

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 : Génie civil et hydraulique  
Ref :



جامعة محمد خيضر بسكرة  
كلية العلوم و التكنولوجيا  
قسم: الهندسة المدنية والري  
المرجع:

Thèse présentée en vue de l'obtention  
Du diplôme de  
**Doctorat en sciences**  
Spécialité : Génie Civil  
Intitulé

# Etude des performances des bétons de poudres réactives fibrés

Présentée par : **MOUNIRA CHADLI**

Soutenue publiquement le : 18/04/2019

**Devant le jury composé de :**

TAALLAH BACHIR	Président	Maitre de conférences 'A'	Université de BISKRA
MEKKI MELLAS	Rapporteur	Professeur	Université de BISKRA
RAHMOUNI ZINE EL ABIDINE	Examineur	Professeur	Université de M'SILA
BENAMARA DALILA	Examineur	Maitre de conférences 'A'	Université de DJELFA

## ***REMERCIEMENTS***

Je voudrais avant tout remercier le tout puissant et le miséricordieux Allah qui ma donner la volonté et le courage de mener à bien et d'achever ce modeste travail.

Je voudrais remercier ma famille pour leur soutien et leurs encouragements pour poursuivre la thèse.

Je tiens à remercier Monsieur **MELLAS MEKKI**, Professeur à l'Université de Biskra, mon Directeur de thèse, pour les conseils et orientations prodigués. Je le remercie pour sa confiance et pour son aide scientifique.

J'exprime mes vifs remerciements au **Dr. TAALLAH BACHIR**, qui m'a fait l'honneur de présider le jury de soutenance, je tiens à lui exprimer ma profonde reconnaissance.

Je tiens à exprimer mes sincères remerciements aux membres de jury pour l'honneur qu'il me faisait en participant à ce jury et de bien vouloir juger ce travail :

Monsieur **RAHMOUNI ZINE EL ABIDINE**, Professeur à l'Université de M'SILA, d'avoir accepté d'examiner mon travail et de faire partie de ce jury.

Madame **BENAMARA DALILA**, Docteur à l'université de DJELFA qui m'a fait l'honneur d'être membres du jury de soutenance de cette thèse. Je les remercie de trouver le temps et la volonté de faire le déplacement pour examiner ce travail.

J'exprime ma profonde gratitude au **Dr MEZGHICHE BOUZIDI et Dr. TEBAL NADIA** pour leur encouragement et leur aide dans l'accomplissement de cette thèse.

Je tiens aussi à remercier tous les membres du laboratoire de génie civil pour leurs conseils, leur soutien et leur aide précieuse pendant la durée de mes travaux.

Enfin un remerciement particulier et personnel à l'ensemble de mes enseignants qui ont contribué à ma formation, à tous mes amis et collègues de travail qui ont grandement contribué à faire de mon passage au doctorat une belle expérience.

# Etude des performances des bétons de poudres réactives fibrés

## Résumé

Les bétons de poudres réactives (BPR) constituent une nouvelle famille de matériaux de construction dont la production est similaire à celle des bétons ordinaires. Le BPR est un matériau cimentaire à matrice à ultra haute performance. Le BPR est caractérisé par une forte teneur en fumée de silice et par un très faible rapport eau/ciment, c'est un matériau dont les plus gros granulats, en l'occurrence du sable, ont une dimension maximale d'environ 600 $\mu$ m. Pour le fabriquer on utilise des matériaux tels que : du ciment portland, du sable, de la fumée de silice, un super plastifiant et de l'eau, on utilise également des fibres d'acier et du quartz broyé pour améliorer certaines caractéristiques de ce béton telles que la résistance et la ductilité. Il nécessite un étuvage de 48h à une température moyenne de 90°C, ce traitement offre de plus quelques avantages comme le quasi disparition du retrait de dessiccation. Ce béton permet d'atteindre des résistances de 180 MPa en compression, de 7 à 12 MPa en traction directe et d'obtenir des caractéristiques de durabilité, bien supérieures à celles des bétons classiques, il faut noter que la résistance en traction de ce matériau est la propriété la plus intéressante car elle a un caractère de fiabilité indéniable.

Le présent travail de recherche consiste à la mise au point et l'étude des propriétés physico-mécaniques, élastiques et de la durabilité d'un béton de poudre réactive fibré (BPRF) à partir de matériaux existant sur le marché algérien. Trois additions minérales : laitier granulé, poudre de quartz et fumée de silice sont incorporées dans le ciment avec trois pourcentages (15%, 23% et 25%) en plus d'utiliser des valeurs différentes de fraction volumique de fibres d'acier (1%, 1.5%, 2% et 2,5%). Les résultats montrent que l'incorporation de 2,5% de fibres métalliques dans la formulation du béton de poudre réactive donne une résistance à la compression élevée de 175 MPa à 12 mois. La relation entre la valeur relative et les déformations élasto-instantanées longitudinales du béton de poudre réactive pulvérulent à une caractéristique linéaire dans toutes les gammes de contraintes relatives, de sorte que le module d'élasticité développé pour un béton de poudre réactive renforcé est supérieur à celui de béton non fibré. La présence d'ajouts minéraux améliore la durabilité des bétons par rapport à celle non adjuventé par des ajouts minéraux.

**Mots clés :** Béton de poudre réactive, Compression, Traction, Module d'élasticité, Déformabilité, Retrait, Gonflement, Durabilité.

# Performance study of metal fiber reinforced reactive powder concrete

## Abstract

Reactive powder concretes RPC is a new family of construction materials whose production is similar to that of ordinary concrete. The RPC is an ultra high performance matrix cementitious material. The RPC is characterized by a high content of silica fume and a very low water / cement ratio, it is a material whose largest aggregates, in this case sand, have a maximum dimension of about 600  $\mu\text{m}$  to manufacture it we use materials such as: portland cement, sand, silica fume, super plasticizer and water, we also use steel fibers and crushed quartz to improve certain characteristics of this material concrete such as strength and ductility. It requires a 48h parboiling at an average temperature of 90°C, this treatment also offers some advantages such as the virtual disappearance of the withdrawal of desiccation. This concrete makes it possible to reach resistances of 180 MPa in compression, 7 to 12 MPa in direct traction and to obtain durability characteristics, much superior to those of conventional concretes, it should be noted that the tensile strength of this material is the most interesting property because it has a character of undeniable reliability.

The present work consists of the development and study of the physico- mechanical, elastic properties and durability of an ultra high performance concrete (UHPC) from materials existing on the Algerian market. Three mineral additions: granulated slag, quartz powder and silica fume are incorporated into the cement with three percentages (15%, 23% and 25%) in addition to use different values of steel fibers volume fraction (1%, 1.5%, 2% et 2,5%). The results show that the incorporation of 2.5% metal fibers in the formulation of the reactive powder concrete give a high compressive strengths of 175 MPa at 12 months. The relationship between the relative value and the longitudinal elasto-instantaneous deformations of the reactive powder concrete to a linear characteristic throughout the relative stress ranges, so the modulus of elasticity developed for a fiber-reinforced reactive concrete is greater than that of the unbound fiber. Results from the current study concluded that the presence of the mineral additions improves the durability of the concretes compared to that not adjuvanted by mineral additions.

**Keywords:** Reactive powder concrete, Compression, Traction, Elasticity modulus, Deformability, Shrinkage, Swelling, Durability.

# دراسة أداء الخرسانة بالمسحوق المتفاعل تحتوي على الألياف المعدنية

## ملخص

الخرسانة بالمسحوق المتفاعل هي عائلة جديدة من مواد البناء التي يشبه إنتاجها الى الخرسانة العادية. و هذا النوع من الخرسانة هو مادة اسمنتية عالية الأداء. ويتميز هذا النوع من الخرسانة بمحتوى عال من الدخان السيليكات ونسبة المياه / الأسمنت منخفضة جدا أيضا أبعاد الرمل تبلغ كحد أقصى حوالي 600µm. لتصنيعها نستخدم مواد مثل: الاسمنت البورتلاندي والرمل ودخان السيليكات، الملدنات العالية والمياه، ونستخدم أيضا الألياف المعدنية والكوارتز المسحوق لتحسين بعض الخصائص لهاته الخرسانة مثل المقاومة والمطوليه.

فإنها تتطلب 48 ساعة في متوسط درجة حرارة 90°C ، ويوفر هذا العلاج الحراري أيضا بعض المزايا مثل الاختفاء الظاهري للتقلص. هذه الخرسانة تسمح بالوصول إلى مقاومة ضغط تصل إلى 180 ميغاباسكال و الشد المباشر إلى 7-12 ميغاباسكال والحصول على خصائص الديمومة تفوق بكثير تلك التي من الخرسانة العادية وتجدر الإشارة إلى أن مقاومه الشد هي الخاصية الأكثر إثارة للاهتمام. ويتألف العمل الحالي لدراسة الخصائص الفيزيائية الميكانيكية والمرونة والديمومة من الخرسانة عالية الأداء من المواد الموجودة في السوق الجزائرية.

ثلاثة إضافات معدنية: يتم تضمين الخبث المسحوق و الكوارتز المسحوق ودخان السيليكات في الأسمنت بثلاثة نسب مئوية (15% و 23% و 25%) بالإضافة إلى استخدام قيم مختلفة من ألياف المعدنية (1%, 1.5%, 2% et 2.5%). وأظهرت النتائج أن دمج الألياف المعدنية بنسبه 2.5% في الخلطة الخراسانية أعطت مقاومه ضغط عالية تقدر بـ 175 ميغا باسكال في 12 شهرا.

إن العلاقة بين القيمة النسبية والتشوهات الطولية المرنة الفورية للخرسانة بالمسحوق المتفاعل هي علاقة خطية في جميع مراحل الاجهادات النسبية، وبالتالي فإن معامل المرونة للخرسانة المدعمة بالألياف المعدنية أكبر من الخرسانة الغير مدعومه بالألياف المعدنية. وخلصت نتائج الدراسة الحالية إلى أن وجود الإضافات المعدنية يحسن ديمومة الخرسانة بالمقارنة مع تلك التي لا توجد بها الإضافات المعدنية.

**الكلمات المفتاحية:** الخرسانة بالمسحوق المتفاعل - الضغط - الشد - معامل المرونة - التشوهات - التقلص - الانتفاخ - الديمومة.

Table des matières

Remerciements	i
Résumé	ii
Abstract	iii
الملخص	iv
Table des matières	v
Liste des figures	x
Liste des tableaux	xv
Liste des abréviations	xvii
Introduction générale	1

Première partie : Synthèse bibliographique

**Chapitre I : Généralités sur les bétons à ultra haute performance**

I.1 Introduction	6
I.2 Définition	6
I.3 Historique sur Les bétons	7
I.3.1 Bétons Ordinaires	7
I.3.2 Bétons à ultra hautes performances	8
I.4 Les constituants du BPRF	11
I.4.1 Le ciment	11
I.4.2 Granulats	12
I.4.2.1 Sable fin	12
I.4.3 Additions	13
I.4.3.1 La fumée de silice	13
I.4.3.1.1 Effet de la fumée de silice	14
a. Mode d'action	14
a.1 Réaction pouzzolanique	15
a.2 Effet d'optimisation de l'empilement granulaire	15
b. Avantages de la fumée de silice	16
b.1 Performance à l'état frais	16
b.2 Performances à l'état durci	16
I.4.3.2 Le laitier broyé	17
a. Les facteurs d'activation	19
I.4.3.2.1 Effet de laitier broyé	22

I .4.3.3 Le quartz broyé	22
I .4.4 Les super-plastifiants	23
I .4.4.1 Influence du dosage en super plastifiant	24
I .4.5 Fibres	24
I .4.6 Rapport Eau/Liant	26
I.5 Propriétés Constructives Des BPR	26
I.5.1 Résistance à la compression	26
I.5.1.1 Influence du rapport E/C	31
I.5.1.2 Influence de la teneur en fibres	32
I.5.1.3 Impact d'un traitement thermique sur la résistance en compression	34
I.5.2 Comportement en traction	35
I.5.3 Résistance en flexion	35
I.5.4 Rigidité	36
I.5.5 Le retrait	36
I.5.5.1 Comportement du béton vis-à-vis du retrait	36
I.5.5.1.1 Définition	37
Le retrait de séchage	38
Le retrait plastique	38
Le retrait endogène	38
Le retrait thermique	39
Le retrait de carbonatation	39
I.5.5.2 Paramètres influençant le retrait	40
I.5.5.2.1 Influence du rapport E/C	41
I.5.5.2.2 Influence de la fumée de silice et des adjuvants	41
I.5.6 La déformabilité	42
I.5.6.1 Définition	42
I.6 Principe de formulation	43
I.6.1 Introduction	43
I.6.2 Méthode proposé par BONNEAU	43
I.6.3 Méthode empirique de formulation	46
I.6.4 Exemple de formulation	49
I.6.4.1 En laboratoire	49
I.8 Conclusion	51

## **Chapitre II : Durabilité et microstructure d'un béton à poudre réactive**

II.1 Durabilité	55
II.1.1 Introduction	55
II.1.2 Les indicateurs de durabilité	55
II.1.2.1 La porosité	56
II.1.2.2 La perméabilité aux gaz	58
II.1.2.3 La carbonatation d'un béton	59
II.1.2.3.1 Les paramètres influents du phénomène de carbonatation	59
II.1.2.3.1.1 L'environnement	59
II.1.2.3.1.1 Les paramètres propres aux bétons	64
II.2 La microstructure	65
II.2.1 Introduction	65
II.2.2 Diffraction rayon X (DRX)	66
II.2.2.1 Définition	66
II.2.2.2 Le diffractomètre	66
II.2.2.4 Description de l'essai	67
II.2.3 L'analyse thermogravimétrique (ATG)	67
II.2.3.1 Définition	67
II.2.3.5 Courbe thermogravimétrique (ATG)	69
II.2.4 Microscope électronique à balayage (MEB)	70
II.2.4.1 Historique	70
II.2.4.3 Principe du MEB	71
II.3 Conclusion	71

## **Deuxième partie : Etude expérimentale**

### **Chapitre III. Matériaux et procédures expérimentales**

III.1 Introduction	74
III.2 Caractéristiques et sélection des matériaux utilisés	74
III.2.1 Ciment (C)	74
III.2.2 Additions	75



III.2.2.1 La fumée de silice (FS)	74
III.2.2.2 Le quartz broyé (QB)	76
III.2.2.3 Le laitier broyé (LB)	76
III.2.3 Granulats	78
III.2.4 L'eau	80
III.2.5 Adjuvant	80
III.2.6 Les fibres	81
III.3 Mise au point des formulations	82
III.4 fabrication, mise en place et traitement thermique des BPRF	83
III.4.1 Séquence de malaxage	83
III.4.2 Coulage et vibration	84
III.4.3 Détermination de la maniabilité	85
III.4.6 Mode de conservation	86
III.4.7 Traitement thermique	86
III.5 Programme des essais	87
III.5.1 Essai de traction par flexion 3 points	87
III.5.2 Essai de compression	88
III.5.3 Essai de retrait et de gonflement	89
III.5.4 Essai de capacité d'absorption d'eau	91
III.5.5 Essai de déformabilités et module d'élasticité	92
III.5.6 La résistance à l'attaque agressive	94
III.5.7 L'analyse aux rayons X	94
III.5.7.1 Préparation de l'échantillon	94
III.5.7.2 Analyse par diffraction des rayons X	95
III.6 Conclusions	95

### **Chapitre IV : Présentation Et Discussion Des Résultats**

IV.1 Introduction	98
IV.2 Caractéristiques instantanées à l'état durci	98
IV.2.1 L'effet de traitement thermique sur les propriétés mécaniques	99
IV.2.1.1 : La résistance à la compression	101
IV.2.1.2 : La résistance à la traction par flexion	101

III.2.2 L'étude des propriétés mécaniques de différentes formulations des BPRF à l'air libre et dans l'eau	101
IV.2.2.1 La résistance à la compression	101
IV.2.2.2 La résistance à la traction par flexion	101
IV.2.3 L'étude des propriétés mécaniques de différentes formulations des BPR sans et avec fibre métallique	103
IV.2.3.1 La résistance à la compression	103
• L'effet des fibres sur la résistance mécanique après 12 mois	107
IV.2.3.2 La résistance à la traction par flexion	108
IV.3 Effet du quartz broyé	110
IV.4 Effet des fibres métalliques	111
IV.5 Effet des traitements thermiques	112
IV.6 Etude de la durabilité du béton à poudre réactive fibré	112
IV.6.1 Absorption d'eau par immersion	112
IV.6.2 Le Retrait à l'air	113
IV.6.3 La variation de la masse dans l'air	114
IV.6.4 Gonflement à l'eau	115
IV.6.5 La variation de la masse dans l'eau	116
IV.6.6 Déformabilité	117
IV.6.7 Attaques chimiques et sulfatiques	120
IV.6.8 Analyse aux rayons X	123
IV.9 Conclusions	128
<b>Conclusion générale et perspective</b>	<b>130</b>
<b>Références bibliographiques</b>	<b>136</b>
<b>Annexe</b>	<b>148</b>

Liste des figures

Chapitre I : GENERALITES SUR LES BETONS A ULTRA HAUTE  
PERFORMANCE

<b>Figure I.1</b> : Principe de la pouzzolanique [Patricia Bredy Tuffe et al ,2011]	15
<b>Figure I.2</b> : Courbe granulométrique laser comparative ciment /fumée de silice [Patricia Bredy Tuffe et al ,2011]	16
<b>Figure I.3:</b> Résistance des bétons aux attaques chimiques [T.Patricia Bredy et al ,2011]	17
<b>Figure I.4</b> : Laitier cristallisé et laitier vitrifié (granulé) de haut fourneau	19
<b>Figure I.5</b> : Granulation du laitier de haut fourneau d'El hadjar	19
<b>Figure I.6</b> : Résistance en compression à 28 jours en fonction de la finesse du laitier (activé avec du silicate de sodium : $Na_2O = 5.5\%$ , $M_s = 1$ ; sable/laitier = 2) [ <i>S. D Wang ,1994</i> ]	20
<b>Figure I.7</b> : Observation au MEB d'une pâte de ciment au laitier AAS conservée 4heures à température ambiante, puis 12 heures à 80°C [ <i>A. R. Brough, 2002</i> ]	21
<b>Figure I.8.</b> Résistance à la compression à 3 jours, 7 jours, 28 jours, 90 jours, 180 jours de ciments au laitier à 25°C et 45°C a) laitier de finesse 450 m <sup>2</sup> / kg ; b) laitier de finesse 900 m <sup>2</sup> / kg [ <i>A. Fernandez-Jiménez ,1999</i> ]	22
<b>Figure I. 9</b> : l'action «réduction d'eau» ou «l'effet fluidification» [Dakhmouche, 2009]	23
<b>Figure I.10</b> : 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]	27
<b>Figure I.11:</b> Courbe contrainte-déformation du BPR 200 en compression (Dugat_ ,1996)	29
<b>Figure I.12</b> : Courbe contrainte déformation du BPR800 en compression (Dugat_1996)	29
<b>Figure I.13</b> : Influence du rapport E/C sur la résistance moyenne en compression d'après les données bibliographiques du Tableau 1.5	32
<b>Figure I.14</b> : Résistances en compression en fonction de la teneur en fibres métalliques d'après les données bibliographiques du Tableau 1.5	33
<b>Figure I.15:</b> Résultats des mesures de retrait sur prismes (7 x 7 x 28) cm pour quatre types de BUHP [Caugberg, 2009]	36
<b>Figure I.16</b> : Principaux types de retrait du béton [Caugberg, 2009]	40

<b>Figure I.17:</b> Influence du rapport Eau /Liant (0,17 et 0,20 à gauche, 0,9, 0,11, 0,13 et 0,15 à droite) sur le retrait endogène de BPR [Loukili, 1996]	41
<b>Figure I.18:</b> a) Relation entre la résistance en compression et la teneur en air occlus ; b) Relation entre l'étalement et l'air occlus selon (Wille et al. 2012)	47
<b>Figure I.19 :</b> Influence de fibres de différentes longueurs et de grains de différentes tailles sur la compacité du mélange selon (De Larrard et Sedran, 1999)	48

## CHAPITRE II : DURABILITE ET MICROSTRUCTURE D'UN BETON DE POUDRE REACTIVE

<b>Figure II. 1 :</b> Répartition porométrique dans le béton [Mehta, 1993].	57
<b>Figure II. 2 :</b> Concept de la perméabilité d'un milieu poreux selon [Darcy, 1856].	58
<b>Figure II. 3 :</b> Eclatement du béton d'enrobage dû à la carbonatation [Vu, 2011].	59
<b>Figure II.4 :</b> Influence de la teneur en dioxyde de carbone sur la carbonatation [Nischer, 1984].	60
<b>Figure II.5 :</b> Evolution dans le temps de l'épaisseur carbonatée mesurée pour le mortier à base de CEM I et pour les différentes teneurs de CO <sub>2</sub> [Hyvert, 2009].	61
<b>Figure II. 6 :</b> Représentation schématique d'un réseau poreux partiellement rempli par l'eau condensée [Houst, 1992].	62
<b>Figure II. 7:</b> Vitesse de carbonatation en fonction de l'humidité relative [Verbeck, 1958].	62
<b>Figure II. 8:</b> Solubilité de la Portlandite et des C-S-H en température dans une eau pure sans CO <sub>2</sub> [Taylor, 1997 ; Glasser et al., 2005].	63
<b>Figure II. 9 :</b> Évolution de la carbonatation en fonction du rapport E/C pour différentes conditions de cure [Balayssac et al., 1995].	65

**CHAPITRE III : MATERIAUX ET PROCEDURES EXPERIMENTALES**

<b>Figure III .1:</b> la fumée de silice SIKA	76
<b>Figure III.2 :</b> Diagramme de diffraction X du laitier granulé	77
<b>Figure III.3 :</b> Courbe granulométrique du laitier granulé	78
<b>Figure III.4 :</b> Courbe granulométrique de la fumée de silice	78
<b>Figure III.5 :</b> Granulométrie par tamisage	80
<b>Figure III.6 :</b> Super plastifiant utilisée	81
<b>Figure. III.7 :</b> Fibres métallique	82
<b>Figure III.8 :</b> Malaxeurs, moules et éprouvettes utilisés pendant les essais	85
<b>Figure III.9 :</b> Armoire humide	87
<b>Figure III.10 :</b> Dispositif pour l'essai de résistance à la flexion	88
<b>Figure III.11 :</b> Dispositif de rupture en compression	89
<b>Figure III.12:</b> machine d'essais à la pression avec dispositif de compression et de traction	89
<b>Figure III.13 :</b> Appareil de mesure de retrait (Rétractomètre)	90
<b>Figure III.14:</b> les moules et éprouvettes du retrait	91
<b>Figure III.15 :</b> Essai de capacité d'absorption d'eau	92
<b>Figure III.16 :</b> Essai de déformabilité : compression sur prisme $10 \times 10 \times 40 \text{ cm}^3$	92
<b>Figure III.17 :</b> Essai de déformabilité : mesure des déformabilité pendant la compression du prisme de $10 \times 10 \times 40 \text{ cm}^3$ .	93
<b>Figure III.18 :</b> Broyeur.	95
<b>Figure III.19 :</b> Poudre broyé.	95

**CHAPITRE IV : PRESENTATION ET DISCUSSION DES RESULTATS**

<b>Figure IV.1</b> Evolution de la résistance à la compression des BPRF en fonction de traitement thermique	99
---	----

<b>Figure IV.2 :</b> Evolution de la résistance à la traction des BPR en fonction de traitement thermique.	100
<b>Figure IV.3 :</b> Evolution de la résistance à la compression de des BPRF à l'air libre et à l'eau	101
<b>Figure IV.4 :</b> Evolution de la résistance à la traction par flexion des BPRF à l'air libre et dans l'eau	102
<b>Figure IV.5 :</b> Evolution de la Résistance à la compression en fonction des pourcentages des fibres après 7 jours	103
<b>Figure IV.6 :</b> Evolution de la Résistance à la compression en fonction des pourcentages des fibres après 14 jours	104
<b>Figure IV.7 :</b> Evolution de la résistance à la compression en fonction les pourcentages des fibres après 28 jours	104
<b>Figure. IV.8 :</b> Evolution de la résistance à la compression en fonction des pourcentages des fibres après 60 jours	105
<b>Figure. IV.9 :</b> Evolution de la résistance à la compression avec et sans fibre après 12 mois	107
<b>Figure. IV.10 :</b> Evolution de la Résistance à la traction par flexion en fonction les pourcentages des fibres après 7 jours	108
<b>Figure. IV.11 :</b> Evolution de Résistance à la traction par flexion en fonction les pourcentages des fibres après 14 jours	108
<b>Figure. IV.12 :</b> Evolution de la résistance à la traction par flexion en fonction les pourcentages des fibres après 28 jours	109
<b>Figure. IV.13:</b> Evolution de la Résistance à la traction par flexion en fonction les pourcentages des fibres après 60 jours	109
<b>Figure. IV.14 :</b> Evolution de résistance à la traction par flexion avec et sans fibre après 12 mois.	110
<b>Figure IV.15 :</b> Capacité d'absorption d'eau des différentes formulations du BPRF	112
<b>Figure IV.16 :</b> Influence de la nature des ajouts sur le retrait des bétons en fonction du temps	113
<b>Figure IV.17 :</b> Variation de la masse dans l'air des bétons en fonction de l'âge des éprouvettes	114

<b>Figure IV.18 :</b> Influence de la nature des ajouts sur le gonflement des bétons en fonction du temps	115
<b>Figure IV.19 :</b> Variation de la masse dans l'eau des bétons en fonction de l'âge des éprouvettes	116
<b>Figure IV.20:</b> Déformation élastique instantanée longitudinale du béton $\varepsilon_1$ Tel en fonction des contraintes relatives $\eta$ pour la série de prismes BPRF1, BPRF2, BPRF5 et BPRT.	117
<b>Figure IV.21:</b> Déformation élastique instantanée transversale du béton $\varepsilon_2$ Tel en fonction des contraintes relatives $\eta$ pour la série de prismes BPRF1, BPRF2, BPRF5 et BPRT	118
<b>Figure IV.22:</b> Module de déformabilité E du béton en fonction des contraintes relatives $\eta$ pour les séries de prismes BPRF1, BPRF2, BPRF5 et BPRT.	118
<b>Figure IV.23:</b> Module d'élasticité des bétons BPRF1, BPRF2, BPRF5 et BPRT	119
<b>Figure IV.24:</b> Résistance mécanique à la compression cubique ( $R_c$ ) et prismatiques ( $R_{pr}$ ) en fonction du dosage en ciment	119
<b>Figure IV.25:</b> Résistance à la compression en fonction du temps d'immersion dans l'eau potable après 12 mois	121
<b>Figure IV.26:</b> Résistance à la compression en fonction du temps d'exposition au sulfate, après 12 mois.	121
<b>Figure IV.27:</b> Résistance à la compression des formulations du BPRF immergé dans hydroxyde de sodium (NaOH) à 12 mois.	122
<b>Figure IV.28:</b> Béton réactif renforcé de fibres (BPRF) immergé dans l'eau après 365 jours	124
<b>Figure IV.29 :</b> Diffractogramme du BPRF3 en (mode 2)	125
<b>Figure IV.30:</b> Diffractogramme du BPRF1 en (mode 2)	125
<b>Figure IV.31:</b> Diffractogramme du BPR	126
<b>Figure IV.32:</b> Diffractogramme du BPRF1 en (mode 3)	126

## Liste des Tableaux

### CHAPITRE I : GENERALITES SUR LES BETONS A ULTRA HAUTE PERFORMANCE

<b>Tableau I.1:</b> composition chimique et caractéristiques physiques de la fumée de silice [Olga, 1996]	13
<b>Tableau I.2 :</b> Influence de la fumée de silice sur les propriétés des matériaux cimentaires [Olga, 1996]	14
<b>Tableau I.3 :</b> Influence du laitier sur les propriétés des matériaux cimentaires [Olga, 1996]	21
<b>Tableau I.4 :</b> Caractéristiques mécaniques des BPR [Dugat et al, 1995]	28
<b>Tableau 1.5 :</b> Synthèse des valeurs de résistance moyenne en compression à 28 jours en fonction de la cure appliquée, de la teneur en fibres métalliques et du rapport E/C	30
<b>Tableau I.6 :</b> Formules types de BUHP (Bonneau, 1997) (Alepari et al, 1997)	49

### CHAPITRE II : DURABILITE ET MICROSTRUCTURE D'UN BETON DE POUDRE REACTIVE

<b>Tableau II.1 :</b> Principal étapes du développement du MEB. [Mellas Mekki, 2003]	70
--	----

### CHAPITRE III : MATERIAUX ET PROCEDURES EXPERIMENTALES

<b>Tableau III.1:</b> Composition chimique, physique et minéralogique du ciment en (%)	75
<b>Tableau III.2.</b> Résistances mécaniques à la compression du ciment	75
<b>Tableau III.3:</b> Composition chimique et physique exprimée en % pondéraux des additions utilisées	77
<b>Tableau III.4:</b> Les caractéristiques physiques de sable	79



<b>Tableau III.5:</b> Les caractéristiques de super plastifiant	80
<b>Tableau III.6 :</b> Les Caractéristiques des fibres	81
<b>Tableau III.7:</b> La composition de béton à poudre réactive BPR	83

**CHAPITRE IV : PRESENTATION ET DISCUSSION DES RESULTATS**

## LISTE DES ABREVIATIONS

**BPRF** : Béton de poudre réactive fibré.

**BHP** : Béton à haute performance.

**BTHP** : Béton à très haute performance.

**BO** : Béton ordinaire.

**BAP** : Béton auto plaçant.

**BFUP** : Béton fibré ultra performant.

**BPR** : Béton de poudre réactive.

**BUHP** : Béton ultra haute performance.

**DRX** : Diffraction rayon X.

**ATG** : Analyse thermogravimétrique.

**MEB** : Microscope électronique à balayage.

**C** : Ciment.

**FS** : La fumée de silice.

**QB** : Quartz broyé.

**LB** : Laitier broyé.

**SF** : Sable fins.

**SP** : Super plastifiant.

**E** : L'eau.

**FM** : Fibre métallique.

**MPa** : Miga Pascal.

**BPRT** : Béton de poudre réactive témoin (sans fibres métalliques) ;

**BPRF1** : Béton de poudre réactive avec 1%, 2% de fibre, 0 % Quartz broyé et 0 % de laitier broyé ;

**BPRF2** : Béton de poudre réactive avec 1.5%, 2% de fibre et 0 % de laitier broyé ;

**BPRF3** : Béton de poudre réactive avec 1.5%, 2.5% de fibre ;

**BPRF4** : Béton de poudre réactive avec 1.5%, 2.5% de fibre et 0 % de laitier broyé ;

**BPRF5** : Béton de poudre réactive avec 1.5%, 2.5% de fibre.

**BPRF6** : Béton de poudre réactive avec 1.5%, 2.5% de fibre, 0 % Quartz broyé.

The text is enclosed in a pair of large, red, stylized brackets that are open at the top and bottom. The brackets are positioned on either side of the text, framing it.

