ductal [Dugat, 1996].

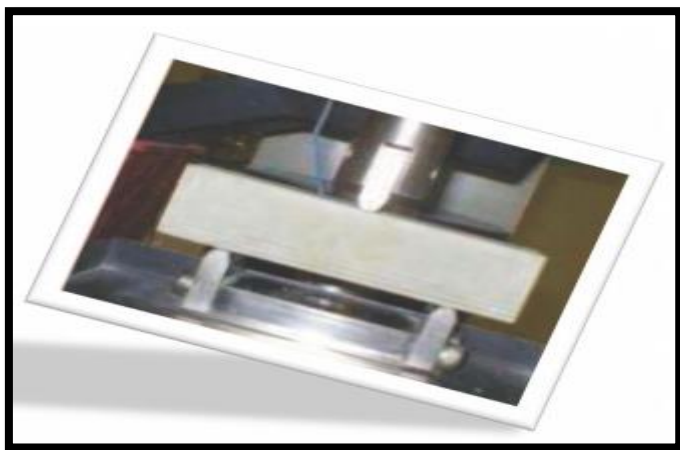


Figure I.16 : essai de flexion 3 points [Dugat ,1996].

I.3.8.2.4 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.

CHAPITRE I : GENERALITES SUR LES BETONS ET LES BETONS DE POUDRE REACTIVE

I.3.8.2.5 Porosité :

Les propriétés physiques du BPR sont au centre de l'attention de nombreux chercheurs, en particulier les propriétés de porosité et la distribution poreuse, qui contrôlent généralement le transport des matériaux à travers le réseau poreux du matériau. D'après [Richard et Cheyrezy, 1995] étaient parmi les premiers à travailler sur la porosité des BPR. Ces derniers ont mesuré, à l'aide d'un essai d'intrusion de mercure, une porosité de 7%, pour un BPR non traité thermiquement et dont le rapport Eau / Liant était voisin de 0,12. Pour ce même rapport E/L, [Feylessoufi, 1996] ont détecté un pic à 2,5 nm, pour des BPR traités thermiquement.

I.3.8.2.6 La 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 W non chargée et à 30 min pour une structure chargée.

Pour obtenir une tenue au feu supérieure, il convient d'employer des protections anti-feu additionnelles. [Cherkaoui, 2010].

Tab I.6 : principales caractéristiques (propriété) de durabilité du BPR 200 [Cherkaoui, 2010].

PROPRIÉTÉ	VALEURS
Porosité	2 % à 5 %
Perméabilité à l'azote	1 à $5 \cdot 10^{-20} \text{ m}^2$
Gel-dégel : - module résiduel après 300 cycles - perte de masse après 300 cycles	100 % < 10 g/m ²
Abrasion (coefficient CNR)	1,3
Carbonatation : - pénétration sur 15 mm	Plusieurs centaines d'années
Perméabilité à l'oxygène	< 10^{-9} m^2
Coefficient de diffusion des ions chlorure	$2 \cdot 10^{-14} \text{ m}^2/\text{s}$

CHAPITRE I : GENERALITES SUR LES BETONS ET LES BETONS DE POUDRE REACTIVE

I.3.9 Microstructure des BPR :

Le dosage en eau est inférieur à celui nécessaire pour l'hydratation complète du ciment. Les BFUP possèdent ainsi une réserve de ciment anhydre qui leur procure un potentiel d'auto cicatrisation en cas de fissuration. L'eau pénétrant éventuellement par les fissures va permettre la formation d'hydrates au sein des microfissures en réagissant avec les grains de clinker résiduel. Ce phénomène constitue un atout particulièrement intéressant en termes de durabilité pour ce matériau. [Kamila ,2012] .Il est également d'usage de faire subir aux BPR un traitement thermique visant à améliorer la microstructure en activant la réaction pouzzolanique . En effet ce traitement permettrait de reconstituer des chaînes C-S-H plus longues [Zanni _1996].Ceci est attribué à l'hydratation rapide et à l'accélération de réaction pouzzolanique du quartz broyé [Cherkaoui,,2010].Le progrès dans les BPR et BFUP résulte aujourd'hui d'un changement complet de philosophie et d'une optimisation tous azimuts de tous les paramètres disponibles Leur coût croit en proportion des paramètres optimisé. [Cherkaoui,,2010]. En résumé , les critères de formulation des BPR sont :

- Un ciment a faible teneur en C₃A
- Un sable fin
- Une quantité de marbre ou (grande quantité de fumée de silice)
- Et parfois l'ajout de quartz broyé

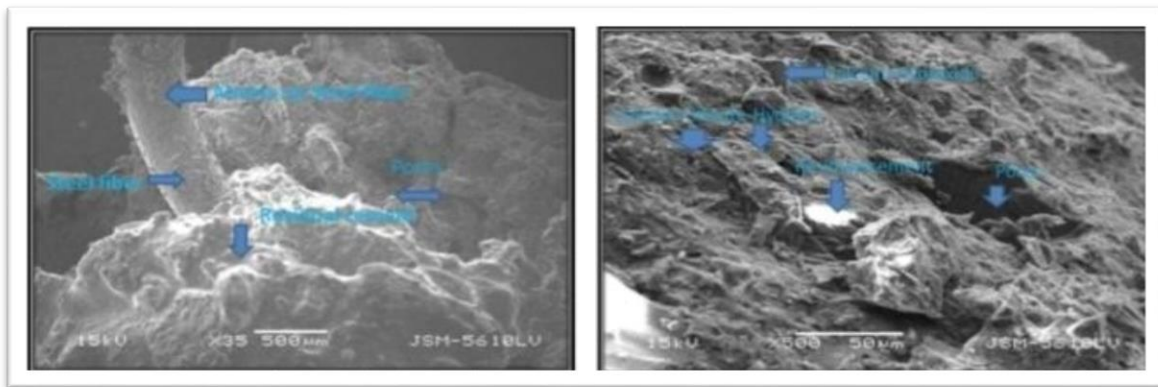


Figure I.17: microstructure de BPR après 1 jour (Kamila,2012) **Figure.18:** microstructure de BPR (après 7 jours)

CHAPITRE I : GENERALITES SUR LES BETONS ET LES BETONS DE POUDRE REACTIVE

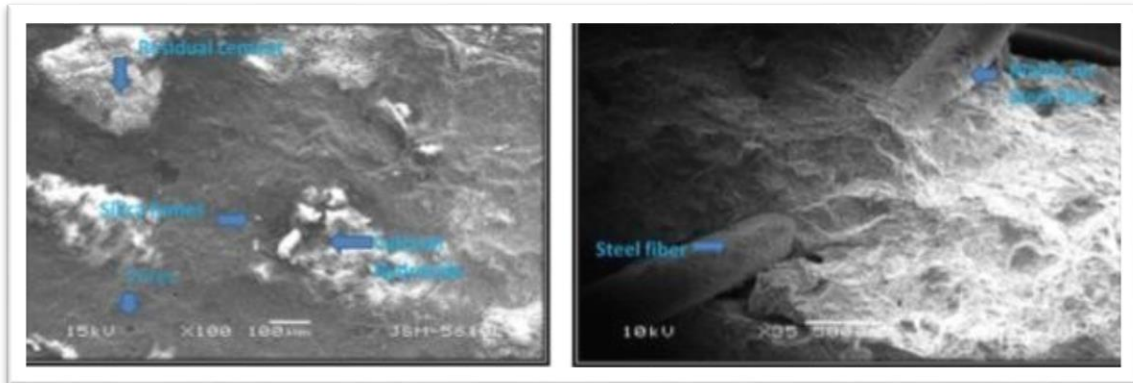


Figure I.19: microstructure de BPR après
(Kamila ,2012)

Figure I.20 : microstructure de BPR après
180 jours.

I.3.10. Principe de formulation de BPR :

- **Méthode proposé 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) :

$$V = V_0 (d / D)^{0.2} \quad 1.1$$

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 [Sablocrete, 1994], 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:

$$[\text{fines}] = [V] \quad 1.2$$

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

CHAPITRE I : GENERALITES SUR LES BETONS ET LES BETONS DE POUDRE REACTIVE

[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 :

$$PS=0.75(0.08/ D)^{0.2} (\% \text{ volumique}) \quad 1.3$$

Ainsi, le dosage volumique optimal en fines s'écrit en combinant des équations (1.2) et (1.3) :

$$[\text{fines}] = 0.38 (0.08/ D)^{0.2} (\% \text{ volumique}) \quad 1.4$$

On estime qu'une précision de l'ordre de ± 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 :

$$(e+v)_{\min} = 0.8(d/D)^{0.2} (\% \text{ volumique}) \quad 1.5$$

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 :

$$[\text{vides}] = k \times [\text{eau}] (1/ \text{m}^3) \quad 1.6$$

Où K = 0,2 à 0,25.

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

$$[\text{Sable}] = 1000 - [\text{fines}] - [\text{eau}] - [\text{vide}] (1/ \text{m}^3) \quad 1.7$$

Le dosage de sable estimé par cette formule prend en considération toutes les particules de taille supérieure à 80 µm. Le sable est considéré dans un état saturé, superficiellement sec. 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 :

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

1.8

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) v : Air piégé (l/ m³)

CHAPITRE I : GENERALITES SUR LES BETONS ET LES BETONS DE POUDRE REACTIVE

c : Dosage en ciment (kg/ m³)

K1 : Coefficient pouzzolanique

K2 : Coefficient d'activité du filler calcaire [Tafraoui, 2009].

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.

L'optimisation du dosage en super plastifiant des BUHP dépend généralement de la maniabilité souhaitée et de la facilité de mise en place dans les moules (coulabilité). Le dosage en super plastifiant est compris entre 1,8 et 3% en extrait sec par rapport au ciment. [Alpari et al, 1997].

I.4 Conclusion :

Dans ce chapitre , nous avons effectué une revue bibliographique des travaux consacrés aux BPR Cette partie est destinée particulièrement à la description des BPR, qui un béton de type haut performance et leur caractérisation de tout les côtés (physique, chimique ,mécanique ...). Ensuite nous avons détaillé les performances mécaniques et physique de cette nouvelle génération de béton aussi donne le formulation de préparé ce type de béton et etc... .Donc on a dons une généralité bibliographique globale pour cette nouvelle génération de béton.

CHAPITRE II :

Comportement des bétons à haute température.

CHAPITRE II : COMPORTEMENT DES BETONS A HAUTE TEMPERATURE.

II.1 Introduction :

L'incendie est un phénomène redoutable qui concerne les ouvrages en béton et qui occasionne chaque année des pertes de vies humaines et matérielles considérables. Les incendies les plus connus dans le monde sont ceux des tunnels sous la Manche (1996 et 2008), du Mont Blanc (1999) et du Fréjus (2005) en France, tunnels du Storebealt (1994) au Danemark, du Tauern (1999) en Autriche ou bien encore tunnel du Gothard (2001) en Suisse ainsi que la tour de Windsor à Madrid (2005) [Faure, et Thimus, (2004).]. Ces incendies ont mis en avant l'impact des hautes températures sur l'endommagement du béton. Ces incendies montrent d'importantes dégradations caractérisées par un détachement de matière, une perte des performances mécaniques, voire la mise hors service de l'ouvrage. Le présent chapitre présente une analyse bibliographique sur le comportement des bétons portés aux températures élevées. Cette analyse portera d'une part sur l'évolution des propriétés physiques, thermiques ainsi que les propriétés mécaniques des bétons portés aux hautes températures et d'autre part sur les mécanismes de l'instabilité thermique du béton avec les paramètres pouvant influencer cette dernière.

II.2 Terminologie feu et incendie :

Un feu est une combustion qui prend une dimension telle qu'il devient un incendie. En tant que phénomène physique, un incendie se définit comme le résultat d'une combinaison chaleur – carburant – oxygène. En effet, pour qu'un feu (une combustion) puisse prendre naissance, il faut la présence conjuguée de trois éléments [Loïc Thomas Guy Archambault ,2005.] : Source d'inflammation :

- Source d'inflammation : source d'énergie nécessaire au démarrage de la combustion (Flamme, étincelle, décharge électrique, etc.);
- Présence d'un carburant : corps qui se combinant avec le combustible permet la combustion (oxygène, air, peroxyde, etc.);
- Présence d'un combustible : matière inflammable solide (bois, charbon, papier, etc.);
- Liquide (essence, alcools, etc.); gazeux (butane, propane, etc.).

CHAPITRE II : COMPORTEMENT DES BETONS A HAUTE TEMPERATURE.

Ces trois composantes sont souvent représentées graphiquement sous forme d'un triangle appelé triangle du feu (figure II.1).



Figure II.1 : Triangle du feu [Loïc Thomas Guy Archambault. ,2005.] .

La sévérité du feu et la durée de ces phases dépendent de plusieurs paramètres:

- quantité et répartition des matériaux combustibles (charge incendie) ;
- vitesse de combustion de ces matériaux ;
- conditions de ventilation (ouvertures) ;
- géométrie du compartiment ;
- propriétés thermiques des parois du compartiment;
- mesures actives de lutte contre l'incendie. . [Allal , 2015].

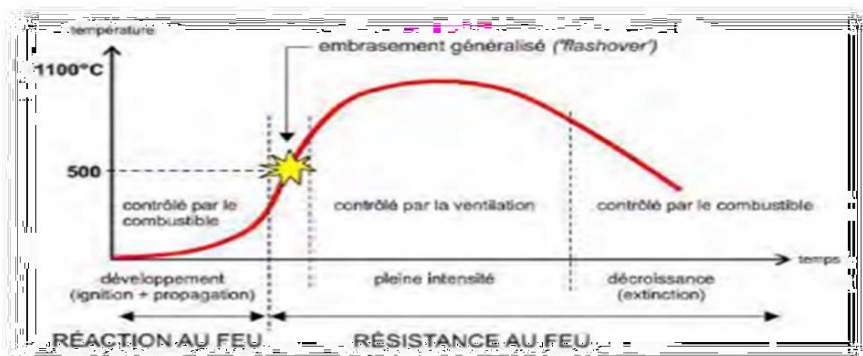


Figure II.2 : Phases de développement d'un incendie . . [Allal , 2015].

CHAPITRE II : COMPORTEMENT DES BETONS A HAUTE TEMPERATURE.

II.3. Evolution des propriétés physiques du béton au cours de l'échauffement :

II.3.1 Densité apparente :

D'après les travaux de Bazant and Kaplan [Bazant Z. P. et Kaplan M. F, 1996.], on observe une légère diminution de la masse volumique Pour tous les bétons entre la température ambiante et la température 400 °C à cause de l'expansion thermique du matériau et du départ de l'eau.

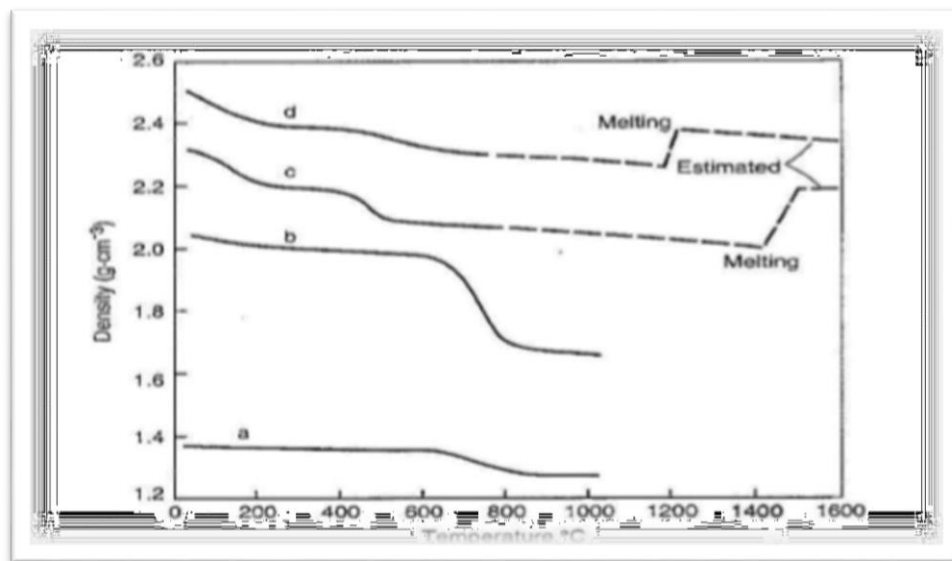


Figure II.3 : Effet de la température sur la masse volumique de bétons confectionnés avec des granulats de type a– argile expansé (granulats léger), b– silico- calcaire, c– quartzite et d– basalte. [Bazant Z. P. et Kaplan M. F, 1996.].

Les roches d et c contenant du quartz, leur expansion à 573 °C provoque une diminution de la masse volumique des bétons. La forte baisse de la masse volumique dans le béton b est attribuée à la présence de granulats calcaires dans sa composition, ce qui peut entraîner un fort dégagement de CO₂ à partir de 600 °C [Bazant Z. P. et Kaplan M. F, 1996.] . D'après ces résultats on peut conclure que :

CHAPITRE II : COMPORTEMENT DES BETONS A HAUTE TEMPERATURE.

- L'expansion thermique du béton et le départ d'eau par séchage et déshydratation des CSH et pentlandite diminue la densité du matériau,
- La forte expansion à 573 °C des granulats contenant du quartz diminue la densité du béton,
- Le fort dégagement de CO₂ qui accompagne la décomposition du carbonate de calcium à partir de 700 °C diminue fortement la densité du béton,
- La fusion du béton densifie le matériau, augmentant par conséquent sa masse volumique [Bazant Z. P. et Kaplan M. F, 1996] .

II.3.2 Perméabilité :

Dans les travaux de Sliwinski et al. [Sliwinski J. et al , 2004] , il a été montré que la perméabilité du béton augmente avec la température de manière exponentielle. Les valeurs de la perméabilité ont été obtenues pour un béton de granulats basalte chauffé à 1°C/min et refroidi à la température ambiante (Figure II.4).

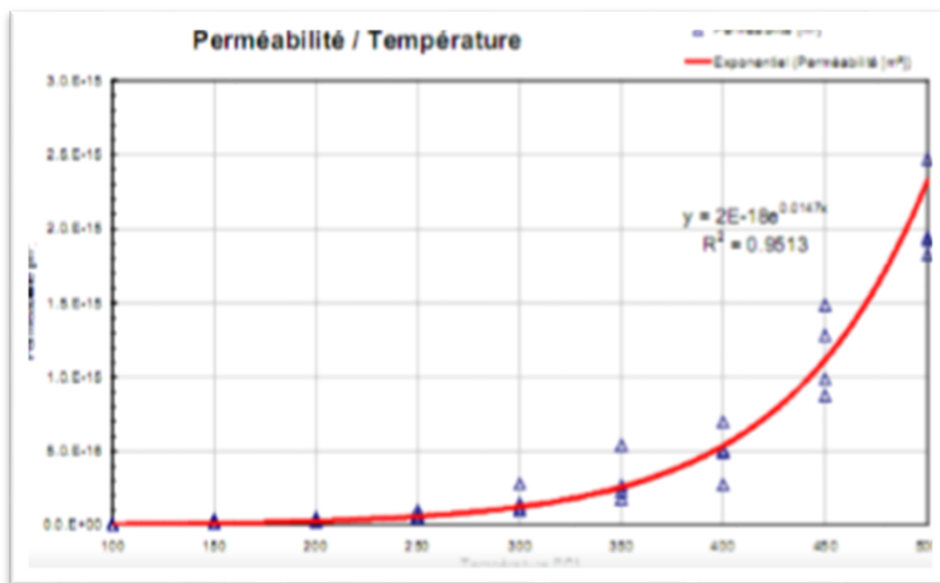


Figure II.4 : Perméabilité intrinsèque résiduelle en fonction du traitement thermique [Sliwinski J, et al ,2004] .

CHAPITRE II : COMPORTEMENT DES BETONS A HAUTE TEMPERATURE.

L'évolution de la perméabilité avec la température a été aussi étudiée dans le cadre du Projet National BHP 2000 [Kalifa, et Menneteau , 2000]. La détermination de la perméabilité intrinsèque (k) a été réalisée à partir de la mesure de la perméabilité à l'azote (Ka) selon la méthode de Klinkenberg en utilisant la relation :

$$K_a = (1 + p) \cdot k$$

Où P est la pression moyenne et b un coefficient déterminé expérimentalement. La figure montre qu'à 105°C la perméabilité intrinsèque du BHP est nettement inférieure à celle d'un BO. Par contre, elle augmente plus rapidement avec la température pour le BHP que pour BO. A 350°C, le BHP a une perméabilité équivalente à celle du béton ordinaire.

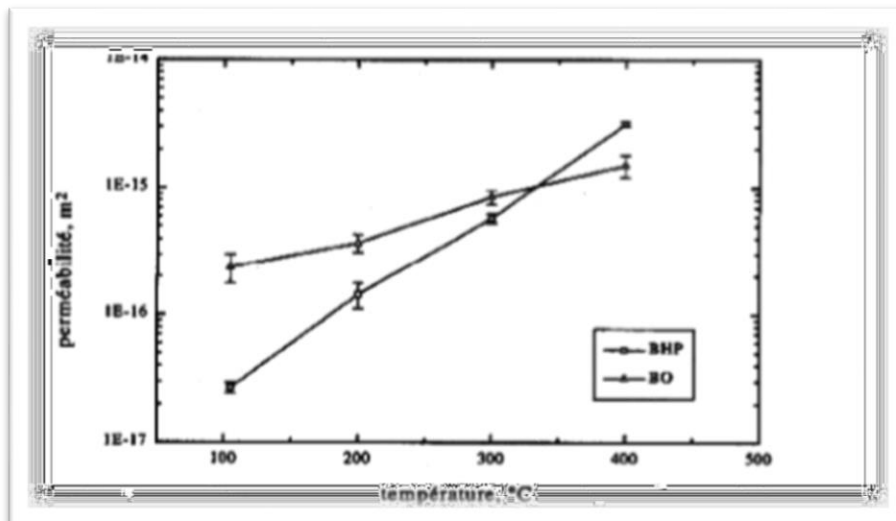


Figure II.5 : Perméabilité apparente au gaz en fonction de la température de conditionnement [Piasta J, 1984] .