**INTRODUCTION**  
**GENERALE**

# Introduction générale

La recherche vers des bétons de plus en plus performants se poursuit depuis les années 1980 on trouve dans le monde entier un nombre croissant de réalisations en bétons hautes performances (BHP60-80 MPa) puis très hautes performances (BTHP 80-100MPa) en particulier généralisées pour les ouvrages d'art.

Les bétons de poudre réactives (PBR) ou béton à ultra hautes performances (BUHP>150) présentent des propriétés remarquables de performances mécaniques, mais aussi de durabilité mais ils ne sont sortis des laboratoires que pour des applications marginales. Ils restent des matériaux de construction chers et ne sont appliqués que dans un nombre restreint de pays.

La première application mondiale est la passerelle piétonnière de Sherbrooke réalisée en 1997, parallèlement aux travaux en cours à la Direction Scientifique de Bouygues, à l'université de Sherbrooke, le Professeur Ai'tcin a initié un projet de recherche qui consistait à fabriquer du BPR à l'aide de matériaux locaux ainsi qu'à développer certains aspects de ce nouveau matériau.

Les premières recherches sur le BPR sont françaises et canadiennes et datent des années 1990 elles découlent des études sur l'optimisation granulaire des compositions de bétons de De larrard et ont été motivées par le nucléaire de Cattenom et confinement des déchets radioactifs.

Actuellement les pays employant ces bétons se basent sur les recommandations françaises (AFGC SETRA), guide de conception français sur les BUHP paru en 2002 et les adaptent aux conditions locales.

Ces bétons permettent de construire autrement là où les bétons classiques ne répondent plus aux contraintes exigées techniques et/ou architecturales : grands ouvrages, bétons architecturaux environnements agressifs, respect du paysage, réparation avec contraintes de poids.

## Introduction générale

---

Sans nécessité d'équipement spécifique pour leur fabrication ils présentent des qualités exceptionnelles :

- leur durabilité très importante permet de ne pas envisager de cout d'entretien.

La difficulté principale pour une application plus large de ces bétons (outre leur prix) concerne le non existence de règles de dimensionnement des structures .Les études en laboratoire récentes s'orientent sur la résistance aux chocs et au feu de ces bétons et l'adaptation de leurs compositions aux ressources locales en granulats et ultrafines.

Si on s'intéresse à l'aspect développement durable ; un BPR contient près de trois fois la quantité de ciment d'un béton ordinaire ; et sa production génère donc trois fois plus de CO<sub>2</sub> et consomme trois fois plus d'énergie. Mais du fait des performances de ce type de matériaux on peut souvent diviser par trois les quantités utiles de béton.

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 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'Ile 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.

Composés de poudres (sable, ciment, quartz, fumée de silice) dont la taille des plus gros grains ne dépasse pas 500 µm, les BPR sont fabriqués dans des conditions semblables à celles des bétons classiques, mais avec une très faible quantité d'eau. Ils constituent une famille de matériaux aux performances variées selon leur méthode de fabrication. Un traitement thermique appliqué après la prise permet de moduler la qualité du béton en fonction des besoins.

## Introduction générale

---

Les caractéristiques exceptionnelles des BPR résultent de l'application de quatre principes fondamentaux :

- amélioration de l'homogénéité par suppression des gros granulats,
- augmentation de la compacité par optimisation du mélange granulaire et par pressage,
- amélioration de la microstructure par traitement thermique,
- amélioration de la ductilité par ajout de microfibres métalliques.

Les travaux récents effectués en matière de formulation et de fabrication des bétons ont conduit à la mise au point de bétons à ultra haute performance (BUHP) qui présentent des propriétés mécaniques et de durabilités remarquables (Malier, 1993) et (Richard & Cheyrezy 1995).

Toutefois ces bétons sont peu employés et leurs mises en œuvre ont encore un caractère exceptionnel, essentiellement à cause de leurs coûts élevés liés à l'utilisation importante de composants onéreux (fumée de silice, super plastifiant).

Le travail de doctorat présenté dans ce manuscrit a pour objectif vise l'élaboration de micro béton BPR à base au ciment portland et des matériaux riche en silice (fumée de silice, quartz broyé et laitier broyé).

L'objectif de cette recherche concerne l'utilisation des ressources disponibles localement et tout particulièrement les ajouts cimentaires et ceci, dans le but de formuler et confectionner un béton de poudre réactive fibré. L'étude s'est articulé autour des trois principaux axes :

- Etude de l'influence des additions minérales : (laitier granulé, poudre de quartz et fumée de silice.) sur les propriétés des bétons élaborés.
- Caractérisation des bétons avec additions minérales à travers des essais physico-mécaniques et élastiques dont le choix a été justifié.
- Etude de la durabilité de ces bétons conservés dans différents milieux agressifs.

Le présent travail de cette recherche est basé sur l'étude des comportements

## **Introduction générale**

---

des bétons de poudres réactives fibrés élaborées des matériaux disponibles localement.

Outre l'introduction générale, cette thèse est structurée en deux parties :

La première partie est composée de deux chapitres, le premier chapitre, qui est consacré à la synthèse bibliographique, en vue de donner un aperçu général sur les bétons à ultra hautes performances, les constituants et propriétés constructives des bétons de poudre réactive fibrés. Ce chapitre présentera aussi les travaux antérieurs réalisés sur l'effet de la présence des fibres métalliques et traitement thermique sur les propriétés physiques et mécaniques des bétons de poudre réactive.

Le deuxième chapitre présente les facteurs affectant la durabilité des matériaux cimentaires et l'effet des ajouts minéraux sur les différentes propriétés des bétons et la microstructure d'un béton à poudre réactive. Il présente aussi une synthèse des travaux effectués sur ce thème.

La deuxième partie, composée de deux chapitres, est consacrée à l'étude expérimentale.

Le chapitre trois fait le point sur les caractéristiques physiques, chimiques, minéralogiques, et mécaniques des matériaux utilisés (le ciment, le sable fin, les additions et les fibres métalliques). Ce chapitre présente aussi les mélanges, les méthodes de formulations, les traitements thermiques et les techniques de conservation finalement les essais effectués le long de l'étude expérimentale.

Les résultats et les discussions de l'étude expérimentale sont donnés dans le chapitre quatre. Ces résultats montrent l'effet de la teneur en fibres métalliques (avec ou sans fibre), de quartz broyé (avec ou sans quartz broyé) et de laitier broyé (avec ou sans laitier broyé) ainsi que le traitement thermique (sans traitement, avec traitement à 90 °C).

Enfin, la conclusion générale est une synthèse des résultats obtenus aux chapitres précédents ainsi que des recommandations. Pour une meilleure caractérisation de béton de poudres réactives.

**PREMIÈRE PARTIE**  
**SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE**

**Chapitre I**  
**GENERALITES SUR**  
**LES BETONS A ULTRA**  
**HAUTE**  
**PERFORMANCE**



# **Chapitre I : Généralités sur les bétons à ultra haute performance**

---

## **I.1 Introduction**

La résistance des structures en bétons fibrés ultra performants BFUP est fortement influencée par le comportement en traction du matériau. Ce comportement est lui-même dépendant de l'orientation des fibres au sein de la structure. Dans ce chapitre et dans un premier temps, nous présenterons les BFUP en insistant sur leurs propriétés mécaniques ainsi que sur l'influence des fibres sur ces propriétés. Des bétons à performances très élevées appelés, selon les périodes ou leurs formulations, BPR (Bétons de Poudres Réactives), BUHP (Bétons à Ultra Hautes Performances) ou BFUP (Bétons Fibrés Ultra Performants). Pour notre part, nous retiendrons dans la suite de ce document soit l'appellation BUHP, soit l'appellation BFUP (Brühwiler et Denarié, 2013).

Les bétons fibrés ultra performants BFUP, sont des matériaux à très haute compacité et haute résistance. Elle est de l'ordre plus de 100 MPa pour les bétons à très hautes performances, voir plus (150 à 200 MPa pour des bétons fibrés à ultra hautes performances, BFUP. Hautes performances signifient aussi facilité de mise en œuvre et souplesse d'adaptation aux contraintes d'exécution des ouvrages. Selon Toutlemonde et al, les bétons à très hautes performances ont une porosité extrêmement réduite, plus résistants aux agents agressifs et de façon générale, présentent une durabilité accrue (Toutlemonde et Resplendino, 2013).

## **I.2 Définition**

Les BPR (Bétons de Poudres Réactives) sont des micros bétons armés de micro armatures, dans lesquels la taille de tous les constituants est divisée par 100 par rapport à un béton ordinaire. Pour obtenir des performances exceptionnelles, la porosité des BPR est réduite à l'extrême ; ils contiennent un sable très fins (max. 600  $\mu\text{m}$ ), de forts dosages en ciment et fumée de silice, du quartz broyé, une teneur en eau très faible et un superplastifiant. Pour augmenter encore leurs performances, certains BPR subissent un traitement thermique : au-dessus de 90°C, le quartz broyé réagit alors par réaction pouzzolanique ; au-dessus de 200 °C, l'espacement des feuillettes de C-S-H (porosité nanométrique) diminue et on observe une augmentation de la cristallinité de ces hydrates. On peut encore presser les BPR traités thermiquement avant et pendant la prise pour augmenter leur compacité (Resplendino, 2010).

# Chapitre I : Généralités sur les bétons à ultra haute performance

---

## I.3 Historique sur les bétons

### I.3.1 Bétons Ordinaires

Le béton est un mélange de granulats dont les diamètres centimètre au micromètre, d'un liant hydraulique, généralement du ciment et d'eau le béton ordinaire sont caractérisés par un rapport E/C supérieur à 50% faciliter leur mise en place et la résistance mécanique allant de 25 MPa à 42 MPa [CIM BETON, 1970]. Comme les roches naturelles, le béton possède une grande résistance à la compression et une faible résistance à la traction. C'est pourquoi son utilisation comme matériau de construction, qui remonte aux Romains, ne s'est véritablement développée qu'avec l'invention du béton armé. Dans ce dernier, des armatures, c'est-à-dire des barres en acier (initialement en fer), pallient son insuffisante résistance à la traction.

L'ingénieur Bélidor (1737), avait étudié la composition du béton et introduisit le mot béton dans son sens actuel. L'invention du ciment par Louis Vicat en 1817, celle du ciment portland par Aspdin en 1824 et l'installation des premiers fours par Pavin de Lafarge au Teil en 1830 préparent l'avènement du béton. Les premières cimenteries se développent en France entre 1850 et 1860, dans le Boulonnais avec la Société des Ciments Français [CIM BETON, 1970].

L'invention du béton armé est généralement attribuée à Joseph Lambot, qui, en 1848, fit flotter une barque en ciment armé, et à Joseph Monier, qui en 1849 construisit indépendamment, grâce à ce matériau, des bacs à fleurs [Picon, 1997 ; Bosc et al, 2001].

L'emploi du béton armé dans les structures s'étend dès lors rapidement en France sous l'impulsion de Joseph Monier, de François Hennebique et de Armand Gabriel mais aussi de l'ingénieur François Coignet qui mit au point le béton aggloméré destiné à être moulé et pilonné en place. Il s'agissait d'un mélange sans cailloux, composé de sable, de cendres, de scories, de charbon brûlé, de terre argileuse cuite et pilée, de chaux hydraulique naturelle et d'eau en faible quantité. Il construisit ainsi en béton aggloméré une vaste maison, encore visible, au n°72 de la rue Charles Michels à Saint-Denis au Nord de Paris [Sablocrete, 1994].

## **Chapitre I : Généralités sur les bétons à ultra haute performance**

---

Dès 1906, une circulaire ministérielle fixe des instructions relatives à l'emploi du béton armé, codifiant ainsi pour la première fois la conception et le calcul des ponts et des bâtiments avec ce matériau.

Un nouvel essor est apporté par l'invention, vers 1930, du béton précontraint par Eugène Freyssinet. Un pas conceptuel important est alors franchi, constituant une véritable révolution dans l'art de construire, tant par la mise en pratique de la notion de précontrainte que par l'approfondissement de la compréhension du comportement mécanique et rhéologique du béton. L'utilisation de la précontrainte autorise en effet la maîtrise de la distribution des contraintes dans la matière. Elle permet, en particulier, de tirer profit de la grande résistance à la compression du béton tout en évitant les inconvénients dus à sa faible résistance à la traction. La Société Technique pour l'Utilisation de la Précontrainte (S.T.U.P.) met en œuvre les idées novatrices et les brevets d'Eugène Freyssinet et donne une forte impulsion au développement de l'emploi du béton précontraint dans le monde.

Les recherches menées depuis 1970 sur le béton, et particulièrement sur ses constituants actifs (ciment, ultrafines et surtout superplastifiants), conduisent à un nouveau bond qualitatif et quantitatif de ses propriétés. Ainsi, aux Etats-Unis et au Japon, on fabrique et on met en œuvre, dans les années 1980, des bétons à hautes performances dont la résistance à la compression atteint 100 MPa, et même 140 MPa dans un immeuble à Seattle aux États-Unis. En France, plusieurs ouvrages en BHP sont aussi construits (immeubles, ponts, centrales nucléaires, ...ect ).

### **I.3.2 Bétons à ultra hautes performances**

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").

## **Chapitre I : Généralités sur les bétons à ultra haute performance**

---

En France, les premières recherches et les premiers développements ont été effectués par la Direction Scientifique de la Société Bouygues qui développa un Béton de Poudres Réactives [Richard et al, 1995].

La première application en BFUP (Ductal) fut la réalisation de la passerelle piétonne à Sherbrooke (Québec, Canada) en 1997. En 1998, la première application en Ductal en France fut la réalisation des poutrelles de renforcement d'un aéroréfrigérant de la centrale nucléaire de Cattenom. D'autres ouvrages en BFUP ont aussi vu le jour après la publication de la recommandation provisoire de l'AFGC en 2002, tels que la passerelle piétonne Sakata-Mirai au Japon en 2002, passerelle de la Paix à Séoul en 2004, poutres de renforcement d'un aéroréfrigérant de la centrale nucléaire de Cattenom, la passerelle des Anges du pont du Diable à Saint Jean de Fos (Hérault) en 2007, le musée MUCEM à Marseille en 2013, et le stade Jean Bouin à Paris en 2014 pour n'en citer que quelques-uns.

Les BUHP sont des matériaux à matrice cimentaire, de résistance à la compression supérieure à 150 MPa. Ces matériaux sont additionnés de fibres métalliques (BFUP) en vue d'obtenir un comportement ductile en traction. Ils se caractérisent aussi par leur fort dosage en liant et la sélection particulière dont les granulats font l'objet [AFGC, 2002]. Du point de vue de leur formulation, ils se caractérisent par [Richard et al, 1995] :

- un rapport E/C très faible  $< 0,2$  ;
- l'emploi de sable fin afin d'améliorer l'homogénéité ;
- une augmentation de la compacité, par optimisation du squelette granulaire et par pressage du matériau à l'état frais et pendant la prise ;
- l'amélioration possible de la microstructure par traitement thermique après la prise ;
- l'emploi de fibres métalliques pour augmenter la ductilité.

Le retour d'expérience de plusieurs chantiers significatifs (poutraison de l'aéroréfrigérant de Cattenom, passerelle de Sherbrooke, PS de Bourg-lès-Valence), et une dizaine d'années d'efforts de recherche sur le sujet, ont permis de proposer des recommandations provisoires permettant d'utiliser ces nouveaux matériaux en toute sécurité [AFGC, 2002]. En effet, les performances

## **Chapitre I : Généralités sur les bétons à ultra haute performance**

---

mécaniques des BUHP ou des BFUP encouragent leur utilisation dans divers domaines comme la mécanique et le génie civil :

- Bâtis pour machines-outils, outil d'emboutissage, blocs moteurs, siège d'hélicoptères,
  
- Poutres et poutrelles, panneaux de façades, conteneur de haute intégrité pour l'entreposage des déchets radioactifs, poutres précontraintes préfabriquées mises en place sur les aéroréfrigérants de centrale nucléaire (EDF, centrale de Cattenom, poutres réalisées sans armatures passives, de longueur 14 m),
  
- Hourdis supérieur de la passerelle cyclo pédestre de Sherbrooke (d'une portée de 60 m, cette passerelle est constituée d'une dalle en BUHP de 30 mm d'épaisseur), passerelle piétonnière de Séoul en Corée du sud (portée de l'arc 120 m, hauteur du caisson de l'arc 1,3 m, épaisseur de la dalle supérieure de 30 mm).

De plus, l'absence de gros granulats dans les BUHP permet de réaliser des éléments de parement très fins d'une épaisseur de 15 mm [Cheyrezy, 1998]. Bon nombre de ces réalisations exemplaires ont notamment vu le jour en France, en Allemagne ou en Asie. Parmi les plus connues, on peut citer entre autres :

- La toute première application du BUHP concrétisée par la passerelle piétonne de Sherbrooke, au Canada (1997).
  
- Les quelques 2000 poutres (en Ceracem et en Ductal) qui composent la tour de refroidissement de la centrale électrique de Cattenom en France (1997-1998).
  
- Le pont de Bourg-lès-Valence, premier pont réalisé à l'aide de cinq poutres préfabriquées en BUHP et assemblées in situ au moyen de béton coulé (2000-2001).
  
- La passerelle piétonne de Sakata Miraï, au Japon (en Ductal), d'une portée de 50 m (2002).

## **Chapitre I : Généralités sur les bétons à ultra haute performance**

---

- La toiture hélicoïdale en voile mince de la gare de péage du viaduc de Millau d'une longueur de 98 m et d'une largeur de 28 m, réalisée au moyen de 53 éléments en Ceracem (2004).
- La passerelle piétonne de la Fulda (à Cassel, en Allemagne) d'une portée de 50 m (2004-2005).

### **I.4 Les constituants du BPRF**

#### **I.4.1 Le ciment**

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

Les formulations de Béton Fibrés Ultra Performants (BFUP) se caractérisent par l'emploi d'une grande quantité de ciment allant de 700 kg/m<sup>3</sup> (Graybeal, 2007) jusqu'à plus de 1000 kg/m<sup>3</sup> (Hajar et al., 2004), (Rossi et al., 2005). Cette quantité considérable de ciment, à laquelle vient s'ajouter aussi des ultrafines, a pour but de diminuer au maximum les vides, et d'augmenter, par conséquent, la compacité du mélange [Nguyen, 2015].

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

La rhéologie des BUHP étant fortement liée à la réactivité du ciment utilisé, il apparaît que l'emploi de ciment à faible teneur en C<sub>3</sub>A et à faible surface spécifique permet d'augmenter l'ouvrabilité des BUHP. Selon Bonneau [Bonneau, 1997], un ciment CEM I 52,5 PMES conduit à de très bonnes performances rhéologiques et mécaniques. En effet, ce ciment se caractérise par une faible teneur en C<sub>3</sub>A et un pourcentage en C<sub>3</sub>S qui favorise le développement de haute résistance mécanique. D'autres types de ciment tels que le CEM II 42,5 et les CEM III ont été utilisés dans la

## **Chapitre I : Généralités sur les bétons à ultra haute performance**

---

confection de BFUP (Toledo Filho et al. 2012), (Corinaldesi et Moriconi, 2012). Ces ciments peuvent également conduire à des résistances en compression élevées (de 150 MPa à 162 MPa obtenues sur prismes 4x4x16 cm).

### **I.4.2 Granulats**

#### **I.4.2.1 Sable fin**

Le sable constitue le plus gros granulats du BPR, sa taille moyenne est inférieure à 600  $\mu\text{m}$ . 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 [Khalid, 2010].

Conformément aux normes NF EN 12620 [AFNOR NF EN 12620, 2003] et NF XP P18-545 [AFNOR XP P18-545, 2004], le sable est défini comme étant un granulats naturel 0/D avec D (diamètre du plus gros granulats) limité à 4 mm. Il peut s'agir soit d'un sable naturel alluvionnaire (ou de ballastière), soit d'un sable de carrière issu du concassage d'une roche massive ou détritique.

Dans la formulation des BUHP, le sable est choisi pour sa composition minérale (teneur en  $\text{SiO}_2 > 98 \%$ ), la taille moyenne de ses grains (généralement entre 400 et 600  $\mu\text{m}$ ) et leur forme (forme arrondie) [Richard et al, 1995]. Ce doit être un matériau de grande dureté qui permet d'obtenir d'excellentes interfaces pâtes/granulats. La forme des grains arrondie présente une absorption d'eau faible et favorise la rhéologie du béton [De Larrard et al, 1999].

Dans la pratique actuelle, il est plus prudent de se borner à l'utilisation de sable dont 12 % de fines sont inférieurs à 0,08 mm tels qu'on peut les employer pour des formules de béton classique [AFNOR NF EN 12620, 2003], [Neville, 1995].

Ainsi, le sable de plage (lavé pour éviter les ions chlore) et le sable de dune, de nature siliceuse et dont la taille des grains est comprise entre 0,063 et 2 mm, semblent parfaitement adaptés à la fabrication des BUHP.

# Chapitre I : Généralités sur les bétons à ultra haute performance

## I.4.3 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 métakaolin (Tafraoui, 2009). Les additions ont trois fonctions essentielles dans la matrice cimentaire du BFUP : par effet filler, elles comblent les vides entre les grains de ciment, les fibres et le sable ; elles améliorent la rhéologie du mélange et enfin, elles forment des produits d'hydratation par leur effet pouzzolanique.

### I.4.3.1 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 ( $\text{SiO}_2$ ) 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). Leur couleur est le plus souvent gris clair [Khalid, 2010]. Le dosage en fumée de silice utilisé en substitution partielle de ciment dans la fabrication des BFUP est de 10 à 30% par rapport à la masse de ciment. (Parant, 2003) et (Wille et al. 2012) ont montré que le pourcentage optimal de substitution en masse de ciment est de 25%.

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

Composition chimique	(%)	Couleur	Bleu gris
$\text{SiO}_2$	93	Densité	2,22
$\text{Al}_2\text{O}_3$	0,59	Masse volumique ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	280 (en vrac)
FeO	0,70	Fuseau granulométrique ( $\mu\text{m}$ )	0,04 i 0,28
MgO	0,52	Diamètre moyen ( $\mu\text{m}$ )	0,18
CaO	0,51	Surface spécifique théorique	20 000
$\text{Na}_2\text{O}$	0,17	( $\text{m}^2/\text{kg}$ )	17 500
$\text{K}_2\text{O}$	0,59	Surface spécifique, B. E.T. ( $\text{m}^2/\text{kg}$ )	
S	0,16		
Perte au feu	2,20		



# Chapitre I : Généralités sur les bétons à ultra haute performance

## I.4.3.1.1 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]

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

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 métakaolins, la phonolithe, la cendre volante pulvérisée ou les micro-fillers calcaires [Rougeau, 2004].

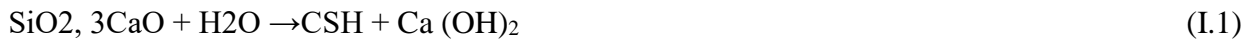
### a. Mode d'action

La fumée de silice est utilisée dans les bétons pour améliorer leurs propriétés mécaniques et leur durabilité

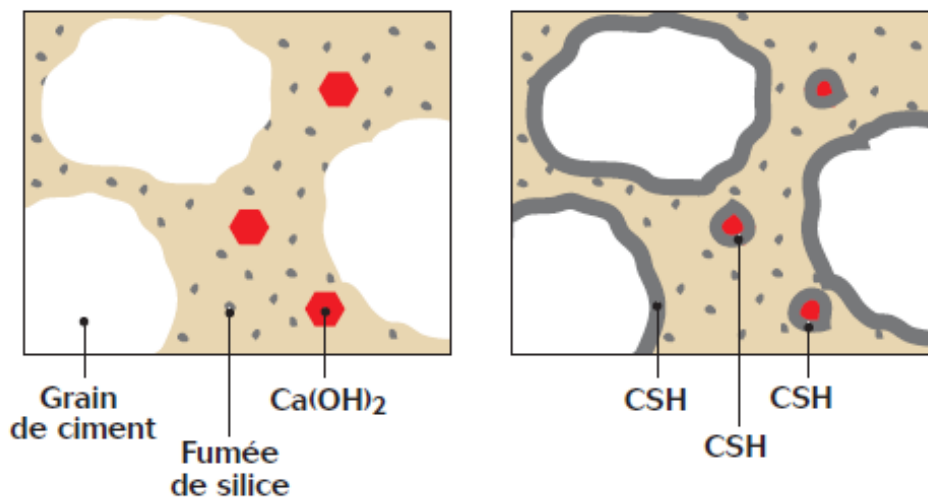
# Chapitre I : Généralités sur les bétons à ultra haute performance

## a.1 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  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  produits durant l'hydratation du béton :



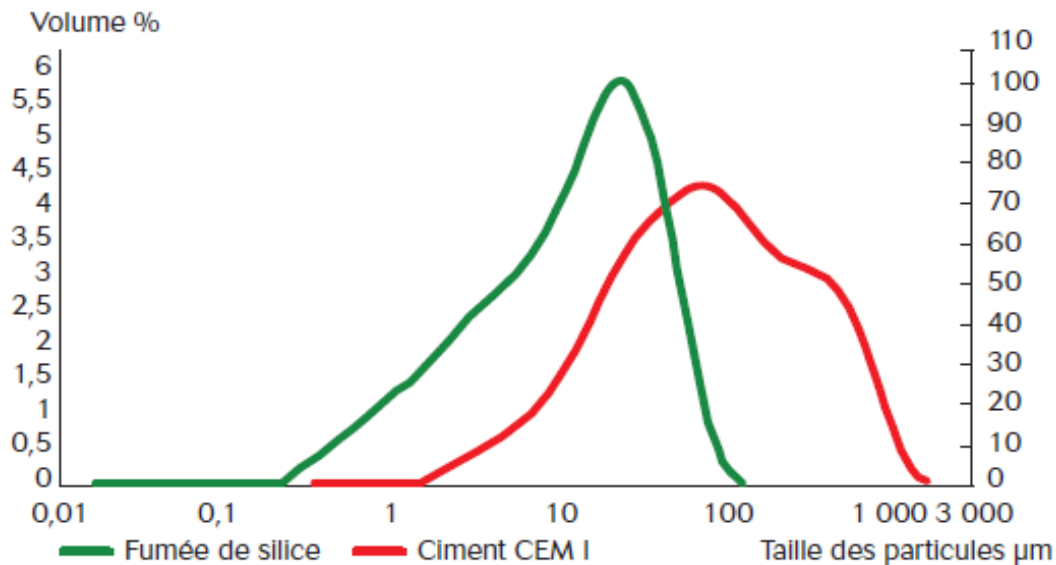
Sa haute réactivité augmente l'homogénéité du mélange et réduit la porosité et la perméabilité du béton (figure I.1).