II.3.3 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. La figure II.6 regroupe les résultats d'analyses thermogravimétriques (ATG), menées par différents auteurs sur des bétons comprenant différents granulats. Globalement on observe entre 20°C et 200°C une perte de masse due à l'eau libre, entre 200 et 500°C une perte de l'eau liée chimiquement et au-delà de 500°C une perte liée aux dégradations chimiques des différents types de granulats [Belkacem T., 2010] .

CHAPITRE II : COMPORTEMENT DES BETONS A HAUTE TEMPERATURE.

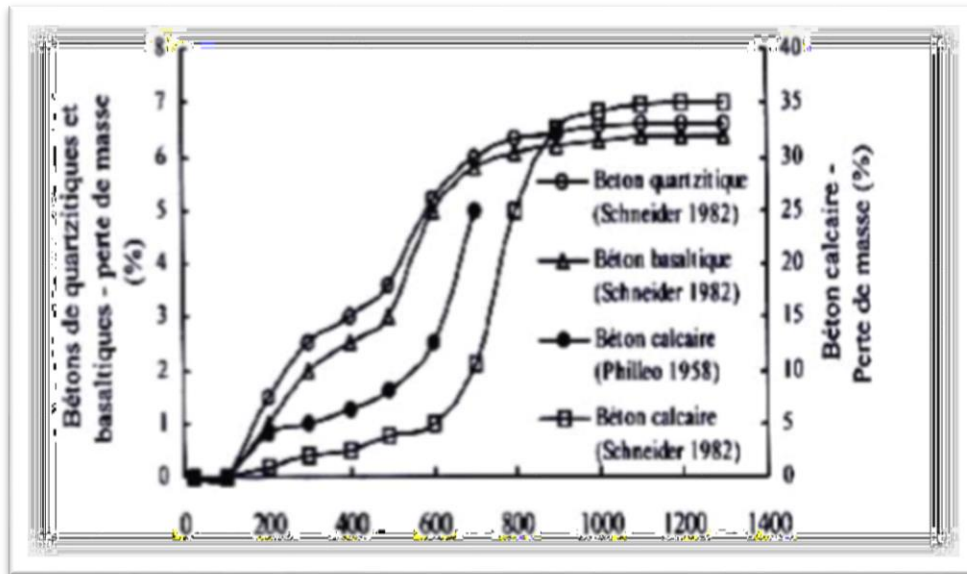


Figure II.6 : Perte de masse des bétons de différents types de granulats en fonction de la température [Belkacem T., 2010] .

La perte de masse est plus importante dans un béton ordinaire (BO) que dans un béton à haute performance (BHP) ou d'un (BUHP) ou par rapport d'un (BPR). En effet, le ratio E/C est de l'ordre de 0.5 pour un BO contre 0.3 pour un BHP. La perte de masse d'un béton se résume en trois domaines dont les limites varient suivant les auteurs :

- de la température ambiante à 120°C (150°C) : une faible variation de masse s'observe. Ce premier domaine marque le départ de l'eau libre des capillaires, [Noumowé N. A, 1995].
- de 120°C (150°C) à 300°C : l'augmentation de la perte de masse est beaucoup plus rapide. Ce domaine est caractérisé par le départ de l'eau liée dans les hydrates et principalement du gel de C-S-H. C'est dans ce domaine que le taux de séchage passe par un maximum correspondant à la fin de la migration de l'eau évaporable [Noumowé N. A, 1995] , [Gaweska I. H , 2004.] .

au-delà de 300°C : la vitesse de perte de masse diminue. La diminution de la masse continue à cause de la déshydroxylation de la portlandite et de la décarbonatation du carbonate de calcium [Noumowé N. A , 1995], [Diederichs et all , 1992] , [Gaweska I. H. , 2004] .

CHAPITRE II : COMPORTEMENT DES BETONS A HAUTE TEMPERATURE.

Lors de l'échauffement du béton à haute température, sa masse diminue à cause de l'évaporation de l'eau et la déshydratation progressive du gel C-S-H. Il est important de distinguer la perte de masse des bétons mesurée en régime permanent (en fixant la température) de celle réalisée en régime transitoire (en fixant la vitesse de chauffage) des cycles thermiques. La nature minéralogique des granulats influence le degré de la perte de masse. Les résultats de Xing [Z. Xing , 2011.] montrent (figure II.7) que la perte de masse des bétons est moins significative pour les bétons de granulats siliceux ou bien des béton de poudres réactive (BPR) que pour les bétons de granulats calcaires ou silico-calcaires.

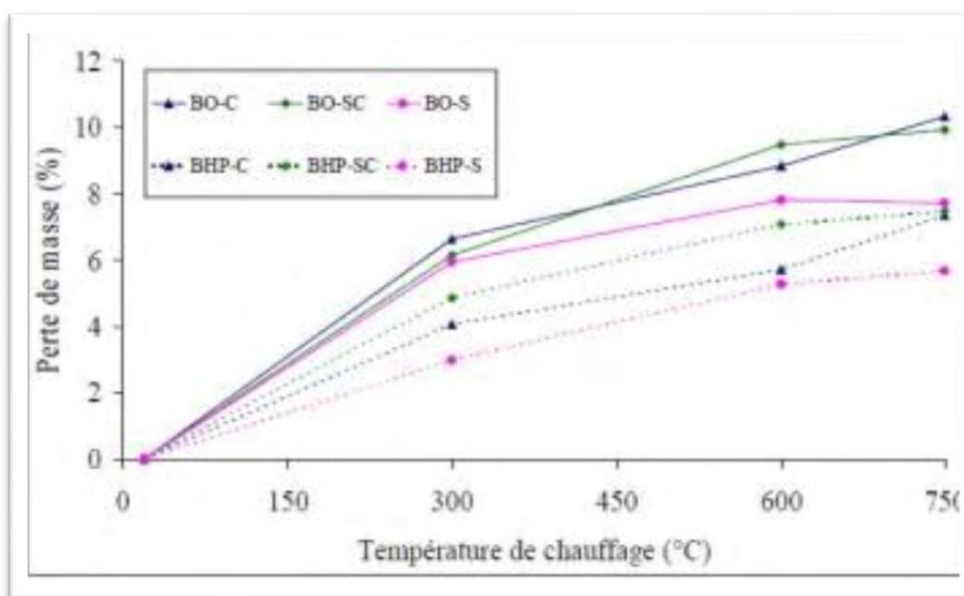


Figure II.7 : Perte de masse des bétons testés en fonction de la température de chauffage: une plus faible perte de masse pour les BHP que les BO [Z. Xing , 2011.].

II.3.4 Evolution de la porosité :

La déshydratation reste un de phénomènes majeurs durant l'échauffement de la pâte de ciment. Elle change les hydrates en anhydres. Le volume des anhydres qui se créent est inférieur à celui des hydrates de départ. Ceci entraîne une augmentation de la porosité du système. La porosité totale augmente et la taille caractéristique des pores change [Gaweska I. H, 2004.] . Noumowé et al. [Noumowé N. A et al , 1996] .

CHAPITRE II : COMPORTEMENT DES BETONS A HAUTE TEMPERATURE.

ont montré une augmentation de la porosité au mercure à 300°C avec un accroissement de la taille des pores. Pour Ye et al. [Ye G., Liu X et al ,2007] , la porosité totale et la distribution des pores évoluent plus sur les pâtes de ciment des bétons à haute performances que celles des bétons ordinaires. Les travaux de Gaweska [Gaweska I. H., 2004] confirment l'augmentation de la porosité en fonction de la température. Cependant, Gaweska note une croissance rapide avant 180°C puis une évolution progressive jusqu'à la température de 600°C. A 180°C, la porosité relative du BO augmente de 57% et celle du BHP de 98%. A l'inverse pour Kalifa et al. [Kalifa P., Tsimbrovska M ,2000.], la valeur de la porosité à l'eau évolue très peu entre 105°C et 400°C. Elle augmente de 2.3% pour le BO et de 0.9% pour le BHP. Tsimbrovska observe l'évolution de la porosité totale à l'eau avec la température. Quel que soit le béton considéré, la tendance est identique, la porosité augmente régulièrement jusqu'à 450°C, puis de façon plus importante à partir de cette température. Cette évolution est attribuée à la détérioration de la pâte et de l'interface granulats/pâte, puis à la déshydratation de la Portlandite [Ludovic M., , 2006]

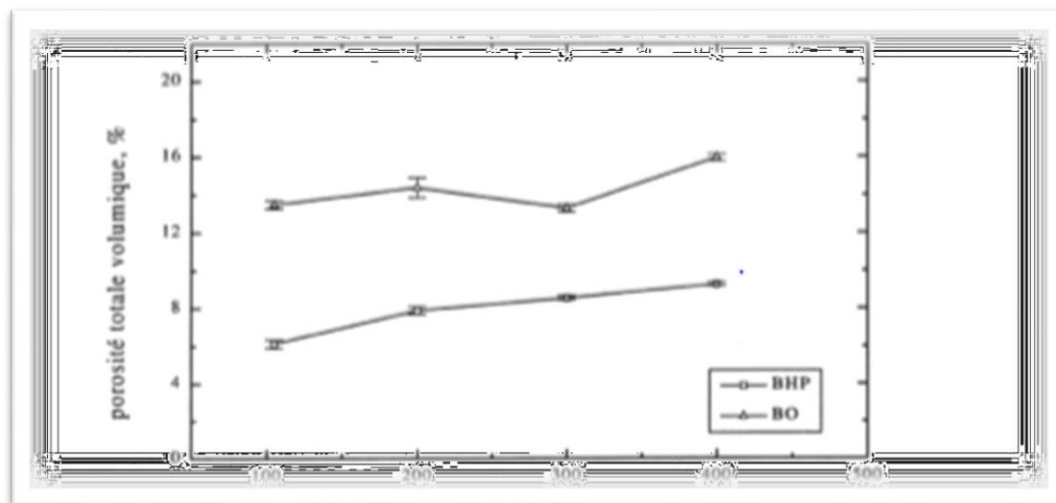


Figure II.8 : Évolution de la porosité totale d'un béton ordinaire ($R_c=36$ MPa) et d'un béton à haute performance ($R_c=110$ MPa), d'après [Ludovic M., 2006].

II.4 Effet de la température sur le comportement mécanique des béton :

Le béton subit de fortes modifications physico-chimiques qui influencent l'évolution de ses propriétés mécaniques avec la température. Les résultats obtenus de différentes investigations sur le comportement du béton chauffé, interprètent différemment les évolutions de ces paramètres.

CHAPITRE II : COMPORTEMENT DES BETONS A HAUTE TEMPERATURE.

Ces différences ne sont pas dues seulement à la nature et au type du béton mais aussi aux conditions expérimentales comme : la durée et le taux de chauffage et de refroidissement, la géométrie des éprouvettes..... Les recherches menées jusqu'à présent sur les bétons à haute température ont visé principalement, l'amélioration de ses performances mécaniques à l'état durci aussi bien qu'à l'état frais. En revanche l'amélioration de ses performances vis-à-vis du comportement au feu reste un champ d'investigation assez peu développé.[Saadi Imene ,2017] .

II.4.1 Résistance en compression à hautes températures :

L'évolution de la résistance en compression en fonction de la température a été le sujet de plusieurs investigations expérimentales. Cette évolution est affectée par de nombreux paramètres : nature du liant et des granulats, rapport agrégat/ciment, rapport E/C [Schneider U , 1988.] . Phan [Phan L. T., Carino N. J, 2003.] dans ses travaux, rassemble les résistances en compression résiduelles obtenues au cours de ses essais et une partie des résultats obtenus par d'autres chercheurs. L'allure générale des courbes débute par une chute de résistance au voisinage de 100 à 150°C, suivi d'un accroissement de résistance entre 300 et 350°C, puis d'une chute de résistance continue avec la température au-delà de 350°C [Saadi Imene,2017].

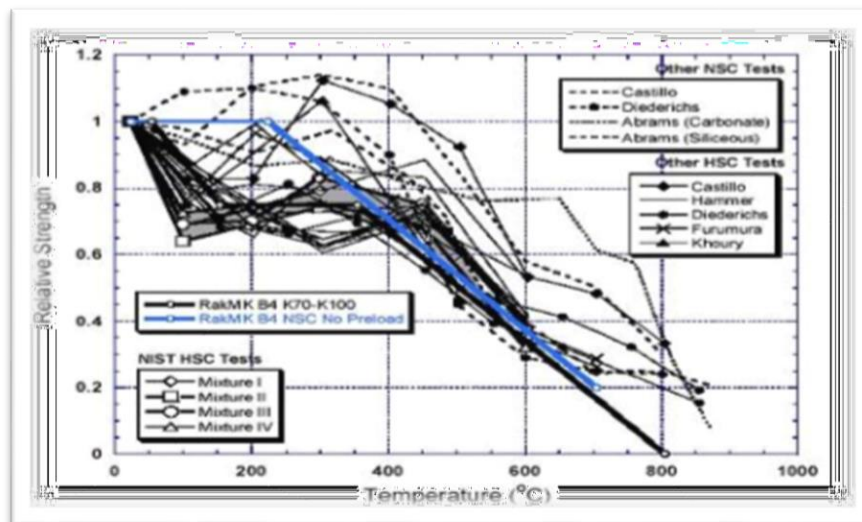


Figure II.9 : Evolution de la résistance en compression relative des bétons avec la température [Phan L. T., Carino N. J, 2003] .

CHAPITRE II : COMPORTEMENT DES BETONS A HAUTE TEMPERATURE.

Khoury [Khoury G. A, 1988-1992] attribue la baisse de résistance enregistrée entre 100-150°C à un gain de fluidité de l'eau qui à ces températures a pour conséquence de réduire les forces de liaison entre les couches de C-S-H. Cette réduction d'énergie de surface entre gels développe éventuellement des groupes silanols (Si-OH HO-Si) qui ont la particularité de présenter des forces de liaison faibles. D'après Dias [Dias W. P. Set all , 1990] et Cast [Castillo et Durrani .J,1990.]

le gain de résistance vers 300- 350°C est dû à une augmentation des forces de liaisons entre hydrates et à un accroissement des énergies de surface. Les bétons à hautes performances (BHP) présentent un gain plus marqué et décalé vers les hautes températures par rapport aux bétons ordinaires (BO). La raison de la baisse de résistance du béton est souvent attribuée à une modification de la microstructure de la pâte de ciment par déshydratation. Cette réaction de déshydratation étant chimiquement irréversible, la chute de résistance du béton est liée au degré d'hydratation de la matrice cimentaire. Cette explication est à nuancer dans la mesure où le c&livage qui transforme le quartz α En quartz β dans des granulats siliceux à 573°C fragilise le granulat et peut entraîner également une chute des résistances mécaniques du béton [Felicitti R., Gambarova P. G., Sora M. N., Khoury G .A., 2000].

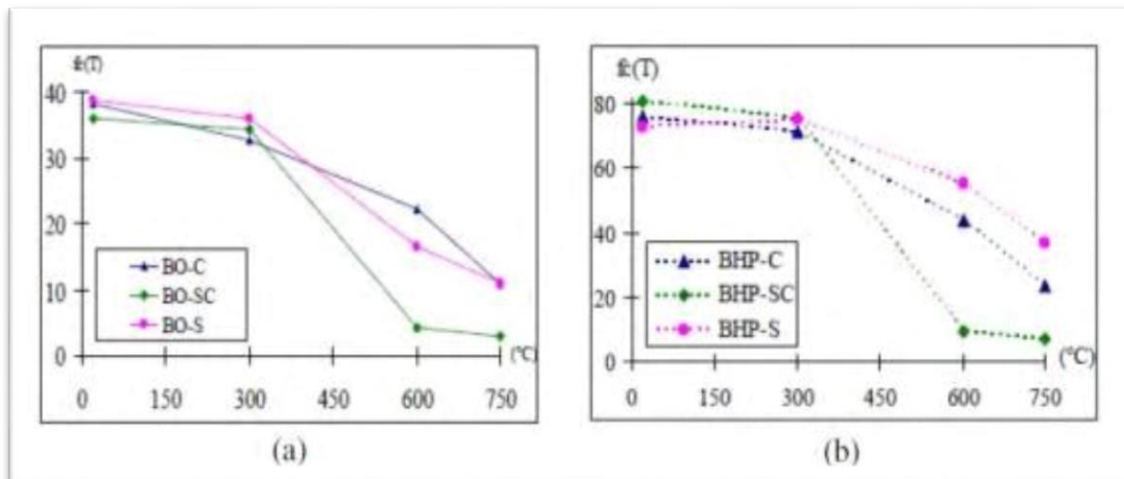


Figure II.10 : Évolution de la résistance résiduelle à la compression (en MPa) des BO (a) et BHP (b) avec différents granulats [Z. Xing, 2011.] .

CHAPITRE II : COMPORTEMENT DES BETONS A HAUTE TEMPERATURE.

II.4.2 Résistance en traction à hautes températures :

Peu de recherches ont été faites pour déterminer la résistance à la traction à hautes températures, vu la complexité de la réalisation des essais. La plupart des observations, de l'évolution de la résistance en traction en fonction de la température, sont réalisées après le refroidissement par fendage (Thelandersson [Thelandersson S, 1971.] , Noumowé [Noumowé N. A , 1995]) . Sur la Figure II-11, on présente les résultats de traction directe à chaud obtenus par Thelandersson [Thelandersson S, 1971.] , Felicetti & al [Felicetti et , Gambarova , 1999-2000] et Felicetti & Gambarova [Harada T et all, 1972.] . Comparés avec les valeurs proposées par l'EUROCODE 2 et le DTU Feu-Béton.

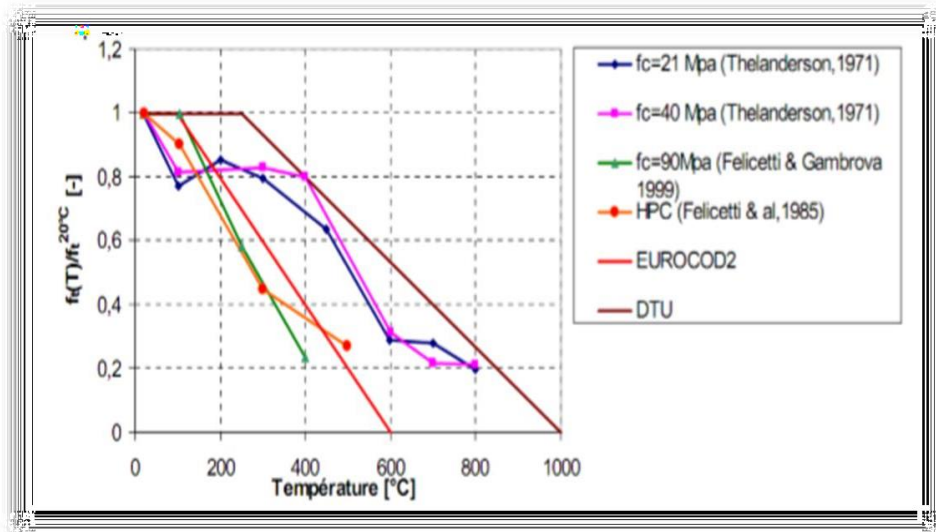


Figure II.11 : Résultats des essais de résistance en traction relative obtenus par [Thelandersson S, 1971.] [Felicetti R., Gambarova P. G., Sora MP. N., Khoury G. A , 1985] , et [Felicetti R., Gambarova P. G, 1999-2000] comparés à ceux de la DTU et EUROCODE 2.

CHAPITRE II : COMPORTEMENT DES BETONS A HAUTE TEMPERATURE.

Toutes les valeurs déterminées se situent au dessous de celle du DTU. A partir de ce graphe, comme pour la variation de la résistance en compression, la résistance en traction chute avec l'élévation de la température. En effet, la résistance en traction du béton avec la température est affectée par les mêmes paramètres que pour la résistance en compression (nature du liant et des granulats, teneur en eau, vitesse de chauffage...). Par ailleurs, Harada & al. [Harada T et al., 1972.] affirment que, par rapport à la résistance en compression, la diminution de la résistance en traction est très marquée. Gaweska [Gaweska I. H., 2004.] a effectué des essais de traction directe durant le cycle thermique à la fin de la période de stabilisation du palier de température sur un BHP (100 MPa). Elle observe que la résistance à la traction obtenue « à chaud » à 120°C, 250°C et 400°C est supérieure à celle déterminée à 20°C (figure II-12). Ces résultats semblent corroborer ceux de Khoury [Khoury G et Sullivan, 1988.] obtenus par des essais de flexion à haute température.