**Figure I.1** : Principe de la pouzzolanique [Patricia Bredy Tuffe et al ,2011].

## a.2 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.2).



**Figure I.2 :** Courbe granulométrique laser comparative ciment /fumée de silice  
[Patricia Bredy Tuffe et al ,2011]

### **b. Avantages de la fumée de silice**

#### **b.1 Performance à l'état frais**

##### ✓ **Maniabilité**

Les bétons formulés avec la fumée de silice ont une rhéologie différente des bétons courants. Ils sont thixotropes et ont donc un comportement visqueux et compact au repos et deviennent fluides dès qu'on leur applique une pression. Cette particularité offre en particulier les avantages suivants :

- Moins de ségrégation (nids de cailloux et ressuage) ;
- Transfert par pompage sous pression possible sur de grandes distances ;
- Projection sur des parois sans perte de produit dans le cas de béton

#### **b.2 Performances à l'état durci**

##### ✓ **Performances mécaniques**

La fumée de silice permet d'optimiser l'empilement granulaire et ainsi d'améliorer l'adhésion des différents constituants d'un béton, ce qui a un impact direct sur ses propriétés mécaniques, en particulier sur les résistances mécaniques en compression. Ces dernières sont

## Chapitre I : Généralités sur les bétons à ultra haute performance

directement liées à la quantité de fumée de silice ajoutée au ciment. L'utilisation de fumée de silice pour un béton de même qualité permet d'augmenter la proportion de granulats grossiers par rapport aux granulats fins.

### ✓ 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 (figure I.3).

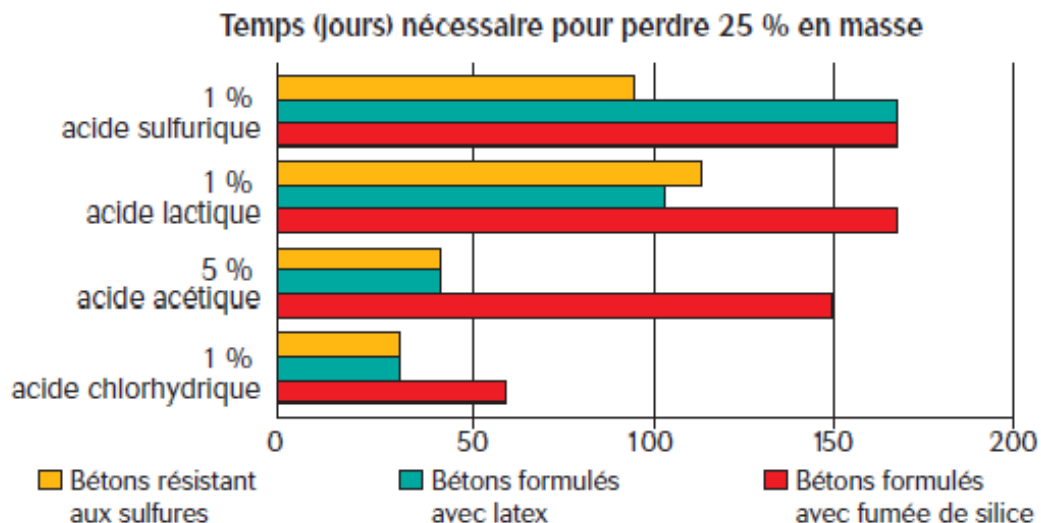


Figure I.3: Résistance des bétons aux attaques chimiques [T.Patricia Bredy et al ,2011]

### I.4.3.2 Le laitier broyé

C'est un résidu minéral de la préparation de la fonte dans les hauts fourneaux à partir de minerai et du coke métallurgique [G.Dreux ,1995]. La fusion du minerai dans les hauts fourneaux provoque la séparation gravitaire de la fonte liquide (en partie inférieure) et un résidu surnageant, également liquide, appelé laitier en raison de sa couleur claire (lorsqu'il est à température ambiante) [F.Larrard, 2002]. Il sort du trou de coulée à une température, de l'ordre de 1500 C° [G.Dreux,

## Chapitre I : Généralités sur les bétons à ultra haute performance

---

1995]. À sa sortie du haut fourneau, il est trempé brutalement par déversement dans des bassins remplis d'eau où il se disperse en grains poreux de diamètre 1 à 5 mm : c'est le laitier granulé.

Il se trouve donc dans un état thermodynamiquement instable (vitreux) et manifeste des propriétés hydrauliques [A.Brahma, 1992]. Sans la trempe, les minéraux cristallisent et deviennent presque insolubles dans l'eau [F.Larrard, 2002]. Le laitier contient de la chaux (45 à 50 %), de la silice (25 à 30 %), de l'alumine (15 à 20%) et 10% environ de magnésie oxydes divers et manganèse [G.Dreux, 1995]. Ce laitier constitue par lui-même un véritable liant. Toutefois la prise est trop lente ; aussi pour remédier à cet inconvénient on lui ajoute une base en guise de catalyseur (ex : chaux). Or le ciment Portland libère de la chaux en s'hydratant ce qui montre bien l'intérêt de l'utilisation du laitier comme ajout au ciment Portland [A.Brahma, 1992].

La norme ASTM C 989 classe le laitier selon une échelle ascendante de degrés de réactivité (degrés 80, 100 ou 120). Le degré d'un LGHF est fonction de son indice d'activité, soit le rapport entre la résistance à la compression de cubes de mortier composés d'un mélange à 50 % de LGHF et celle de cubes de mortier incorporant un ciment de référence [ASTM C989- 04]. La pâte de ciment au laitier durcie présente une moindre quantité de chaux (portlandite), par rapport à celle issue de l'hydratation du ciment Portland seul [F.Larrard, 2002]. Son hydratation, qui se traduit par le développement de résistances mécaniques est moins rapide que celle du Portland surtout dans sa période initiale. Elle dégage parallèlement moins de chaleur et retient moins bien l'eau de gâchage [G.Dreux, 1995].

Le laitier de haut fourneau est composé essentiellement de quatre composants : Chaux (CaO), magnésie (MgO), silice (SiO<sub>2</sub>) et alumine (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), selon le mode de refroidissement adopté, on distingue deux formes minéralogiques différentes de laitier :

- **le laitier vitrifié** (granulé) obtenu par refroidissement rapide par trempe : possède une structure vitreuse riche en énergie lui conférant une hydraulicité latente (figure I.4).

- **le laitier cristallisé** obtenu par refroidissement lent : lui à une structure minéralogique cristalline stable et son hydraulicité si elle existe n'est que modeste. Son utilisation découle de ses

## Chapitre I : Généralités sur les bétons à ultra haute performance

propriétés, c'est un granulat. Cette différence, du point de vue cristallographique et chimique conditionne les propriétés des matériaux obtenus et donc leur utilisation. Ce refroidissement rapide ou trempe, est obtenu par granulation ou boulettage. Ce fût en 1853 que commença la granulation du laitier de haut fourneau, afin de produire un matériel facile à transporter. On formait un sable plus ou moins vitreux [L. Alexandre ,1988].



**Figure I.4 :** Laitier cristallisé et laitier vitrifié (granulé) de haut fourneau



**Figure I.5 :** Granulation du laitier de haut fourneau d'El hadjar

### a. Les facteurs d'activation

#### ✓ La finesse

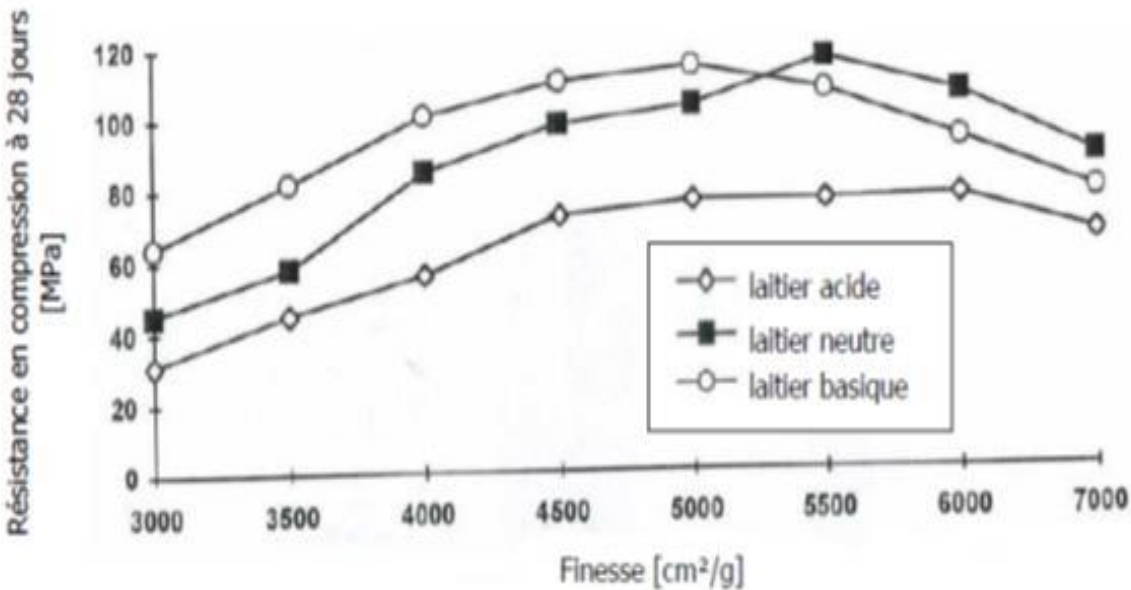
La surface spécifique du laitier est un facteur influençant sa réactivité. L'effet est significatif seulement dans les trois premiers jours : plus la finesse du laitier est grande, plus la résistance à la compression augmente [A. Fernandez-Jimenez ,1999], [S. D Wang ,1994]. Avec un taux de gâchage égal et une maniabilité suffisante pour les différents laitiers testés, la Figure I.6 donne les résistances à 28 jours. L'optimum de finesse est compris entre 4500 et 6500  $\text{cm}^2/\text{g}$  pour les laitiers acides et neutres et entre 4000 et 5500  $\text{cm}^2/\text{g}$  pour les laitiers basiques [S. D Wang].

Malhotra et Metha précisent que les particules de laitier dont le diamètre est inférieur à 10  $\mu\text{m}$  contribuent au développement des résistances avant 28 jours, celles dont le diamètre est compris entre 10 et 45  $\mu\text{m}$  contribuent aux résistances ultérieures, les particules dont le diamètre est supérieur à 45  $\mu\text{m}$  présentent une faible réactivité. Mais il faut préciser que même si une plus

## Chapitre I : Généralités sur les bétons à ultra haute performance

grande finesse améliore la réactivité, elle entraîne aussi une plus grande consommation d'eau pour avoir des conditions de plasticité similaires, ce qui fait chuter les résistances finales.

De plus, l'influence de la surface spécifique sur les résistances mécaniques dépend de la nature de l'activateur alcalin : avec de la soude NaOH ou du carbonate de sodium  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ , l'augmentation de la surface spécifique de 450 à 900  $\text{m}^2/\text{kg}$  permet l'augmentation des résistances à 3 jours alors qu'avec une solution de silicate de sodium  $\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot n \text{H}_2\text{O} + \text{NaOH}$ , les résistances diminuent avec l'augmentation de la surface spécifique [S. D Wang ,1994].



**Figure I.6 :** Résistance en compression à 28 jours en fonction de la finesse du laitier (activé avec du silicate de sodium :  $\text{Na}_2\text{O} = 5.5\%$ ,  $M_s = 1$  ; sable/laitier = 2) [S. D Wang ,1994]

### ✓ La température de cure

Brough et Atkinson [Brough] ont étudié l'influence de la température de cure sur le développement des résistances de mortiers à base de laitier activé avec des silicates de sodium ("waterglass"  $\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{SiO}_2 \cdot m \text{H}_2\text{O}$ ). Lorsque la température de malaxage et de cure est seulement de  $5^\circ\text{C}$ , le laitier activé par des silicates de sodium voit le développement de sa résistance fortement retardé : le démoulage ne peut avoir lieu à un jour car l'échantillon est trop mou. Par contre à 28 jours, la résistance est correcte. L'élévation de la température à  $40^\circ\text{C}$  et à  $80^\circ\text{C}$  a un effet

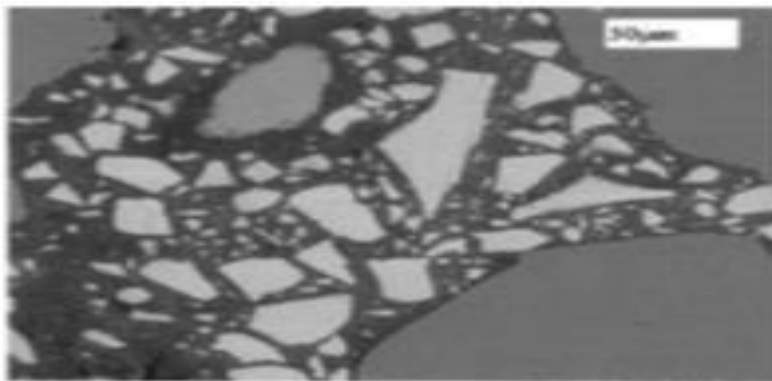
## Chapitre I : Généralités sur les bétons à ultra haute performance

---

stimulateur : l'accélération des résistances est très forte et les résistances à moyen terme sont nettement améliorées. Précisons qu'avec une température de 80°C, le développement des résistances est extrêmement rapide puisque dès 12 heures, la résistance atteint déjà 70 MPa, résistance similaire à la résistance obtenue par le mélange conservé à 20°C pendant 28 jours.

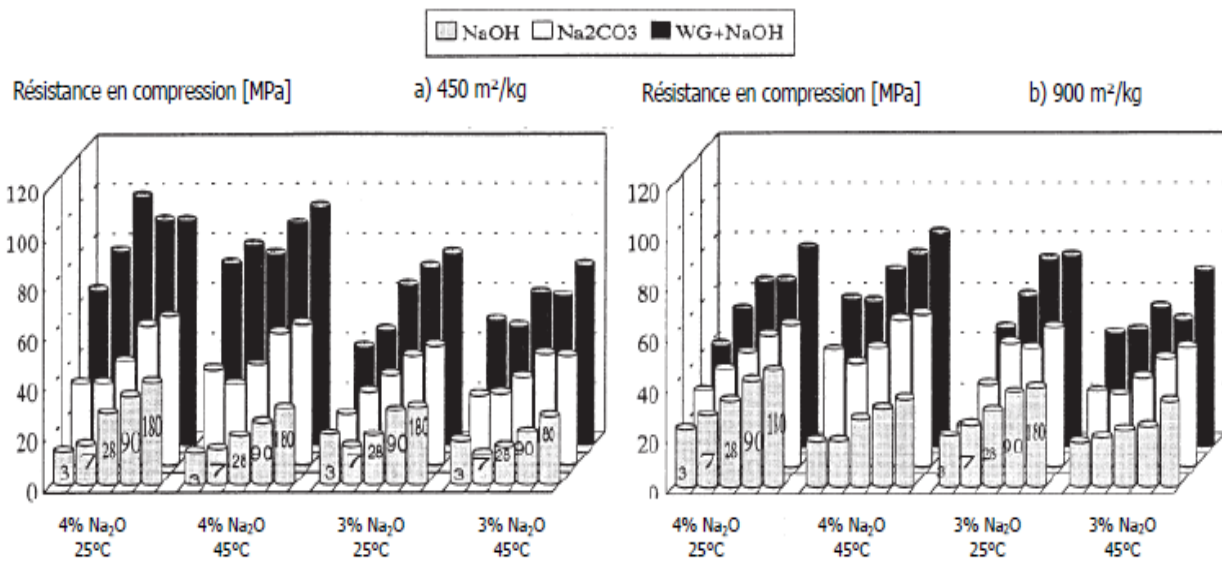
Les analyses des échantillons dont la cure est de 80°C indiquent que la microstructure à 1 jour est similaire à celle des échantillons conservés à 20°C à des échéances plus longues (1 mois à 1 an) (Figure I.7). La composition des hydrates est similaire : il y a formation dans les deux cas d'une phase hydrotalcite ( $Mg_6Al_2CO_3(OH)_{16} \cdot 4H_2O$ ) et d'un gel de C-S-H.

Fernández-Jiménez et al. [F. Jiménez 1999] ont précisé que l'augmentation de la température de cure (45°C) a des effets différents suivant le type d'activateur utilisé : les résistances au jeune âge sont améliorées par l'augmentation de la température avec des carbonates de sodium  $Na_2CO_3$  comme activateur, par contre, à tous les âges, les résistances sont moins bonnes avec de la soude NaOH ou des silicates de sodium  $Na_2SiO_3, nH_2O, NaOH$  comme activateurs lorsque la température augmente (Figure I.8).



**Figure I.7 :** Observation au MEB d'une pâte de ciment au laitier AAS conservée 4heures à température ambiante, puis 12 heures à 80°C [A. R. Brough, 2002]





**Figure I.8.** Résistance à la compression à 3 jours, 7 jours, 28 jours, 90 jours, 180 jours de ciments au laitier à 25°C et 45°C a) laitier de finesse 450 m<sup>2</sup>/kg ; b) laitier de finesse 900 m<sup>2</sup>/kg [A. Fernandez-Jiménez ,1999]

### I .4.3.2.1 Effet de laitier broyé

Le Tableau I.3 dresse un récapitulatif de l'influence du laitier sur les propriétés des matériaux cimentaires :

**Tableau I.3 :** Influence du laitier sur les propriétés des matériaux cimentaires [Olga, 1996]

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Affinement de la structure poreuse</li> <li>• Réduction de la chaleur d'hydratation</li> <li>• Diminution de la perméabilité</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Retard de prise</li> <li>• Augmentation du retrait endogène</li> </ul>

### I .4.3.3 Le quartz broyé

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 (SiO<sub>2</sub> > 98 %) généralement utilisé dans la fabrication du verre. Selon (Richard et Cheyrezy, 1995), le quartz broyé est indispensable pour les traitements

## Chapitre I : Généralités sur les bétons à ultra haute performance

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  $\mu\text{m}$ . 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).

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.

### I.4.4 Les super-plastifiants

Compte tenu des très faibles rapports Eau/Liant des BFUP, la quantité d'eau est insuffisante pour obtenir une maniabilité correcte permettant une bonne mise en œuvre de ces bétons. L'emploi d'adjuvants de la famille des superplastifiants, généralement hauts réducteurs d'eau, est donc indispensable pour fluidifier le mélange, mais aussi pour disperser les grains.

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

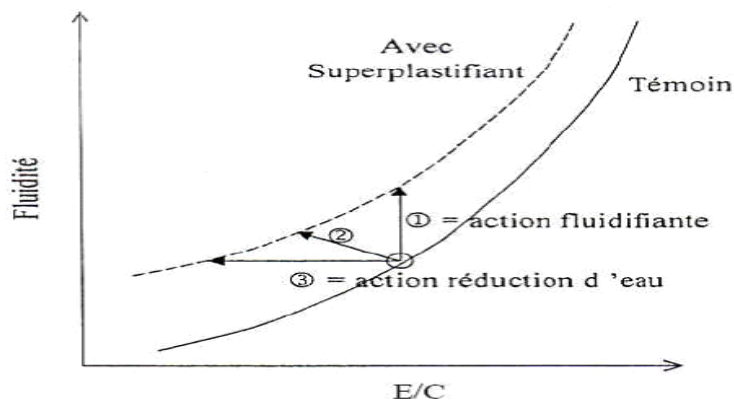


Figure I. 9. L'action «réduction d'eau» ou «l'effet fluidification» [Dakhmouche, 2009]

## **Chapitre I : Généralités sur les bétons à ultra haute performance**

---

### **I.4.4.1 Influence du dosage en super plastifiant**

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

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

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

Une plage de pourcentages très élevés en adjuvant. Les valeurs sont supérieures à 3 ou à 4% d'extrait sec. Dans cette plage, le maintien de la maniabilité est très faible [Dakhmouche, 2009].

### **I.4.5 Fibres**

Les fibres sont ajoutées aux bétons pour augmenter la résistance à la traction et apporter un caractère ductile aux bétons fragiles par nature. En général, les fibres métalliques, synthétiques, de verre ou végétales peuvent être incorporées dans le béton. En ce qui concerne les BFUP, elles peuvent être de nature métallique ou organique. Certaines fibres organiques permettent également d'augmenter la résistance au feu des BFUP [Chefdebien, 2008 ;Missemer, 2011 ;Pimienta, 2009].

Généralement, l'impact des fibres sur le comportement à l'état frais des bétons est de nature à augmenter le dosage en liant et en adjuvant pour contrecarrer la perte de fluidité [Martinie, 2010]. Le choix se fait en fonction du type d'application visée. En effet, la prénorme matériaux BFUP (PR NF P18-470) préconise l'utilisation des fibres métalliques pour les BFUP structuraux, et les

## **Chapitre I : Généralités sur les bétons à ultra haute performance**

---

fibres synthétiques dans le cas de BFUP non structuraux. Par rapport à nos objectifs de formuler des BFUP structuraux, nous traitons ici uniquement le cas des fibres métalliques.

Les géométries des fibres, très variables doivent permettre une bonne adhérence avec la matrice cimentaire, de manière à améliorer leur ancrage, et ainsi le comportement post-fissuration et la ductilité du BFUP. Les fibres métalliques ont généralement une forme cylindrique et droite. La longueur des fibres varie entre 3 et 20 mm, avec un diamètre entre 30 et 250  $\mu\text{m}$  (Rougeau et al., 2000). Les fibres de module d'élasticité élevé, droites et lisses de 13 mm de longueur et de 0,2 mm de diamètre sont souvent utilisées. Mais il existe également celles à crochets et torsadées qui assurent un meilleur ancrage et une dissipation de l'énergie de fissuration plus importante grâce aux frottements à l'interface fibres-matrice (Chanvillard et Aïtcin, 1996), (Wille et al., 2014).

Cependant, l'utilisation de ces deux derniers types de fibres peut favoriser la formation d'oursins (pelotes de fibres) durant le malaxage entraînant une répartition non homogène dans le béton (Wille et al., 2012). Concernant le dosage volumique en fibres des BFUP, il peut varier de 2 à 11%, ce qui correspond à environ 160 à 856  $\text{kg}/\text{m}^3$ . D'après (Yang et al. 2009), un dosage en fibres de 2% volumique procure un rapport performances mécaniques/prix optimal. Selon des recommandations récentes (AFGC 2013 et PR NF P18-470), la teneur volumique minimale en fibres garantissant la non-fragilité du matériau doit être équivalente ou supérieure à 2%.

L'incorporation des fibres dans la matrice cimentaire, de par leur géométrie et leur dosage, peut avoir des impacts négatifs sur le comportement à l'état frais et la mise en œuvre, et par conséquent, altérer les performances à l'état durci. Le rapport longueur/diamètre des fibres ( $L_t/d_f$ ) joue ainsi un rôle important dans la maniabilité des BFUP. (Rossi et al., 1995) a montré que, pour un dosage en fibres donné, plus ce rapport est grand et plus la maniabilité est mauvaise, avec un risque accru de formation de pelotes de fibres au sein de la matrice. Ainsi, la maniabilité du mélange est diminuée lorsque le rapport longueur/diamètre augmente. Si l'on synthétise ces principes, il convient, pour maintenir une maniabilité correcte, d'utiliser soit un dosage important de fibres courtes, soit un faible dosage en fibres longues.

## **Chapitre I : Généralités sur les bétons à ultra haute performance**

---

### **I.4.6 Rapport Eau/Liant**

Pour ce qui concerne la teneur en eau, les BFUP sont obtenus en choisissant un faible rapport Eau/Liant, inférieur à 0,20, dans le but de réduire au maximum la porosité du matériau et la connectivité des pores résiduels [Mehta, 1980].

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

### **I.5 Propriétés Constructives Des BPR**

#### **I.5.1 Résistance à la compression**

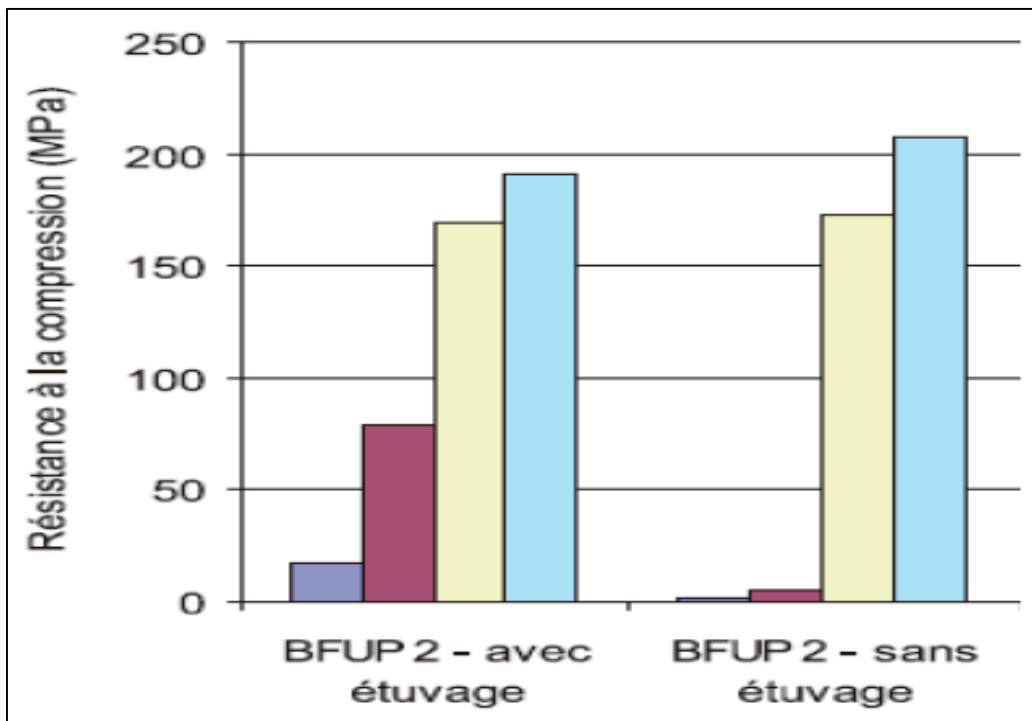
Une des propriétés exceptionnelles des BFUP est leur résistance caractéristique en compression à 28 jours, généralement supérieure à 150 MPa, et pouvant aller jusqu'à 250 MPa (AFGC, 2013). L'optimisation du squelette granulaire permet de diminuer le volume des vides et par conséquent d'augmenter la résistance 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%.

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.10). Le démoulage des éprouvettes de dimensions 40 x 40 x 160 mm<sup>3</sup> a eu lieu respectivement à 5 heures, 8 heures, et 20 heures.

## Chapitre I : Généralités sur les bétons à ultra haute performance

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.10** : 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]

Pour une comparaison adéquate des résultats, l'indication de l'âge équivalent aurait été utile. Même si cela avait été le cas, il aurait fallu poser la question du mode de calcul de l'âge équivalent pour la période de temps qui suit un traitement thermique et pendant laquelle un béton est conservé à 20 °C. En toute rigueur, comme l'évolution du degré d'avancement des réactions d'hydratation semble ralentie pour les bétons traités thermiquement une fois le traitement thermique terminé, le calcul de l'âge équivalent devrait lui aussi prendre en compte ce

## Chapitre I : Généralités sur les bétons à ultra haute performance

---

ralentissement en considérant par exemple une période de temps équivalente inférieure à une période de temps réelle même si dans les deux cas, le béton est conservé à 20 °C une fois le traitement thermique terminé. La détermination de l'âge équivalent basée sur l'évolution de la température et l'énergie d'activation est plutôt adaptée à de faibles degrés d'hydratation.

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

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

Caractéristiques	BPR 200	BPR 800
Traitement thermique	90 °C	Pressage 60 MPa (90°C + 250°C)
Résistance à la compression (MPa)	190-200	420-520
Module d'élasticité E (GPa)	60-66	60-74
Coefficient de Poisson $\nu$	0,22-0,24	0,28
Limite d'élasticité linéaire (% de la résistance ultime)	60%	85%

Les Figures I.11 et I.12 présentent respectivement les comportements mécaniques en compression des BPR200 et BPR800.

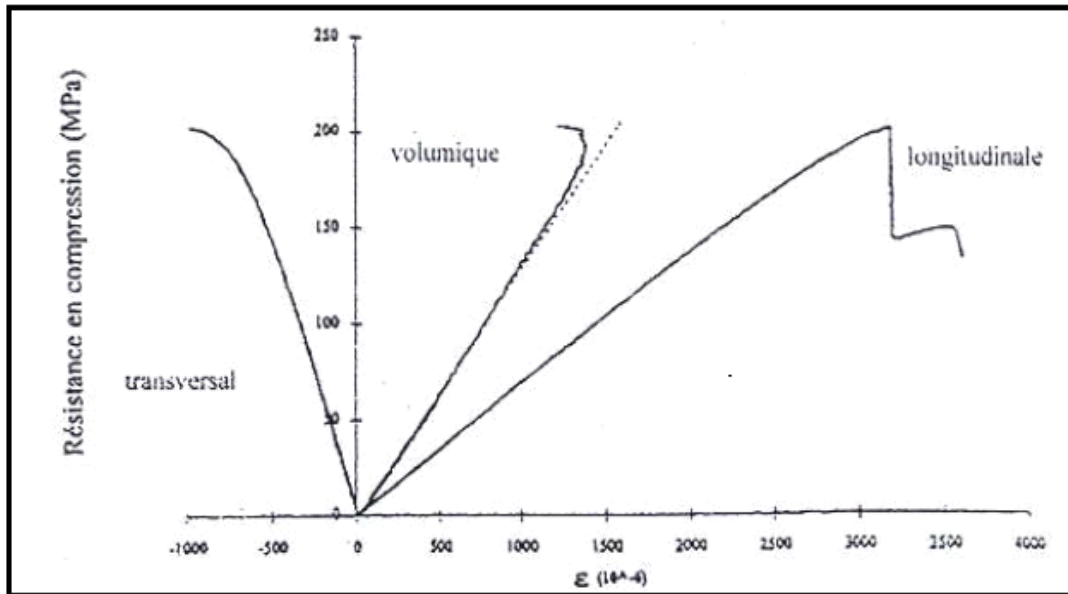


Figure I.11: courbe contrainte-déformation du BPR 200 en compression (Dugat\_ ,1996).

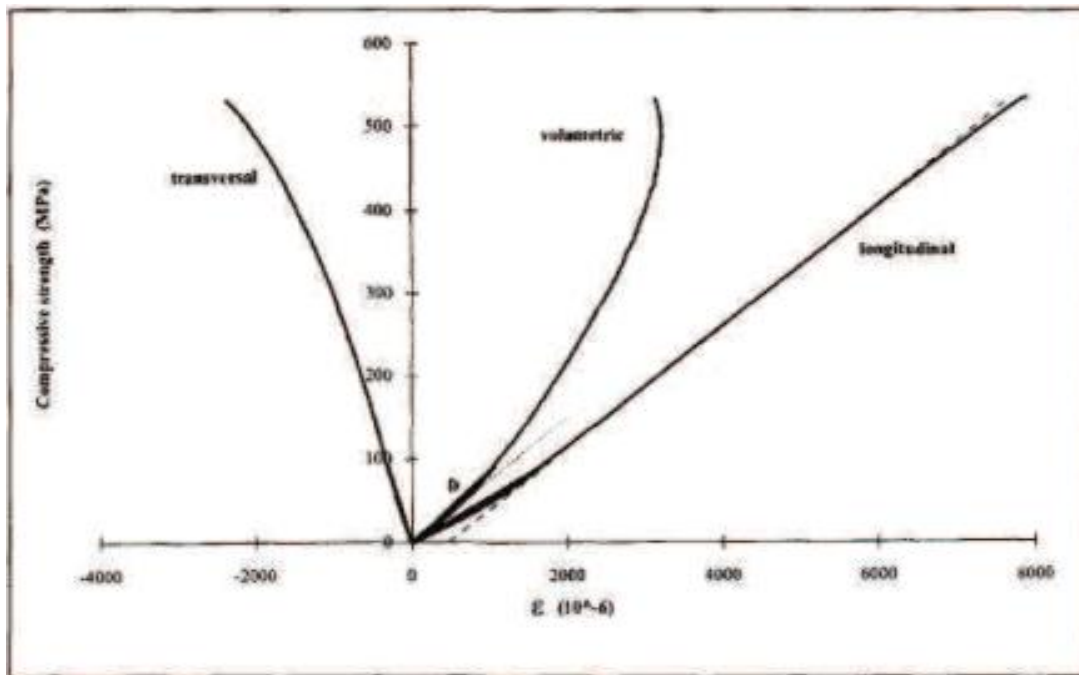


Figure I.12 : Courbe contrainte déformation du BPR800 en compression (Dugat\_1996).



## Chapitre I : Généralités sur les bétons à ultra haute performance

Nous présentons ensuite dans le Tableau I.5 une synthèse des valeurs de résistance moyenne en compression à 28 jours. Dans ce tableau, sont précisés les paramètres les plus influents relatifs à la formulation, le rapport E/C, le dosage en fibres, et les conditions d'ambiance, à savoir la cure et le traitement thermique. Il est important de noter que certaines valeurs de résistance moyenne en compression à 28 jours présentées sont inférieures à 150 MPa, (AFGC, 2002, 2013).

**Tableau 1.5** : Synthèse des valeurs de résistance moyenne en compression à 28 jours en fonction de la cure appliquée, de la teneur en fibres métalliques et du rapport E/C

Référence	Cure/TT	Teneur en fibres (%)	E/C	fcm28 (MPa)
(Richard et Cheyrezy, 1995)	20°C	-	-	170
	90°C			230
(Collepari et al., 1997)	20°C/95%HR	2,5	0,21-0,29	160-180
	90°C/95%HR			190-210
	160°C/95%HR			
(Kamen, 2007)	20°C/95%HR	9	0.14	255
	30°C			265
	40°C			268
(Chanvillard et Rigaud, 2003)	90°C/95%HR	2	-	160-240
(Jungwirth et Muttoni, 2004)	20°C/95%HR	2.5	-	199
(Boulay et al., 2004)	20°C/95%HR	11	-	200
(Markovic, 2006)	20°C/95%HR	1	0,2 (E/L)	120
		2		127
		4		132
(Farhat et al., 2007)	-	6	0.22	200
(Graybeal, 2007)	20°C/30%-50%HR	2	0.15	119
	90°C/95%HR			200
(Charron et al., 2008)	20°C/95%HR	6	0.16	168
(Tafraoui et al., 2009)	20°C/95%HR	2	0.27	98-192
	Etuve 90°C			133-204
	Etuve 150°C			141-234

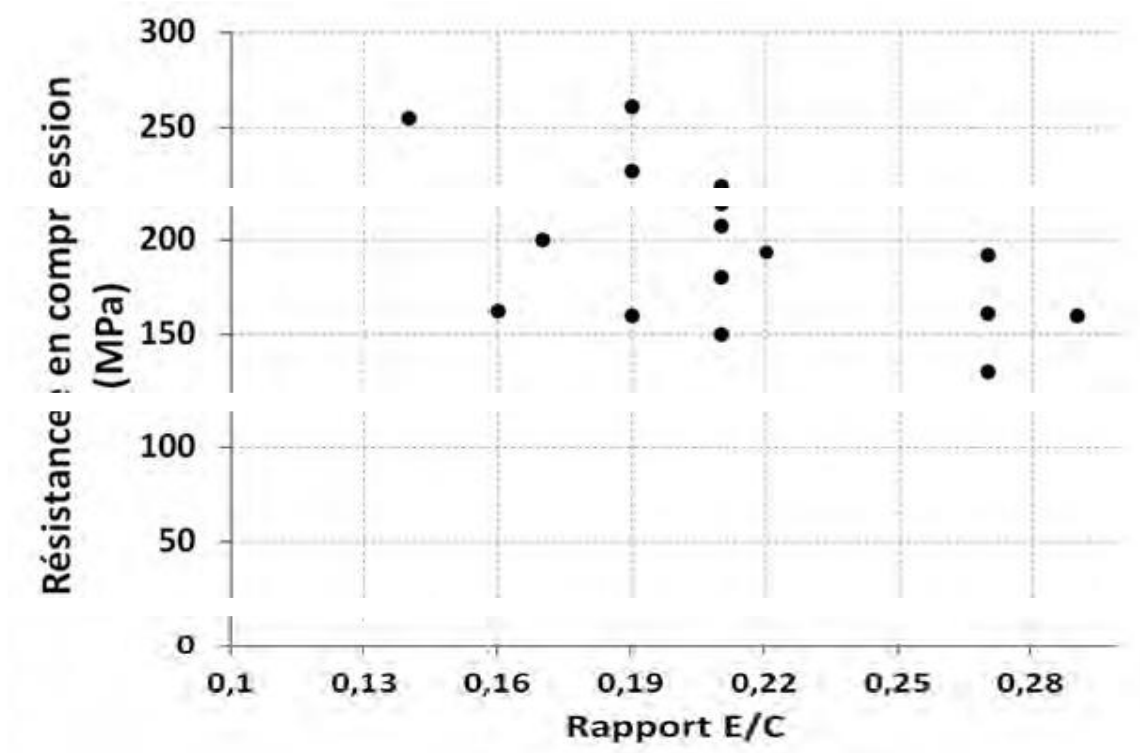
## Chapitre I : Généralités sur les bétons à ultra haute performance

(Yang et al., 2009)	20°C/95%HR	2	0.27	115-130
	90°C/95%HR			150-180
(Toledo Filho et al.,2012)	20°C/95%HR	2	0.16	162
(Francisco, 2012)	50°C/95%HR	2	0.2	122
(Corinaldesi et Moriconi, 2012)	20°C/95%HR	2,5	0,19-0,21	150-160
(Graybeal et al., 2012)	20°C/30%-50%HR	2	-	192
		2.5		213
	90°C/95%HR	2		212
		2.5		220
(Wille et al., 2012)	20°C/95%HR	0	0,22-0,18	194-246
		1.5	0,21	207
		2	0,19	227
		2.5	0,20-0,21	213-219
		3	0,19	261

### I.5.1.1 Influence du rapport E/C

La réduction du rapport E/C est un des principes de formulation des BFUP pour atteindre des résistances mécaniques élevées. Généralement, ce rapport est autour de 0,2 pour les BFUP.

La Figure I.13 représente la relation entre la résistance moyenne en compression et le rapport E/C des BFUP. Les valeurs présentées sont obtenues pour les BFUP sans traitement thermique.

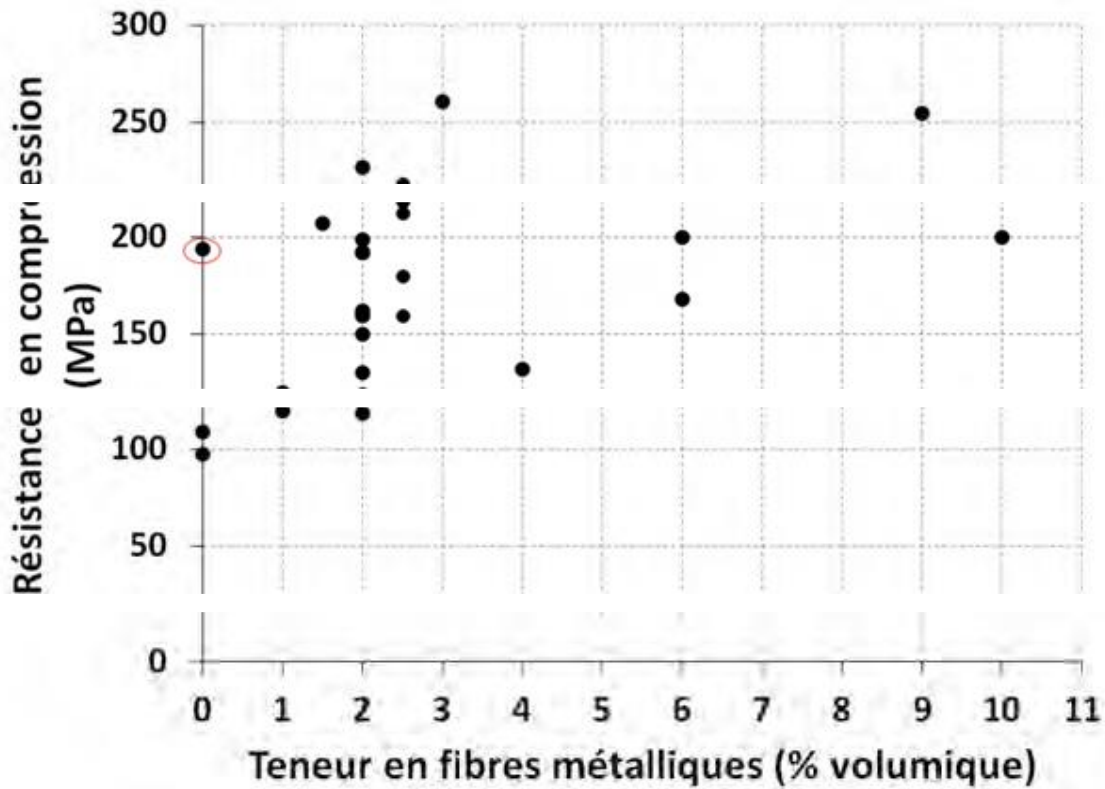


**Figure I.13** : Influence du rapport E/C sur la résistance moyenne en compression d'après les données bibliographiques du Tableau 1.5

Nous pouvons constater une tendance générale d'augmentation des résistances en compression lorsque le rapport E/C diminue. Cependant, à rapport E/C égal à 0,27, les valeurs de résistance varient de 130 MPa (Yang et al., 2009) à 192 MPa (Tafroui et al., 2009), et des variations semblables peuvent être observées pour des valeurs de rapport E/C de 0,19 et de 0,21. Ceci signifie que le rapport E/C est un paramètre important, mais pas le seul à impacter la résistance en compression (Wille et al., 2011).

### I.5.1.2 Influence de la teneur en fibres

Globalement, la teneur en fibres influe peu sur la résistance en compression, sauf quand celle-ci dépasse un dosage volumique de 2% (Behloul, 1996). La Figure I.14 présente les valeurs de résistance moyenne en compression à 28 jours en fonction de différentes teneurs en fibres métalliques.



**Figure I.14** : Résistances en compression en fonction de la teneur en fibres métalliques d'après les données bibliographiques du Tableau 1.5

Sur cette figure, nous pouvons constater la tendance observée par (Behloul, 1996), qui a montré que l'incorporation des fibres dans les BUHP entraîne une augmentation de 5% à 10% de la résistance en compression lorsque le dosage en fibres atteint 4% volumique. (Markovic, 2006) a aussi montré une amélioration de 9% de la résistance en compression lorsque le taux d'incorporation de fibres passe de 1 à 4% volumique. Les fibres métalliques peuvent être incorporées dans la matrice cimentaire en quantité importante jusqu'à 10% volumique comme dans les BFUP de la gamme CEMTEC, sans provoquer une amélioration substantielle de la résistance en compression.

Sur la base de ces données, nous pouvons constater qu'une majorité d'études sont réalisées avec des dosages volumiques en fibres de 2 ou 2,5%, avec des résistances en compression variant entre 119 MPa et 261 MPa. Ces dosages sont considérés comme un bon compromis entre les performances mécaniques recherchées et le prix. Des récentes études (Wille et al., 2011) (Wille et

## **Chapitre I : Généralités sur les bétons à ultra haute performance**

---

al., 2012), (Wille et al., 2014) ont montré qu'il est possible d'obtenir une résistance en compression de 180 MPa sans ajout de fibres par amélioration de la compacité du mélange.

### **I.5.1.3 Impact d'un traitement thermique sur la résistance en compression**

Les différents types de cure à appliquer au BFUP : soit pour assurer les performances recherchées à 28 jours dans le cas d'une cure humide à 20°C ; soit pour accélérer les évolutions des résistances dans le cas d'un traitement thermique de type I ; soit pour accélérer les réactions d'hydratation mais surtout pour former de nouveaux hydrates qui permettent d'accroître davantage la résistance mécanique dans le cas d'un traitement thermique de type II.

La tendance à l'augmentation de la résistance en compression des BFUP avec un traitement thermique de type II est généralement observée dans de nombreuses études (Richard et Cheyrezy, 1995), (Collepari et al., 1997), (Graybeal, 2007), (Yang et al., 2009), et (Tafraoui et al., 2009). Dans ces études, des augmentations de l'ordre de 12 à 40% ont été notées par rapport aux mêmes formulations sans traitement thermique. En revanche, (Collepari et al., 1997), ont obtenu des résistances en compression quasiment équivalentes entre la cure à 20°C et celle à 90°C des BPR modifiés où le quartz broyé n'était pas présent.

Ceci montre que l'efficacité du traitement thermique varie en fonction de la composition du BFUP, en particulier l'utilisation ou non du quartz broyé qui modifie le rapport C/S et les hydrates formés.

Le traitement thermique à température modérée, entre 30°C et 50°C, ne modifie pas la microstructure, mais permet d'accélérer la prise. Ceci a été montré par (Kamen, 2007), et (Francisco, 2012), qui ont constaté une légère augmentation de la résistance en compression sur des éprouvettes ayant subi un traitement thermique de type I par comparaison avec celles obtenues sur des éprouvettes en cure humide à 20°C. Ce type de traitement thermique peut être un bon compromis pour garantir les résistances au jeune âge des pièces préfabriquées.

En ce qui concerne la cure à 20°C, la résistance en compression obtenue varie entre 113 MPa et 255 MPa. La recherche des résistances mécaniques élevées sans utilisation de traitement

## **Chapitre I : Généralités sur les bétons à ultra haute performance**

---

thermique pour limiter la consommation énergétique et le coût font l'objet de nombreuses études récentes (Toledo Filho et al., 2012), (Corinaldesi et Moriconi, 2012), et (Wille et al., 2012) qui se concentrent sur l'optimisation de la compacité du squelette granulaire du mélange. Des valeurs de résistance en compression de plus de 200 MPa ont été atteintes dans l'étude de (Wille et al., 2012), grâce à l'optimisation de la compacité du mélange.

### **I.5.2 Comportement en traction**

Une caractéristique remarquable des BFUP est leur résistance en traction dont la valeur minimale de 6 MPa d'après la prénorme (PR NF P18-470) est largement supérieure à celle des bétons ordinaires qui est de l'ordre de 3 MPa. Cette propriété est acquise grâce à l'optimisation de la compacité de la matrice et à l'ajout de fibres. L'incorporation de fibres dans la matrice cimentaire permet également d'améliorer fortement le comportement postfissuration.

Les fibres utilisées sont le plus souvent métalliques. Le dosage et les dimensions de fibres sont optimisés vis-à-vis du comportement en traction recherché et des conditions de mise en oeuvre, avec ou sans vibration. Il est également possible de combiner des fibres de dimensions variables tel que dans le CEMTEC multiscale afin d'améliorer la résistance à la traction et la ductilité. En effet, les microfibrilles (fibres courtes) retardent le développement des microfissures tandis que les macrofibres (fibres longues) peuvent conférer au matériau une grande ductilité (Rossi et al., 1987).

### **I.5.3 Résistance en 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. L'addition de fibres entraîne une augmentation significative des résistances et une augmentation de la ductilité. Le comportement post-pic de rupture est fortement amélioré, pour les BUHP fibrés sans pressage avec une résistance à la flexion de l'ordre de 60 MPa. Pour une même teneur en fibres et un même type de fibres, Richard et al [Richard et al, 1995] montre que le BPR200 présente une résistance à la flexion de 30 à 50 MPa tandis que le BPR800 avec pressage atteint des résistances de 45 MPa à 140 MPa.

# Chapitre I : Généralités sur les bétons à ultra haute performance

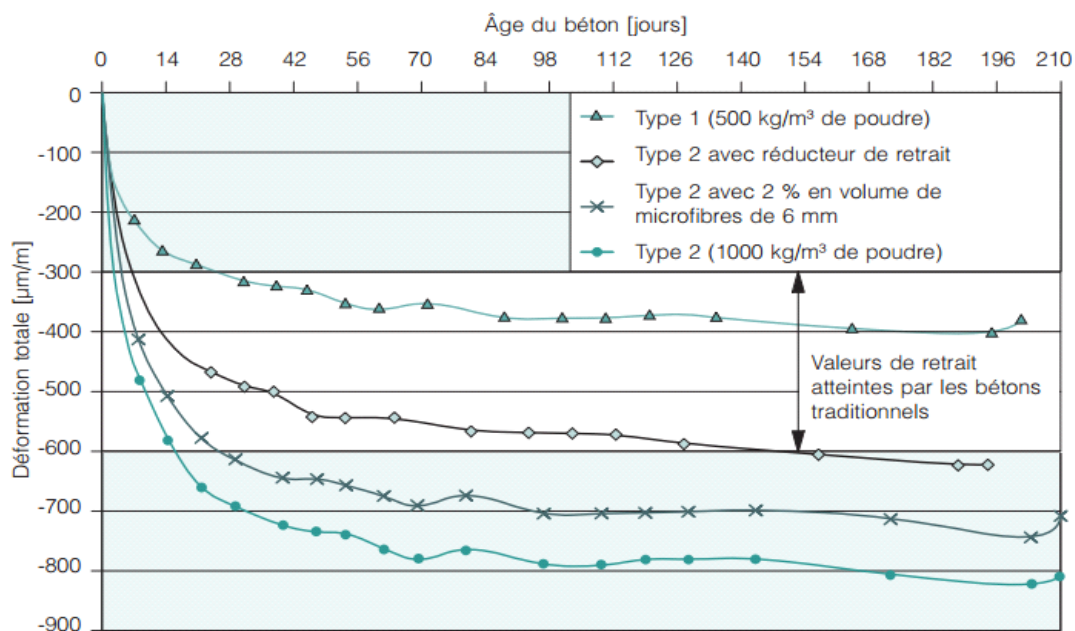
## I.5.4 Rigidité

La connaissance du module d'élasticité du béton revête une grande importance pour un concepteur quand il lui faut calculer des déformations de ses différents éléments structuraux. Il est difficile de mesurer, directement le module élastique d'un béton, car il faut enregistrer à la fois la charge appliquée et la déformation générale par cette charge pour cela, les chercheurs ont essayé de trouver des relations empiriques permettant de calculer le module élastique d'un béton en utilisant un théorème ou en utilisant une formule empirique qui relie ce module élastique à la résistance à la compression.

## I.5.5 Le retrait

### I.5.5.1 Comportement du béton vis-à-vis du retrait

Comme pour beaucoup d'autres bétons à très hautes performances, il importe de se pencher sur le comportement au retrait. La teneur élevée en poudre du BUHP, son facteur E/C très faible et l'absence de gros granulats peuvent en effet générer des valeurs de retrait total considérables. Par ailleurs, comme pour les autres types de béton à très hautes performances, l'équilibre entre le retrait de séchage et le retrait endogène n'est pas constant [Cauberg, 2009].



**Figure I.15** : Résultats des mesures de retrait sur prismes (7 x 7 x 28) cm pour quatre types de BUHP [Cauberg, 2009].

## **Chapitre I : Généralités sur les bétons à ultra haute performance**

---

Le retrait sur des prismes de 7 x 7 x 28 cm, à une température de 20 °C et une humidité relative de 65 %. Quoique ces valeurs de retrait soient bien plus élevées que pour les bétons traditionnels, celles-ci sont plus faibles que prévu, pour des volumes de poudre aussi élevés. Après six mois, le mélange de référence de type 2 affichait ainsi un retrait de 800 µm/m, alors que les bétons traditionnels ont enregistré des valeurs oscillant entre 300 et 600 µm/m. Pour le mélange de type 1 ( $D_{\max}$  8 mm et 500 kg/m<sup>3</sup> de poudre), les valeurs de retrait enregistrées étaient encore plus basses que pour le type 2.

### **I.5.5.1.1 Définition**

Le retrait du béton peut être défini comme la déformation d'un élément de béton libre de toute sollicitation mécanique extérieure dans une ambiance thermodynamique constante, ainsi on distingue le retrait dans une ambiance sèche et le gonflement dans une ambiance saturée. La prédiction de cette déformation est d'une très grande importance pour l'étude de la durabilité et de l'aptitude au fonctionnement à long terme des structures en béton. En effet, elles peuvent être à l'origine de la fissuration, de pertes de précontrainte, d'une redistribution des contraintes, et même, plus rarement, de la ruine de l'ouvrage. Cette variation dimensionnelle dépend de plusieurs paramètres tels que la composition du béton, la qualité de ses constituants, la taille des éléments ainsi que les conditions extérieures de conservation. On distingue cinq formes de retrait :

- Le retrait de séchage
- Le retrait plastique
- Le retrait endogène (ou retrait chimique)
- Le retrait thermique (ou contraction thermique)
- Le retrait de carbonatation.



## **Chapitre I : Généralités sur les bétons à ultra haute performance**

---

### **Le retrait de séchage**

[Aïtcin et coll. 1997] explique que le retrait de séchage est un phénomène de dessiccation localisé qui commence à se développer à la surface du béton par où s'évapore l'eau interne du béton. La cause essentielle du retrait de séchage est, évidemment, l'évaporation de l'eau contenue dans les capillaires de la pâte de ciment hydraté à partir des surfaces de béton exposées à l'air ambiant. L'évaporation se produit aussitôt que le degré hygrométrique de l'air ambiant, est inférieur à celui qui règne dans le réseau capillaire.

Les forces de tension développées dans les ménisques à l'intérieur du béton entraînent une contraction du béton. La valeur du retrait de séchage dépend de plusieurs facteurs. Il est possible de contrôler l'évaporation de l'eau contenue dans le béton frais en utilisant une méthode de cure adéquate (application d'un produit de cure, mise en place de jute humide).

### **Le retrait plastique**

D'origine exogène, il peut se développer à la surface du béton, dès la fin de sa mise en place, par dessiccation et il se manifeste alors avant et pendant la prise initiale du béton [Détriché, 1992]. Il est causé par une évaporation trop rapide de l'eau en surface qui ne peut pas être compensée par un apport d'eau provenant de la masse de béton sous la surface. Il provoque une forte contraction de la pâte qui fait fissurer la surface externe. Le retrait plastique est généralement associé à une technique de cure mal adaptée aux conditions climatiques.

### **Le retrait endogène**

Le retrait endogène est une contraction de la pâte de ciment hydraté occasionnée par le développement de la réaction d'hydratation. Ce type de retrait peut avoir deux origines. Une origine chimique, associée au retrait endogène interne (retrait chimique), et une origine physique, associée au retrait endogène externe (autodessiccation), qui sont toutes deux une conséquence de la diminution du volume absolu résultant de l'hydratation du ciment.

Dans les bétons de rapport  $E/L > 0,42$ , le retrait endogène est négligeable comparativement au retrait de séchage. Cependant dans les bétons de rapport  $E/L < 0,42$ , le retrait endogène peut

## **Chapitre I : Généralités sur les bétons à ultra haute performance**

---

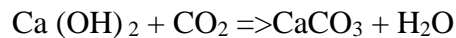
représenter près de la moitié du retrait total développé. Contrairement aux retraits de dessiccation (plastique et de séchage), le retrait endogène se développe sans perte de masse et de façon isotrope dans toute la masse de l'élément de béton qui durcit.