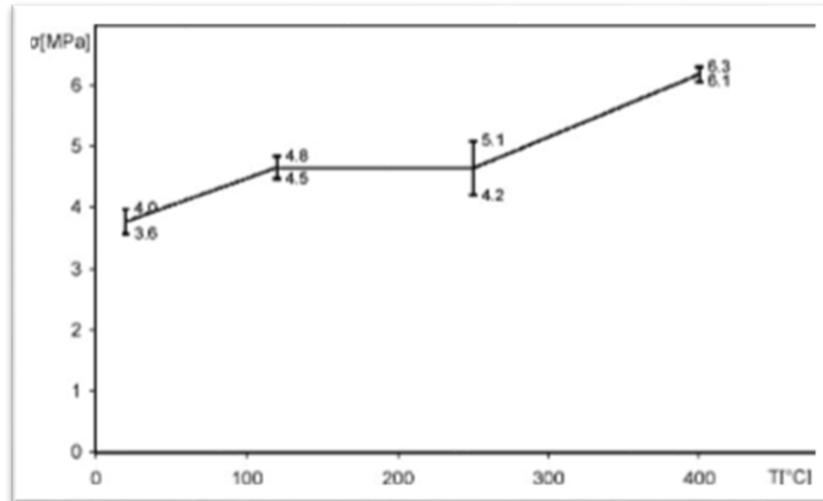


Figure II.12 : Evolution de la résistance à la traction à chaud d'un béton à hautes performances [Gaweska I. H., 2004.].

Les essais menés par Chang [Chang et al 1999-2005, 2006.] sur la résistance résiduelle à la traction normalisée montrent 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. Min Li [Min Li et al., 2004.] note que sur la résistance résiduelle à la traction par fendage est plus sensible aux effets de la

CHAPITRE II : COMPORTEMENT DES BETONS A HAUTE TEMPERATURE.

fissuration que la résistance résiduelle à la compression. Il indique également que la baisse de résistance des pâtes à hautes performances est beaucoup plus rapide que celles des pâtes ordinaires dans la plage de température comprise entre 200 et 400°C (figure II-13).

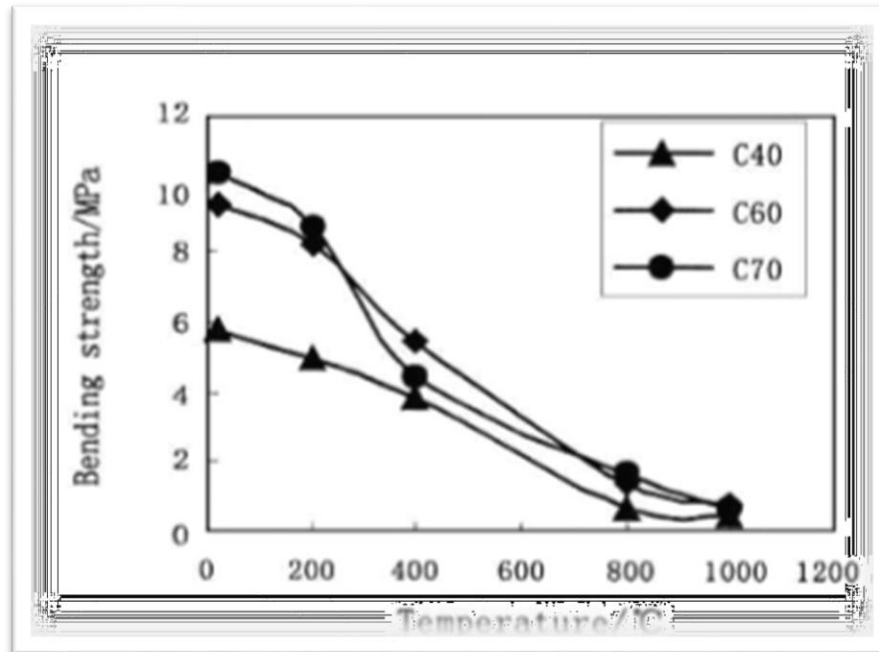


Figure II.13 : Evolution de la résistance résiduelle à la traction des pâtes de ciment avec la température [Min Li et al, 2004.] .

II.4.3 Module d'élasticité à hautes températures :

Ce module traduit l'évolution de la rigidité du béton avec la température. La perte de l'eau évaporable au dessous de 100°C du béton a tendance à faire augmenter la résistance en compression et diminuer le module d'élasticité. La chaleur affecte similairement le module d'élasticité et la résistance du béton au dessus de 100°C. De nombreuses études expérimentales montrent une diminution graduelle du module élastique en compression avec la température (Noumowé [Noumowé N. A , 1995.] , Tolentino [Tolentino E et all, 2002.], Gaweska [Gaweska I. H., 2004]) . Noumowé [Noumowé N. A , 1995.] a effectué des essais de module d'élasticité résiduel, après un chauffage à 150°C, 300°C, 450°C et 600°C sur un béton ordinaire (38,1 MPa) et sur un béton à hautes performances (61,1 MPa). Il constate que la baisse du module d'élasticité des deux bétons s'effectue de manière linéaire avec l'augmentation de la température et que la courbe d'évolution du module élastique résiduel du BHP reste très proche et semble similaire à celle du béton traditionnel. Sabeur [Sabeur H et all, 2007.] aboutit à la même constatation pour des mesures de module d'élasticité réalisé à chaux Gaweska [Gaweska I. H , 2004] a noté une

CHAPITRE II : COMPORTEMENT DES BETONS A HAUTE TEMPERATURE.

décroissance du module d'élasticité relatif entre 20°C et 600°C sur trois BHP M100C, M75C, M75SC et un BO M30C comme montre la figure II-14. Les valeurs du module d'élasticité à 600°C sont inférieures à 15%.

La plus faible valeur est celle du M75SC (moins de 2 %). Gaweska conclut aussi que le rapport E/C n'a aucune influence sur l'évolution du module d'élasticité avec la température.

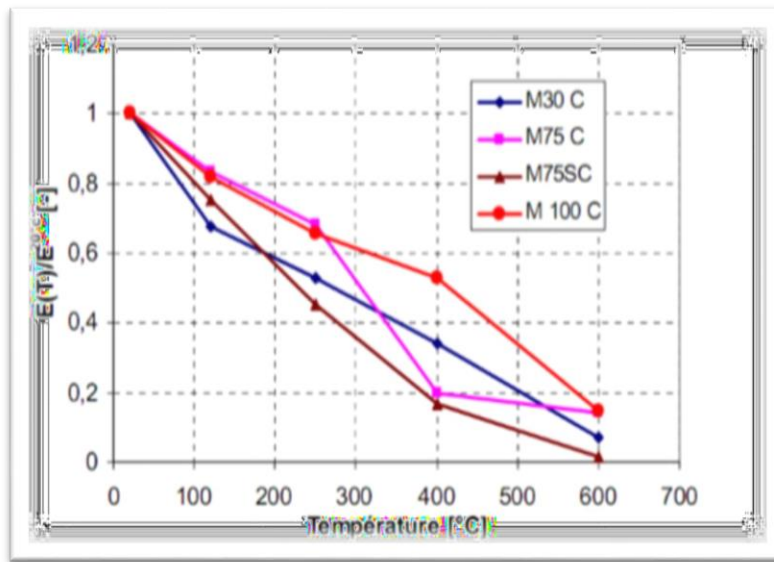


Figure II.14 : Evolution du module d'élasticité relatif pour les bétons M30C, M75C, M75SC, M100C [Gaweska I. H , 2004] .

La comparaison du module d'élasticité mesuré à chaud et en résiduel effectuée par Gaweska [Gaweska I. H , 2004.] indique une diminution plus importante du module d'élasticité résiduel au-delà de 120°C. La différence entre les deux types d'essais semble croître avec l'augmentation de la température. Le gradient thermique additionnel induit durant la période de refroidissement et la réaction de réhydratation expansive de la chaux CaO semblent être à l'origine d'une fissuration additionnelle du matériau. Les variations du module d'élasticité avec l'augmentation de la température dépendent principalement de la microstructure de la pâte de ciment (augmentation de l'endommagement du matériau par la déshydratation et la fissuration de la matrice) et traduit l'évolution de la rigidité du béton avec la température. Ainsi, avec l'élévation de la température, on assiste à la rupture de liaisons internes qui entraînent une diminution du module d'élasticité avec un matériau de plus en plus déformable [Fares H , 2009]. Pour Kanéma le module d'élasticité diminue de manière continue à partir du cycle de 150°C. L'auteur obtient une baisse de plus de 98% de la rigidité initiale à un chauffage de 600°C. Il conclut donc qu'après 600°C, les éprouvettes de bétons testées ne présentent plus une rigidité significative. Tolentino [Tolentino E et all , 2002] explique la baisse de rigidité des

CHAPITRE II : COMPORTEMENT DES BETONS A HAUTE TEMPERATURE.

bétons portés à une température élevée par l'augmentation des volumes poreux dans le béton. Les modules d'élasticité déterminés par Diederichs et al [Diederichs et Jumppanen , 1992.] sur les trois BHP et par Castillo et Durrani [Castillo C., Durrani A. J, 1990.] sur le BHP et le béton ordinaire sont portés sur la figure II.15 . Les valeurs du DTU sont également données sur la même figure .

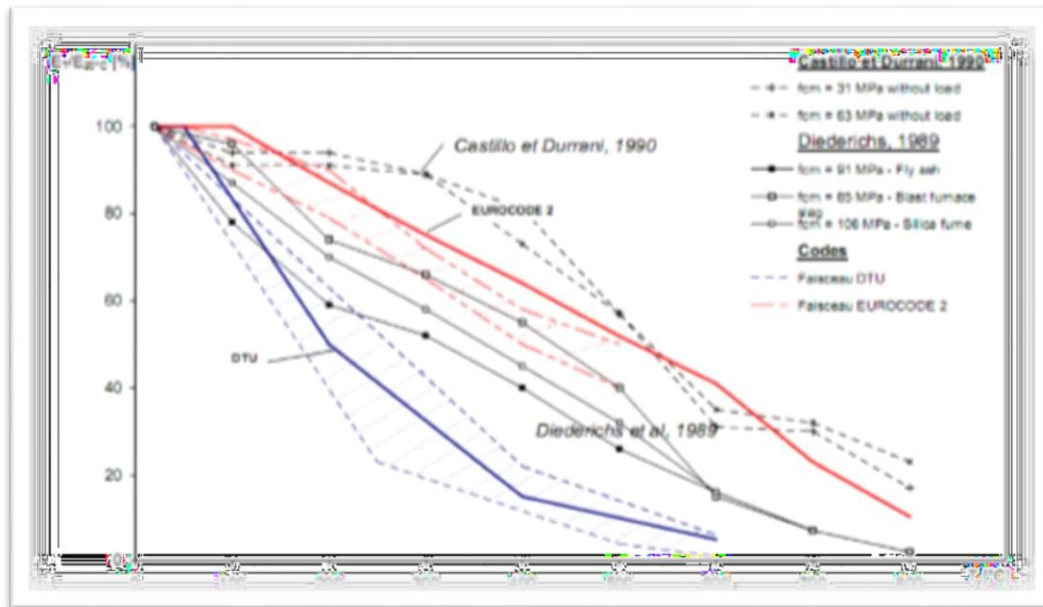


Figure II.15 : Modules d'élasticité en fonction de la température d'exposition; la zone grisée indique les valeurs expérimentales prises en compte pour l'établissement du DTU (les courbes extrêmes représentant déjà des moyennes d'après leurs auteurs).

Il est clair, qu'au-delà de 200°C, les modules d'élasticité déterminés sont supérieurs à ceux obtenus par Diederichs. Les deux séries de courbes restent cependant supérieures à celles du DTU. Les différences sont importantes sur une grande plage de température. Elles sont maximales à T = 400 °C et comprises entre 20 et 70 %. Seule une valeur déterminée à T = 100°C sur le BHP de cendres volantes se situe environ 5 % au-dessous de la courbe du DTU [Saadi ,2017] .

II.5 Comportement au feu du béton à haute performance éclatement ultra haute performance et écaillage du béton :

II.5.1 Phénomène d'éclatement et d'écaillage du béton :

Quand un béton est chauffé, deux phénomènes proches peuvent conduire à la perte de matière: l'écaillage et l'éclatement. Ces deux termes peuvent être définis assez précisément.

CHAPITRE II : COMPORTEMENT DES BETONS A HAUTE TEMPERATURE.

1. L'écaillage : c'est la rupture des couches ou des pièces proches de la surface d'un élément de structure en béton lorsqu'il est soumis à une haute et rapide augmentation de la température. Harmathy [Harmathy T. Z, 1964] est le premier à avoir tenté d'expliquer le phénomène d'écaillage du béton. Il considère la présence des forts gradients thermiques et le développement de pression de vapeur d'eau comme les deux principales causes de l'écaillage du béton. En effet lorsque le béton est sollicité thermiquement à haute température, la vapeur d'eau se déplace vers les surfaces froides et se condense. Les pores se remplissent alors d'eau sous forme liquide qui migre vers les régions froides. La migration est rendue difficile par la condensation alors que de plus en plus de vapeur essaie de se déplacer. Ces pressions de vapeur associées aux fortes contraintes thermiques aboutissent à l'apparition du phénomène d'écaillage. La figure II.16 illustre ce mécanisme d'écaillage.

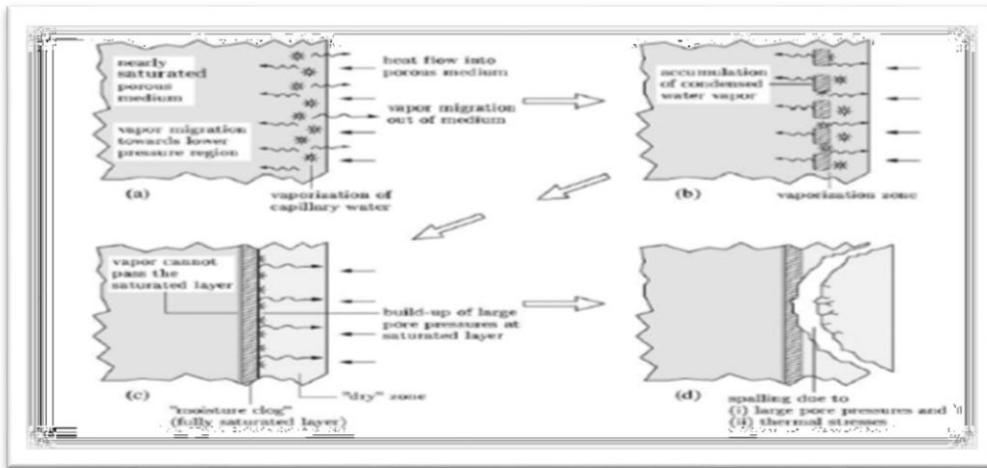


Figure II.16 : Mécanisme d'écaillage du béton [Zeiml M., Leitherner D., Lackner R., Mang H.A , 2006.].

CHAPITRE II : COMPORTEMENT DES BETONS A HAUTE TEMPERATURE.



Figure II.17 : Ecaillage lors de l'incendie du tunnel mont blanc. [Saadi,2017] .

1. L'éclatement : c'est la soudaine désintégration de l'élément de structure en béton qui s'accompagne d'une libération d'une grande quantité d'énergie en projetant des morceaux de béton à grande vitesse dans toutes les directions [Phan L.T, Lawson J.R., Davis F.L , 2001.-2003]. L'éclatement est la résultante de processus thermiques, hydriques et mécaniques couplés et éventuellement concurrents, impliquant un grand nombre de paramètres, tant à l'échelle du matériau qu'à celle de l'élément de structure. De ce fait le comportement à l'éclatement

2 présente un caractère stochastique, comme en témoignent les essais au feu : dans des conditions expérimentales identiques, seulement une partie des éléments de structures testées présentent de l'éclatement. [Saadi,2017] .



Figure II.18 :Eclatement d'un poteau durant l'essai au feu. [Saadi Imene,2017].

II.5.2.Mécanisme du phénomène :

Les premières mentions concernant l'éclatement des bétons datent des années soixante. Les observations du comportement des bétons à haute température menées par Harmathy (1965) [Harmathy T.Z , 1964-1965.] ont montré que les matériaux chauffés pouvaient présenter, dans certains cas, un comportement explosif.

CHAPITRE II : COMPORTEMENT DES BETONS A HAUTE TEMPERATURE.

Deux principales raisons de l'éclatement ont été attribuées premièrement aux effets du gradient thermique et la formation de pressions de vapeur d'eau dans le matériau. Ce n'est qu'en 1984 que Hertz [Hertz K , 1984], en étudiant les propriétés de bétons à haute performance (120 MPa et 170 MPa) soumis aux températures élevées a observé une forte sensibilité de ces bétons à l'éclatement.

Plusieurs études menées sur ce sujet, notamment, par [Zhukov V.V, 1994.] , [Hertz K. D, 2003.], [Khoury G.A , 2003] ont permis de recenser cinq principaux paramètres augmentant la probabilité d'apparition du phénomène. Ces paramètres sont :

- 1. faible porosité :** cette caractéristique a été citée comme un paramètre principal d'éclatement. La porosité faible (caractéristique principale des BHP et BUHP), entraîne une faible perméabilité et par conséquent un transfert de masse plus difficile.[Saadi ,2017].
- 2. contrainte thermique :** notamment dues aux gradients thermiques provoqués notamment par l'échauffement rapide avec les vitesses de montée en température très importantes, ou l'échauffement des éléments asymétriques. Ces facteurs entraînent les gradients thermiques et hydriques plus importants ainsi que des états de contraintes qui favorisent l'éclatement. [Saadi,2017].
- 3. présence de l'eau et apparition des pressions internes:**

L'eau présente dans le matériau est considérée comme la raison principale de l'éclatement. Les travaux de Harmathy ont montré que le comportement explosif commence à partir d'une certaine teneur en eau du matériau. Les sources [Zhukov V.V , 1994] .[Hertz K. D, 2003] [Hertz K. D, 2003] et [Hertz K., S , 1998.] citent 3- 4% de la teneur en eau (massique) comme une valeur au-dessus laquelle la possibilité d'éclatement est très forte. Il a été observé que l'éclatement ,n'apparaît pas si le matériau est sec, même en condition de présence d'un fort gradient thermique.

possibilité d'éclatement est très forte. Il a été observé que l'éclatement ,n'apparaît pas si le matériau est sec, même en condition de présence d'un fort gradient thermique.

L'eau libre contribue fortement à l'apparition des pressions internes de vapeur d'eau.

L'augmentation des pressions de vapeur d'eau dans le matériau est l'une des principales raisons de l'éclatement. Dans le travail de Hertz, 1984 [Hertz K, 1984] le mécanisme de l'éclatement due à l'apparition des pressions de vapeur d'eau est comparé au mécanisme de travail du canon à vapeur « Architrone » de Léonard de Vinci.

CHAPITRE II : COMPORTEMENT DES BETONS A HAUTE TEMPERATURE.

4. **présence de la charge mécanique** : notamment de la précontrainte qui favorise, dans certains cas, l'éclatement. [Saadi,2017] .
5. **déformations thermiques empêchées** : Ulm et al. [ULM F.J., Coussy O., Bazant Z.P , 1999.] a montré que la dilatation thermique empêchée, génère des contraintes internes en compression dans la direction parallèle à la surface soumise au feu. Selon ces auteurs, c'est cette compression qui provoque la fissuration, tandis que les pressions internes dans la structure ne jouent qu'un rôle secondaire en influençant l'éclatement après localisation des déformations. Cette hypothèse est cohérente dans le sens où les BHP présentent un risque d'écaillage plus élevé que le béton ordinaire à cause de leur faible ductilité en compression.[Saadi ,2017]

II.6 Conclusion :

L'objectif de ce chapitre a été de faire une recherche sur les paramètres influençant significativement le comportement thermique et hydrique du béton à haute température figure l'eau. Sa quantité dans le matériau dépend du rapport E/C initial et du degré d'humidité relative.

L'eau présente sous forme liquide et celle présente sous forme vapeur modifient significativement les propriétés thermiques du matériau, notamment dans le cas des bétons à hautes performances et ultra hautes performance aussi les bétons des granulats siliceux comme les bétons de poudres réactives BPR où l'augmentation de la pression de vapeur semble contribuer à l'apparition du phénomène d'écaillage et /ou d'éclatement. En observant le paramètre de confection tel que le rapport eau sur ciment, il apparaît à la vue des résultats qu'il n'a que peu d'importance sur l'évolution des propriétés mécaniques des bétons à haute température, alors qu'il intervient de manière très sensible dans l'évolution de la perméabilité et l'apparition du phénomène d'éclatement.

CHAPITRE III:

**LE BRIQUE ET L'EMPLOI DES
DECHETS DE BRIQUE DANS LE
DOMAINE GENIE CIVIL**

CHAPITRE III: LE BRIQUE ET L'EMPLOI DES DECHETS DE BRIQUE DANS LE DOMAINE GENIE CIVIL

III.1 Le brique :

III.1.1 Définition du brique :

Le brique est un matériau de construction qui est fabriqué en portant une petite quantité d'argile, préalablement mise en forme, à une température appropriée- la température de frittage.

III.1.2 Principaux constituants de la brique et caractéristiques chimiques :

Les briques cuites sont fabriquées avec tous types d'argile : les ilitiques (couleur marron gris à rouge, après cuisson), les kaoliniques (très claires) et les bravais tiques (couleur orange à rose). On trouve dans la pâte argileuse essentiellement des éléments métalliques, sous forme d'oxydes plus ou moins hydratés : - les éléments dits "réfractaires" dont le degré de fusion est très supérieur à celui de la température (de 800 à 1000°) des fours à briques : il s'agit de la silice (SiO₂), et de l'aluminium (Al₂O₃).

- les éléments "colorants" dont la proportion détermine la couleur basique de la brique (le degré de cuisson étant l'autre facteur déterminant de cette couleur). Ce sont :

- l'oxyde de fer,
- l'oxyde de titane,
- l'oxyde de manganèse. - les "fondants", de deux types :
- les oxydes alcalins : oxydes de sodium et de potassium,
- les oxydes alcalino-terreux : chaux et magnésie. [Marc Mélon ,2017]

Tab III.1 : Les composants chimiques de brique terre cuite(rouge)[Marc Mélon ,2017]

Nature des elements	Formulation	Tolérances (%)
Silice	SiO ₂	35 - 85
Alumine	Al ₂ O ₃	9 - 25
Chaux	CaO	0 - 25
Magnésie	MgO	0 - 5
oxydes alcalins	Na ₂ O + K ₂ O	1 - 5
Sesquioxyde de fer	Fe ₂ O ₃	3 - 9
Oxyde de titane	TiO ₂	0,3 - 2
anhydride sulfurique	SO ₃	0 - 3
gaz carbonique	CO ₂	0 - 13
eau de combinaison	H ₂ O	5 - 11

CHAPITRE III: LE BRIQUE ET L'EMPLOI DES DECHETS DE BRIQUE DANS LE DOMAINE GENIE CIVIL

III.1.3 Les Processus de fabrication :

Le processus de production de la terre cuite se compose de différentes étapes :

A / Extraction

La matière première naturelle de la brique de terre cuite est l'argile.

L'argile est extraite dans des argilières situées en zone d'extraction.



Figure III.1 : l'Extraction d'argile pour le fabrication de brique rouge . . [Marc Mélon ,2017].

B/ Préparation de l'argile :

La préparation comprend deux opérations principales : le broyage et le malaxage d'une part, le dosage et le mélange des matières premières d'autre part. Le but est d'obtenir une masse argileuse bien homogène et plastique qui sera facilement transformée en produit fini.



Figure III.2 : Préparation de l'argile pour fabriquer la brique rouge . [Marc Mélon ,2017].

CHAPITRE III: LE BRIQUE ET L'EMPLOI DES DECHETS DE BRIQUE DANS LE DOMAINE GENIE CIVIL

C/ Dosage et mélange:

Pour obtenir une qualité optimale de la matière première, divers types d'argile sont mélangés, toujours sous un contrôle permanent. On peut ainsi garantir la qualité constante des produits en terre cuite. Les machines à doser sont constituées de réservoirs contenant les différentes matières premières dont des «nourrices» alimentent régulièrement, et dans les proportions requises, un ou plusieurs mélangeurs.

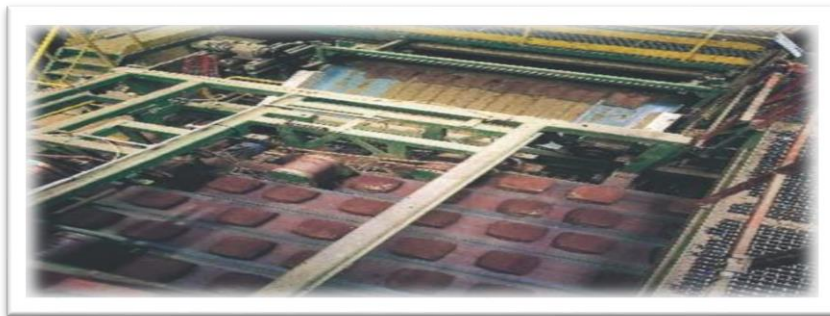


Figure III.3 : Dosage et mélange les constituants pour fabriquer le brique [Marc Mélon ,2017].

D / Façonnage :

On distingue divers types de briques, en fonction de la manière dont elles sont mises en forme : Briques moulées main : La méthode de moulage la plus ancienne est le façonnage à la main des briques. Briques étirées :les briques pour maçonnerie ordinaire sont presque exclusivement fabriquées par extrusion. Chaque élément forme une brique qui présente quatre faces assez lisses suite au coulissement dans la filière, et deux faces de sectionnement plus grossières.



Figure III.4 : le Façonnage de brique rouge. [Marc Mélon ,2017].

CHAPITRE III: LE BRIQUE ET L'EMPLOI DES DECHETS DE BRIQUE DANS LE DOMAINE GENIE CIVIL

E/ Séchage :

Le séchage se poursuit jusqu'à ce que les briques ne contiennent plus qu'environ 2% d'eau. la stabilité dimensionnelle du produit n'est obtenue qu'au terme du retrait consécutif à la dessiccation. le séchage (généralement de 2 à 4 jours).

F/ Cuisson :

C'est la dernière étape que doit subir la brique d'argile façonnée et séchée, avant de pouvoir devenir une brique de terre cuite à proprement parler. C'est là une phase d'une grande importance qui doit se dérouler très progressivement. On augmente graduellement la température jusqu'à l'obtention de la température de cuisson (comprise entre 850 et 1200°C, en fonction du type d'argile) . [Marc Mélon ,2017].



Figure III.5 : le Séchage et le Cuisson de brique rouge . [Marc Mélon ,2017].

G/ Emballage :

Après la cuisson, les briques sont prêtes à être transportées et livrées sur chantier. Pour des raisons de facilité et de sécurité, elles sont préalablement empilées sur des palettes et emballées de façon à minimiser la quantité d'emballage utilisé.



Figure III.6: l'Emballage de brique rouge . [Marc Mélon ,2017].

CHAPITRE III: LE BRIQUE ET L'EMPLOI DES DECHETS DE BRIQUE DANS LE DOMAINE GENIE CIVIL



Figure III.7: Les différents processus de fabrication de brique (rouge) terre cuite.

[Christian Du Brulle , 2014].

III.1.4 Quel type de brique en terre cuite pour quel usage ?

Il est important de choisir vos briques selon le type de travaux envisagé :

- Les **briques plâtrières**, par exemple, conviennent à la construction d'un mur intérieur.
- Les **briques pleines en terre cuite** sont quant à elles adaptées à la construction d'un mur extérieur ou à la construction d'un mur porteur.
- Les **briques en terre cuite de parement** sont différentes. Elles servent à décorer un mur dans le but de lui donner un aspect particulier. [**Christian Du Brulle , 2014**].

CHAPITRE III: LE BRIQUE ET L'EMPLOI DES DECHETS DE BRIQUE DANS LE DOMAINE GENIE CIVIL



Figure III.8 : Un exemple d' usage de brique terre cuite [Christian Du Brulle , 2014].

III.1.5 Types de brique :

Il existe différents types de briques pleines avec des aspects de surface variée.

On distingue différents types de briques :

- la brique de terre crue, qui peut aussi contenir des fibres (pailles, lin, crin...),
- la brique de terre compressée,
- la brique cuite pleine, matériau traditionnel très ancien, avec une variante appelée brique pleine perforée (les perforations sont perpendiculaires au plan de pose),
- la brique légère et isolante (qui flotte sur l'eau) utilisé une terre silico-magnésienne sans consistance .
- la brique cuite creuse, plus légère et plus isolante, est devenue la plus utilisée.
- la brique de chanvre, ayant de très bonnes propriétés d'isolation thermique,
- la brique non gélive,
- la brique réfractaire, pour la construction des fours, chaudières, foyers, cheminées, etc. [Christian Du Brulle , 2014].

III.2 L'emploi des déchet de brique dans le domaine de génie civil:

III.2.1 Définitions :

Un déchet est, selon la loi du 15 juillet 1975 relative à l'élimination des déchets et à la récupération des matériaux du code l'environnement français : « tout résidu d'une processus de production, de transformation ou d'utilisation, toute substance, matériau produit ou plus généralement tout bien meuble abandonné ou que son

CHAPITRE III: LE BRIQUE ET L'EMPLOI DES DECHETS DE BRIQUE DANS LE DOMAINE GENIE CIVIL

détenteur densité à l'abandon ».

On définit le déchet comme un produit ou n'importe quel résidu issu métabolisme ou d'une activité humaine : domestiques, industrielles et agricoles, quand il ne peut plus être utilisé à d'autres fins par celui qui l'a fabriqué. [Bensafi boucif et Belkacem oussama soufyane ,2018].

III.2.2 Définition et classifications des déchets :

Un déchet correspond à tout matériau, substance ou produit qui a été jeté ou abandonné car il n'a plus d'utilisation précise.

Les déchets peuvent être abordés de manière différente en fonction de leurs propriétés. Leur classification peut notamment se faire en fonction de leur état physique (solide, liquide, gazeux), de leur provenance (déchets ménagers, déchets industriels, déchets agricoles), de leur traitement (primaires, secondaires, ultimes) ou encore de leur dangerosité (déchets inertes, déchets banals, déchets spéciaux).

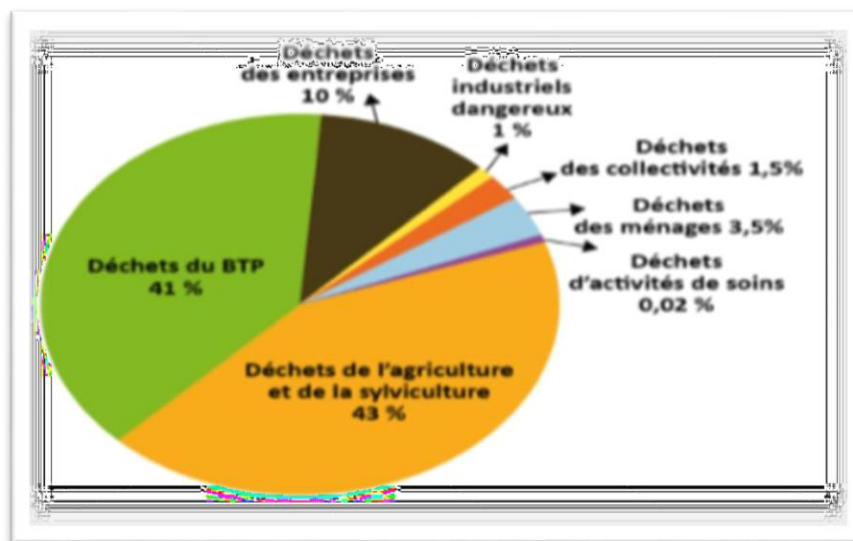


Figure III.9 : Les différents types de déchets [Bensafi, Belkacem ,2018].

III.2.3 Exemple de déchet peut être recyclée :

- **Le Poudre de marbre :**

Le terme « marbre » serait d'abord une appellation traditionnelle dérivée du grec marmaros, qui signifie "pierre resplendissante", (ensuite du latin marmor) et indiquait n'importe quelle pierre « lustrable », c'est-à-dire dont la surface pouvait être lustrée au moyen de polissage. Dans ce sens, l'appellation n'a pas de définition géologique précise et ne se réfère qu'à la capacité d'une roche à être polie et refléter la lumière. Pour les scientifiques, un marbre est une roche métamorphique dérivant d'un calcaire

CHAPITRE III: LE BRIQUE ET L'EMPLOI DES DECHETS DE BRIQUE DANS LE DOMAINE GENIE CIVIL

ou d'une dolomie sédimentaire ayant été transformée généralement par métamorphisme régional ou plus rarement par métamorphisme de contact. Dans ce processus de transformation de la roche originelle, les structures sédimentaires sont effacées et la roche carbonatée recristallise en un amas de cristaux de calcite et/ou de dolomie engrenés de dimensions millimétriques à centimétriques. Les intercalations argileuses, les minéraux détritiques ou les oxydes minéraux présents dans le carbonate originel donnent alors au marbre diverses colorations et veinages polychromes du plus grand effet esthétique. [Belmiloud Lilia, et Benkanoun Dyhia, 2017].

La poudre du marbre utilisée est le déchet des marbreries dues au découpage des pièces en marbre blanc. Les caractéristiques chimiques de cette poudre sont données dans le tableau [J. Mater. Environ. Sci. 7 (2) (2016) 429-437].

Tab III.2: Composition chimique de la poudre de marbre [A.H. Mohammed et all,2016].

Elémen	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

III.2.4 Déchets de brique :

L'objectif de ce paragraphe est de donner quelques renseignements sur les déchets de brique qu'on appelle « briquillons », « chamotte » ou « brique concassée ». Vu leur emploi occasionnel, il y a peu des données sur ces matériaux et leur utilisation comme granulats du béton, malgré la consommation universel de leur matière première « brique » en grande masse, en conséquence, leur génération en quantités énormes.

En Algérie, selon les informations disponibles, la recherche sur ces matériaux est presque Négligeable. On appelle « briquillons » : des briques morcelées provenant généralement de la démolition ou d'une mauvaise cuisson de briques (briques trop cuites) . On appelle « chamotte » : brique cuite broyée ou concassée .[Barkat Abderezzak,2006].

III.2.5 Bétons des déchets de brique utilisé comme granulats :

- **Déchets de brique (recyclage et normes) :**

La brique est un matériau qui provient du démantèlement de bâtiment résidentiel, industriels, commerciaux, etc.

CHAPITRE III: LE BRIQUE ET L'EMPLOI DES DECHETS DE BRIQUE DANS LE DOMAINE GENIE CIVIL

• De contaminants inorganiques (métaux et métalloïdes) en provenance de la matière première (granulaire naturel, matières résiduelles non dangereuses, ciment), d'enduits ou d'activités industrielles. De contaminants organiques en provenance d'enduits, de déversements ou d'activité industrielle.

Il existe peu d'information disponibles sur le devenir des débris de brique de terre cuite qui constituent la plus grande partie des déchets de démolition et de décombres, d'un part techniquement, les débris de brique pratiquement recycle comme composant d'un matériau type maçonnerie.

Les débris de brique ont été très employés dans le type d'Europe très ravagés, à la fin de la seconde guerre mondiale. Des tas de décombres de villes dont les de briques générés, se trouvent en quantités énormes.

Les débris de brique ont été utilisés pour produire des granulats et des normes ont été élaborées telles que :

- Béton de débris de brique.
- Parpaings de béton de briques.
- Hourdis creux de planchers en béton léger.[Bensafi,et Belkacem, ,2018].

III.2.6 Propriétés de béton à base de déchets de brique :

Les briques concassées sont utilisées largement, bien que largement usage, il n'y avait pas d'études systématique des différentes propriétés du béton de granulats de brique.

- Les différentes propriétés, de granulats ainsi que de béton de granulats de brique concassée, résultantes des recherches sont :
- La procédure de la reproduction de mélange pour bétons de granulats normal, peut être utilisée avec succès pour la production du béton de brique concassée.
- Le béton contenant de l'argile cuite comporte une résistance au feu beaucoup élevée que celle de béton à base de gravier naturel.
- Le béton contenant des granulats de brique concassée est plus perméable que le béton normal.
- Pour la même résistance à la compression, la résistance à la traction est de 11% supérieure à ceux du béton normal.
- La masse volumique apparente de béton de brique concassée varie de 2000 à 2080 kg/m³.

CHAPITRE III: LE BRIQUE ET L'EMPLOI DES DECHETS DE BRIQUE DANS LE DOMAINE GENIE CIVIL

- Pour le béton à base de granulats de brique concassées, cette chute est plus importante
- Elle est de l'ordre de 10 à 40%. Lorsque les granulats naturels sont remplacés par un mélange de granulats de béton et de briques concassées en même temps, la chute de résistance est en moyenne de 35 à 42%. [Bensafi ,Belkace ,2018].

III.2.7 Domaine d'utilisation du béton de déchets de briques :

Le béton de débris de brique a déjà été trouvé, il y a longtemps, son utilisation dans les revêtements de routes sur les ponts, suite de sa faible densité.

Le béton à base de granulats de briques présente une bonne résistance au feu.

Les débris de brique sont utilisés aussi comme granulats dans la construction d'assises routières, pour l'aménagement paysager et comme matériaux de remblaiement.

Parmi les exutoires utilisés comme remède de la situation vivante et d'après les sources des briqueteries :

- Plates formes en béton,
- Chapes en mortier de ciment,
- Étanchéité : forme de pente en isolation de toiture,
- Réfection de planchers anciens,
- Béton réfracteur utilisé pour revêtement des wagons de brique, Remblaiement des fouilles et de site, etc.[Barkat Abderezzak ,2006].

III. 3 Les avantages et les inconvénients des briques en terre cuite :

III.3.1 Les avantages :

Si ce matériau de construction est encore utilisé aujourd'hui, parfois au détriment de briques plus sophistiquées, comme la brique mono mur (que nous vous présentions il y a peu), c'est tout simplement car elle a de très nombreux avantages !

Citons ensemble l'intérêt d'utiliser des briques en terre cuite pour vos constructions :

- **Une bonne isolation** : la brique en terre cuite est naturellement isolante.
- **Un matériau naturel** : contrairement à d'autres briques, la brique en terre cuite est artisanale et écologique..
- **Une pose facile** : monter un mur en briques est facile et rapide,
- **Un matériau esthétique** : enfin, la brique en terre cuite offre un côté naturel et très esthétique à n'importe quelle maison.[Marc Mélon ,2017].

CHAPITRE III: LE BRIQUE ET L'EMPLOI DES DECHETS DE BRIQUE DANS LE DOMAINE GENIE CIVIL

III.3.2 Les inconvénients :

- La brique rouge poreuse ne peut pas être utilisée comme matériau de construction dans les zones très humides.
- Facile à percuter et cassable surtout s'il est exposé au gel parce que sa résistance mécanique est faible.
- Requiert patience et précision pendant le travail.
- Une main-d'œuvre qualifiée est nécessaire pour éviter de la casser pendant la construction.

III.4 Recyclage de déchet de brique terre cuite dans le domaine de génie civil :

➤ Réutilisation de la brique de terre cuite :

A petite échelle, certaines entreprises de démolition récupèrent les briques en les nettoyant du mortier. Elles peuvent alors être réutilisées pour des travaux de restauration ou pour des nouvelles constructions auxquelles elles donnent un certain cachet .Si la réutilisation de briques et tuiles reste marginale à l'heure actuelle, on peut s'attendre à une croissance dans le cadre de la démolition sélective des bâtiments. [**Guillame , 2017,**].

➤ Valorisation de la brique de terre cuite :

Près de 95 % des déchets de terre cuite sont revalorisés (brique ou tuile principalement). La filière terre cuite s'engage massivement depuis plusieurs années pour réduire son impact environnemental et améliorer la durabilité de ses produits.

Issue des déchets de chantier, la brique appartient à la catégorie des déchets inertes. Deux types de valorisation sont possibles à l'heure actuelle. **.[Bourema ,2015].**

La valorisation de la matière est un mode d'exploitation des déchets qui vise à leur mise en valeur afin de les réintroduire dans le circuit économique. Elle couvre le réemploi, la réutilisation, la régénération et le recyclage de la matière **.[Bourema ,2015].**

CHAPITRE III: LE BRIQUE ET L'EMPLOI DES DECHETS DE BRIQUE DANS LE DOMAINE GENIE CIVIL



Figure III.10 : Exemple de valorisation de déchets de brique rouge comme un poudre .
[Marc Mélon ,2017].

➤ **Recyclage de la brique de terre cuite :**

Le recyclage est un procédé qui consiste à réintroduire le déchet dans le cycle de production en remplacement total ou partiel d'une matière première naturelle. Il se distingue de la réutilisation par la nécessité de nouveau traitement que la matière subisse.[Bourema ,2015].La brique peuvent être concassés et utilisés comme granulats dans la couche de fondation routière, comme matériaux de remblai, pour l'aménagement paysager et pour d'autres applications et pour le domaine de la construction.

***Routes :** Les briques sont généralement concassées pour être transformées en granulats. Ils servent alors au remblaiement et à la stabilisation de certaines routes.



Figure III.11: le brique de terre dans les routes le brique de terre dans les routes .
[Guillaume , 2017,].

***Courts de tennis :** Une autre pratique très courante est l'utilisation de la brique pour les revêtements des courts de tennis. La technique consiste à les broyer pour entrer dans la composition de la terre battue des surfaces.

CHAPITRE III: LE BRIQUE ET L'EMPLOI DES DECHETS DE BRIQUE DANS LE DOMAINE GENIE CIVIL



Figure III.12 : le brique de terre dans les Courts de tennis le brique de terre dans les routes .
[Guillame , 2017,].

***Terre :** Elles peuvent servir de compost pour la culture de plantes puisqu'elles sont issues de matières premières naturelles.

III.5 Conclusion :

Cette chapitre parle sur généralité de brique et l'emploi de déchet de brique dans le domaine de génie civil aussi on considérer dans cette partie que les habitation on briques offrent ainsi les meilleures conditions pour un climat intérieur sain . le brique est une matière n'est pas banale. Elle à une vie, elle a souvent muté au cours de son existence pour se retrouver dans les poubelles et les décharges. Avec une telle diversité moléculaire, qu'il est nécessaire de trouver les moyens pour en extraire les fractions valorisables ou pour atténuer les capacités de nuisances .Le brique soit visible ou crépie , elle rayonne d'une atmosphère qui nous est bénéfique. Notre recherche dans les déchets, nous montre la possibilité d'utilisation de ces derniers (dits inertes) dans le domaine de génie civil. A part les avantages climatiques de ce matériaux , c'est son aspect familier et naturel qui plaît , et qui nous apaisent et tous cella en respectant la nature et s'inscrivant sous l'étiqye du développement durable.

Chapitre IV :

**Caractérisation et
méthodologie
d'essais
expérimentale.**

CHAPITRE IV : CARACTERISATION ET METHODOLOGIE D'ESSAI EXPERIMENTALE

IV.1 Caractéristique des matériaux utilisés :

IV.1.1 Introduction :

La caractérisation des matériaux utilisés dans la composition d'un béton joue un rôle très important sur ses propriétés et ses performances ultérieures. En effet, les propriétés essentielles du béton sont largement influencées par les caractéristiques de ses constituants. De ce fait, la normalisation des modes d'essais et d'identification des composants d'un béton, selon les normes en vigueur, devient une condition nécessaire pour l'obtention d'un béton avec des résultats expérimentaux comparables avec ceux donnés dans la littérature. Dans ce chapitre, on présente les différents matériaux à utiliser dans la confection des bétons à étudier ainsi que les essais et les méthodologies à effectuer selon les normes européennes, normes françaises et les modes opératoires en vigueur.