### **Le retrait thermique**

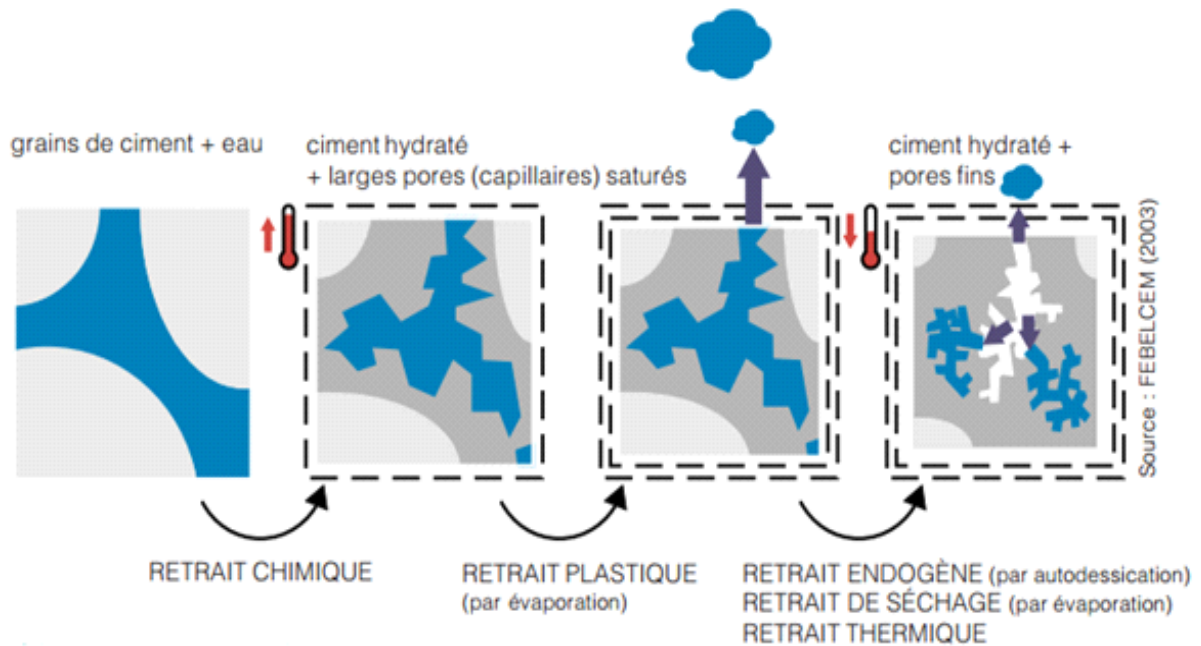
Le retrait thermique est lié au retour à température ambiante du béton durci ayant au préalable subi une élévation de température due aux réactions exothermiques d'hydratation du ciment (le retrait thermique est généralement plus important pour des bétons à plus fort dosage en liant tels que les BHP ou les BUHP). A cette origine interne d'élévation de température, il peut être associé un apport de chaleur externe au béton visant à accélérer le durcissement du béton ou à réaliser une mise en œuvre par temps froid [Cauberg, 2009].

### **Le retrait de carbonatation**

Le retrait de carbonatation est un type de retrait spécial causé par une réaction chimique. Quand le béton durci est exposé à l'air, le gaz carbonique présent dans l'air pénètre à l'intérieur du béton et réagit avec l'hydroxyde de calcium (portlandite), libéré par l'hydratation, pour former du carbonate de calcium [Barron, 1982] :



Selon [Powers, 1962], le retrait de carbonatation est le résultat d'une augmentation de la compressibilité de la pâte due à la dissolution de la portlandite cristallisée. Ce type de retrait est limité, quand le béton est exposé à l'environnement d'une humidité relative, soit faible (<25%) ou très élevée (~ 100%); d'une manière générale, il est maximal quand l'humidité relative est d'environ 50% [Swenson et Serada, 1968].



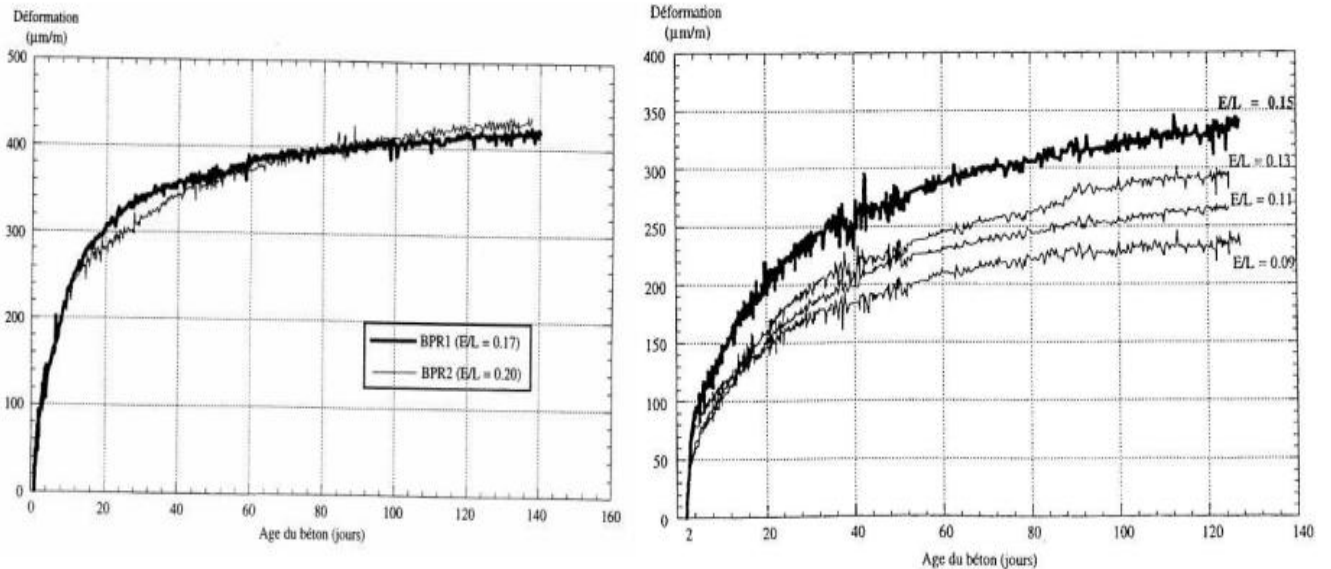
**Figure I.16 :** Principaux types de retrait du béton [Cauberg, 2009].

La profondeur de carbonatation est très faible dans un béton d'une qualité satisfaisante, dont la porosité n'est pas très élevée. À cause de cela, le retrait de carbonatation est souvent considéré comme insignifiant et il n'est pas pris en considération dans la pratique [Kosmatka et coll., 1995].

### I.5.5.2 Paramètres influençant le retrait

De nombreux paramètres peuvent influencer l'auto dessiccation et donc le retrait endogène. On s'intéresse ici au rapport E/C, la présence d'une addition minérale (fumée de silice) et l'ajout d'un adjuvant.

### I.5.5.2.1 Influence du rapport E/C



**Figure I.17 : Influence** du rapport Eau /Liant (0,17 et 0,20 à gauche, 0,9, 0,11, 0,13 et 0,15 à droite) sur le retrait endogène de BPR [Loukili, 1996]

Plusieurs auteurs se sont intéressés à l'influence du rapport E/C sur le retrait endogène. Ils ont montré que la diminution du rapport E/C engendre une structure plus dense et donc un retrait plus important. En effet, la diminution de l'humidité relative interne au cours de l'hydratation de pâtes à faibles rapports E/C est intense et plus rapide, ce qui engendre des dépressions capillaires importantes, et par conséquent de plus grandes déformations endogènes.

### I.5.5.2.2 Influence de la fumée de silice et des adjuvants

L'ajout de la fumée de silice densifie la microstructure du matériau et affine sa porosité. La combinaison de cet effet et la grande surface spécifique de cette addition minérale engendre d'importantes tensions et dépressions capillaires.

Cet effet de la fumée de silice sur la porosité a été observé par Baroghel-Bouny et Kheirbek [Baroghel-Bouny\_2001], qui ont également mesuré une augmentation linéaire et croissante du retrait endogène de pâtes de ciment en fonction de leur teneur en fumée de silice. Tazawa et Miyazawa [Tazawa\_1995] ont obtenu des résultats similaires. Ils ont par ailleurs montré que l'ajout

## Chapitre I : Généralités sur les bétons à ultra haute performance

---

de superplastifiant diminuait l'amplitude du retrait endogène (essais menés sur 100 jours). Les auteurs attribuent ce phénomène aux propriétés retardatrices des superplastifiants sur la cinétique d'hydratation.

### I.5.6 La déformabilité

#### I.5.6.1 Définition

La résistance mécanique et la déformation sont des caractéristiques importantes du béton, car elles jouent un grand rôle non seulement pour la stabilité, mais aussi la durabilité des ouvrages. Le béton est un matériau en évolution : ses propriétés se modifient constamment au cours de son existence, l'hydratation du ciment se poursuit pendant longtemps, augmentant ainsi les résistances mécaniques et les modules de déformation. Le béton soumis à l'action d'une charge assez faible subit une déformation pratiquement instantanée élastique, réversible. Il suit la loi de **Hooke** bien connue. ( $\sigma = E \times \varepsilon$ ).

Avec :  $\sigma$  : contrainte appliquée ; E : module d'élasticité ;  $\varepsilon$  : déformation.

Au-delà d'une certaine charge apparaît une zone plastique. Après suppression de la charge, il subsiste une déformation permanente. Lorsque la charge est appliquée pendant un certain temps, la viscosité du béton qui est très élevée intervient.

Il y'a fluage du béton, il se comporte alors comme un corps élasto-visco-plastique. La compacité joue un rôle important. Certains auteurs ont trouvé qu'une revibration du béton diminuait sensiblement à la fois le retrait et le fluage. Il a granulé possédant une résistance suffisante ainsi que de bonnes caractéristiques de déformation (module d'élastique initial), le liant devrait être dosé à 340-350 Kg par unité de volume, la macrostructure est très compacte où les agrégats sont bien liés au conglomérat ainsi les grains d'agrégats sont répartis régulièrement. Cette étude permis de préciser nombre de point :

- Le module de déformation diminue avec l'augmentation de la contrainte relative.
- La relation entre la valeur relative de la contrainte et les déformations élasto-instantanées du béton revêt un caractère rectiligne dans l'intervalle  $\sigma = 0-0.5$ .

## Chapitre I : Généralités sur les bétons à ultra haute performance

---

- La relation entre la valeur relative de la contrainte et les déformations est curviligne dans l'intervalle  $\eta = 0.5-0.9$ , ce qui signale le développement dans les bétons des déformations irréversibles.
- Une attention particulière doit être prêtée au choix optimal de la microstructure des bétons de manière à ce que la résistance et la déformabilité s'y combinent convenablement de déformation que ce soit celles d'un béton au laitier basique ou de toute autre sorte du béton.

### I.6 Principe de formulation

#### I.6.1 Introduction

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

#### I.6.2 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 ( $d/D$ ) :

$$V = V_0 (d / D)^{0,2} \quad (I.1)$$

Où  $V_0$  : constante empirique

$d$  : dimension du tamis retenant 90% du granulat

$D$  : dimension du tamis retenant 10% du granulat

## Chapitre I : Généralités sur les bétons à ultra haute performance

---

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 :

$$[fines] = [V] \quad (I.2)$$

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

$[fines]$  : volume de l'ensemble de particules inférieures à 80  $\mu\text{m}$

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

$$PS = 0,75 (0,08/D)^{0,2} \quad (\% \text{ volumique}) \quad (I.3)$$

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

$$[fines] = 0,38(0,08/D)^{0,2} \quad (\% \text{ volumique}) \quad (I.4)$$

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

Cette formule montre que le dosage en fines dépend de la dimension du plus gros granulat  $D$ . En admettant que la porosité du squelette granulaire se décompose en la somme d'un volume d'eau ( $e$ ) et d'un volume de vide piégé ( $V$ ), la porosité minimale théorique du béton est :

$$(e + v)_{\min} = 0,8[d/D]^{0,2} \quad (\% \text{ volumique}) \quad (I.5)$$

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 :

$$[vides] = k \times [eau](l/m^3) \quad (I.6)$$

Où  $K = 0,2$  à  $0,25$ .

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

$$[Sable] = 1000 - [fines] - [eau] - [vide](l/m^3) \quad (I.7)$$

Le dosage de sable estimé par cette formule prend en considération toutes les particules de taille supérieure à 80  $\mu\text{m}$ . Le sable est considéré dans un état saturé, superficiellement sec. Dans le

## Chapitre I : Généralités sur les bétons à ultra haute performance

---

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

$$R_b = \frac{K_f \times R_c}{\left[1 + \frac{3,1 \times (e+v)}{c(1+K_1+K_2)}\right]} \quad (I.8)$$

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 ( $l/m^3$ )

$v$  : Air piégé ( $l/m^3$ )

$c$  : Dosage en ciment ( $kg/m^3$ )

$K_1$  : Coefficient pouzzolanique

$K_2$  : Coefficient d'activité du filler calcaire

Le coefficient pouzzolanique  $K_1$  est donné par l'équation suivante :

$$K_1 = K_{cv} \times C_v / c + K_{fs} \times F_s / c \quad (I.9)$$

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

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

$K_1 \leq 0,5$

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

$C_v$  et  $F_s$  sont les dosages en cendres volantes et fumée de silice ( $kg/m^3$ ). Le coefficient d'activité du filler calcaire  $K_2$  est donné par l'équation suivante :

$$K_2 = K_{fil} \times \frac{f_{il}}{c} \quad (I.10)$$

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

$K_2 < 0,2$ .

$K_{fil}$  et  $f_{il}$  sont respectivement le coefficient d'équivalence en ciment et le dosage ( $kg/m^3$ ) du filler calcaire. Cette formule permet de prendre en compte l'activité pouzzolanique des additions telles que les cendres volantes ou les fumées de silice et l'activité des fillers calcaires au niveau des résistances en compression. Il est sous-entendu dans la formulation de Feret (Ohama



## **Chapitre I : Généralités sur les bétons à ultra haute performance**

---

et al, 1986) que la formulation du béton est basée sur l'utilisation d'un ciment au clinker pur, type CEM I. L'utilisation d'un ciment composé type CEM II ou CEM III peut introduire un conflit dans la gestion des additions par cette formule.

### **I.6.3 Méthode empirique de formulation**

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

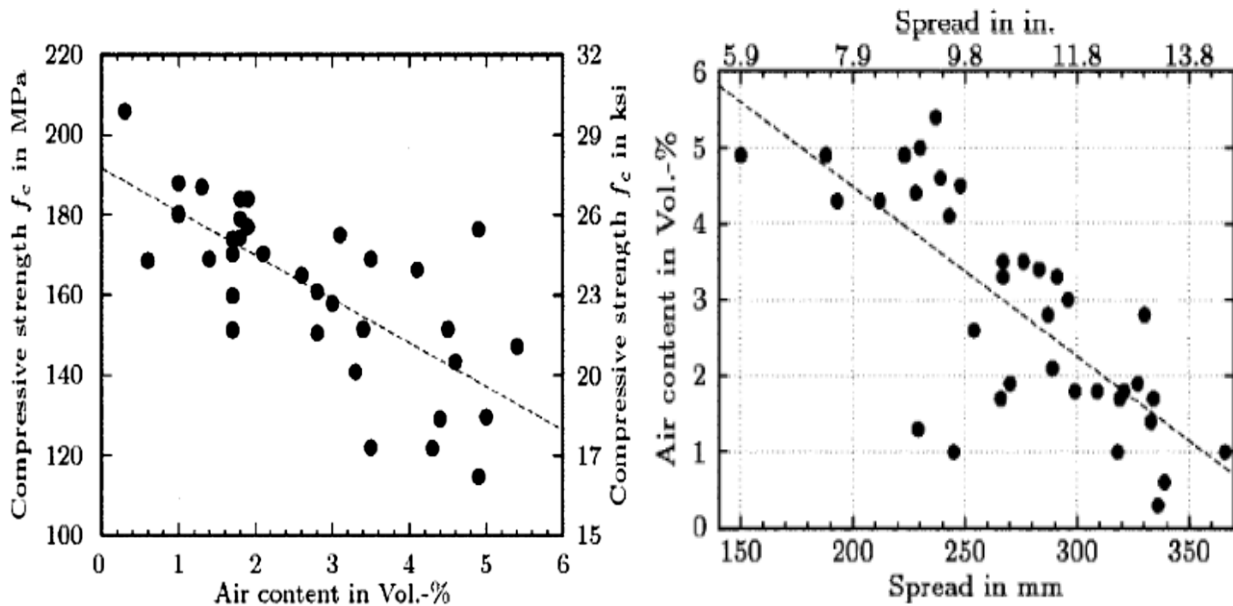
- amélioration de l'homogénéité macroscopique du béton par réduction du diamètre du plus gros granulats.
- amélioration de la compacité par optimisation du squelette granulaire.
- réduction du rapport eau/liant.
- amélioration de la microstructure par traitement thermique après la prise.
- choix de constituants de très grandes qualités (dureté du sable, indice d'activité de la fumée de silice, classe vraie du ciment, pouvoir défloculant du superplastifiant). Une compacité élevée du squelette granulaire est obtenue en augmentant l'étendue granulaire du squelette par adjonction d'ultrafines pouzzolaniques (Bache, 1981) dont la dimension des particules est inférieure à celles des ciments. Selon le volume et la nature des fibres utilisées (acier ou carbone), la masse volumique des BFUP varie entre 2300 et 3000 kg/m<sup>3</sup>, la teneur en air est inférieure à 4% (généralement 2%).

Avec un pressage, la teneur en air peut atteindre un chiffre inférieur à 1%. Deux formules types de BUHP sont présentées sur le (tableau I.6) avec ou sans quartz broyé et renforcé de fibres d'acier.

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

## Chapitre I : Généralités sur les bétons à ultra haute performance

(Wille et al., 2012) ont proposé une méthode expérimentale d'optimisation de la matrice de BFUP en se basant sur les mesures d'étalement et de l'air occlus. Il est connu que la résistance en compression dépend non seulement du rapport Eau/Ciment (E/C), mais également de la teneur en air occlus. Les relations entre la teneur en air occlus et les valeurs d'étalement, et entre la teneur en air occlus et la résistance en compression sont montrées sur la Figure I.18.



a)

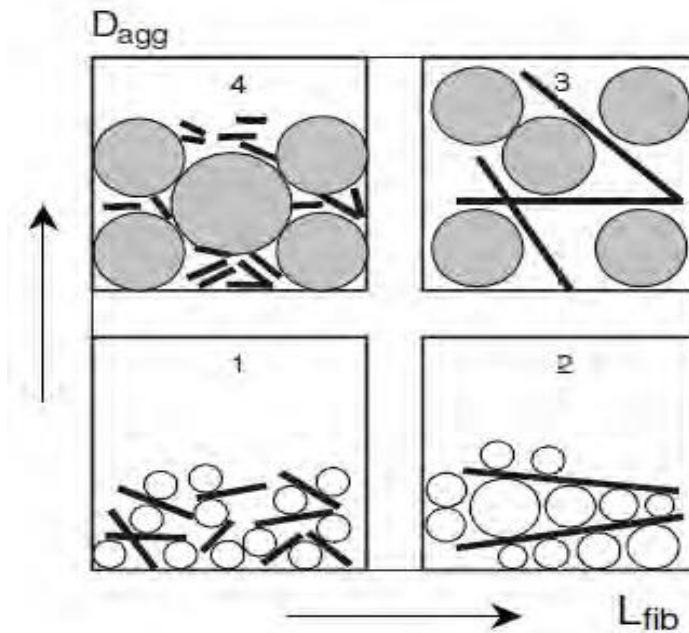
**Figure I.18:** a) Relation entre la résistance en compression et la teneur en air occlus ; b) Relation entre l'étalement et l'air occlus selon (Wille et al. 2012).

Sur la Figure I.18 a, les résistances en compression élevées sont obtenues pour un pourcentage en air occlus inférieur à 2%. La Figure I.18 b montre de faibles teneurs en air occlus lorsque l'étalement varie entre 250 mm et 350 mm. Ainsi, ces résultats mettent en évidence le lien étroit entre comportement à l'état frais et résistance mécanique. Si le matériau présente une faible maniabilité caractérisée par un étalement réduit, il peut entraîner et piéger, probablement du fait de sa viscosité élevée, une quantité significative d'air occlus qui affecte sa résistance en compression.

L'ajout de fibres peut influencer la compacité du mélange de manière non négligeable. (Rossi, 1998) a montré que la perturbation exercée par les fibres sur l'arrangement granulaire

## Chapitre I : Généralités sur les bétons à ultra haute performance

augmente avec leur longueur. Si des fibres suffisamment courtes sont insérées dans un mélange granulaire, elles peuvent pénétrer dans un interstice de gros grains sans perturber la compacité réelle. Pour un mélange dont l'étendue granulaire est rapprochée, l'influence des fibres sur chaque grain dépend du rapport entre la longueur des fibres et le diamètre du grain. Si ce rapport est grand, l'arrangement du mélange est peu perturbé par la présence de fibres (De Larrard et Sedran, 1999).



**Figure I.19 :** Influence de fibres de différentes longueurs et de grains de différentes tailles sur la compacité du mélange selon (De Larrard et Sedran, 1999)

La Figure I.19 représente les interactions qui existent entre les fibres de différentes longueurs et les grains de différentes tailles et leur effet sur la compacité du mélange :

- Lorsqu'on associe deux diamètres de grains réduits par rapport à la longueur des fibres (cas 2), les grains les plus petits peuvent remplir les vides autour des fibres longues. Si le mélange contient deux types de granulats de tailles plus grandes que la longueur des fibres (cas 4), ces dernières peuvent se placer dans le squelette granulaire sans créer de perturbation significative. Ces deux configurations permettent d'obtenir les meilleures compacités.

## Chapitre I : Généralités sur les bétons à ultra haute performance

- Les mélanges 1 et 3 sont les plus défavorables pour l'empilement granulaire. En effet, ces mélanges contiennent davantage d'espaces vides que les autres cas, car ils associent des tailles de granulat et des longueurs de fibres assez comparables. Comblé ce surplus de porosité nécessite dès lors un supplément de fines (ciment+addition).

L'étude a montré également que l'association de deux types de fibres, microfibres et macrofibres, diminue fortement la compacité du mélange. Il est important de noter que la teneur en fibres dans le mélange influe également sur la compacité du mélange. De plus, les fibres constituent une part prépondérante du coût du produit BFUP.

### I.6.4 Exemple de formulation

#### I.6.4.1 En laboratoire

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

**Tableau I.6 :** Formulation types de BUHP (Bonneau, 1997) (Alepari et al, 1997).

Matériau	Sans quartz broyé		Avec quartz broyé	
	Proportions de la masse du ciment	kg/m <sup>3</sup>	Proportions de la masse du ciment	kg/m <sup>3</sup>
Ciment	1	934	1	740
Fumée de silice	0,25	234	0,32	240
Quartz broyé	---	---	0.30	220
Sable	1,10	1030	1.4	1050
Eau	0,23	215	0,20	150
Superplastifiant	1,40	13	1.80	13
Fibres d'acier (% en volume de béton)	2,4	187	2	150

# Chapitre I : Généralités sur les bétons à ultra haute performance

---

## I.7 Les avantages 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 et dégel
- 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.

### I.7.1 Domaine d'application des BPR

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 : la passerelle de Sherbrooke est une structure triangulée de 60 m de portée. Elle illustre un des modes d'emploi du BPR
  - poutres et poutrelles légères ;
  - poteaux confinés ;
  - dalles de ponts mixtes ;
  - panneaux de façade ;
  - voussoirs de tunnels.

## Chapitre I : Généralités sur les bétons à ultra haute performance

---

- **Industrie :**
  - bâtis pour machines-outils ;
  - dalles d'usure ;
  - pièces pour l'emboutissage.
  
- **Traitement des déchets. Environnement :**
  - container pour le stockage de déchets radioactifs ;
  - dalles filtres pour l'épuration des eaux usées ;
  - coulis de blocage de déchets.
  
- **Protection. Sécurité :**
  - blindages légers
  - coffres-forts

Les nombreuses qualités des BFUP, permettent d'envisager une multitude d'applications aussi bien en structure de génie civil (poutres précontraintes par pré ou post tension, canalisations, conteneurs, ouvrages offshore, couvertures de grande portée, silos, réservoirs, cuves de rétention, tours de refroidissement, murs de soutènement, dalles, structures triangulées, voussoirs de tunnels, etc.) qu'en bâtiment (poutres, poteaux élancés, planchers de grande portée, etc.) et leur utilisation dans des applications innovantes jusque-là inaccessibles au matériau béton et réservées à d'autres matériaux .

### I.8 Conclusion

Cette étude bibliographique montre que les BUHP sont des matériaux de hautes performances grâce à l'emploi d'adjuvants qui réduisent la quantité d'eau, et d'ultra fines comme la fumée de silice qui améliorent la compacité, faciles à mouler et bien adaptés à la préfabrication. Leur formulation est fortement conditionnée par :

- le rapport eau/ciment très faible ( $E/C < 0,2$ ) ;

## **Chapitre I : Généralités sur les bétons à ultra haute performance**

---

- l'emploi de sable fin afin d'améliorer l'homogénéité ;
- l'augmentation de la compacité, par optimisation du squelette granulaire et par pressage du matériau à l'état frais et pendant la prise ;
- l'emploi de fibres métalliques pour augmenter la ductilité ;
- l'optimisation du malaxage ;
- l'amélioration de la microstructure par traitement thermique après la prise.

Les BFUP sont les matériaux cimentaire de résistance caractéristique à la compression supérieure à 150 MPa et pouvant aller jusqu'à 250 MPa.

La formulation d'un BFUP se caractérise par d'une quantité importante et onéreuse de liant, ciment et additions ultrafines pouzzolaniques, un faible rapport E/C, par l'utilisation de sable fin et de fibres métalliques pour les BFUP structuraux, et enfin d'une quantité élevée de superplastifiant à haut réducteur d'eau pour garantir la bonne dispersion des fines et une aptitude autoplaçante. Le traitement thermique peut être appliqué à ces bétons pour améliorer leurs résistances mécaniques. L'ultrafine la plus souvent employée est la fumée de silice qui améliorent la compacité. De plus, l'ajout des fibres dans leur fabrication les rend très ductiles et très résistants à la traction.

Il est possible de fabriquer un BFUP avec un malaxeur pour bétons ordinaires à volume réduit, environ la moitié de la capacité maximale à l'échelle industrielle. Dans le cas d'un malaxeur conventionnel pour bétons ordinaires, le temps de malaxage est de 18 à 20 minutes.

A l'état frais, les BFUP sont généralement autoplaçants et présentent un caractère thixotropique qui peut entraîner une interface de type reprise de bétonnage en cas de délai excessif entre coulage successif de couches de matériaux. Le caractère thixotropique des BFUP est lié au volume de pâte important et au faible rapport E/C.

A l'état durci, les BFUP présentent une résistance caractéristique à la compression généralement supérieure à 150 MPa, pouvant aller jusqu'à 250 MPa. Le traitement thermique de type II à hautes températures, au-delà de 90°C, permet généralement d'augmenter la résistance en

## **Chapitre I : Généralités sur les bétons à ultra haute performance**

---

compression de l'ordre de 12 à 40% par rapport aux mêmes BFUP sans traitement thermique. Quant au traitement thermique de type I à température plus modérées, il permet uniquement d'accélérer la prise. Certaines études récentes sont parvenues à atteindre des résistances élevées sans le recours aux traitements thermiques et grâce à l'optimisation de la compacité du mélange, afin d'améliorer le bilan énergétique et économique.

Enfin, la synthèse sur les applications des BFUP montre que l'utilisation de BFUP se résume à l'heure actuelle à quelques types d'applications tels que les passerelles, les ponts routiers, les éléments de toiture, le renforcement d'ouvrage et le joint-fil.

Malgré le coût de production élevé des BFUP, l'utilisation des BFUP à la place du béton armé notamment peut être privilégiée, voire indispensable, dans certains ouvrages, grâce à leurs meilleures propriétés mécaniques et durabilité.



**Chapitre II**  
**DURABILITE ET**  
**MICROSTRUCTURE**  
**D'UN BETON DE**  
**POUDRE REACTIVE**

## **Chapitre II : Durabilité et microstructure d'un béton de poudre réactive**

---

### **II.1 Durabilité**

#### **II.1.1 Introduction**

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 [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.

L'expression durabilité est généralement utilisée pour caractériser de façon générale la résistance d'un béton face à l'attaque d'un agent agressif physique ou chimique. La nature, l'intensité et les mécanismes concernés dans chacun des cas et les différents impacts peuvent se varier considérablement. L'expression durabilité du béton est donc parfois à un sens beaucoup trop vague. D'ailleurs, aucune méthode normalisée ne permet de mesurer la durabilité d'un béton ; il n'y a pas d'unité pour évaluer la durabilité du béton comme il en existe lorsqu'on veut mesurer la résistance à la compression.

Les premiers essais de durabilité réalisés sur le BPR remontent à 1991 et ont permis d'acquérir un nombre important de données. L'origine des propriétés de durabilité du BPR est à chercher dans la qualité de la microstructure ont pour effet de diminuer la porosité et d'augmenter l'homogénéité du matériau.

#### **II.1.2 Les indicateurs de durabilité**

Plusieurs travaux de recherche observent que la valeur de la résistance en compression, indicateur traditionnel de la performance des bétons, n'est désormais plus suffisante pour évaluer la durabilité potentielle des bétons et pour sélectionner une formule devant satisfaire des critères relatifs à la durabilité [Ho et Lewis, 1988 ; Fornasier et al. 2003 ; Bentur et Mitchell, 2008].

Les indicateurs de durabilité sont des paramètres qui permettent d'évaluer et de déterminer la durabilité des bétons. Comme un béton d'enrobage fournit, dans un premier temps, une barrière physique (la porosité, l'absorption, la perméabilité et la

## Chapitre II : Durabilité et microstructure d'un béton de poudre réactive

---

diffusivité), et dans un deuxième temps, une protection chimique (la réactivité et la solubilité), les indicateurs de durabilité sont destinés à évaluer ces barrières au travers de tests spécifiques.