IV.1.2 Matériaux utilisés:

IV.1.2.1 Le ciment :

Le ciment qu'on a utilisé c'est un ciment portland CPA CEM I 52.5 R Malaki Super Blanc 52,5 R Malaki 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 est certifié conforme à la norme Algérienne (NA442 - 2013), +Européenne (EN197-1) et CE(0099/CPR/A33/001025) par un organisme de certification .

Avantage de produit :[Fiche technique Lafarge Avril 2019].

- 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 inégalés.
- Favorise l'obtention d'une gamme importante de couleurs .
- Idéal pour les structures en béton apparents .

CHAPITRE IV : CARACTERISATION ET METHODOLOGIE D'ESSAI EXPERIMENTALE

- Idéal pour les mortiers et colles de base de ciment .

Applications Recommandées :

- Constructions 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.



Figure IV.01 : ciment utilisé .

❖ Caractéristiques technique : [Fiche technique Lafarge Avril 2019].

- **Composition chimique et composition minéralogique :**

Tab IV.1 : Composition chimique pour un CEM I 52.5R MALAKI .

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

CHAPITRE IV : CARACTERISATION ET METHODOLOGIE D'ESSAI EXPERIMENTALE

- **Composition minéralogique :**

Tab IV.2 : Composition minéralogique pour un CEM I 52.5R MALAKI

Composition minéralogique du Clinker (Bogue)	Valeur
C3S(%)	55±3
C3A(%)	9.0±1

- **Temps de prise :**

Tab IV.3 : Temps de prise pour un CEM I 52.5 MALAKI .

Temps de prise à 20 °(NA230)	Valeur
Début de prise (min)	140 ±40
Fin de prise (min)	200 ±40

- **Résistance à la compression :**

Tab IV.4 : Résistance à la compression pour un CEM I 52.5R MALAKI .

Résistance à la compression	Valeur
2 jours (MPa)	≥30
28 jours (MPa)	≥55

- **Propriétés physiques :**

Tab IV.5 : Propriétés physiques pour un CEM I 52.5R MALAKI .

Propriétés physiques	Valeur
Consistance Normales (%)	28±3
Finesse suivant la méthode de Blaine (cm ² /g) (NA231)	4000-5000
Retrait à 28 jours (µm/m)	≤1000
Masse volumique absolue	3.40
Blancheur (Y)	84±4

IV.1.2.2 SABLE D'OUED (LIWA) :

Le sable utilisé dans le cadre de notre étude expérimentale est un sable de d'une passe au tamis de 0.5mm donc la plus gros diamètre et de 500 µm, se sable a été prélevé de la région de LIWA, il est apprécié pour ces bonne caractéristiques.

CHAPITRE IV : CARACTERISATION ET METHODOLOGIE D'ESSAI EXPERIMENTALE



Figure IV.2 : Le sable utilisé.

❖ Caractéristiques physiques du sable:

➤ Analyses Granulométrique [NF EN 933-1] :

➤ But de l'essai :

L'analyse granulométrique permet de déterminer la grosseur et les pourcentages pondéraux respectifs des différentes familles de grains constituant l'échantillon.

➤ Principe de l'essai :

L'analyse consiste à séparer et classer ces grains selon leur diamètre à l'aide de tamis, emboîtés les uns sur les autres dont les dimensions des ouvertures sont décroissantes du haut vers le bas. L'échantillon étudié est mis sur le tamis supérieur et le classement des grains est obtenu par vibration de la colonne de tamis.

➤ Matériels utilisés :

- Une colonne de tamis propres et correspondants à chaque fraction.

Tab IV.6: Tamis utilisés pour le tamisage de sable.

Action	Tamis utilisés (exprimé en mm)
0/5	(5 – 2.5 – 1.25 – 0.63 – 0.32 – 0.16 – 0.08)et le fond



Figure IV.3: La tamiseuse utilisée.

CHAPITRE IV : CARACTERISATION ET METHODOLOGIE D'ESSAI EXPERIMENTALE

➤ Préparation de l'échantillon

L'échantillon de sable est préparé selon la norme NF EN 933-1 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. La masse de sable trouvé dans notre essais : $M=2000g=2kg$.

➤ Mode Opérateur :

L'opération du tamisage du sable se fait au moyen d'une tamiseuse ou on place la série des tamis sur le cercle inférieur du cadre de l'appareil en suite l'ensemble est serré aux montants par la couronne supérieure, à l'aide de deux jeux de ressort et vis de blocage. La vibration se fait durant 07 minutes à chaque fois. Les résultats de l'analyse granulométrique de sable sont représenté dans le tableau suivant :

Tab IV.7 : Analyse granulométrique de sable d'OUED LIWA.

Diamètre des tamis (mm)	Refus élémentaire (g)	Refus cumulés (g)	Refus cumulés (%)	Tamisât cumulés (%)
5	1.82	1.82	0.091%	99,909%
2.5	111.49	113.31	5.6655%	94,3345%
1.25	94.23	205.72	10.286%	89,714%
0.63	319.01	413.24	20.662%	79,338%
0.315	1260.49	1579.5	78.975%	21,025%
0.16	616.44	1876.93	93.8465%	6,1535%
0.08	1360.62	1977.06	98.853%	1,147%
Le fond	628,41	1989.03	99.4515%	0,5485%

La courbe granulométrique de sable

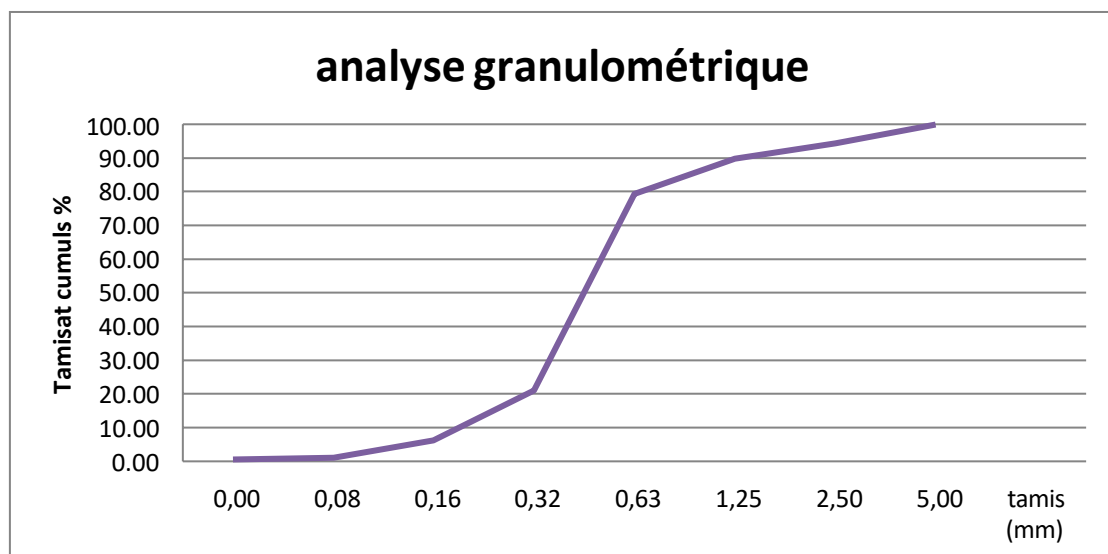


Figure IV.4 :courbe granulométrique de sable.

CHAPITRE IV : CARACTERISATION ET METHODOLOGIE D'ESSAI EXPERIMENTALE

➤ **LE MODULE DE FINESSE : (George et al 2007)**

La finesse du sable est quantifiée par le calcul de son module de finesse à partir de l'analyse granulométrique. Plus le module est faible et plus le sable est riche en éléments fins, 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 – 0.32 – 0.16 – 0.08.

Tab IV .8 : Modules de finesse du sable

Quantité du sable	Module de finesse
Gros	> 2.5
Moyen	2 à 2.5
Fin	1.5 à 2
Très fin	1 à 1.5

La caractéristique qui donne des indications sur le comportement possible d'un mélange de béton fait avec du sable d'une certaine granulométrie est le module de finesse et c'est une caractéristique intéressante en raison de son importance. Le bon sable de béton doit avoir un module de finesse est d'environ 2 à 2,5; en dessous, le sable contient la majorité des éléments très fins.

$$M_f = \frac{A_{5(2,5)} + \dots + A_{0,16(0,14)}}{100}$$

$$M_f = \frac{0,091 + 5.6655 + 10.286 + 20.662 + 78.975 + 93.8465}{100}$$

Après l'analyse granulométrique on trouve que, le module de finesse du sable testé est égal à :

$$MF = 2.09525 \Rightarrow MF \text{ entre } 2 \text{ et } 2.5 \text{ (c'est un sable moyen).}$$

➤ **EQUIVALENT DE SABLE : NA EN 933-8**

➤ **But de l'essai :**

Cet essai permet de mettre en évidence la proportion d'impuretés argileuses contenues dans le sable et le pourcentage de poussières nuisibles qui diminuent la qualité du béton et mortier. L'essai consiste à séparer les particules fines contenues dans le sol des éléments sableux plus grossiers.

CHAPITRE IV : CARACTERISATION ET METHODOLOGIE D'ESSAI EXPERIMENTALE

➤ **Mode opératoire :**

- Tamiser une quantité de sable (masse supérieure à 500g), Prendre une pesée de 120g.
- Remplir l'éprouvette de solution lavant jusqu'au premier repère (10cm). A l'aide de l'entonnoir verser la prise d'essai (120g) dans l'éprouvette et taper Fortement à plusieurs reprises avec la paume de la main afin d'éliminé toutes les bulles d'air et favoriser le mouillage de l'échantillon .
- Laisser reposer pendant 10 minutes.
- Fermer l'éprouvette à l'aide du bouchon en caoutchouc.
- Placé l'éprouvette dans un agitateur mécanique pendant 3 minute.
- Retirer ensuite le bouchon, le rincer avec la solution lavant .
- au-dessus de l'éprouvette, rincée ensuite les parois de celle-ci.
- Faire descendre le tube laveur dans l'éprouvette, le rouler entre le pouce et l'index en faisant tourner lentement le tube et l'éprouvette et en imprimant en même temps au tube un léger piquage. Cette opération a pour but de laver le sable et de faire monter

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

- Après 20 min de dépôt, lire la hauteur h1, de niveau supérieure de flocculat jusqu'au fond de l'éprouvette à l'aide d'une règle.
- Mesuré également avec la règle la hauteur h2 compris entre le niveau supérieur de la partie sédimentaire du fond de l'éprouvette.

$$E_{sv} = (h_2/h_1) 100\%$$

Avec : h1 : hauteur du sable plus flocculat.

h2 : hauteur du sable.

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

CHAPITRE IV : CARACTERISATION ET METHODOLOGIE D'ESSAI EXPERIMENTALE

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

$$Esp = (h'2/h1) 100\% \quad ;$$

Avec : h1 : hauteur du sable plus flocculat.

h'2 : hauteur du sable.

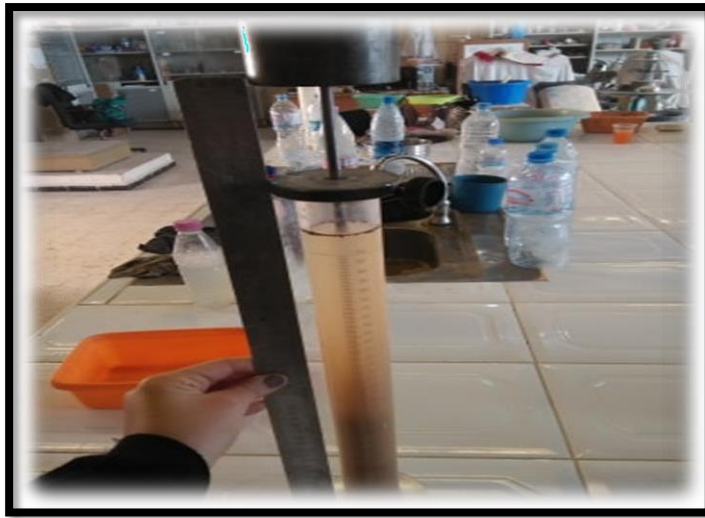


Figure IV.5 : essai d'équivalent se sable.

CHAPITRE IV : CARACTERISATION ET METHODOLOGIE D'ESSAI EXPERIMENTALE

Tab IV .9: Qualité du sable en fonction des valeurs d'équivalent de sable E SV et ESP

ES à vue	ES au piston	Nature et qualité du sable
ES < 65%	ES < 60%	Sable argileux : risque de retrait ou de gonflement. Sable à rejeter pour des bétons de qualité.
65% ≤ ES < 75%	60% ≤ ES < 70%	Sable légèrement argileux de propreté admissible pour les bétons de qualité courante quand le retrait n'a pas de conséquence notable sur la qualité du béton.
75% ≤ ES < 85%	70% ≤ ES < 80%	Sable propre à faible proportion de fines argileuses convenant parfaitement pour les bétons de haute qualité.
S ≥ 85%	ES ≥ 80%	Sable très propre. L'absence presque totale de fines argileuses risque d'entraîner un défaut de plasticité du béton qu'il faudra compenser par une augmentation du dosage en eau.

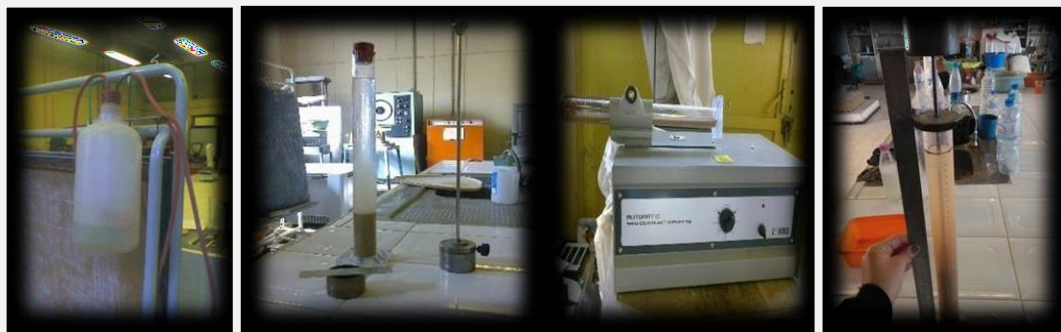


Figure IV.6 : les matériels de l'essai d'équivalent de sable.

- Les résultats obtenus sont représenté dans les tableaux suivants :

Tab IV.10: Résultats d'essais d'équivalent de sable du sable de dune testé.

N° d'essais	h1 (cm)	h2 (cm)	E.S.V (%)	E.S.V moyenne (%)	h'2 (cm)	E.S.P (%)	E.S.P moyenne (%)
1	11.8	8.5	72		7.5	63.55	
2	12.1	8.7	71,90	72,43	8.7	71,90	70,42
3	12.4	9.1	73,39		9.4	75,81	

CHAPITRE IV : CARACTERISATION ET METHODOLOGIE D'ESSAI EXPERIMENTALE

D'après les résultats on a trouvé dans le tableau ci-dessus on conclut que la qualité du sable : Sable propre à faible proportion de fines argileuses convenant parfaitement pour les bétons de haute qualité.

➤ LA MASSE VOLUMIQUE APPARENTE ET LA MASSE VOLUMIQUE ABSOLUE :

A- Masse volumique apparente:[NA EN 1097-6]

➤ Principe de l'essai :

Le principe de cette mesure consiste à remplir un récipient avec un volume intérieur connu et de peser la quantité de granulats correspondant.

➤ Matériels utilisés :

- Une balance avec une précision de 0.01g.
- Un récipient avec un volume de 1 litre.
- Une règle a arase.

Mode opératoire :

- Pesé le récipient vide et taré.
- Prendre le matériau (sable) dans les deux mains formant un entonnoir.
- Place les deux mains à hauteur d'environ 10cm au-dessous de récipient.
- Verse le matériau au centre de récipient jusque qu'il soit rempli et débord au tour.
- Arase avec la règle sans compacte le matériau.
- Pesé le contenu est note la masse M.
- Répète l'opération 3 fois a fin de validé l'essai.



Figure IV.7 : les matériels de l'essai la masse volumique apparente .

CHAPITRE IV : CARACTERISATION ET METHODOLOGIE D'ESSAI EXPERIMENTALE

- La masse volumique apparent a l'état lâche et déterminer par la formule suivante :

$$\gamma_{app} = \frac{M1-M0}{V} \quad V=1 \text{ L}$$

Tab IV.11: Masse volumique apparente du sable de LIWA à l'état lâche.

N° d'essais	M0 en (g)	M1 en (g)	V (L) Volume	La masse volumique P app en(g/cm ³)	La moyenne Papp moy en(g/cm ³)
1	299.48	1836.52	1	1.54	1,557
2	299.48	1840.6	1	1,541	
3	299.48	1890.3	1	1,590	

D'après les résultats on a trouvé dans le tableau ci-dessus on conclus que la masse volumique apparente de sable de LIWA est =1.557 g/cm³ dans l'intervalle acceptable [1.5-1.65] .

B-masse volumique absolus : [NA EN 1097]

C'est le rapport entre la masse est l'unité de volume de la matière qui constitue le granulat, sans tenir compte des vides pouvant exister dans ou entre des grains. Elle est exprimée en (g/cm³; Kg/m³; t/m³).

➤ **Principe de l'essai :**

Consiste a mesuré le volume réel occupe par les granulats, sans tenir compte des vides. Dans notre étude en va utiliser la méthode de l'éprouvette graduée, car cette méthode est très simple et très rapide.

➤ **Matériels utilisés :**

- une éprouvette graduée en verre.

➤ **Mode opératoire :**

- remplir l'éprouvette graduée en verre un volume d'eau (V1 =200 cm³).
- Peser une masse (M =220 g) du matériau (sable).
- introduire cette masse dans l'éprouvette (s'assuré de bien éliminé les bulles d'air).
- Note le nouveau volume V2.

CHAPITRE IV : CARACTERISATION ET METHODOLOGIE D'ESSAI EXPERIMENTALE

- Cette opération est répétée 3 fois.
- La masse volumique absolue est déterminée par la formule suivante :

$$p_{abs} = M / (V_2 - V_1)$$

- Les résultats obtenus sont représentés dans les tableaux suivants :

Tab IV.12 : Masse volumique absolue du sable de LIWA.

N° d'essais	M (g)	V1 (ml)	V2 (ml)	Pabs (g/cm ³)	Pabs moy (g/cm ³)
1	220	200	287	2.52	2,53
2	220	200	288	2,50	
3	220	200	285	2,58	

- **Autres essais physique sur sable utiliser sable de LIWA :**

Tab IV.13 : la compacité et porosité et l'indice du vide de sable LIWA.

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

- **Teneur en eau du sable de Liwa :**

Tab IV.14 : la teneur en eau du sable 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	

- **Coefficient d'absorption du sable de LIWA :**

Tab IV.15 : le coefficient d'absorption du sable 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	

CHAPITRE IV : CARACTERISATION ET METHODOLOGIE D'ESSAI EXPERIMENTALE

IV.1.2.3 Les additions :

Toutes les additions, de finesse supérieure à celle des ciments, peuvent être utilisées en substitution des ciments.

➤ Poudre de marbre :

La poudre du marbre utilisée est le déchet des marbreries dues au découpage des pièces en marbre blanc. Les caractéristiques chimiques de cette poudre sont données dans le tableau suivant :

Tab IV.16: Analyse chimique du 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

➤ Les caractéristiques physique sont données dans le Tableau si dessous

Tab IV.17: Caractéristiques générales du poudre de marbre .

Masse volumique apparent (g/cm ³)	0.97
Masse volumique absolue(g/cm ³)	2.65
Surface spécifique (cm ² /g)	5150



Figure IV.8 : le marbre et le poudre de marbre utilisé .

➤ 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 ($\text{SiO}_2 > 98 \%$) 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

CHAPITRE IV : CARACTERISATION ET METHODOLOGIE D'ESSAI EXPERIMENTALE

thermiquement, le quartz broyé peut être considéré comme inerte et son utilisation n'est pas obligatoire.

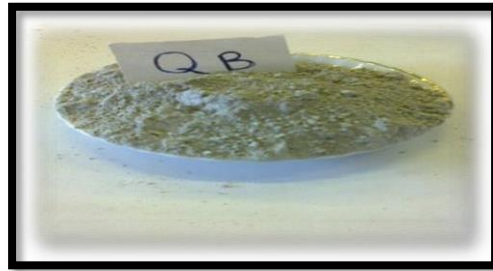


Figure IV.9 : Quartz broyée.

- Les caractéristiques chimiques sont données dans le tableau IV-15 suivant :

Tab IV.18 : Analyse chimique du Quartz broyé

Elément	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	Loi	CL
Quartz broyé %	94.333	1.171	1.044	1.622	0.184	0.037	0.386	0.001	1.582	0.012

- Les caractéristiques physique sont données dans le Tableau IV-16 suivant :

Tab IV.19 : Caractéristiques générales du quartz broyé.

Masse volumique apparente (g/cm ³)	0.8
Masse volumique absolu (g/cm ³)	2.64
Surface spécifique (cm ² /g)	5714.7

➤ **Le Brique rouge broyée :**

Les briques cuites sont fabriquées avec tous types d'argile : les ilitiques (couleur marron gris à rouge, après cuisson), les kaoliniques (très claires) et les bravais tiques (couleur orange à rose). On trouve dans la pâte argileuse essentiellement des éléments métalliques, sous forme d'oxydes plus ou moins hydratés : - les éléments dits "réfractaires" dont le degré de fusion est très supérieur à celui de la température (de 800 à 1000°) des fours à briques : il s'agit de la silice (SiO₂), et de l'aluminium (Al₂O₃).