### II.1.2.1 La porosité

La porosité est un paramètre essentiel pour la durabilité des matériaux à base cimentaire car la taille des pores et leur connectivité déterminent la résistance du matériau à la pénétration d'agents agressifs. Le premier travail à la porosité des BPR réalisé par (Cheyrezy en 1995). 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 [Paillere, 1990].

La porosité volumique totale  $\phi$  d'un matériau est définie par (II- 1) :

$$\phi = V_p \cdot V_T \times 100 \quad (\text{II.1})$$

Avec :  $V_T = V_p + V_s$

Où  $V_T$  : volume total d'un échantillon de matériau,

$V_p$  : volume poreux de l'échantillon,

$V_s$  : volume solide de l'échantillon.

La porosité diminue au cours du temps avec la progression de l'hydratation du ciment. Les paramètres de transfert comme la diffusivité ou la perméabilité dépendent largement de la porosité. Cependant, deux bétons peuvent avoir, pour une même porosité, des diffusivités ou des perméabilités différentes. En effet, la proportion volumique des vides dans un matériau n'est pas un critère suffisant pour caractériser les propriétés de transfert des bétons. Deux autres paramètres sont à considérer :

- La distribution de la taille des pores,
- La connectivité et la tortuosité des réseaux poreux.

## Chapitre II : Durabilité et microstructure d'un béton de poudre réactive

D'une manière générale, tous les phénomènes de transfert dépendent de la taille des pores. L'ensemble des pores est constitué (Figure II. 1) :

- Des pores capillaires : ( $0,01 \mu\text{m} < \varnothing \text{ pore} < 5,00 \mu\text{m}$ ) vestiges des espaces intergranulaires de la pâte fraîche. Ils sont directement liés au rapport E/C et à l'hydratation.
- Les pores des hydrates désignent les espaces inter-feuillets ou les pores de gel : ( $\varnothing \text{ pore} < 40 \text{ \AA}$ ) qui sont associés à la formation des hydrates et qui, au contraire de la famille précédente, dépendent faiblement du rapport E/C.

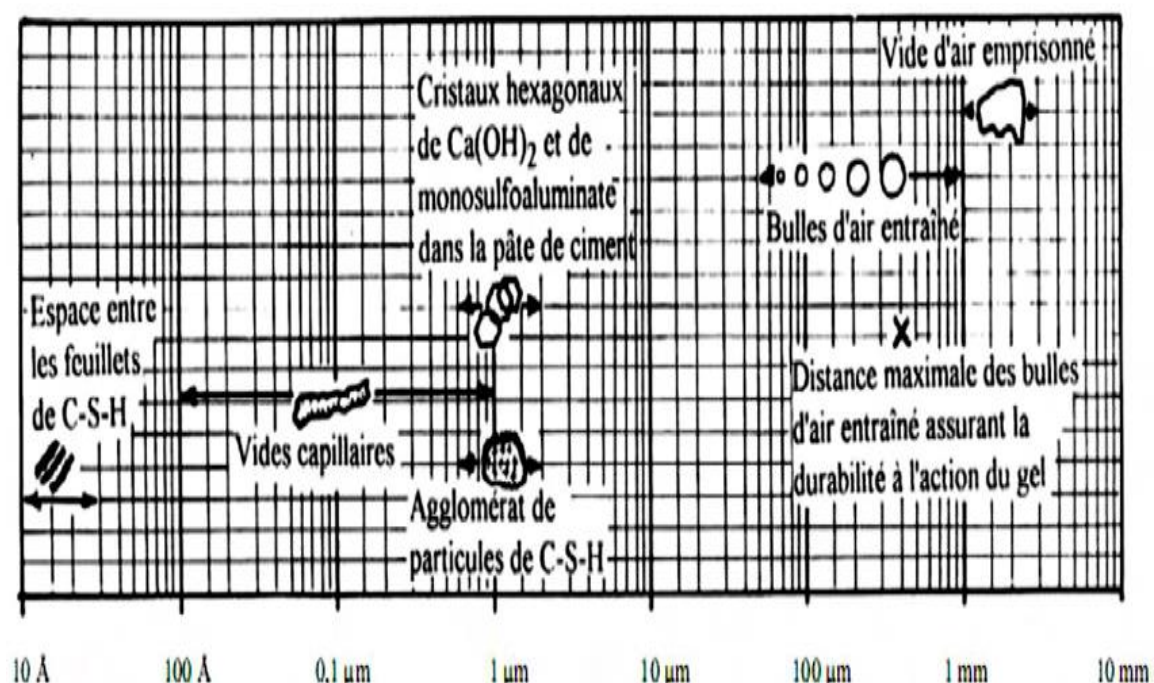


Figure II. 1 : Répartition pomométrique dans le béton [Mehta, 1993].

Les propriétés de transfert des matériaux ne dépendent pas que de la valeur de la porosité globale et de la taille de pores, mais, ils dépendent aussi de la connectivité et de la tortuosité des pores. Mehta [Mehta, 1993] distingue trois catégories de familles de pores en caractérisant l'interconnexion du réseau :

- Les pores interconnectés qui forment un espace continu dans le milieu poreux et qui ont un impact majeur sur les propriétés de transport du matériau,
- Les pores isolés (ou occlus) qui constituent la porosité fermée et ne communiquent pas avec le milieu extérieur,

## Chapitre II : Durabilité et microstructure d'un béton de poudre réactive

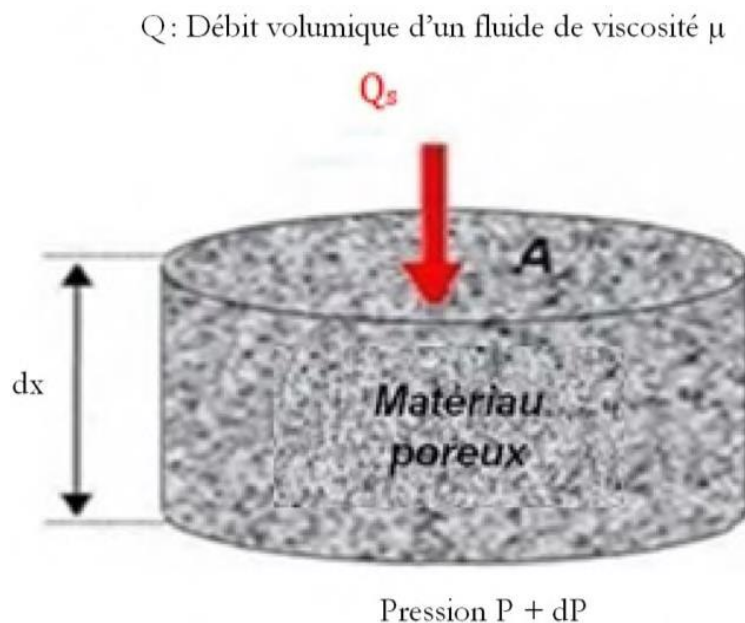
- Les pores aveugles (ou bras morts) et qui sont connectés uniquement par une voie accessible à un fluide extérieur et qui ne participent pas au transport.

### II.1.2.2 La perméabilité aux gaz

La perméabilité aux gaz est un indicateur de durabilité général majeur qui évalue la capacité du matériau vis-à-vis de la pénétration d'agents agressifs [Care et Derkx, 2011].

La perméabilité traduit l'aptitude d'un matériau à se laisser traverser par un fluide liquide ou gazeux sous l'effet d'un gradient de pression. Selon l'équation (II.2) la perméabilité  $k$  d'un milieu poreux est définie par la relation de Darcy [Darcy, 1856] qui exprime le débit volumique  $Q$  d'un fluide de viscosité  $\mu$  qui traverse une épaisseur  $dx$  de matériau de section apparente  $A$  sous la différence de pression  $dp$  (Figure II.2).

$$Q = \frac{k}{\mu} A \frac{dp}{dx} \quad (\text{II.2})$$



**Figure II. 2 :** Concept de la perméabilité d'un milieu poreux selon [Darcy, 1856].

## Chapitre II : Durabilité et microstructure d'un béton de poudre réactive

---

### II.1.2.3 La carbonatation d'un béton

La carbonatation résulte de la pénétration du gaz carbonique dans le réseau poral et les fissures du béton. Elle affecte la durabilité des structures en béton non pas tant parce qu'elle endommage ce dernier (au contraire, la carbonatation a une action plutôt favorable) mais en favorisant la corrosion des armatures. Elle a donc un impact néfaste majeur sur toute structure en béton armé (Figure II.3). Cet impact est cependant variable en fonction des conditions d'environnement de la construction et des propriétés du matériau.



**Figure II. 3** : Eclatement du béton d'enrobage dû à la carbonatation [Vu, 2011].

#### II.1.2.3.1 Les paramètres influents du phénomène de carbonatation

Le processus de carbonatation des bétons est influencé par de nombreux paramètres. Nous analyserons tout d'abord les facteurs de l'environnement (la concentration en  $\text{CO}_2$ , l'humidité relative, la température), puis les facteurs liés à la composition et à la conservation du béton.

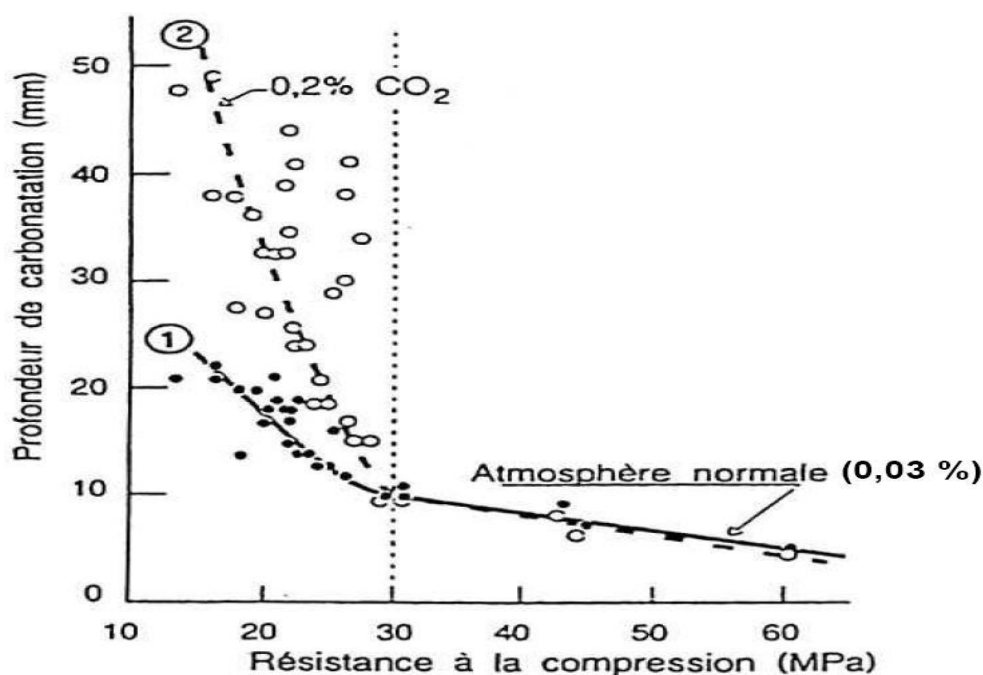
##### II.1.2.3.1.1 L'environnement

###### A) Concentration en $\text{CO}_2$

Nischer a mesuré la profondeur de carbonatation de bétons de résistances en compression de 15 à 60 MPa en conditions naturelles et accélérées (0,2%  $\text{CO}_2$ ) (Figure II.4). Il montre, comme [Parrot, 1987], que pour un béton donné, la

## Chapitre II : Durabilité et microstructure d'un béton de poudre réactive

profondeur de carbonatation et la dispersion des mesures sont d'autant plus élevées que la concentration en  $\text{CO}_2$  augmente [Nischer, 1984], [Hyvert, 2009].



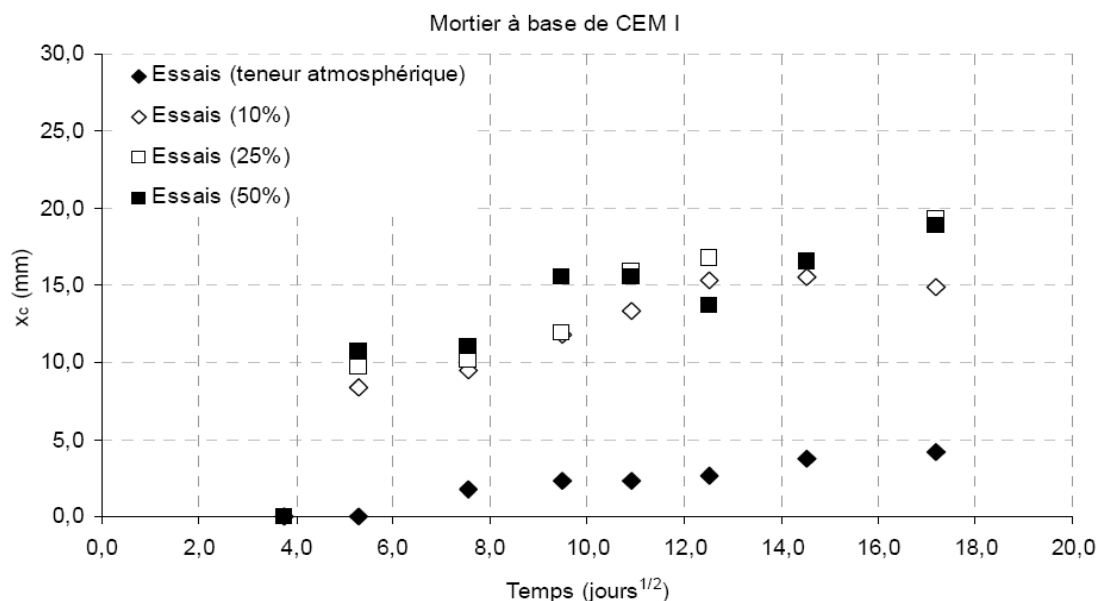
**Figure II.4** : Influence de la teneur en dioxyde de carbone sur la carbonatation [Nischer, 1984].

Les études menées par [Anstice et al., 2005] concernant l'évolution de la profondeur de carbonatation de pâtes de ciment de rapport E/C de 0,6, pour différents taux de  $\text{CO}_2$  (0,03%, 5%, 100%) et à différentes humidités relatives (50% et 80%) ont mis en évidence, outre la corrélation attendue entre profondeur carbonatée et teneur en  $\text{CO}_2$ , une chute de porosité totale et une augmentation de la masse volumique pour tous les échantillons avec l'augmentation de la concentration en  $\text{CO}_2$ . Cette diminution de la porosité peut conduire à un colmatage du réseau poreux et ensuite freiner le processus de carbonatation.

La Figure II.5 illustre les travaux d'Hyvert [Hyvert, 2009] qui a étudié, à partir d'analyses thermogravimétriques, de DRX ou de porosimétrie mercure de mortiers carbonatés à différentes taux de  $\text{CO}_2$  (0,03%, 10%, 25%, 50%), l'effet du taux de  $\text{CO}_2$  sur le processus de carbonatation. On constate, sur la Figure II.5, que la profondeur de carbonatation pour les mortiers en ambiance naturelle (0,03%) est relativement faible. En revanche, elle augmente nettement pour des ambiances à 10%, 25% ou 50% avec

## Chapitre II : Durabilité et microstructure d'un béton de poudre réactive

cependant quasiment aucune différence entre ces trois taux de  $\text{CO}_2$ . Selon l'auteur, ces résultats pourraient s'expliquer de la manière suivante : il existerait deux sources possibles de calcium carbonatable, d'une part la Portlandite, l'ettringite et les aluminates, dont le calcium est totalement carbonatable et d'autre part les C-S-H. Il note que la fraction carbonatable de C-S-H est fortement liée à la pression partielle de gaz carbonique appliquée.



**Figure II.5 :** Evolution dans le temps de l'épaisseur carbonatée mesurée pour le mortier à base de CEM I et pour les différentes teneurs de  $\text{CO}_2$  [Hyvert, 2009].

### B) Humidité relative

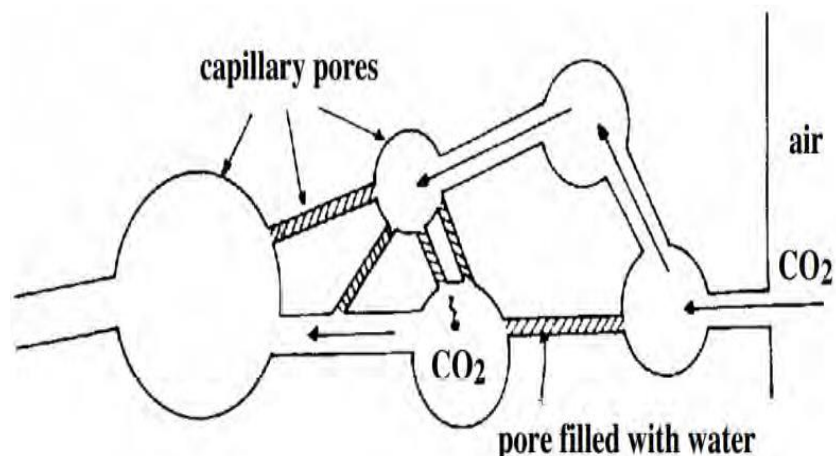
L'humidité relative influence considérablement la vitesse de carbonatation des matériaux cimentaires [Verbeck, 1958 ; Wierig, 1984].

La Figure II.6 représente de façon schématique un réseau poreux partiellement saturé d'eau. Deux cas de figures extrêmes sont possibles :

- Si le réseau poreux est saturé d'eau, la carbonatation est quasi-inexistante, le coefficient de diffusion du  $\text{CO}_2$  à travers la solution interstitielle étant 104 fois plus faible qu'en phase gazeuse,
- Si, au contraire, le réseau poreux est totalement sec, la carbonatation est aussi quasi nulle puisque la dissolution du  $\text{CO}_2$  nécessitant de l'eau n'est quasiment plus possible.

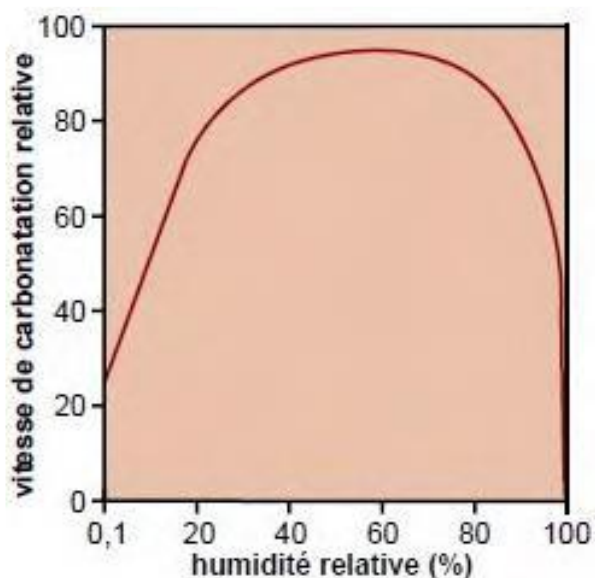


## Chapitre II : Durabilité et microstructure d'un béton de poudre réactive



**Figure II. 6 :** Représentation schématique d'un réseau poreux partiellement rempli par l'eau condensée [Houst, 1992].

Le processus de carbonatation n'est donc optimal que si les molécules d'eau tapissent la surface des pores sans les obstruer [Duval, 1992]. L'état de saturation du réseau étant fonction de l'humidité relative de l'environnement, [Wierig, 1984] a montré, pour des bétons traditionnels, que la carbonatation est maximale lorsque l'HR est comprise entre 40 et 70%. La Figure II. 7 illustre ce propos [Verbeck, 1958].



**Figure II. 7:** Vitesse de carbonatation en fonction de l'humidité relative [Verbeck, 1958].

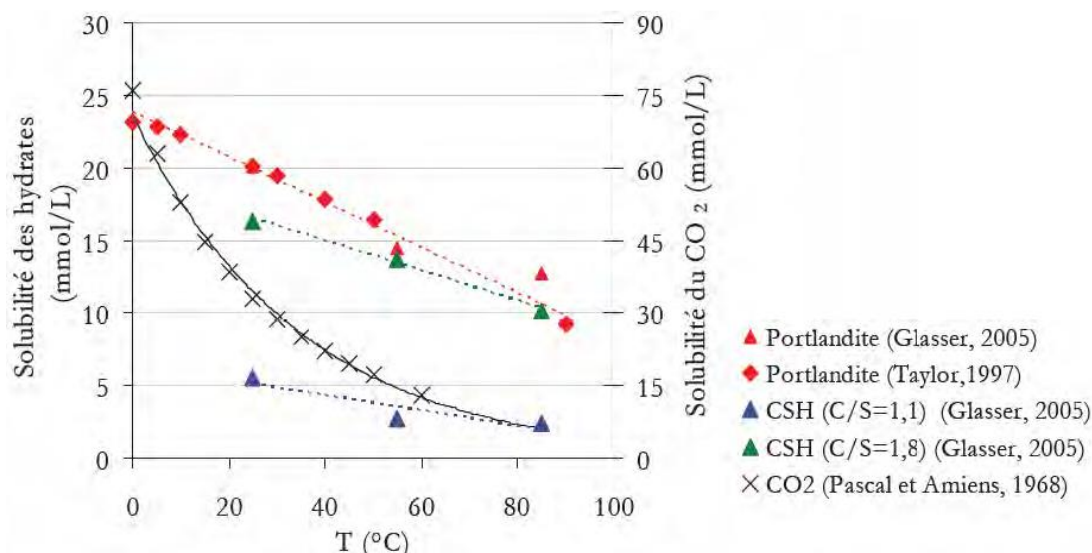
## Chapitre II : Durabilité et microstructure d'un béton de poudre réactive

Notons, cependant, que des chercheurs ont obtenu, lors d'essais de carbonatation accélérée, des profondeurs de carbonatation croissantes avec l'humidité relative (HR) pour des HR supérieures à 92% [Roy et al, 1999].

### C) Température

Des résultats contradictoires ont été obtenus dans la littérature. Des études montrent qu'une augmentation de la température accroît la vitesse de carbonatation car elle favorise le séchage des pores et ainsi l'accès du CO<sub>2</sub> dans le réseau poreux [Houst et Wittmann, 2007]. En outre, une élévation de température accélère les réactions chimiques (thermoactivation selon la loi d'Arrhenius) [Thiery, 2005].

D'autres chercheurs, au contraire, [Girodet, 1996 ; Taylor, 1997 ; Glasser et al., 2005] notent que l'augmentation de la température réduit la vitesse de carbonatation à cause de la diminution de la solubilité de la Portlandite (Figure II. 8). De plus [Pascal et Amiel, 1968 ; Chaussadent, 1999] observent que la solubilité du CO<sub>2</sub> diminue avec la température.



**Figure II. 8** : Solubilité de la Portlandite et des C-S-H en température dans une eau pure sans CO<sub>2</sub> [Taylor, 1997 ; Glasser et al., 2005].

## **Chapitre II : Durabilité et microstructure d'un béton de poudre réactive**

---

### **II.1.2.3.1.1 Les paramètres propres aux bétons**

#### **A) Rapport E/C**

Plusieurs auteurs ont montré, à maintes reprises, l'importance du rapport E/C vis-à-vis notamment de l'interconnexion du réseau poreux et donc vis-à-vis de la diffusivité du béton influençant la résistance à la carbonatation. Ainsi, nombreuses sont les recherches qui ont mis en évidence que la profondeur de carbonatation augmente avec le rapport E/C [Papadakis et al., 1991 ; Roy et al., 1999 ; Rafai, 2000 ; Castel et al., 2001 ; Chang et al., 2004 ; Baroghel-Bouny, 1994].

Plus le rapport E/C est élevé, plus la quantité d'eau libre susceptible de s'évaporer est importante. Lorsque cette eau s'évapore, le CO<sub>2</sub> peut alors diffuser à travers le réseau poreux.

#### **B) Dosage en ciment**

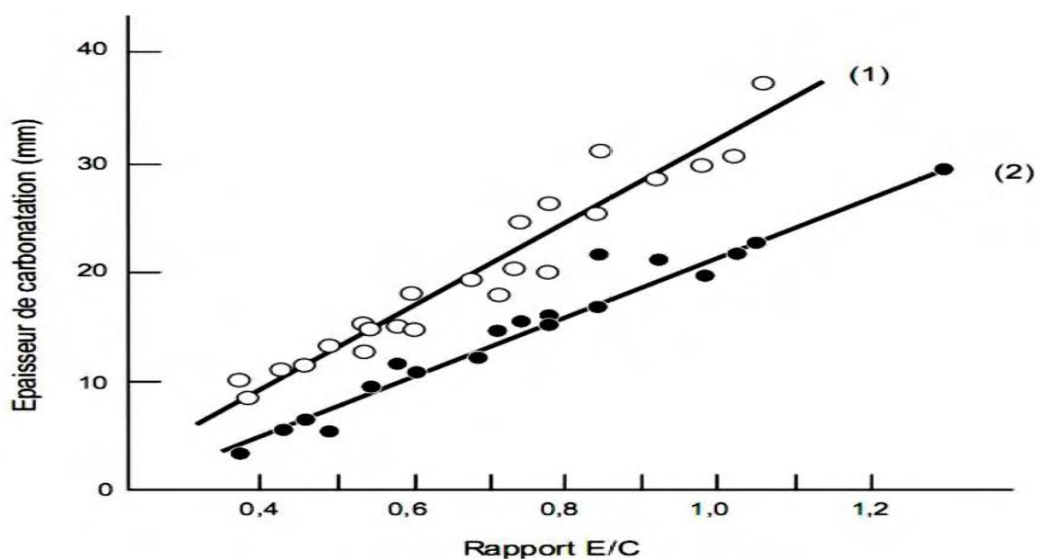
Un autre paramètre du matériau influençant le processus de carbonatation et la diffusion du CO<sub>2</sub> est le dosage en ciment [Vénuat et Alexandre, 1968 ; Parrott, 1987 ; Duval, 1992]. Ainsi, on observe, sur la Figure II.9 [Venuat et Alexandre, 1968], qu'à la plus faible épaisseur carbonatée, pour une échéance donnée, correspond un dosage en ciment le plus important. La sensibilité à la carbonatation augmente donc avec la diminution du dosage en ciment.

#### **C) Cure**

La cure du béton désigne le processus de conservation des matériaux dans des conditions de température et d'humidité relative suffisantes pour assurer l'hydratation du ciment. Une hydratation complète diminue la vitesse de carbonatation [Bier, 1986]. Ceci s'explique par le fait que l'augmentation de l'hydratation permet de réduire la porosité, ce qui conduit à un béton plus résistant à la carbonatation.

La Figure II.9 illustre l'évolution de la profondeur de carbonatation de bétons à base de CEM I en fonction du rapport E/C et pour deux conditions de cure humide. Pour un rapport E/C donné, l'augmentation de la durée de cure humide conduit à une diminution de l'épaisseur carbonatée [Balayssac et al., 1995].

## Chapitre II : Durabilité et microstructure d'un béton de poudre réactive



**Figure II. 9** : Évolution de la carbonatation en fonction du rapport E/C pour différentes conditions de cure [Balayssac et al., 1995].

**Courbe 1** : Eprouvettes à base de CEM I conservées 24 heures en moule puis 6 ans dans l'air.

**Courbe 2** : Eprouvettes à base de CEM I conservées 24 heures en moule, puis 27 jours dans l'eau et enfin 6 ans dans l'air.

De même, [Neville, 2000] observe une diminution de la profondeur de carbonatation sur des échantillons de béton de l'ordre de 40% par simple prolongation de la durée de cure d'un à trois jours. L'augmentation de la durée de cure humide permet ainsi d'augmenter le degré d'hydratation de la phase liante et donc de réduire la pénétration du gaz carbonique.

## II.2 La microstructure

### II.2.1 Introduction

Les BPRF sont des matériaux à structure micrométrique. La microstructure des BPRF est la clé de leurs performances. Elle leur confère une très faible porosité. Les composants des BPRF varient du millimètre au nanomètre, de clinker non hydraté qui jouent le rôle de micro granulat à surface très active et de haut module d'élasticité (120000 MPa).

La phase grise interstitielle représente le mélange des silicates de calcium hydratés et de fumée de silice. Le dosage en eau est inférieur à celui nécessaire pour

## **Chapitre II : Durabilité et microstructure d'un béton de poudre réactive**

---

l'hydratation complète du ciment. Les BPRF 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.