➤ **Étapes d'obtention le poudre de brique rouge et d'opération de broyage en général :**

Afin d'obtenir la poudre de brique ou bien les points suivants doivent être suivis :

CHAPITRE IV : CARACTERISATION ET METHODOLOGIE D'ESSAI EXPERIMENTALE

- ✓ Apportez des morceaux de briques rouges de maçonnerie, puis brisez-les à la main et martelez-les en petits morceaux .
- ✓ Apportez les petits morceaux manuel et repiquez-les avec un concasseur et avec un appareil de broyeur dans 10 min a une vitesse moyen .
- ✓ Ensuite, j'ai tamisé la brique de broyage sur un écran ci-dessous de tamis 0.08. Au lieu de cela, nous obtenons la poudre finement broyée que j'ai utilisée comme un addition dans mon béton.
- ✓ Cette opération est faire pondant deux semaines.

➤ **Essais effectués sur la brique :**

Recyclage Le recyclage de brique consiste à réintroduire le déchet dans le cycle de production en remplacement total ou partiel d'une matière première naturelle. Il se distingue de la réutilisation par la nécessité de nouveau traitement que la matière subisse.

➤ **Préparation des fines recyclées :**

La préparation des classes granulaires a été effectuée à l'aide d'un concasseur, un broyeur et un tamis (80 μ).



Figure IV.10:Concasseur de los Anglos. **Figure IV.11:**Les 11 boules de l'appareil los Anglos



Figure IV.12 :Le brique concassé.

Figure IV.13 :Concasseur

CHAPITRE IV : CARACTERISATION ET METHODOLOGIE D'ESSAI EXPERIMENTALE



Figure IV.14: le broyeur utilisé

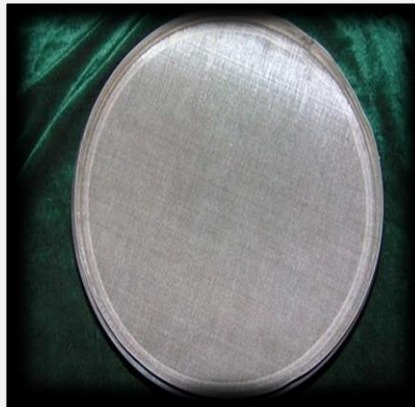


Figure IV.15 : le tamis utilisé .



Figure IV.16: le brique fin obtenons utilisé.

- Les caractéristiques physique sont données dans le Tableau IV-17 :

Tab IV.20 : Caractéristiques générales du Brique rouge .

Masse volumique apparent (g/cm ³)	2.5
Masse volumique absolue (g/cm ³)	1.088
Equivalent de brique rouge %	80.99

IV.1.2.4 L'eau de gâchage :

L'eau de gâchage utilisée pour la confection du béton doit être pure que Possible, elle ne doit pas contenir une quantité excessive de vase, de matières organiques, acides, sels, matières sucrées, etc...

L'eau de gâchage utilisée dans notre étude est une eau potable « eau du robinet» Fournie au laboratoire de Génie-civil à l'université de Mohamed khider –Biskra-.

CHAPITRE IV : CARACTERISATION ET METHODOLOGIE D'ESSAI EXPERIMENTALE

IV.1.2.5 L'adjuvant: (NFP 18-103) :

Les adjuvants sont des produits dosés en faible quantité dans les bétons : moins de 5% de la masse de ciment. Ce sont souvent des composés organiques, spécialement formulés pour les applications béton, et disponibles commercialement sous forme de solutions aqueuses. Ils ont pour but d'améliorer certaines propriétés du matériau.

C'est surtout la rhéologie du béton frais et la cinétique de prise et de durcissement que l'on peut espérer modifier directement. L'adjuvant utilisé dans notre étude est un super plastifiant haut réducteur d'eau de la nouvelle génération de type «MEDAFLOW SR 20 » C'est une solution de Polycarboxylates, fabriqué en Algérie par la société GRANITEX implanté à Oued Smar (Alger). (Fiche technique Granitex 2019).

- Les caractéristiques principales de l'adjuvant utilisé sont indiquées sur le tableau IV.18 :

Tab IV.21 : Les caractéristiques principales de l'adjuvant utilisé.

Adjuvant	Densité	Forme	Couleur	PH	Teneur en chlore (g/L)
MEDAFLOW SR 20(Granitex)	1.07	Liquide	Couleur brun claire	6-6.5	<0.1



Figure IV.17: l'adjuvant utilisé.

CHAPITRE IV : CARACTERISATION ET METHODOLOGIE D'ESSAI EXPERIMENTALE

IV.2 Essais réalisés :

IV.2.1. Techniques expérimentales : Nous allons exposer la méthodologie des expériences menées sur les différents échantillons confectionnés. Ces techniques expérimentales seront menées conformément aux normes NFEN 196-1.

IV.2.2 Formulation de BPR :

Tab IV.22 : Formulation de BPR utilisé.

Mélange au ciment « kg/m ³ »	BPR1	Témoin (BT)
C	945	450
SF	1039.5	1350
PM	94.5	/
QB	217.35	/
SP/C	28	/
E/C	0.25	0.6
PB	15%	/

IV.2.3 Equipement nécessaire :

- Un malaxeur normalisé :



Figure IV.18: malaxeur normalisé pour pâte et mortier.

CHAPITRE IV : CARACTERISATION ET METHODOLOGIE D'ESSAI EXPERIMENTALE

- Une chambre ou une armoire humide Maintenu à une température de $20\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ et à une humidité relative supérieure à 90 %.(Figure .IV.20).
- Un bag de conservation.

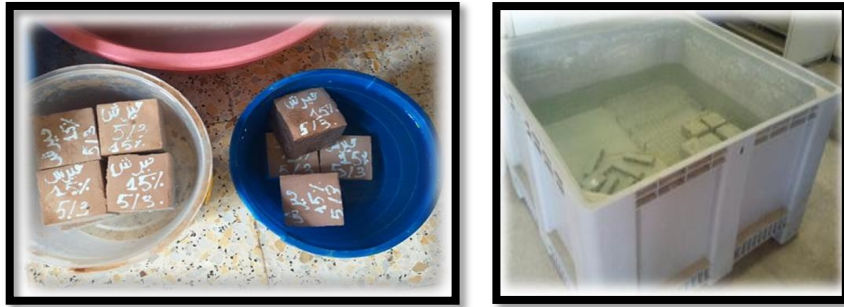


Figure IV.19 :. bag de conservation.



Figure IV.20: Armoire humide.

IV.2.4.Principe de l'essai : L'essai consiste à étudier les résistances à la traction et à la compression et chauffage (perte de masses et porosité) des éprouvettes de BPR . Le BPR est testé en fonction des dosages en matériaux choisis.

CHAPITRE IV : CARACTERISATION ET METHODOLOGIE D'ESSAI EXPERIMENTALE

- Des moules normalisé : permettant de réaliser 3 éprouvettes prismatiques de section carrée 4cm×4cm et de longueur 16cm (ces éprouvettes sont appelés “éprouvettes 4×4×16”).



Figure IV.21 : Moules pour éprouvettes 4×4×16.

- Un appareil à chocs : permettant d'appliquer 60 chocs aux moules en les faisant chuter d'une hauteur de 15mm± 0,3mm à la fréquence d'une chute par seconde pendant 60 s.



Figure IV.22 : appareil à chocs.

IV.2.5. Conduite de l'essai :

- Préparation Des Epreuves :

On prépare les moules des éprouvettes du béton de dimension 40×40×160mm. Les moules sont ensuite recouverts par une huile avant le coulage pour faciliter le démoulage du béton après 24 heures .Chaque formule de BPR est coulée dans 1 moule (trois éprouvettes).

- Fabrication des BPR :

Tous les BPR sont préparés dans un malaxeur à mortier Le tableau IV.23 donne les durées de malaxage permettant d'obtenir la fluidification des mélanges. On constate que dans tous les cas le temps de fabrication d'un BPR ne dépasse pas 20 minutes.

CHAPITRE IV : CARACTERISATION ET METHODOLOGIE D'ESSAI EXPERIMENTALE

Tab IV.23 : Temps de malaxage de béton étudié.

3 min	Homogénéisation des matériaux secs.
2 min	Ajout de l'eau et de la moitié du super plastifiant
5 min	Ajout de l'autre moitié du super plastifiant Malaxages à grande vitesse

➤ Confection des éprouvettes :

Avec le béton préparé comme indiqué (à la partie supérieure), on remplit un moule 4 x 4 x 16. Le serrage du BPR dans ce moule est obtenu en introduisant le béton en deux fois et en appliquant au moule 15chocs à chaque fois. Après quoi le moule est arasé, recouvert et entreposé dans la salle. Entre 20 h et 24 h après le début du malaxage, ces éprouvettes sont démoulées et entreposées dans l'eau à $20\text{ C}^{\circ} \pm 1\text{ C}^{\circ}$,Avant 1 jour de l'essai de rupture les éprouvettes sont passé par un traitement thermique : elles sont entreposées dans l'armoire humide supérieure à $200\text{ }^{\circ}\text{C}$, 500°C et 800 C° à 24 h .Au jour prévu, les éprouvettes sont rompues en flexion et en compression.

IV.2.6 Essais sur BPR :

- **A/ Essais microstructuraux :Mesure les pertes de masses et le porosités .**
- **B/ Essais Macrostructuraux :Mesure des résistances à la compression et à la traction .**

A/ Essais microstructuraux : les pertes de masses et le porosité :

A.1 la perte de masse : NF EN ISO 1741

La perte de masse est un indicateur important des dégradations au sein du matériau, et notamment de la perte en eau. Elle permet, en complément des essais mécaniques réalisés après application des cycles thermiques, de suivre l'évolution du poids des matériaux ayant subi un cycle de chauffage. Pour la quantification de l'eau perdue, la masse des éprouvettes est mesurée avant et après chaque cycle de chauffage-refroidissement. De la fabrication au traitement thermique, les éprouvettes subissent des variations de masse dues au ressuage, à la dessiccation ou absorption d'eau. Pour rendre compte de ces variations, les éprouvettes sont pesées à différents temps : après leur démoulage.

CHAPITRE IV : CARACTERISATION ET METHODOLOGIE D'ESSAI EXPERIMENTALE

les éprouvettes de béton sont pesées et placées dans les bacs remplis d'eau pour limiter une longue durée d'exposition à l'aire libre qui entrainerait une dessiccation. A la fin de la période de cure, les éprouvettes sont essuyées avec un chiffon sec et pesées. Elles sont ensuite placées dans le four pour subir un cycle de chauffage-refroidissement. Après le traitement thermique, chacune des éprouvettes est pesée une dernière fois pour quantifier la quantité de l'eau évaporée au cours du chauffage. Ces mesures sont effectuées sur l'ensemble des éprouvettes placées dans le four et pour tous les cycles de chauffage et pour chacune des compositions.

La perte de masse a été calculée par rapport à la masse initiale des éprouvettes et exprimée en pourcentage de la masse de départ.

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

dm : perte de masse (%).

mi : masse initiale (g).

mt : masse après chauffage (g).

A.2 la porosité : NF P94-410-3

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'immersed les 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 :

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

Avec :

CHAPITRE IV : CARACTERISATION ET METHODOLOGIE D'ESSAI EXPERIMENTALE

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

B/ Essais Macrostructuraux : Mesure des résistances à la compression et à la traction par flexion 3 point .

B.1 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 ($\sigma_t = 0,6 \sigma_{Rf}$).

La résistance à la flexion est calculée suivant la formule :

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

P : force appliquée en [Kgf].

b : largeur de l'éprouvette.

h : hauteur de l'éprouvette.

L : distance entre les appuis (cm).

- Une machine d'essais de résistance à la flexion permettant d'appliquer des charges jusqu'à 10KN avec une vitesse de mise en charge de $50 \text{ N/s} \pm 10\text{N/s}$. La machine doit être pourvue d'un dispositif de flexion tel que celui schématisé sur la Figure.

CHAPITRE IV : CARACTERISATION ET METHODOLOGIE D'ESSAI EXPERIMENTALE



Figure IV.23 : machine d'essais de flexion 3 points .

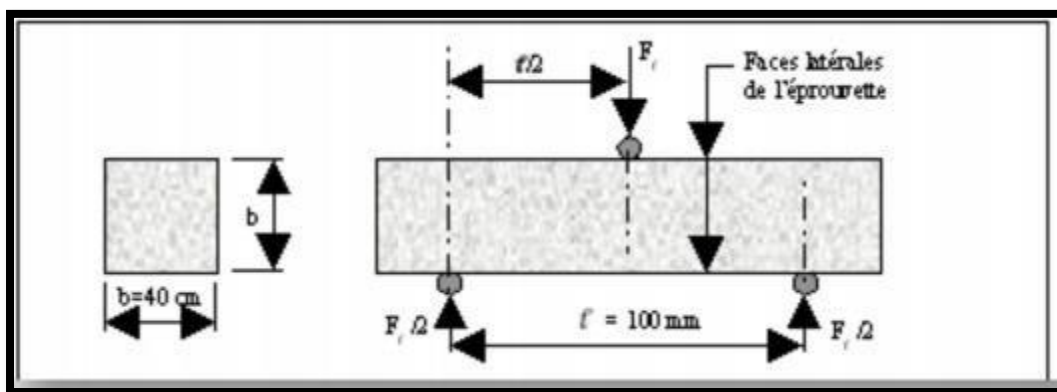


Figure IV.24 : Dispositif pour l'essai de résistance à la flexion.

B.2 Essai de compression : norme NFP 15-451.

Chaque demi-éprouvette est essayé 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 : $R_c = F/S$ [KgF/ cm^2].

F : charge appliquée en KgF.

S : section latérale de l'éprouvette égale à 16 cm^2 .

CHAPITRE IV : CARACTERISATION ET METHODOLOGIE D'ESSAI EXPERIMENTALE

- Une machine d'essais à la compression manuel permettant d'appliquer des charges jusqu'à 300 KN . Cette machine est équipée d'un dispositif de compression ou de traction tel que celui schématisé sur figure .



Figure IV.25 : machine d'essais à la pression avec dispositif de compression et de traction.

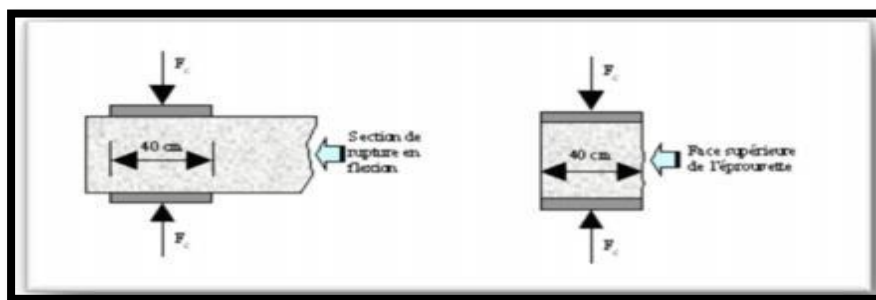


Figure IV.26 : Dispositif de rupture en compression.

IV.3. Conclusion :

Les essais physiques, les analyses chimiques et les analyses minéralogiques effectués dans les différents laboratoires donnent des résultats ces derniers donne une idée générale sur les caractéristiques principales des matériaux servant à la formulation des bétons qui seront étudiés au chapitre suivant du point de vue mécanique et durabilité.

- La connaissance de ces caractéristiques nous aide d'une façon significative à commenter les résultats des essais expérimentaux aussi présenter les essais microstructure et macrostructure qui on a faire sur notre béton BPR.

Chapitre V :

PRESENTATION ET INTERPRETATION DES RESULTATS

CHAPITRE V : PRESENTATION ET INTERPRETATION DES RESULTATS

V.1 : Introduction

Nous présentons dans ce chapitre les résultats des différents essais effectués sur les bétons confectionnées selon les différentes combinaisons d'ajouts (poudre de marbre - poudre de brique rouge et quarts broyée). Ces résultats portent sur les résistances mécaniques (compression et traction par flexion). Et sur les propriétés physiques mécanique (essai de chauffage perte de masses et porosité).

V.2 : Les résultats expérimentaux obtenus

Les essais effectués sur le béton durci sont :

- La résistance mécanique à la compression
- La résistance mécanique à la traction par flexion

Les résultats obtenus dans cette étude sont regroupés en 2 parties.

La première partie est pour l'effet de traitement thermique sur les propriétés mécaniques et physiques, la deuxième partie pour l'étude des propriétés mécaniques et physiques de différentes formulations des BPR sans fibres métalliques avec un pourcentage de brique rouge (15%).

V.2.1 Essai De Chauffage

Pour étudier le comportement à haute température du béton, il est nécessaire de lui faire subir différents cycles thermiques. La Norme RILEM [Rilem, 2004] recommande pour un diamètre des cylindres compris entre 6 et 10 cm une montée en température comprise entre 1°C/min et 4°C/min et un palier de 60 ± 5 min. Nous avons choisi, pour la sollicitation thermique des éprouvettes, d'appliquer une vitesse de chauffage moyenne de 5°C/min pour tous les bétons. L'échauffement rapide avec les vitesses de montée en température très importantes provoque des contraintes thermiques dues aux gradients thermiques. Les vitesses de chauffage comprises entre 1 et 5°C/min n'ont pas d'influence sur le caractère explosif du béton [Haniche, 2011]. Les éprouvettes de formulation des BPR1 sont placées dans l'eau, pour chaque formulation de BPR, les éprouvettes laisser dans l'eau jusqu'au le jour d'essai.

Les échantillons d'essai ont été soumis à des températures élevées allant de 200 °C , 500 °C et 800 ° C avant l'écrasement.

La gamme de température retenue pour nos essais s'étend de la température ambiante à 800°C. Cette amplitude couvre les températures pour lesquelles les principales transformations physico-chimiques des bétons s'observent. Par ailleurs, cela

CHAPITRE V : PRESENTATION ET INTERPRETATION DES RESULTATS

correspond aussi aux capacités des moyens expérimentaux utilisés. Dans la plupart des essais, les températures spécifiques suivantes ont été retenues pour la mesure des propriétés du matériau :

20°C : cette température est considérée comme étant la température de référence.

200°C : à cette température, la déshydratation des CSH est dans un état avancé.

500°C : à cette température, les CSH sont déshydratés et la portland-ite est encore dans son état initial d'hydratation. Aussi la portland-ite est décomposée à cette température et l'éventuelle transformation du quartz- α en quartz- β est atteinte (575 °C). [Hachemi, 2015].

800°C : destruction du béton est l'apparition des fissures.

- **Dispositif de chauffage et disposition dans le four**

Afin de réaliser les cycles de chauffage, nous utilisons un four électrique programmable dont les dimensions utiles sont de 250 x 255 x 355 mm. Ce four permet le chauffage de trois éprouvettes prismatique de dimensions 40 x 40 x 160 mm ont été utilisés pour l'essai de traction par flexion 3 points et les demi- éprouvettes obtenues après rupture ont été testées en compression selon la norme NF EN 196-1.

Les fours (figure V.1) sont pilotés par un régulateur programmeur, relié à un thermocouple placé dans les fours, offrant la possibilité à un opérateur d'installer des programmes prédéfinis et permettant l'enregistrement des températures à l'intérieur du four.

Pour réaliser un essai de chauffage, nous disposons dans le four trois éprouvettes de béton. Ces éprouvettes sont disposées au milieu du four

CHAPITRE V : PRESENTATION ET INTERPRETATION DES RESULTATS



Figure V.1 : Les fours électriques et les éprouvettes utilisées.

V.2.2 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).

V.2.2.1 Essai de perte de masse en fonction de la température

La perte de masse est un indicateur important des dégradations au sein du matériau, et notamment de la perte en eau. Elle permet, en complément des essais mécaniques réalisés après application des cycles thermiques, de suivre l'évolution du poids des matériaux ayant subi un cycle de chauffage. Pour la quantification de l'eau perdue, la masse des éprouvettes est mesurée avant et après chaque cycle de chauffage-refroidissement.

Après l'essai de chauffage en a mesuré les masses des éprouvettes après et avant le chauffage les résultats de perte sont obtenue par la formule suivante :

$$dm = \frac{M_{sec} - M_{chauffe}}{M_{sec}} \times 100$$

CHAPITRE V : PRESENTATION ET INTERPRETATION DES RESULTATS

dm : perte de masse (%).

M_{sec} : La masse sèche d'éprouvette BPR avant le chauffage.

$M_{chauffe}$: La masse chauffée dans le four après le chauffage.

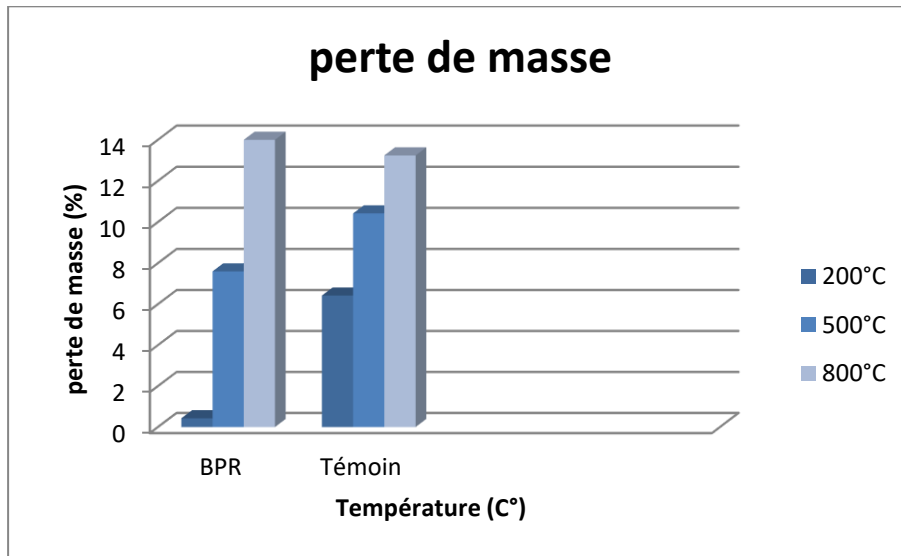


Figure V.2 : Evolution de la perte de masse pour les éprouvettes prismatiques en fonction de la température.