### **II.2.2 Diffraction rayon X (DRX)**

#### **II.2.2.1 Définition**

La diffraction rayon X est une technique d'analyse fondée sur la diffraction des rayons X sur la matière. La diffraction n'ayant lieu que sur la matière cristalline, on parle aussi de radiocristallographie. Pour les matériaux non-cristallins, on parle de diffusion. La diffraction fait partie des méthodes de diffusion élastique. Cette méthode utilise un faisceau de rayons X qui rencontre le cristal provoquant la dispersion du faisceau lumineux dans des directions spécifiques.

Par la mesure des angles et de l'intensité des rayons réfractés, il est possible d'obtenir une image tridimensionnelle de la densité électronique dans le cristal. À partir de cette densité, la position moyenne des atomes du cristal peut être déterminée, ainsi que leurs liaisons chimiques, leur entropie et d'autres informations [Robert Snyder ; Jenkins Ron, 2012]. L'appareil de mesure s'appelle un diffractomètre.

#### **II.2.2.2 Le diffractomètre**

Le diffractomètre est un appareil permettant de mesurer la diffraction d'un rayonnement sur une cible. Le terme est utilisé pour la diffractométrie de rayons X et la diffraction de neutrons. Les premiers diffractomètres utilisaient une pellicule argentique qui était impressionnée par des rayons X. C'étaient parfois juste un tube, un porte-échantillon et un porte-film posés sur une table (les dangers des rayons X étaient sous-estimés à l'époque), parfois mis dans une «boîte». Il portait de ce fait le nom de « chambre », les Britanniques parlant de «*camera*» [Robert Snyder; Jenkins Ron, 2012].

## **Chapitre II : Durabilité et microstructure d'un béton de poudre réactive**

---

### **II.2.2.3 Préparation de l'échantillon**

On prépare l'échantillon sous la forme d'une poudre aplaniée dans une coupelle, ou bien sous la forme d'une plaquette solide plate. On envoie des rayons X sur cet échantillon, et un détecteur fait le tour de l'échantillon pour mesurer l'intensité des rayons X selon la direction. Pour des raisons pratiques, on fait tourner l'échantillon en même temps, ou éventuellement on fait tourner le tube produisant les rayons X.

### **II.2.2.4 Description de l'essai**

L'analyse par diffractométrie des rayons X est conduite selon le déroulement suivant :

- ✓ Mise en place du porte échantillon.
- ✓ Mise en fonctionnement du générateur de rayon X.
- ✓ Choix du programme d'analyse (pas, temps de compactage, angle de départ et d'arrivée, tailles des fentes).
- ✓ Début du compactage.
- ✓ A la fin l'acquisition des données enregistrées peut commencer.

## **II.2.3 L'analyse thermogravimétrique (ATG)**

### **II.2.3.1 Définition**

L'analyse thermogravimétrique (ATG) est une technique d'analyse thermique qui consiste en la mesure de la variation de masse d'un échantillon en fonction du temps, pour une température ou un profil de température donné.

Une telle analyse suppose une bonne précision pour les trois mesures : masse, température et variation de température. Comme les courbes de variations de masse sont souvent similaires, il faut souvent réaliser des traitements de ces courbes afin de pouvoir les interpréter. La dérivée de ces courbes montre à quels points ces variations sont les plus importantes.

L'ATG est souvent employée dans la recherche et les essais pour déterminer les caractéristiques de matériaux tels que les polymères, pour estimer la cinétique

## **Chapitre II : Durabilité et microstructure d'un béton de poudre réactive**

---

d'oxydation en corrosion à haut température, pour déterminer les températures de dégradation, l'humidité absorbée par le matériau, la quantité en composés organiques et inorganiques d'un matériau, le point de décomposition d'un explosif et des résidus de solvants [Muchel Awkal, 1966].

### **II.2.3.2 Principe de l'analyse (ATG)**

Le principe de l'analyse thermogravimétrique est de mesurer en fonction du temps ou de la température les variations de masse d'un échantillon soumis à un programme de température déterminé.

### **II.2.3.3 Préparation de l'échantillon**

L'échantillon de béton à analyse est fragmenté au concasseur de façon à obtenir une granulométrie inférieure à 2.5mm. Cette opération doit se faire en récupérant soigneusement toutes les fines produites. Prélever au moins 100g d'échantillon au moyen d'un échantillonneur ou par quartage.

Broyer l'échantillon pendant quelques secondes puis tamiser à 315  $\mu\text{m}$ . Répéter l'opération « broyage plus tamisage » jusqu'à passage complet à 315  $\mu\text{m}$ . Transférer l'échantillon dans un flacon propre et sec à fermeture hermétique, prendre soin de ne pas perdre de fines et agiter vigoureusement pour l'homogénéiser. Enfin, une prise d'essai de l'ordre de 180 à 230 mg est placée dans un creuset en platine et pesée avec précision.

### **II.2.3.4 Description de l'essai**

L'analyse thermique est conduite sous l'air suivant le programme de température suivant :

- Départ à la température ambiante (proche de 25 °C) ;
- Chauffage linéaire depuis la température ambiante jusqu'à 1100 °C et à une vitesse de 10 °C/min sous balayage d'air (80 ml/min).

## Chapitre II : Durabilité et microstructure d'un béton de poudre réactive

---

L'exploitation des courbes permet d'identifier, et parfois de quantifier, les phases minérales contenues dans le béton. Leur présence ou leur absence est associée à des seuils de température. Par exemple, la pâte de ciment soumise à une élévation de température, subit plusieurs évolutions. La plus connue concerne la déshydratation de la portlandite [ $\text{Ca}(\text{OH})_2 \rightarrow \text{CaO} + \text{H}_2\text{O}$ ] qui se produit entre 450 °C et 540 °C. De même, les granulats subissent aussi des modifications consécutives à une forte élévation de température. Par exemple, nous citerons le cas de la décarbonatation des granulats calcaires [ $\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$ ] qui se produit vers 800 °C.

### II.2.3.5 Courbe thermogravimétrique (ATG)

La courbe d'analyse thermique gravitationnelle (ATG), permet de mieux calculer les diverses ou gains de masse en précisant avec netteté les températures de début de fin de réaction. La thermogravimétrie permet de déterminer :

- La teneur en eau liée aux hydrates (C-S-H...etc.) ;
- La teneur en eau de la portlandite. Le départ de cette eau se produit entre 450 et 540 °C.
- Le teneur en eau correspondant aux groupements hydroxyle contenus dans certains minéraux des granulats (départ à partir de 800 °C).
- La perte au feu totale de l'échantillon de béton.



## Chapitre II : Durabilité et microstructure d'un béton de poudre réactive

### II.2.4 Microscope électronique à balayage (MEB)

#### II.2.4.1 Historique

Le tableau ci-dessous donne un rappel historique sur MEB :

**Tableau II.1** : Principales étapes du développement du MEB. [Mellas Mekki, 2003]

1897	Découverte de l'électron	J.J. Thompson
1924	Théorie et particules et ondes	L.de Broglie
1926	Lentille électromagnétique	H. Busch
1927	Démonstration de la diffraction de l'électron	C.J. Davisson and L. H.Germer
1929	Description théorique du MEB	H. Stintzing
1932	Construction du 1 <sup>er</sup> microscope à transmission	M. Knoll and E. Ruska
1935	Démonstration de la théorie du MEB	M. Knoll
1938	Construction du 1 <sup>er</sup> MEB	M. Von ardenne
1939	1 <sup>er</sup> commercialisation du microscope électronique à transmission	B. Von Borries and E. Ruska
1942	Production des lentilles électrostatique du MEB	V. K. Zworykin, J. Hillier and R. L. Synder
1956	Production de lentille électromagnétique du MEB	K. C. A Smith
1956	Micro analyse par diffraction des rayons X	V. E. Cosslett and p. Duncomb
1960	Perfectionnement de détection des électrons secondaires	T. E. Everhart and R. F. M. Thornley
Début 1960	1 <sup>er</sup> commercialisation du MEB	Combridge Instrument Co. LTD

## **Chapitre II : Durabilité et microstructure d'un béton de poudre réactive**

---

### **II.2.4.2 Définition**

La microscopie électronique à balayage (MEB) est une technique de microscopie électronique capable de produire des images en haute résolution de la surface d'un échantillon en utilisant le principe des interactions électrons-matière. Aujourd'hui, la microscopie électronique à balayage est utilisée dans des domaines allant de la biologie à la science des matériaux, et un grand nombre de constructeurs proposent des appareils de série équipés de détecteurs d'électrons secondaires et dont la résolution se situe entre 0,4 nanomètre et 20 nanomètres.

### **II.2.4.3 Principe du MEB**

Le principe du microscope électronique à balayage (MEB) est balayer un échantillon avec un faisceau d'électrons incident. L'interaction de ce faisceau avec un matériau conduit alors à l'émission d'électrons secondaires qui proviennent de la zone superficielle du matériau. L'intensité de l'émission dépend de la topographie de surface du matériau du potentiel locale et du numéro atomique de l'élément excité.

La microscopie électronique à balayage permet la réalisation d'une analyse élémentaire par détection de l'énergie des rayons X émis. Le fort grandissement et la profondeur de champ très importante de cette technique d'analyse permettent de former des images des surfaces rugueuses ou lisses avec un grand pouvoir de résolution. L'observation d'échantillons isolants nécessite une métallisation de l'échantillon qui permet de le relier à la masse avec une colle conductrice qui permet d'évacuer les charges et de la fixer sur le porte échantillon.

## **II.3 Conclusion**

La durabilité du béton peut être définie, dans le cas le plus général, comme la capacité du matériaux à maintenir ses caractéristiques physiques et ses performances mécaniques dans des conditions de sécurité satisfaisante pendant la durée de vie prévue pour l'ouvrage compte tenu des conditions de service existantes.

Les principaux mécanismes de dégradation du béton sont :

## Chapitre II : Durabilité et microstructure d'un béton de poudre réactive

---

- Les altérations chimiques purement externes (solution acide, eaux contenant des ions  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ , eau de mer,...etc.) qui sont étroitement liées aux actions physico-chimiques et mécaniques. En pratique, il n'est pas possible de séparer ces actions qui agissent simultanément ou successivement et de ne tenir compte que de l'une d'entre elles en négligeant les autres. La durabilité soulève donc des problèmes d'une grande complexité.

La nature et la qualité du liant jouant un rôle très important dans la durabilité. Dans ce sens de nombreuses recherches ont montré qu'il y'a une amélioration de la résistance des bétons à hautes performances aux agressions dues à la réaction alcalis – granulats.

En fin la microstructure des bétons à très hautes performances est très dense et globalement amorphe, et elle comporte un volume inhabituel de grains anhydres (restes de ciments non combinés par manque d'eau disponible). En plus les interfaces pâte- granulats sont peu poreux et ne présentent pas l'accumulation de cristaux de chaux.

**DEUXIÈME PARTIE :**  
**ETUDE EXPERIMENTALE**

**Chapitre III**  
**MATERIAUX ET PROCEDURES**  
**EXPERIMENTALES**

## **Chapitre III : Matériaux et procédures expérimentales**

---

### **III.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.

Dans ce chapitre, nous allons caractériser les matériaux employés dans cette étude en présentant leurs propriétés chimiques et physiques. Les compositions des bétons seront ensuite détaillées après avoir expliqué la méthode de formulation utilisée. Les procédures de fabrication et de séquence de malaxage mises en place seront également définies.

Dans un deuxième temps, nous présenterons le programme expérimental mené sur les différentes formulations de bétons. Les méthodes et essais utilisés pour déterminer les propriétés mécaniques ainsi que les caractéristiques physicochimiques traduisant la durabilité, seront explicités.

### **III.2 Caractéristiques et sélection des matériaux utilisés**

#### **III.2.1 Ciment (C)**

Les BPR sont des matériaux à très faible rapport E/C (eau/ciment). Par conséquent, la rhéologie des BPR est très liée à la réactivité du ciment utilisé.

Le ciment utilisé est le ciment Portland CPA CEM I 42.5 N HRS provenant de la cimenterie d'enfidha (Tunisie) dont les caractéristiques physiques, chimiques et minéralogiques sont présentées dans le Tableau III. 1.

Nous avons ainsi vu que, du point de vue de la composition chimique et de la rhéologie, les ciments à faible teneur en C<sub>3</sub>A et à faible surface spécifique donnent les meilleurs résultats [Bonneau, 1997]. Ils ont en effet une demande en eau plus faible.

## Chapitre III : Matériaux et procédures expérimentales

**Tableau III.1 :** Composition chimique, physique et minéralogique du ciment en (%)

Caractéristiques Physiques	Masse volumique apparente (g/cm <sup>3</sup> )		1.025							
	Masse volumique absolue (g/cm <sup>3</sup> )		3.02							
	La Finesse (cm <sup>2</sup> /g)		3714							
	Consistance normale		0.23							
Composition Minéralogique	C <sub>3</sub> S		64.71							
	C <sub>2</sub> S		17.19							
	C <sub>3</sub> A		3.06							
	C <sub>4</sub> AF		15.03							
Composition Chimique										
	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	K <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>	CL	Na <sub>2</sub> O	P.A.F
(%)	20.62	4.31	4.94	63.24	2.01	1.1	1.85	0.003	0.27	1.86

Le tableau III.2 présente la résistance, le temps de prise et la fin de prise obtenus sur le ciment.

**Tableau III.2.** Résistances mécaniques à la compression du ciment

Résistance (MPa)		Ciment (C)
2j	<b>Compression</b>	18
7j		29
28j		> 42,5
Début de prise		2h47min
Fin de prise		3h50min

### III.2.2 Additions

#### III.2.2.1 La fumée de silice (FS)

La fumée de silice utilisée dans ce travail est une poudre grise (assez foncée), commercialisée sous le nom de Condensil S95 DP (Société Sika) est une silice ultra fine issue de l'industrie de la fabrication du silicium ou des alliages à base de silicium conforme à la norme NF P 18-502 et pr NF EN 13263-1. Ses caractéristiques chimiques et physiques sont données dans le Tableau III.3. Sa fiche technique est donnée en annexe.



**Figure III .1:** la fumée de silice SIKa

### III.2.2.2 Le quartz broyé (QB)

Le quartz broyé est une poudre, de diamètre moyen entre 10 et 15  $\mu\text{m}$ , issue du broyage (cimenterie d'AIN KBIRA à SETIF) d'un sable très riche en silice ( $\text{SiO}_2 > 98 \%$ ) généralement utilisé dans la verrerie. Il est employé principalement dans la formulation des BPRF traité à une température supérieure à 90 °C comme complément chimique. Pour le béton non traité thermiquement, le quartz broyé peut être considéré comme inerte et son utilisation n'est pas obligatoire. Les caractéristiques physiques et chimiques sont données dans le Tableau III.3.

### III.2.2.3 Le laitier broyé (LB)

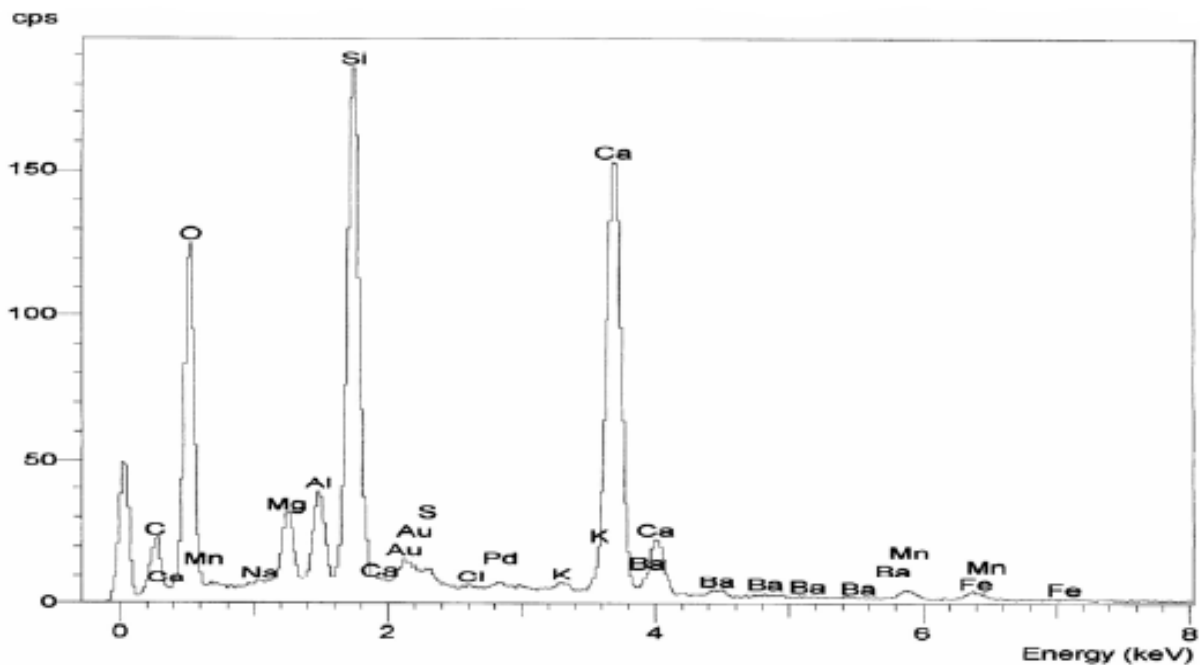
Le laitier granulé de haut fourneau D'El -Hadjar (Annaba), est utilisé en qualité d'ajout, obtenue par refroidissement par trempe dans l'eau et chute dans un grand bassin, il se présente sous forme de sable de couleur gris clair de granulométrie 0 à 5 mm. Sa composition chimique est donnée au Tableau III.3.

## Chapitre III : Matériaux et procédures expérimentales

**Tableau III.3** : Composition chimique et physique exprimée en % pondéraux des additions utilisées

Caractéristiques physiques	Masse volumique apparente (g/cm <sup>3</sup> )	Masse volumique absolue (g/cm <sup>3</sup> )	surface spécifique (cm <sup>2</sup> /g)							
FS	0.646	1.56	230 000							
LB	0.697	2.60	7277.29							
QB	0.800	2.63	5714.719							
Composition Chimique										
(%)	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	K <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>	CL-	Na <sub>2</sub> O	P.A.F
FS	94	1	1	0.4	1	-	1.5	0.06	0.6	-
LB	35.88	8.38	0.56	30.96	4.54	0.62	1.55	0.01	0.41	2.79
QB	94.33	1.171	1.044	1.62	0.184	0.386	0.04	0.012	0.001	

Le diffractogramme du laitier granulé du haut fourneau d'Annaba présenté à la figure III.2 est typique de laitier amorphe qui présente cependant deux pics caractéristiques correspondant à la calcite et au fer.



**Figure III.2** : Diagramme de diffraction X du laitier granulé



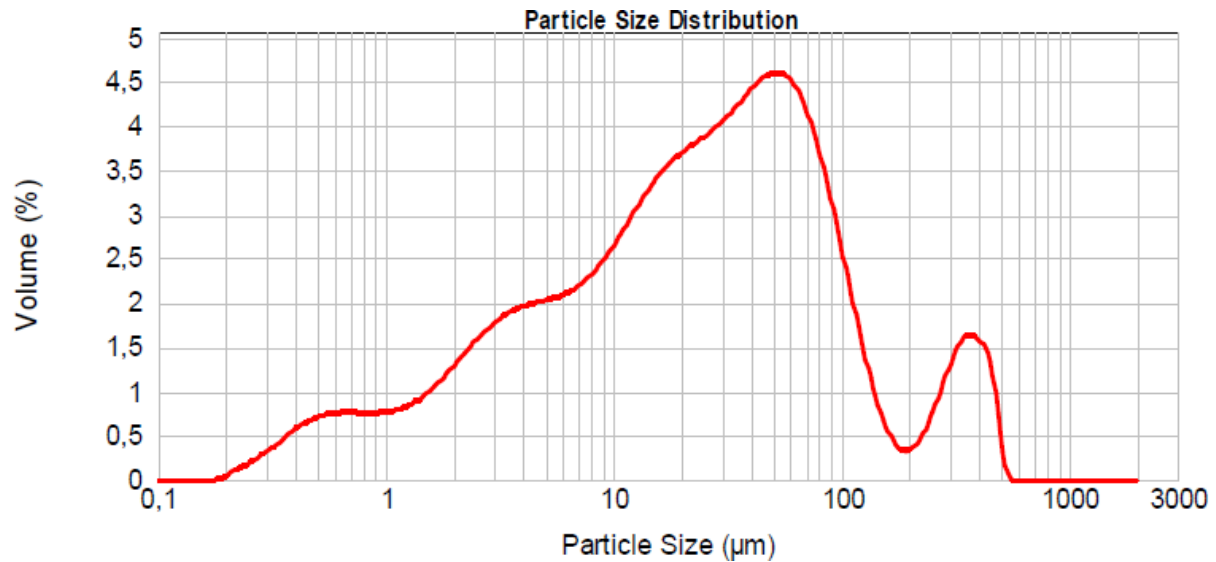


Figure III.3 : Courbe granulométrique du laitier granulé

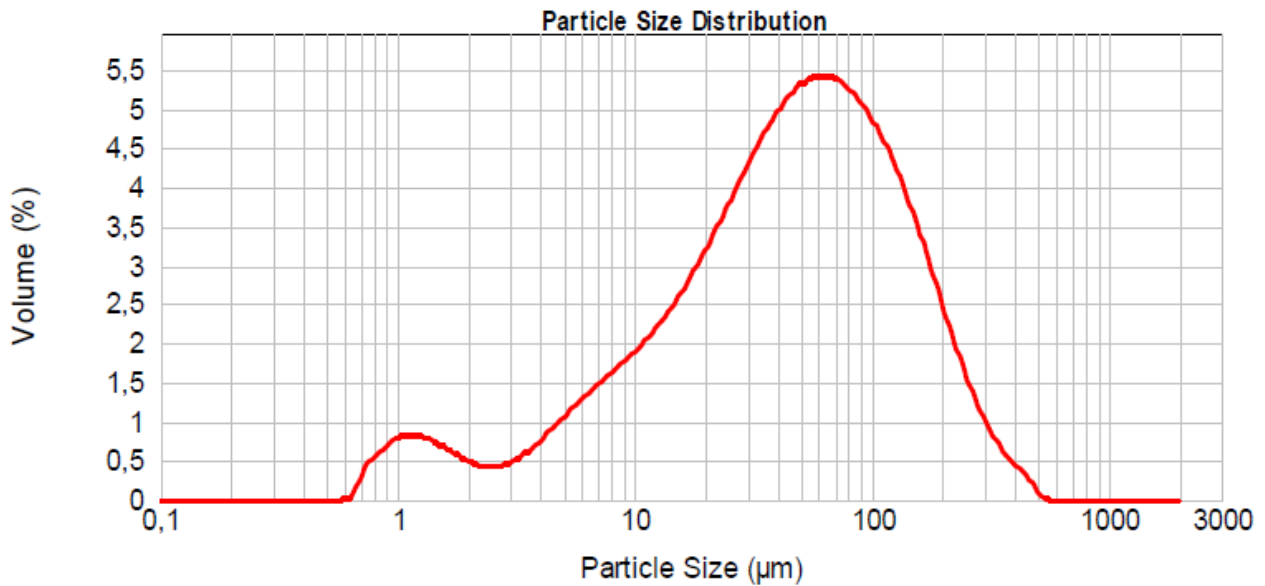


Figure III.4 : Courbe granulométrique de la fumée de silice.

### II.2.3 Granulats

De nombreuses études (Richard et Cheyrezy, 1995), (De Larrard et Sedran, 1994) Préconisent un sable fin ( $D_{max} < 600\mu\text{m}$ ) siliceux pour la confection des BFUP. Le sable utilisé pour toutes les formulations de cette étude, est un sable de dune passe au tamis de 0.6 mm donc

## Chapitre III : Matériaux et procédures expérimentales

---

le plus gros diamètre est de 600  $\mu\text{m}$  de rivière de la région de Djamaa, Wilaya d'El Oued, Algérie.

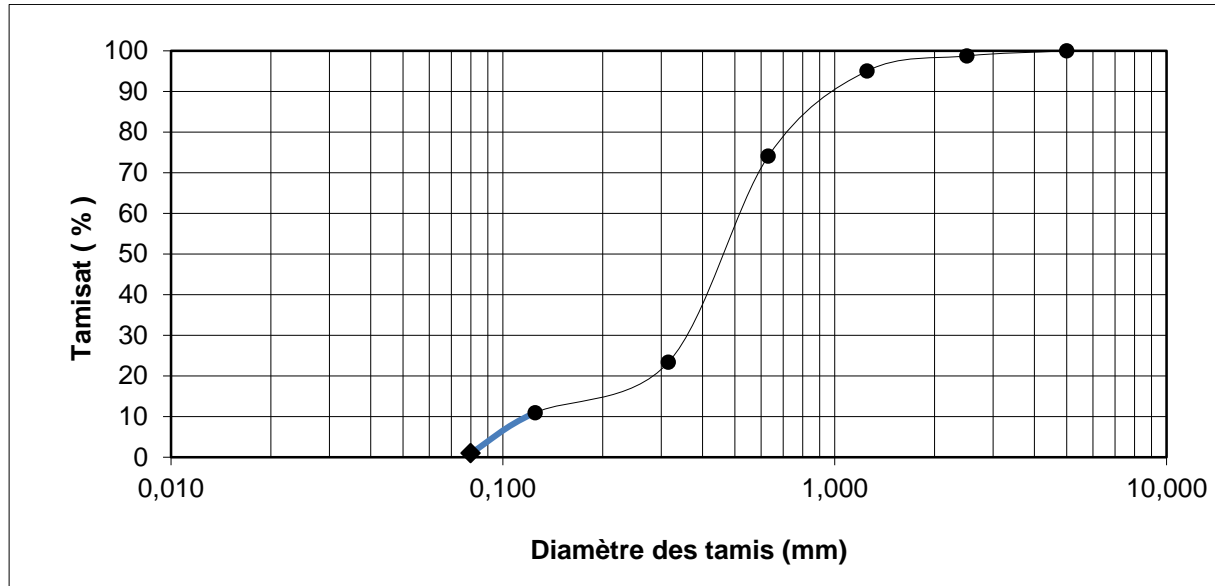
Le module de finesse ( $M_f$ ) est un facteur très important qui nous permet de juger la qualité du sable. Le tableau III.4

La masse volumique d'un granulat est une caractéristique physique fondamentale influençant notablement les caractéristiques mécaniques des granulats et par conséquent les performances du béton. Le coefficient d'absorption d'eau d'un granulat est également un facteur important. Il influence la quantité d'eau de gâchage nécessaire à la fabrication du béton. La masse volumique réelle et le coefficient d'absorption d'eau à 24 heures de granulat utilisé dans cette étude sont mesurés (tableau III.4) au laboratoire de génie civil (GC) selon la norme NF EN 1097-6.

La granulométrie et les caractéristiques physiques sont données sur la Figure III. 4 et dans le Tableau III.4.

**Tableau III.4** : Les caractéristiques physiques de sable

Masse volumique apparente ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	1.57
Masse volumique absolue ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	2.626
La finesse	1.98
Equivalent de sable (%)	74.90
Coefficient d'absorption d'eau (%)	2.7
La taille des particules	Diamètre < 600 $\mu\text{m}$



**Figure III.5 :** La courbe granulométrique du sable

### III.2.4 L'eau

L'eau utilisée pour les mortiers est issue du robinet de laboratoire. Aucune analyse n'a été effectuée, l'eau est supposée potable et ne contenir aucune impureté nuisible.

### III.2.5 Adjuvant

SIKA VISCOCRETE TEMPO 12 est un super plastifiant/haut réducteur d'eau polyvalente de nouvelle génération non chloré à base de copolymère acrylique est produit par la société Sika, Il s'agit d'un super plastifiant, conforme à la norme NF EN 934-2. Les caractéristiques de super plastifiant sont données dans le Tableau III.5. Sa fiche technique est donnée en annexe.

**Tableau III.5 :** Les caractéristiques de super plastifiant

Aspect	Densité (g/cm <sup>3</sup> )	PH	Na <sub>2</sub> O contenu	Extrait sec
Liquide brun clair	1,06± 0,01	6 ± 1	≤ 1 %	30,2 ± 1,3 %



**Figure III.6 :** Super plastifiant utilisée

### III.2.6 Les fibres

Le choix de fibres se base sur deux critères liés à leur nature et à leur géométrie. Les fibres utilisés sont des fibres métalliques «SIKA METAL FIBRES RL-45/50-BN» ont fabriquées à partir de fil d'acier tréfilé. Elles comportent un ancrage mécanique constitué de crochets aux extrémités. Elles sont libres non encollées. Produit par la société SIKA implanté à Alger. Les différentes propriétés sont présentées dans le tableau III.6. Sa fiche technique est donnée en annexe.