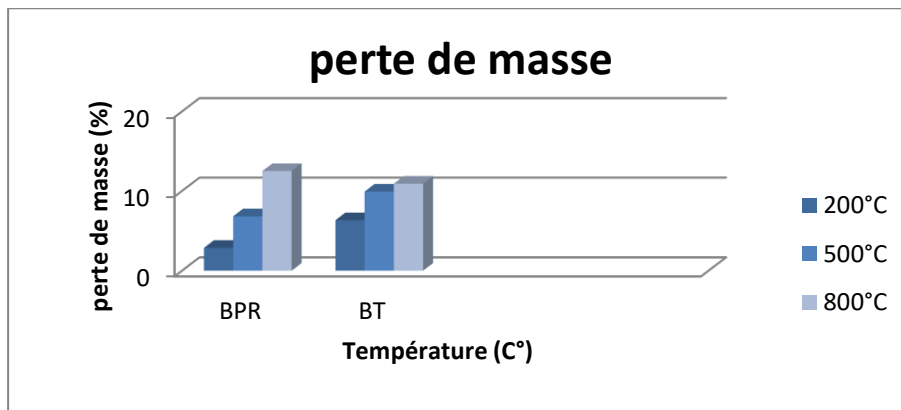


Figure V.3 : Evolution de la perte de masse BPR pour les éprouvettes cubiques en fonction de la température.

D'après les résultats obtenus par les figures V.2 et V.3 montrent l'évolution de la perte de masse au cours du cycle de chauffage des échantillons étudiés. Avant 200 ° C, l'échange de masse est très faible. La perte de masse dans cette plage de température correspond principalement à la fuite d'eau des pores du béton. Entre 200 et 500 ° C, une forte perte de masse pour toutes les éprouvettes de béton testées. Chaque béton a perdu de 3 à 12% de sa masse d'origine. La plupart de l'eau de chaque éprouvette de

CHAPITRE V : PRESENTATION ET INTERPRETATION DES RESULTATS

béton s'est évaporée pendant le chauffage entre 200 et 500 ° C. L'augmentation est presque linéaire jusqu'à une température de 800 ° C. Cela est dû à l'évaporation de l'eau et à la déshydratation progressive du gel CSH. 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.2.2.2 La porosité : NF P94-410-3

- Sécher les éprouvettes dans une étuve à 65 ° C jusqu'à obtention d'une masse constante.
- L'immersed les 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.



Figure V.4 : les éprouvettes de porosité après le chauffage.

CHAPITRE V : PRESENTATION ET INTERPRETATION DES RESULTATS



Figure V.5 :L'essai de porosité.

Remarque 1:

L'essai de porosité pas terminé car le durée de temps de faire cette essai est pendant 12 ou bien 15 jours chaque jours faire les mesures jusqu' à stabilisé la masse aussi l'appareil de l'essai porosité est pas réglais exacte elle ne donne pas les mesures exacte aussi la duré de temps pour complétai le pratique est pas beaucoup c'est pour sa nous restons ici.

Remarque 2 :

D'après l'essai de chauffage on a remarque que les éprouvettes soit BPR et BT ou bien les éprouvette BPR de porosité elles changent leur couleur après le chauffage :

A 200 °C : la couleur des éprouvettes rouge marron un peut claire.

A 500 °C : la couleur des éprouvettes marron.

A 800 °C : la couleur des éprouvette étaient noir cendré, à moitié brûlés avec quelques fissures légères.

Selon les travaux de [Hachemi, 2015] ont montré que :

Pour tous les bétons, nous observons une augmentation de la porosité à l'eau avec l'augmentation de la température d'exposition.

Entre 20°C et 150°C, la porosité augmente très peu. Ceci confirme le fait qu'à cette température, l'eau libre s'est échappée mais la microstructure du béton n'est pas modifiée. La porosité augmente rapidement pour des températures supérieures à 150°C. Elle atteint environ 18% après un traitement à 400°C. Cette augmentation de la porosité peut être attribuée au départ de l'eau adsorbée dans les pores capillaires et de l'eau liée des hydrates de la pâte de ciment qui ont pour conséquence d'augmenter

CHAPITRE V : PRESENTATION ET INTERPRETATION DES RESULTATS

les dimensions des pores. Au-delà de 400°C, l'augmentation de la porosité est considérée due à la rupture des cloisons des capillaires sous l'effet de la pression de la vapeur d'eau engendrée par l'élévation de température et à la microfissuration engendrée par la dilatation différentielle entre la pâte et les granulats.

Selon les travaux de [Rahmouni et Tebbal, 2020] Ont constaté que :

Entre 20 et 200 ° C, la porosité augmente très peu. Le BHP montre une diminution de 0,26%. Cette diminution de la porosité du BHP est associée à la densification due à l'hydratation complémentaire du HSC.

Entre 200 et 400 ° C, la porosité augmente de 4,5% pour le BHP. Cette croissance est associée au rejet d'eau, qu'elle soit présente dans le réseau d'eau ou liée chimiquement. Kalifa explique que la diminution de la porosité du CR entre 200 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 internes d'autoclavage, 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 béton CR2.5 et est de près de 6,33% pour le BHP. L'évaluation de la porosité à 900 ° C est pratiquement impossible car les tubes à essai qui ont subi de graves dommages et se sont désintégrés

V.2.2.3: La résistance à la compression

Les valeurs des résistances en compression des BPR à 206 jours avec différent degré de température (traitement thermique) sont données dans la figure V.6. La contrainte de rupture est obtenue par la formule suivante :

$$f_c = \frac{F_{\max}}{S}$$

Fmax : désigne la charge à la rupture en compression et S la surface de la section transversale de l'éprouvette.

CHAPITRE V : PRESENTATION ET INTERPRETATION DES RESULTATS

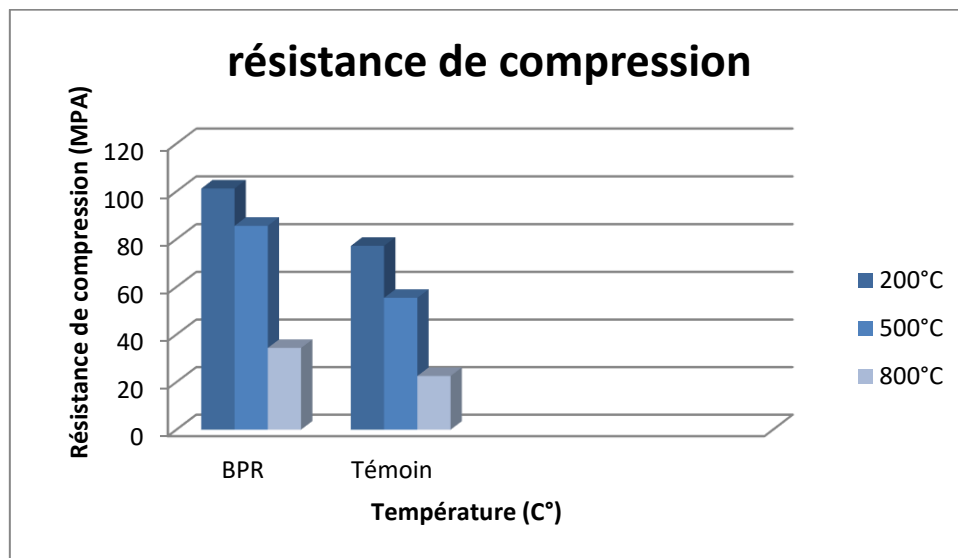


Figure V.6 : Evolution de la résistance à la compression des BPR en fonction de la température

D'après les résultats présentés par l'histogramme de la figure V.6 on remarque que :

La résistance à la compression du BT est nettement inférieure à celle du BPR.

La résistance à la compression a commencé la diminution à 200 ° C, mais à 500 ° C, une récupération partielle a été observée pour tous le béton BPR.

La diminution initiale de la résistance à la compression est peut-être due à l'effet couplé de la vapeur interne pression et charge du bâtiment. L'expansion de l'eau entre le C-S-H, les couches de gel ont également réduit les forces de liaison. La récupération de la résistance à 500 ° C était principalement due à l'augmentation des forces de Van der Waals (forces de surface) due à l'élimination de l'eau gratuite (Abdulaziz et al.2020).

La porosité du béton a un effet direct sur la résistance lorsque l'eau libre est éliminée. Au-dessus de 500 ° C, diminution progressive du cube la densité de la forme a été observée. La diminution de la résistance a été attribuée à divers facteurs expliqués dans la section Analyse de la microstructure (Şakir et al.2019). Une fissuration sévère à 800 ° C a entraîné une perte de résistance de plus de 70%, l'effet de chargement, ce qui n'est pas vu dans le cas du BPR en raison de la forte porosité. Cependant, au-dessus de 500 ° C, la force du BPR est beaucoup plus élevée que celle donnée par le BT. Cela confirme que la microstructure donne une meilleure résistance à la compression à haute température. Les valeurs de la résistance en compression varient aussi en fonction de type d'ajouts utilisés quartz et poudre de marbre et poudre de

CHAPITRE V : PRESENTATION ET INTERPRETATION DES RESULTATS

brique. L'utilisation du sable fin et l'ajout de poudre de brique rouge dans le béton BPR d'un rapport E/C = 0,6 permet d'augmenter légèrement la résistance en compression. [Chen How-Ji et al. 2020].



Figure V.7 : Epreuve mise en place sur la presse hydraulique pour déterminer la résistance en compression.

V.2.2.4: La résistance à la traction par flexion

L'essai est réalisé au minimum sur trois éprouvettes prismatiques, $40 \times 40 \times 160 \text{ mm}^3$, à la température ambiante et après les cycles chauffage-refroidissement de 200°C , 500°C , 800°C . Les valeurs des résistances en traction par flexion des BPR a 206 jours avec déférent degré de température (traitement thermique) sont données dans la figure V.8.

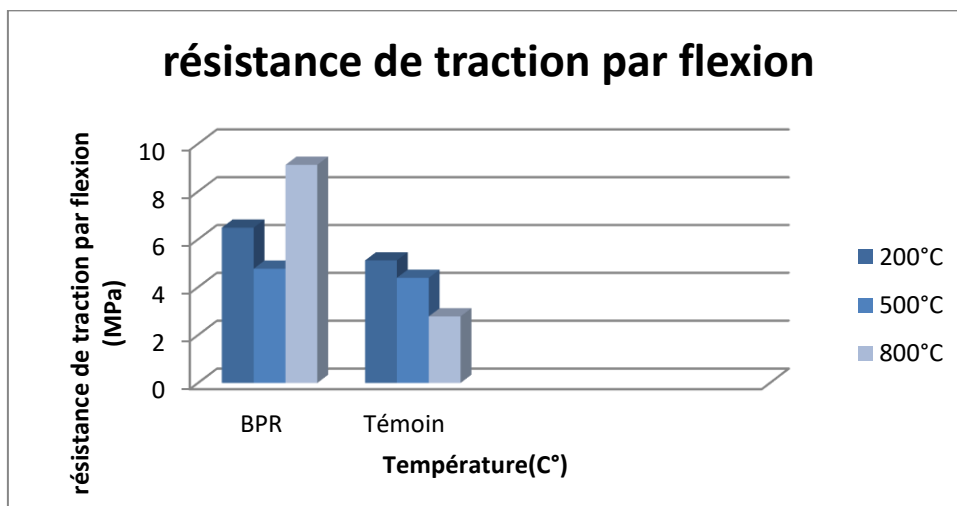


Figure V.8 : Evolution de la résistance à la traction par flexion des BPR en fonction de la température.

CHAPITRE V : PRESENTATION ET INTERPRETATION DES RESULTATS

Les effets des hautes températures sur la résistance à la flexion ont été étudiés sur les bétons BPR et BT. Des essais de flexion 3 points ont été réalisés sur trois éprouvettes pour chaque formulation avant et après chauffage à différentes températures.

La figure V.8 présente l'évolution de la résistance à la flexion en fonction de la température de chauffage. Nous observons que les valeurs de la résistance à la flexion diminuent de manière contenue avec l'augmentation de la température. Les bétons BPR et BT montrent une accélération de la perte de résistance. L'évolution de la résistance à la flexion peut être scindée en trois domaines. De 200°C, on observe une baisse de la résistance à la flexion.

Au-delà de 200°C, la baisse de résistance en flexion devient plus forte. A 500°C, tous les bétons perdent plus de 60% de leur résistance initiale. Cette perte de résistance à la flexion s'explique par l'augmentation de la porosité due à la déshydratation du gel de CSH et la propagation des microfissures engendrées par la détérioration des liaisons créées entre les granulats et la pâte de ciment [Hachemi, 2015].

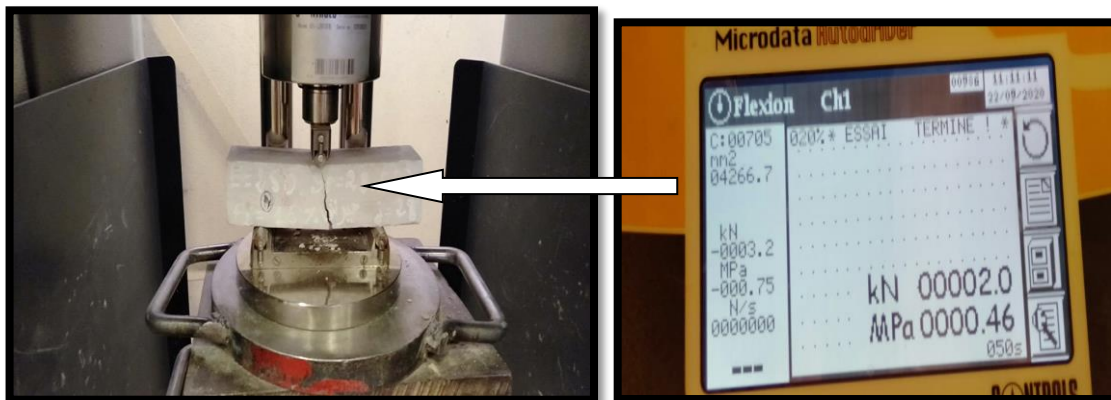


Figure V.9 : Eprouvette mise en place sur la presse hydraulique pour déterminer la résistance en traction par flexion 3 points.

CHAPITRE V : PRESENTATION ET INTERPRETATION DES RESULTATS

V.2.3 Quelques photos de résultats

a. Les résultats de la compression

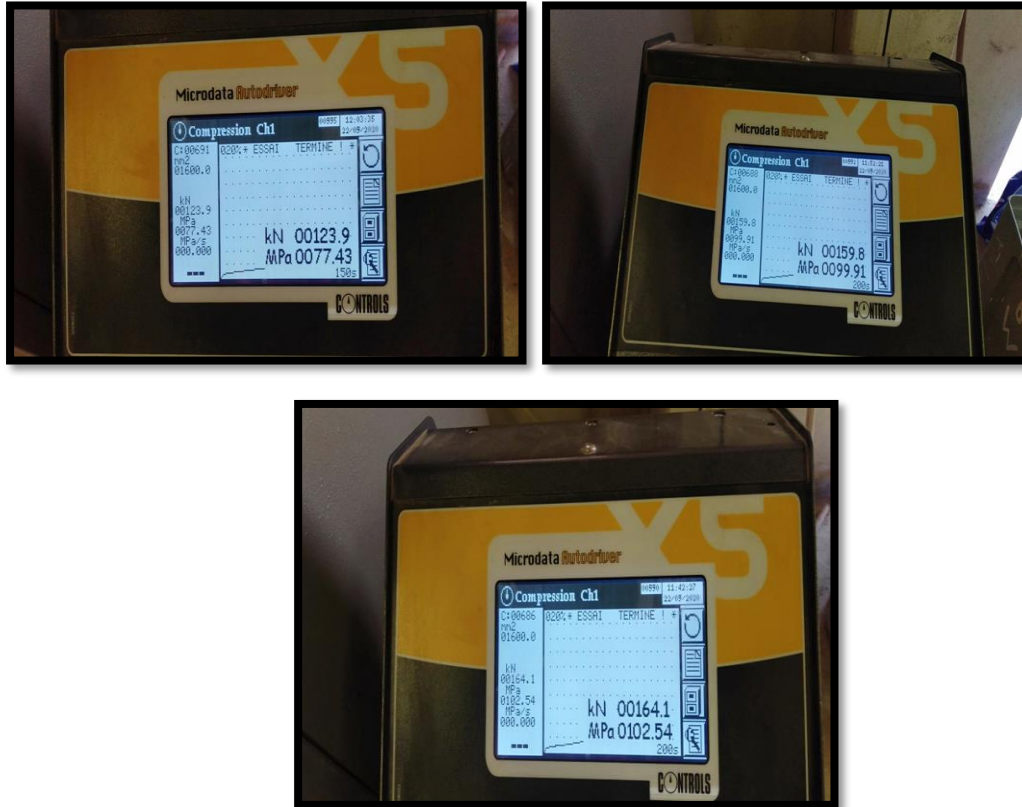


Figure V.10 : Résultats de résistance à la compression obtenue par la presse hydraulique.

b. Les résultats de la traction par flexion :

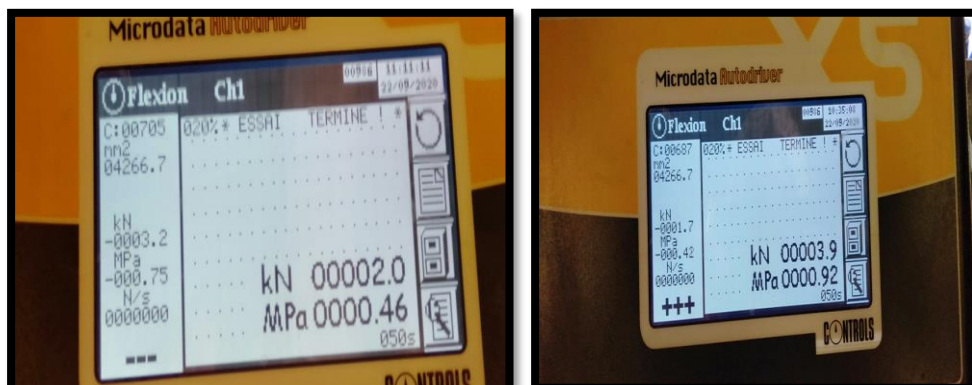


Figure V.11 : Résultats de résistance à la traction par flexion 3point obtenue par la presse hydraulique.

CHAPITRE V : PRESENTATION ET INTERPRETATION DES RESULTATS

V.3 Conclusion

Toutes les observations effectuées dans ce présent chapitre, permettent de tirer les conclusions suivantes :

- 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;
- La résistance à la compression est une fonction croissante par rapport d'augmentation des ajouts de poudre de brique lors que les éprouvette soumis à haut température.
- La résistance du béton diminue avec son exposition à des températures élevées raisonnablement et acceptables, ce qui démontre la résistance à l'ajout de poussière de brique dans le mélange.
- En général, la porosité du BPR augmentait progressivement avec l'augmentation de la température. [Abid et al, 2019].
- Des changements de couleur ont été observés sur le béton sous l'effet des températures élevées.

**CONCLUSION
GENERALE Et
PERSPECTIVE**

CONCLUSION GENERALE

CONCLUSIONS GENERALE

Dans cette étude, les résultats obtenus sont résumés comme suit.

- Lors de l'utilisation d'un échantillon BPR, la vitesse de montée en température influence la baisse de résistance entre 200°C, 500 ° C et 800 °C.
- La température critique, qui provoque une atténuation maximale des différentes propriétés (résistance à la compression, perte de masse), est comprise entre 500 et 800 ° C.
- Au-delà de 500 ° C, le béton peut perdre la majorité de ces propriétés, c'est-à-dire qu'il existe des propriétés qui peuvent s'annuler; on peut dire que le béton est devenu faible.
- Les bétons avec super plastifiant sont affectés par des températures élevées en particulier à 500 ° C et plus par rapport à un dosage de super plastifiant moindre.
- Des changements de couleur ont été observés sur le béton sous l'effet d'une température élevée.
- La résistance à la compression a commencé à diminuer à 200 ° C, mais à 500 ° C, une récupération partielle a été observée pour tous les types de BPR. Au-dessus de 500 °C, une forte diminution de la résistance prismatique a été observée.
- La résistance à la compression du BT témoin est nettement inférieure à celle du BPR.
- La réduction de la résistance à la compression du béton était significativement plus importante pour les échantillons exposés à des températures supérieures à 600° C. Ce résultat est dû à la perte d'eau de cristallisation entraînant une diminution de la teneur en Ca (OH) 2, en plus des changements de morphologie et la formation de microfissures.
- Entre 200 et 500 ° C, la porosité augmente de 4,5% pour le BPR. Cette croissance est associée au rejet d'eau, qu'elle soit présente dans le réseau d'eau ou liée chimiquement. L'évaluation de la porosité à 800 ° C est pratiquement impossibles car les tubes à essai ont subi de graves dommages et se sont désintégrés. Concernant la porosité de la pâte de ciment à haute température, Piasta a montré que la porosité augmente de manière parabolique en fonction de la température. Cette augmentation, également notée dans d'autres travaux de Bazant et al, S'accompagne d'une augmentation de la taille moyenne des pores et du volume total des pores. Cela est dû en partie à la fracture interne de la

CONCLUSION GENERALE



structure du gel C-S-H pendant le processus de déshydratation [Rahmouni et Tebbal, 2020].

- Les déchets de brique produisent en général, des bétons dont la résistance est acceptable.
- La résistance du béton est fonction de la densité des déchets de brique, Plus la densité est importante plus la résistance du béton est grande.
- Au-delà de 200°C, la baisse de résistance en flexion devient plus forte. A 500°C, tous les bétons perdent plus de 60% de leur résistance initiale. Cette perte de résistance à la flexion s'explique par l'augmentation de la porosité due à la déshydratation du gel de CSH et la propagation des microfissures engendrées par la détérioration des liaisons créées entre les granulats et la pâte de ciment [Hachemi, 2015].
- L'aspect extérieur de couleur rouge éclairée des bétons confectionnés avec des déchets de brique peut offrir une voie nouvelle dans le domaine des bétons apparents.
- On peut dire que le BPR 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.

Perspectives et recommandations pour des travaux de future

Afin d'approfondir cette étude on propose les idées suivantes :

- Influence de la finesse des ajouts et le dosage en super plastifiant sur le comportement mécanique de béton de poudre réactive sans fibre. Influence de type de ciment sur les caractéristiques des BPR.
- Etude de l'influence de qualité de sable (sable de dune-sable concassé sable mixte) sur les propriétés mécaniques de BPR sans fibre.
- Etude de l'influence d'ajouts défèrent pourcentages de brique rouge sur les caractéristiques des BPR.
- L'importance de finesse des ajouts et l'existence des matériels qualifiés pour facilité le travail dans le labo surtout le broyeur.
- Étudier l'effet des ajouts cimentaires sur la fixation du portlandite (la chaux) par les analyses thermiques différentielle et gravimétrique.



RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Bibliographie

Référence bibliographique :

[**ALLAL Ishaq,2015**] :**ALLAL Ishaq** , « Tenue et comportement au feu des bétons, Septembre, Mémoire master Université Des Freres Mentouri Constantine,2015.

[**A.H. Mohammed Belhadj1, 2016.**] : **A.H. Mohammed Belhadj1**« Valorisation du déchet de marbre et de la pouzzolane naturelle dans les mortiers , , A. Mahi2 , M.Z. Kazi Aouel1 , R. Derball ,H. Abdelhadi2,2016.

[**Adeline, 2014**]: **Adeline**, « Régis Ancien élève de l'École polytechnique - Ingénieur des Ponts et Chaussées - Chef de service adjoint à la Direction scientifique Bouygues BTP,2014.

[**Barkat Abderezzak, 2006.**]: **Barkat Abderezzak**, « valorisation des déchets de brique dans la réalisation des ouvrages en béton ». Magister en génie civil Filière : Aménagement Hydraulique et Génie Civil.Ouargla :Université KASDI MERBAH ,05/11/2006.

[**Bazant Z. P. et Kaplan M. F, 1996**]: **Bazant Z. P. et Kaplan M. F**, « Concrete at High Temperatures: Material Properties and Mathematical Models », Pearson Education, Harlow: Longman;1996.p.424.

[**Belachew Asteray, 2018**] :**Belachew Asteray**, Demiss, « Walter Odhiambo Oyawa & Stanley Muse Shitote., Mechanical and microstructural properties of recycled reactive powder concrete containing waste glass powder and fly ash at standard curing», Cogent Engineering (2018), 5: 1464877 <https://doi.org/10.1080/23311916.2018.1464877>.

[**Belmiloud Lilia, 2017**] : **Belmiloud Lilia**, Benkanoun Dyhia, «Recyclage des déchets inertes de marbre et de granite de la marbrerie YAHIAOUI-DBK dans la fabrication des dallages de sol. »,2017.

[**Belkacem T,2010**] : **Belkacem T** « Etude de l'influence des hautes températures sur le comportement du béton », thèse de doctorat, Matériaux, Université Mentouri Constantine, 2010.

[**Bourema Moufida,2015**] : **Bourema Moufida**; «Etude des caractéristiques d'un BHP à base de déchet de brique rouge à l'état frais et durci » ; mémoire master 2015.

Bibliographie

[**Bensafi boucif ,Belkacem oussama soufyane,2018**] : **Bensafi boucif ,Belkacem oussama soufyane**, « Valorisation des Bétons à base de granulats recyclés (granulats de brique) sous l'effet de température » , mémoire master Centre Universitaire Belhadj Bouchaïb d'Ain-Temouchent Institut des Sciences et de la Technologie Département de Génie Civil,2018.

[**Bonneau, 1997**]: **Bonneau, O.**, Lachemi, M., Dallaire, E., Dugat, J., Aitcin, P.- C.,. «Mechanical properties and durability of two industrial reactive powder concretes». *ACI Mater. J.* 94, 1997.

[**Castillo C., Durrani A. J,1990**]: **Castillo C., Durrani A. J** « Effect of transient high temperature on high- strength concrete », *ACI Materials Journal*, N°87-M7, p.47-53, 1990.

[**Chang Y. F., Chen Y. H., Shen M. S., Yao G. C,2006**]: **Chang Y. F., Chen Y. H., Shen M. S., Yao G. C**, « Residual stress-strain for concrete after exposure to high temperatures », *Cement and Concrete Research*, vol. 36, p.1999-2005, 2006.

[**Chaid R,2006**] : **Chaid R**, «Formulation, Caractérisation et Durabilité des BHP auajouts cimentaires locaux» Thèse doctorat ;2006 .

[**Cheyrezy, M., Maret, V,1995**] : **Cheyrezy, M., Maret, V** & Frouin, L. (1995). «Microstructural analysis of RPC (Reactive Powder Concrete). *Cement and Concrete Research*, » 25(7), 1491–1500. doi:10.1016/0008-8846(95)00143-Z

[**Christian Du Brulle,2014**] : **Christian Du Brulle**, «La brique crue, « Nouveau » Matériau De Construction »,11 septembre 2014.

[**Cwirzen, A., Penttala,2008**] : **Cwirzen, A., Penttala, V.**, & Vornanen, C. (2008). «Reactive powder based concretes: Mechanical properties, durability and hybrid use with OPC ». *Cement and Concrete Research*, 38(10), 1217–1226. doi:10.1016/j.cemconres.2008.03.013

[**Dalila B, 2011**] : **Dalila B**, «formulation et étude d'un béton à haute performance » thèse de doctorat ;2011.

Bibliographie

[Dias W. P. S., Khoury G. A., Sullivan P. J. E,1990]: Dias W. P. S., Khoury G. A., Sullivan P. J. E, « Mechanical properties of hardened cement paste exposed to temperature up to 700°C », ACI Materials Journal, N°87M18, 1990.

[Diederichs U., Jumpanen U-M. and Penttala V,1992]: Diederichs U., Jumpanen U-M. and Penttala V, « Behaviour of high temperatures », Helsinki University of Technology, Department of Structural Engineering, Report 92. p.723, 1992] .

[Diederichs U., Jumpanen U. M,1992]: Diederichs U., Jumpanen U. M, « High temperature properties and spalling behaviour of high-strength concrete », Verlog für Architekturund techn.wissencheften, Ernst & schn, p.191-197, 1992.

[Fares H,2009] : Fares H, « Propriétés mécaniques et physico-chimiques de bétons autoplaçants exposés à une température élevée », Thèse de doctorat, Université de Cergy-Pontoise, 2009.

[Faure, R.-M. et J.-F. Thimus ,2004] : Faure, R.-M. et J.-F. Thimus, « Contribution of On-Line Tools on Internet for the Teaching of Slopes and Tunnels Stability». Engineering Geology for **Infrastructure Planning in Europe: 59-6, 2004.**

[Felicitti R., Gambarova P. G., Sora M. N., Khoury G .A,2000]: Felicitti R., Gambarova P. G., Sora M. N., Khoury G .A, « Mechanical behaviour of HPC and UHPC in direct tension at high temperature and after cooling», Fifth Rilem Symposium on Fibre-Reinforced Concretes, N°5, p.749-758, Lyon, France, 1999-2000.

[Gaweska I.H,2004] : Gaweska I.H, « Comportement à haute température des bétons à haute performanceévolution des principales propriétés mécaniques », Thèse de doctorat, Ecole Doctorale MODES, 2004.

[G. P. Zraisky and V. N. Balashov,1991]: G. P. Zraisky and V. N. Balashov, « Compressibility of Sandstones». Amsterdam, Elsevier, 1991..

[Guillame Servoise,2017] : Guillame Servoise, de « Déchets, réemploi, recyclage : la déconstruction, nouvelle responsabilité de l'architecte ? », Nov 26, 2017.

[Harada T., Takeda J., Yamane S. and Furumura F,1972]: Harada T., Takeda J., Yamane S. and Furumura F, « Strength, elasticity and thermal properties of concrete subjected to elevated temperatures », In International Seminar on Concrete for Nuclear reactors, ACI Special

Bibliographie

Publication, paper SP34, p 377-406, 1972.

[Harmathy T. Z,1965]: Harmathy T. Z, « Effect of moisture on the fire endurance of building elements », ASTM Special Technical Publication, N° 385, p. 74-95, 1964-1965.

[Hertz K,1984]: Hertz K, « Heat-induced explosion of dense concretes », Technical University of Denmark, Institute of Building Design, Report No 166, 1984.*

[Hertz K. D,2003]: Hertz K. D, « Limits of spalling of fire – exposed concrete », Fire safety Journal, vol. 38, p. 103-116, 2003.

[Hertz K., S,1998]: Hertz K., S, « Limits of palling of Fire Exposed Concrete », Dep. Of Buildings and Energy Technical University of Denmark, 1998.

[How-Ji Chen 1,2020]: How-Ji Chen 1, «Yi-Lin Yu 1 and Chao-Wei Tang., Mechanical Properties of Ultra-High Performance Concrete before and after Exposure to High Temperatures, Materials »2020, 13, 770, pp 3 – 17.

[Hachemi,2015] : Hachemi , «Etude du Comportement du béton soumis à haute température : Influence du type de béton et de la nature des constituants. » ["eprint_fieldopt_thesis_type_phd" not defined] thesis, Université Mohamed Khider – Biskra;2015].

[Kalifa, P. et Menneteau F. D,2000] : Kalifa, P. et Menneteau F. D, « Mesures de pression, température et perte en masse dans les bétons à hautes températures », Rapport BHP 2000.

[Kalifa P, Chen G, Galle C,2001]: Kalifa P, Chen G, Galle C,Hightemperature behavior of HPC with polypropylene fibres :From spalling to microstructure . Cement and Concrete Research. 2001:31(10):1487-1499.

[Kalifa, P., Chene, G., Galle, C,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, 1487-1499 .
[https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(01\)00596-8](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(01)00596-8).

[Khalid Cherkaoui,2010] : Khalid Cherkaoui , «Caractérisation de la microstructure et comportement à court et long terme d'un Béton de Poudre Réactive Extrudable» thèse doctorat ; 2010.

[Khoury G. A,1988]: Khoury G. A, « compressive strength of concrete at high temperatures: a reassessment », Compressive Strength of Concrete Research, Vol. 44, p.291-309, 1988.

Bibliographie

[Khoury G.A,2003]: Khoury G.A, « Effect of heat on concrete », International Centre for Mechanical Sciences, 2003».

[Ladour Ilyes,2014] : Ladour Ilyes, «Etude Des Performance Des Betons De Poudres Reactives Fibres (BPR-F), »mémoire de master ; Juin 2014].

[Lakhal Ridha,2011] : Lakhal Ridha, « Elaboration Des Betons A Hautes Performances A Base Des Sous Produit Locaux Formulation Et Caracterisation Physico-Mecanique, mémoire de magister 2011».

[Loïc Thomas Guy Archambault,2005] : Loïc Thomas Guy Archambault, Sécurité incendie Collection Mémentos acier.Nouvelle édition ,2005.

[Long, G., Shi, Y., Ma, K., & Xie, Y,2016] : Long, G., Shi, Y., Ma, K., & Xie, Y, «Reactive powder concrete reinforced by nanoparticles. Advances in Cement Research», 28(2), 99–109. <https://doi.org/10.1680/jadcr.15.00058;2016>.

[Ludovic M,2006] : Ludovic M, « Étude du comportement sous très hautes températures des Bétons Fibrés à Ultra Hautes Performances : application au BCV »,Thèse de doctorat, Université de Grenoble, 2006.

[Marc Mélon ,2017] : Marc Mélon , « A25 ans ;Mathier Guiton se lance dans la fabrication de la brique Mesbay ,publier le mercredi 7 juin 2017 a 15h 55.

[Min Li et al,2004]: Min Li et al, « Mechanical properties of high-strength concrete after fire », Cement and Concrete Research, vol. 34, p. 1001-1005, 2004.

[Mounira Chadli,2019] : Mounira Chadli, Etude des performances des bétons de poudres réactives fibrés, Thèse de Doctorat, 18/04/2019.

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

Bibliographie

[Noumowé N. A,1995] : Noumowé N. A, « Effet de hautes températures sur le béton (20-600°C), Cas particulier du béton à hautes performances », Thèse de doctorat, INSA de Lyon, 1995.

[Noumowé. A,1998]: Noumowé. A, (2001). 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 2001 (smirt 16), Vol 1, Washington, DC, USA. TSYMBROVSKA.(2015). 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, 1561-1579,1998.

[NF EN 197-1 (AFNOR NF EN 197-1, 2001)].

[NF EN 206, 2014].

[Oudjit et Madiha Lanez,2005] « Contribution A L'étude Des Betons De Poudres Reactives » ; 06 et 07 Décembre2005.

[Olga-mehaela S,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.

[Patrick Guiraud,2018] : Patrick Guiraud, «Les adjuvants : pour des bétons à l'épreuve des chantiers et du temps», Avril 2018 .

[Phan L. T., Carino N. J, 2003]: Phan L. T., Carino N. J, « Codes provisions for high strength concrete strength temperature relationship at elevated temperature », National institute of standards and technology, Materials and structures, vol. 36, N°256, p.91-98, 2003.

[Piasta J,1984]: Piasta J, « Heat deformations of cements phases and microstructures of cement paste », Matériaux et Constructions, N°102, p.415-420, 1984.

[Richard, 1995] : Richard P, and Cheyrezy M,“Composition of reactive powder concrete”, Cement and Concrete Research, Vol. 25, No. 7, pp. 1501-1511, 1995.

[Saadi Imene,2017] :Saadi Imene, Contribution à l'étude du comportement à haute température des bétons à hautes performances « Effet des additions minérales et fibres de polypropylène » ,thèse de doctorat ,Annaba,2017.

Bibliographie

[Sabeur H., Colina H., Bejjani M,2007]: Sabeur H., Colina H., Bejjani M, « Elastic strain, young's modulus variation during uniform heating of concrete », Magazine of Concrete Research, vol.59, N°8, p. 559-566, 2007.

[Salhi K,2007] : Salhi K, «Etude de l'influence de l'ajout du sable de dune et le laitier granulé finement broyés au ciment sur la stabilité de béton»,2007.

[Schneider U,1988]: Schneider U, « concrete at high temperature – a general review ». Fire Safety Journal, vol. 13, p.55-68, 1988.

[Sliwinski J., Leonard R., Tracz T,2004]: Sliwinski J., Leonard R., Tracz T, « Influence of High Temperature on the Residual Permeability of High Performance Concrete (in Polish) », Proc. Of 2nd Conf. Dni Betonu, Polski Cement, Wisła 2004.

[Tafraoui A ; Exadeillas G ;Lebaili S ; Vidal T,2009] : Tafraoui A ; Exadeillas G ;Lebaili S ; Vidal T, « Béton Dilatation et retrait Béton Détérioration Béton à hautes performances Béton à Ultra Hautes Performances Durabilité Fluage Matériaux Fluage Microstructure Microstructure Métakaolin Retrait Résistance mécanique Sable de dune» ;thèse doctorat ,2009 .

[Thelandersson S,1971]: Thelandersson S, « Effect of high temperatures on tensile strength of concrete », Lund Institute of Technology, Division of Struct. Mech. And Concrete Constr., Neostyled, p. 27, 1971.

[Tai, S.; Pan, H.; Kung, N,2011]: Tai, S.; Pan, H.; Kung, N. Mechanical properties of steel fiber reinforced reactive powder concrete following exposure to high temperature reaching 800°C. Nucl. Eng. Des. 2011, 241, 2416–2424.

[Tolentino E., Lameira F.S., Gomes A.M., Rigo da Silva C.A,2002]: Tolentino E., Lameira F.S Vasconcelos W.L., « Effects of high temperature on the residual performance of Portland cement concretes », Materials Research, vol. 5, N°3, p. 301-307, 2002.

[Tome 2,2011] :Tome 2, « Les bétons : formulation, fabrication et mise en œuvre - CT G11, fiches-techniques-2-les-betons-formulation-fabrication-et-mise- en-oeuvre»,2011].

[ULM F.J., Coussy O., Bazant Z.P,1999]: ULM F.J., Coussy O., Bazant Z.P, « The “Chunnel” Fire. I: Chemoplastic Softening in Rapidly Heated Concrete », Journal of Engineering Mechanics», pp 272-282, 1999.

Bibliographie

[**Viviana Fátima Rahhal,et al,2019**]: **Viviana Fátima Rahhal,et al .**, « Complex Characterization and Behavior of Waste Fired Brick Powder-Portland Cement System, Materials (Basel) ». 2019 May; 12(10): 1650. Published online 2019 May 21. doi: 10.3390/ma12101650

[**Widodo Kushartomoa, Ika Balib,, Budi Sulaimana,2015**]: **Widodo Kushartomoa, Ika Balib,, Budi Sulaimana**, « Mechanical behavior of reactive powder concrete with glass powder substitute, Procedia Engineering 125» (2015) 617 – 622, The 5th International Conference of Euro Asia Civil Engineering Forum (EACEF-5).

[**Ye G., Liu X., De Schutter G., Taerwe L., Vandeveld P,2007**]: **Ye G., Liu X., De Schutter G., Taerwe L., Vandeveld P**, « Phase distribution and microstructural changes of self-compacting cement paste at elevated temperature », Cement and Concrete Research, vol. 37, p. 978-987,2007.

[**Yi, N. H., Kim, J. H. J., Han, T. S., Cho, Y. G., & Lee, J. H,2011**]: **Yi, N. H., Kim, J. H. J., Han, T. S., Cho, Y. G., & Lee, J. H.** «Blast-resistant characteristics of ultra-high strength concrete and reactive powder concrete. Construction and Building Materials»,2012;28(1),694–707.doi:10.1016/j.conbuildmat.2011.09.014.

[**Zhukov V.V,1994**]: **Zhukov V.V**, « Reasons of explosive spalling of concrete by fire », Scientific research Institute for Concrete and Reinforced Concrete, Moscow, 1994.

[**Zeiml M., Leitherner D., Lackner R., Mang H.A,2006**]: **Zeiml M., Leitherner D., Lackner R., Mang H.A**, « How do polypropylene fibers improve the spalling behavior of in-situ concrete? », Cement and Concrete Research, vol. 36, p. 929-942, 2006.

[**Zine El Abidine Rahmouni and Nadia Tebbal,2020**]: **Zine El Abidine Rahmouni and Nadia Tebbal**, « Chapter Mechanical Behavior of High-Performance Concrete under Thermal Effect», Licensee IntechOpen, 2020 , pp 1- 21, DOI: <http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.89916>

[**Z. Xing,2011**] : **Z. Xing**, Influence de la nature minéralogique des granulats sur leur comportement et celui du béton à haute température, Thèse de Doctorat, Génie Civil, Université de Cergy-Pontoise, 2011.

LES

ANNEXES.

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
- Découffrage 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 dosé 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 convenance 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 introduite.

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/3

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 cubiténaires 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



83

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 convenance pour déterminer la fourchette d'utilisation tenant compte des conditions réelles de chantier.



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



ALGÉRIE



50kg

ملكي
Malaki
Super
Ciment Blanc

52,5

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.



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) 		Eau (litres) 
			8/15mm	15/25mm	
Dosage pour béton C25/30	X 1 	+ X7 	+ X5 	+ X4 	+ 25 L

Remarque: un bidon = 10 Litres

Cette formule est proposée en l'absence d'une formulation étudiée et délivrée 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
C3A (%)	9.0±1

• Propriétés physiques

	Valeur
Consistance Normale (%)	28 ± 3
Finesse suivant la méthode de Blaine (cm ² /g) (NA231)	4000 - 5000
Retrait à 28 jours (µm/m)	≤ 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

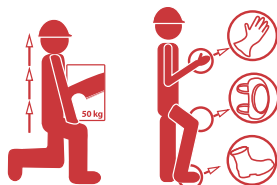
Ces données sont communiquées à titre informatif et sont susceptibles d'être modifiées en fonction des paramètres de production.

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 : Levez le sac en pliant les genoux et en gardant le dos droit.



CONSEILS DE STOCKAGE

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

LAFARGE ALGÉRIE

Centre commercial Bab Ezzouar, Tour n°02, Etages 05 & 06, Bab Ezzouar Alger, Algérie

Tél: + 213 (0) 21 98 54 54

Fax: + 213 (0) 23 92 42 94

www.lafargealgerie.com

dz.satisfaction-clients@lafargeholcim.com

Tél: 021 98 54 54