**Tableau III.6 :** Les Caractéristiques des fibres

Nature	Longueur	diamètre	Elancement	Résistance en traction
Fil d'acier tréfilé sans revêtement	50 mm	1,05 mm	48	1000 MPa (sur fil)



**Figure. III.7** : Fibres métallique

### III.3 Mise au point des formulations

Cette partie présente la mise au point des formulations originales de BPRF. Lors de l'étude bibliographique, nous avons vu qu'il n'existe pas de méthode générale de formulation pour les BPRF, la méthode de (Dreux et Festa, 1998) n'étant pas par exemple applicable à ces matériaux en raison de l'étendue granulaire très rapprochée. La plupart des formules de BPRF sont conçues actuellement de manière expérimentale. La méthode de Dreux-Gorisse pour la formulation d'un béton ordinaire n'est en effet pas adaptée, car elle ne prend en compte ni les adjuvants, ni les additions. La formulation se fait donc sur la base de l'expérience acquise ces dernières années. La mise au point de formulation de BPRF fait cependant appel à de nombreux principes cités par (Richard et Cheyrezy, 1995) et (De Larrard et Sedran, 1994).

La méthode de formulation utilisée pour concevoir les compositions des BPRF testés dans cette étude expérimentale s'appuie sur les différentes formulations présentées au chapitre 1. Différentes formulations préliminaires ont été testées et caractérisées expérimentalement à l'état frais et durci, sur la base d'ajustements successifs des quantités de constituants, jusqu'à l'obtention de la formulation définitive répondant aux critères cités ci-dessus. Le Tableau III.7 présente les sept formules retenues après optimisation du squelette granulaire et du dosage en superplastifiant, à partir du sable de dune, avec ou sans quartz broyé (selon que le matériau va subir un traitement thermique au-delà de 90 °C ou non), renforcées ou non de fibres d'acier, avec ou sans fumée de silice.

## Chapitre III : Matériaux et procédures expérimentales

**Tableau III.7** : La composition de béton à poudre réactive BPR

Mélange au ciment « kg/m <sup>3</sup> »	C (kg/m <sup>3</sup> )	FS (kg/m <sup>3</sup> )	QB (kg/m <sup>3</sup> )	LB (kg/m <sup>3</sup> )	SF (kg/m <sup>3</sup> )	SP/C (kg/m <sup>3</sup> )	E/C	FM (% volume de béton)	FM (% volume de béton)
BPRT	950	237.5	218.5	142.5	1045	19	0.27	0	0
BPRF1	962	240.5	0	0	1058.2	11.54	0.23	2	1
BPRF2	975	224.25	341.25	0	1072.5	26.32	0.23	2	1
BPRF3	950	237.5	218.5	142.5	1045	19	0.27	2.5	1.5
BPRF4	955	219.65	219.65	0	1050.5	47.75	0.20	2.5	1.5
BPRF5	945	217.35	217.35	141.75	1039.5	17.01	0.21	2.5	1.5
BPRF6	930	232.5	-	139.5	1023	13.02	0.22	2.5	1.5

### III.4 fabrication, mise en place et traitement thermique des BPRF

Toutes les formulations des BPRF étudiées ont été confectionnées suivant le même mode opératoire, avec des moyens matériels identiques, et coulées dans les mêmes géométries de moules dans des conditions similaires.

#### III.4.1 Séquence de malaxage

- Pour les éprouvettes de dimensions (4×4×16) cm on a utilisé un malaxeur à mortier de 5 litres.
- Pour les éprouvettes de dimensions (10×10×40) cm on a utilisé un malaxeur à cuve tournante et à axe verticale (malaxeur à béton de 50 litres).

La séquence de malaxage, observée à  $\pm 1$  seconde près, est la suivante :

- Introduction du ciment, de l'addition et des sables secs dans le malaxeur,
- Malaxage des poudres à sec durant 2 minutes,
- Introduction de l'eau et de la moitié du superplastifiant et malaxage durant 3 minutes,
- Introduction de la seconde partie du superplastifiant, et malaxage jusqu'à fluidification (durée variable),
- Introduction éventuelle des fibres, et malaxage final de 1 minute.

## **Chapitre III : Matériaux et procédures expérimentales**

---

Cette séquence de malaxage est simple et permet une action efficace des adjuvants. L'introduction des super plastifiants en deux temps augmente leur efficacité et permet ainsi de réduire la quantité à utiliser pour une fluidité donnée.

Le premier ajout d'eau et de super plastifiant permet de mouiller la surface des constituants secs. Cependant, lors du contact entre l'eau et les particules fines, une partie de l'eau et du super plastifiant est absorbée à la surface des grains, ce qui a pour effet de réduire considérablement l'efficacité du super plastifiant. Une fois la surface des particules fines mouillée, le deuxième ajout de super plastifiant est beaucoup plus efficace car son action n'est pas diminuée par l'absorption. On peut ainsi obtenir une meilleure fluidification.

### **III.4.2 Coulage et vibration**

Le mélange préparé est mis en place par coulage et vibration. Le coulage se fait en deux temps. Le moule est rempli aux trois quarts et il est soumis à une vibration jusqu'à l'apparition d'un léger ressuage. Ensuite, le moule est rempli totalement et la vibration reprend pendant une minute environ.



**Figure III.8** : Malaxeurs, moules et éprouvettes utilisés pendant les essais

### II.4.3 Détermination de la maniabilité

Il s'agit de déterminer le temps d'écoulement des mélanges fibrés et témoin, c'est à-dire de définir la maniabilité des mortiers et des bétons. Il s'agit donc de mesurer le temps d'écoulement du béton soumis à une vibration. La conduite de l'essai est la suivante : on introduit le béton dans la partie la plus grande délimitée par la cloison. Le béton est mis en place en 4 couches, chaque couche étant soumise à 6 coups au moyen de la tige de piquage. Quatre minutes après la fin du malaxage, la cloison est retirée, provoquant la mise en route du vibreur et le déclenchement du chronomètre. Sous l'effet de la vibration, le béton s'écoule. Le chronomètre est arrêté quand le béton atteint un trait repère sur la paroi opposée du boîtier. Le temps  $t$  mis par le béton pour s'écouler caractérise sa consistance. Ce temps sera d'autant plus court que le béton



## **Chapitre III : Matériaux et procédures expérimentales**

---

sera plus fluide et plus maniable. Dans notre cas, nous avons utilisé un maniabilimètre LCL pouvant contenir une capacité de trente litres pour avoir une information plus représentative du comportement rhéologique du béton frais, surtout dans le cas de l'utilisation de fibres de 50 mm. L'essai de mesure du temps d'écoulement a été mené conformément à la norme NF 18-452 et NF P 15-437. (Norme utilisée pour le cas béton).

D'après la valeur du temps d'écoulement ( $t$ ), on peut conclure que le mortier est :

- ferme si  $t \geq 40$  s,
- plastique si  $20 \text{ s} < t \leq 30 \text{ s}$ ,
- très plastique si  $10 \text{ s} < t \leq 20 \text{ s}$ ,
- fluide si  $t \leq 10 \text{ s}$ .

### **III.4.6 Mode de conservation**

Nous avons conservé les éprouvettes dans leurs moules pendant les premières 24 heures dans une ambiance à  $20 \text{ °C} \pm 2$  de température pour une hygrométrie de  $55\% \pm 5$ . Les moules sont ensuite recouverts par un film plastique afin d'empêcher un départ excessif de l'eau libre du béton par évaporation. Ils sont ensuite conservés dans une salle à  $20\text{°C} \pm 1\text{°C}$  sans échange d'humidité pendant 24 heures. Après démoulage, un groupe d'éprouvettes est immergé dans de l'eau à  $20\text{°C}$  jusqu'à l'échéance d'essai (7, 14, 28, 60, 365 jours). Un deuxième groupe est soumis à un traitement thermique à  $90\text{°C}$  pendant 3 jours après une cure de 4 jours à  $20 \text{ °C}$  en salle humide.

### **III.4.7 Traitement thermique**

Le traitement thermique à la pression atmosphérique consiste à mettre le matériau en étuve (air chaud) ou en ambiance humide (vapeur d'eau et immersion) et à lui faire subir une élévation de température. Le taux d'augmentation de la température doit également être contrôlé (au maximum  $20\text{°C} / \text{h}$  selon [Taylor, 1990]).

Dans cette étude, les éprouvettes ont été soumises, après 4 jours de cure à  $20 \text{ °C}$  dans une chambre humide à un traitement thermique à  $90\text{°C}$ . Au départ, les éprouvettes sont mises dans une étuve à température minimale de  $30\text{°C}$  pendant 24 heures afin de stabiliser toute la section des éprouvettes à cette température. Ensuite, la température est élevée à  $90 \text{ °C}$  suivant une vitesse

## Chapitre III : Matériaux et procédures expérimentales

---

de 20 °C/h et maintenu pendant deux jours. On laisse ensuite les éprouvettes se refroidir naturellement dans l'étuve pendant un jour après l'avoir éteinte.



**Figure III.9** : Armoire humide.

### III.5 Programme des essais

Lors de la fabrication, la caractérisation des BUHP est nécessaire. Cela consiste à connaître leur comportement à l'état frais à partir de tests simples et reproductibles. Les principaux tests réalisés sont empiriques, et ont pour objectif de vérifier rapidement la fluidité du matériau.

- La résistance à la compression sur éprouvettes prismatiques 4x4x16 cm<sup>3</sup> ;
- La résistance à la flexion sur éprouvettes prismatiques 4x4x16 cm<sup>3</sup>.

#### III.5.1 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  $\sigma_t$  un terme correctif de 0,6.

$$\sigma_t = 0,6 \cdot \sigma_{Rf} \quad (\text{III.1})$$

## Chapitre III : Matériaux et procédures expérimentales

La résistance à la flexion est calculée suivant la formule :

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

P : force appliquée en [Kgf].

b : largeur de l'éprouvette.

h : hauteur de l'éprouvette.

L : distance entre les appuis (cm).

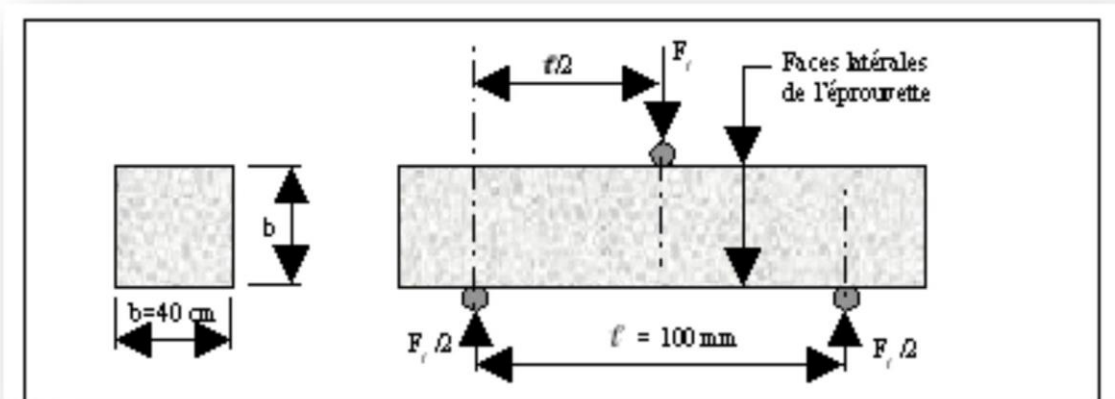


Figure III.10 : Dispositif pour l'essai de résistance à la flexion

### III.5.2 Essai de compression : norme [NFP 15-451]

Chaque demi-échantillon 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-échantillon est placée entre elle de manière que son extrémité intacte dépasse d'au moins 1cm et que les arrêtes longitudinaux d'échantillons 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'échantillon. La résistance à la compression et calculer suivant la formule :

$$R_c = F/S \text{ [KgF/ cm}^2\text{]} \quad (\text{III.3})$$

## Chapitre III : Matériaux et procédures expérimentales

F : charge appliquée en KgF.

S : section latérale de l'éprouvette égale à  $16 \text{ cm}^2$ .

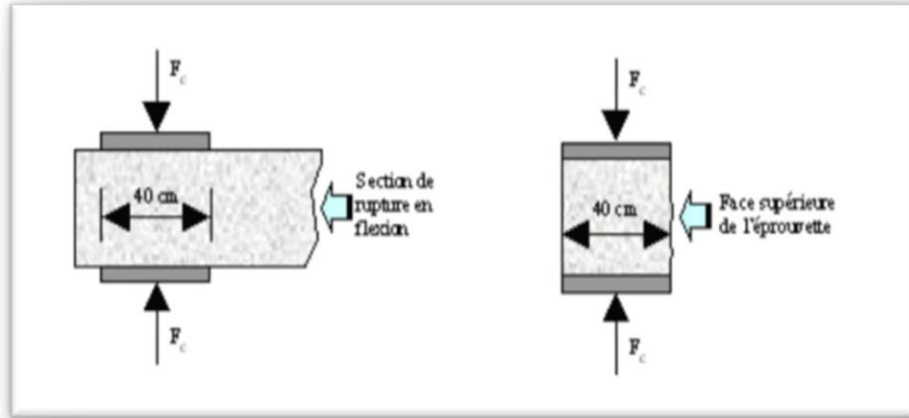


Figure III.11 : Dispositif de rupture en compression



Figure III.12 : machine d'essais à la pression avec dispositif de compression et de traction

### III.5.3 Essai de retrait et de gonflement :(NF P-15-433)

Cet essai a pour but de mesurer, en fonction du temps, les variations dimensionnelles de retrait des éprouvettes à l'état durci, dues aux effets de l'hydratation et de la dessiccation des

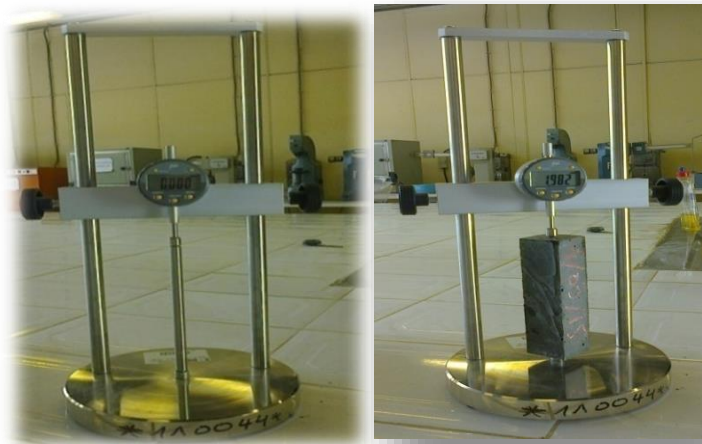
### Chapitre III : Matériaux et procédures expérimentales

---

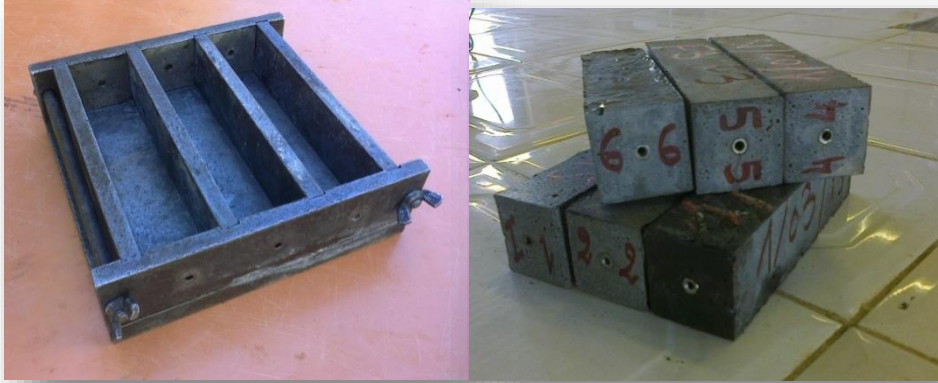
matériaux cimentaires, conservées après démoulage dans une salle à atmosphère contrôlée selon la norme NF P15-433 [AFNOR NF P15-433, 1994].

Afin de comprendre comportement hygrométrique de notre béton, nous avons décidé de mesurer le retrait. La mesure de retrait s'effectue donc sur des éprouvettes prismatiques de dimensions 4×4×16 cm, selon la norme (NF P-15-433). Ces éprouvettes sont équipées de plots métalliques à chaque extrémité et placées verticalement dans le déformètre, La mesure de la variation de longueur de l'éprouvette est réalisée à l'aide d'un rétractomètre munie de billes que l'on positionne au contact des plots de l'éprouvette. L'incertitude de mesure est de 5 µm. L'étalonnage du rétractomètre est effectué à l'aide d'une tige étalon en Invar qui sert de référence de mesure. L'appareillage de mesure de retrait (Rétractomètre) est présenté sur la Figure III.13. Le retrait de béton est mesuré à chaque jour après le démoulage.

Les mesures de retrait sont effectuées à des échéances très courtes juste après démoulage à 24 heures, la périodicité de mesure augmentant ensuite avec le temps. Parallèlement à ces mesures au rétractomètre, l'évolution dans le temps des masses des éprouvettes est également suivie.



**Figure III.13 :** Appareil de mesure de retrait (Rétractomètre).



**Figure III.14** : les moules et éprouvettes du retrait

### III.5.4 Essai de capacité d'absorption d'eau

La capacité d'absorption d'un béton donne une idée générale sur la présence et l'importance des vides (pure). C'est une manière comme une autre de tester la compacité du mélange. Plus le béton est compact plus sa capacité d'absorption est faible et donc plus il est étanche.

Cette capacité d'absorption est déterminée par une méthode simple, les éprouvettes sont pesés après leur passage à l'étuve à 105° C (figure. a) d'où elles sont retirées qu'après stabilisation de leur poids soit ( $P_s$ ), ensuite elles sont entièrement trempées dans l'eau pendant 24 h (figure. b), puis retirées et pesées, soit ( $P_h$ ). La capacité d'absorption est donnée par la formule suivante :

$$Ab \% = \frac{P_h - P_s}{P_s} \times 100 \quad (III.4)$$

La plupart des bons bétons ont une absorption bien inférieure à 10% en masse (Neville, 2000).



**a** : stabilisation du poids par étuvage



**b** : absorption d'eau par l'immersion

**Figure III.15** : Essai de capacité d'absorption d'eau.

### III.5.5 Essai de déformabilités et module d'élasticité

Sous l'effet d'un chargement en compression l'éprouvette  $10 \times 10 \times 40 \text{ cm}^3$  de béton se déforme et se rompt quand elle atteint la charge de rupture  $P_c$  (figure III.16).



**Figure III.16** : Essai de déformabilité : compression sur prisme  $10 \times 10 \times 40 \text{ cm}^3$ .

## Chapitre III : Matériaux et procédures expérimentales

L'essai de déformabilité qui est réalisé sur éprouvettes prismatiques ( $10 \times 10 \times 40 \text{ cm}^3$ ) à 28 jours d'âge, s'agit d'appliquer des contraintes croissantes sur l'éprouvette de béton et de mesurer les déformations correspondantes jusqu'à la valeur de la charge de rupture  $P_c$  préalablement mesurée.

Les déformations longitudinales et transversales de l'éprouvette écrasée sont mesurées à l'aide de l'appareillage non normalisé présenté sur la figure III.17. Ce dernier est constitué de trois cadres à pointeaux (quatre pointeaux pour chaque cadre), qui sont installés sur l'éprouvette de béton sur une surface de  $200 \text{ mm}^2$  dans le sens longitudinal, à distances égales (10 cm). Sur les cadres sont fixés six indicateurs à cadran ayant la valeur d'une division de 0.01 mm, deux pour mesurer les déformations longitudinales et quatre pour mesurer les déformations transversales.



**Figure III.17** : Essai de déformabilité : mesure des déformabilité pendant la compression du prisme de  $10 \times 10 \times 40 \text{ cm}^3$ .



## **Chapitre III : Matériaux et procédures expérimentales**

---

Une fois, l'appareillage fixé sur l'éprouvette en béton, cette dernière est centrée entre les plateaux de la presse pour subir une compression et permettre la mesure des déformations longitudinales et transversales.

### **II.5.6 La résistance à l'attaque agressive**

Les altérations du béton, observées en présence d'agent agressifs, qu'ils soient minéraux organiques ou biologiques, sont d'ordre chimiques ou physiques. Les altérations physiques peuvent être :

- surfacique : abrasion-érosion-cavitation-écaillage.
- interne (fissures): chargement structural- gradients d'humidité ou de température pression de cristallisation-exposition aux températures extrêmes.

Les altérations chimiques sont dues essentiellement aux acides, aux bases et aux solutions salines, elles entraînent presque toujours la dissolution de la chaux et le plus souvent, en association avec cette dissolution, la formation des composés nouveaux dont les conséquences sont des ordres macroscopiques:

Mécaniques - chimiques: Affaiblissement des propriétés liantes, modification de la porosité et des propriétés de transport du gaz et du liquide. Les éprouvettes sont placées dans des conditions naturelle son milieu humide puis sont immergés séparément selon la norme ASTM C267-96, pendant deuze mois dans les solutions suivantes :

- -5% Sulfate de sodium ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ).
- -10% hydroxyde de sodium ( $\text{NaOH}$ ).

### **III.5.7 L'analyse aux rayons X**

#### **III.5.7.1 Préparation de l'échantillon**

On prépare l'échantillon sous la forme d'une poudre, La diffraction aux rayons X est effectuée sur les fines particules des bétons broyés ( $\varnothing \leq 80 \mu\text{m}$ ). Le broyage est une opération nécessaire dans le processus de la préparation de l'étude des échantillons. La préparation des échantillons des BPRF a été faite au laboratoire de génie civil à l'université de Biskra.



**Figure III.18 :** Broyeur.



**Figure III.19 :** Poudre broyée.

### III.5.7.2 Analyse par diffraction des rayons X

La diffraction des rayons X est appliquée pour identifier les produits formés dans les BPRF conservés dans les solutions 5% de sulfates de sodium et 10% hydroxyde de sodium (NaOH). Cette analyse a permis de mettre en évidence l'apparition de phases cristallines au niveau de la surface des échantillons exposés aux milieux agressifs. Le diffractomètre utilisé est couplé à un système d'informatique. Pour les BPRF, on a prélevé des échantillons en poudre de la surface des éprouvettes ayant atteintes l'âge de 12 mois.

### III.6 Conclusions

Dans ce troisième chapitre, nous avons exposé les différents matériaux utilisés dans nos formulations ainsi que leurs propriétés physiques, minéralogiques et chimiques. Six compositions ont été mises au point, avec ou sans quartz broyé et laitier broyé.

Pour qualifier les performances des différents bétons, de nombreux essais ont été définis : certains sont liés au domaine physico-mécanique, comme les essais de résistance à la

### **Chapitre III : Matériaux et procédures expérimentales**

---

compression et à la traction par flexion et d'autres concernent les propriétés de transfert par exemple les essais d'absorption par immersion. Pour mieux étudier l'influence du temps de cure et l'effet du type (d'addition minérale ou de sable) sur les performances des BPRF, les essais d'absorption par immersion et d'immersions dans les solutions agressifs ont été réalisés après 28, et 360 jours de cure. Ces essais sont nécessaires pour bien évaluer les meilleures performances de durabilité des BPRF étudiés dans ce travail.

**Chapitre IV**  
**PRESENTATION ET**  
**DISCUSSION DES**  
**RESULTATS**

## **Chapitre IV : Présentation et discussion des résultats**

---

### **IV.1 Introduction**

La synthèse bibliographique a mis en évidence les besoins d'expérimentation pour étudier l'effet des fibres métalliques et le traitement thermique sur les propriétés du béton de poudres réactives fibrés BPRF.

Dans ce cadre, ce chapitre est consacré à l'analyse et à l'interprétation des résultats d'un programme expérimental qui a comme but, l'étude de l'effet de la présence de fibres (avec ou sans fibre), le type d'addition fumée de silice, de quartz broyé (avec ou sans quartz broyé) et de laitier broyé (avec ou sans laitier broyé) ainsi que le traitement thermique (sans traitement, avec traitement à 90 °C).

Les premiers résultats présentés concerneront les propriétés mécaniques des bétons fibrés, à savoir les résistances mécaniques en compression uni axiale, en flexion trois points en fonction du temps ainsi que le module d'élasticité. Les résultats des mesures des déformations (retrait et gonflement du béton). La durabilité de ces nouveaux matériaux sera étudiée à partir des essais classiques d'absorption d'eau par immersion, déformabilité, attaques chimiques et sulfatiques.

Enfin, les résultats obtenus lors de l'étude de la microstructure seront présentés l'ensemble des résultats entre BPRF selon le sable de dune et d'addition (fumée de silice ou quartz broyé ou laitier broyé).

### **IV.2 Caractéristiques instantanées à l'état durci**

#### **IV.2.1 L'effet de traitement thermique sur les propriétés mécanique**

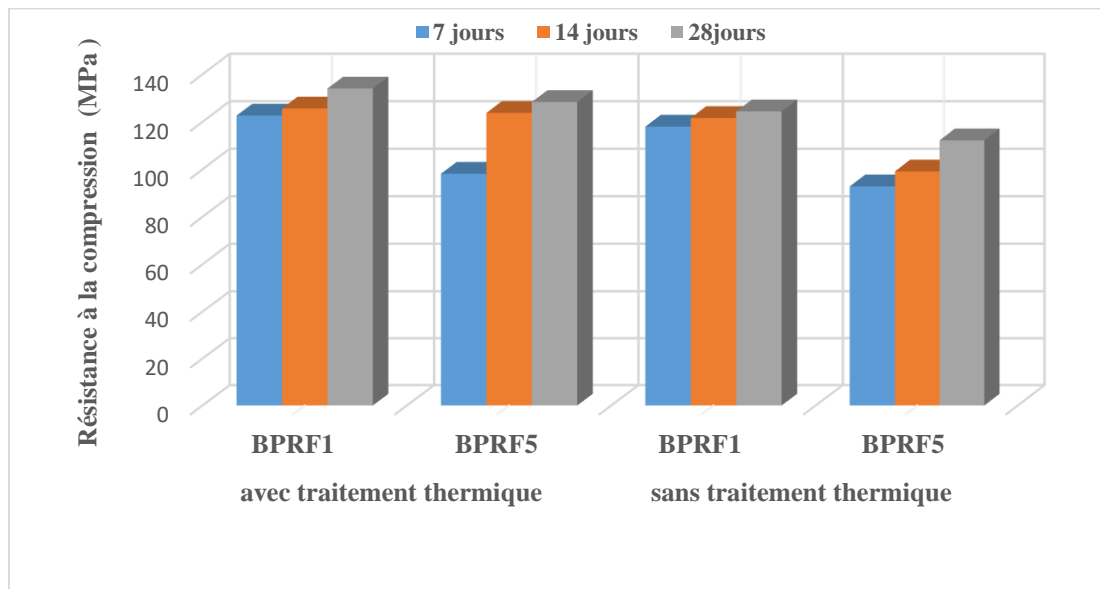
Des éprouvettes prismatiques de dimensions 40 ×40 ×160 mm<sup>3</sup> ont été utilisés pour l'essai de traction par flexion a trois points et les demi- éprouvettes obtenues après rupture ont été testées en compression selon la norme NF EN 196-1.

Les éprouvettes des formulations des BPR et BPRF sont placées dans l'eau, pour chaque formulation de BPR et de BPRF l'une des éprouvette à laisser dans l'eau jusqu'a le jour d'essai et l'autre on le placer à la vapeur d'eau pendant trois jours pour accélérer l'hydratation avant l'écrasement.

## Chapitre IV : Présentation et discussion des résultats

### IV.2.1.1 : La résistance à la compression

Les valeurs des résistances en compression des BPRF à 7, 14, et 28 jours avec et sans traitement thermique sont données dans la figure IV.1.



**Figure IV.1 :** Evolution de la résistance à la compression des BPRF en fonction de traitement thermique

D'après les résultats présentés de la figure IV.1, on remarque qu'il y a une évolution de la résistance à la compression des bétons en fonction de temps qui sont soumis à un effet de traitement thermique.

On remarque que le traitement thermique est très important, il a accéléré les cadences de l'acquisition de résistances mécaniques. Cela s'explique par le fait que la partie gazeuse et liquide dans un béton, sous l'influence de températures élevées, se dilate des dizaines de fois plus que la partie majoritaire qui est le solide, n'ayant pas acquis des résistances mécaniques capables de faire face à ces contraintes internes de dilatation, le béton se fissure et diminue ainsi de ses résistances mécaniques.

BPRF1 après 28 jours présente la meilleure valeur de résistance à la compression avec traitement thermique, La valeur de croissance est 7,2%.

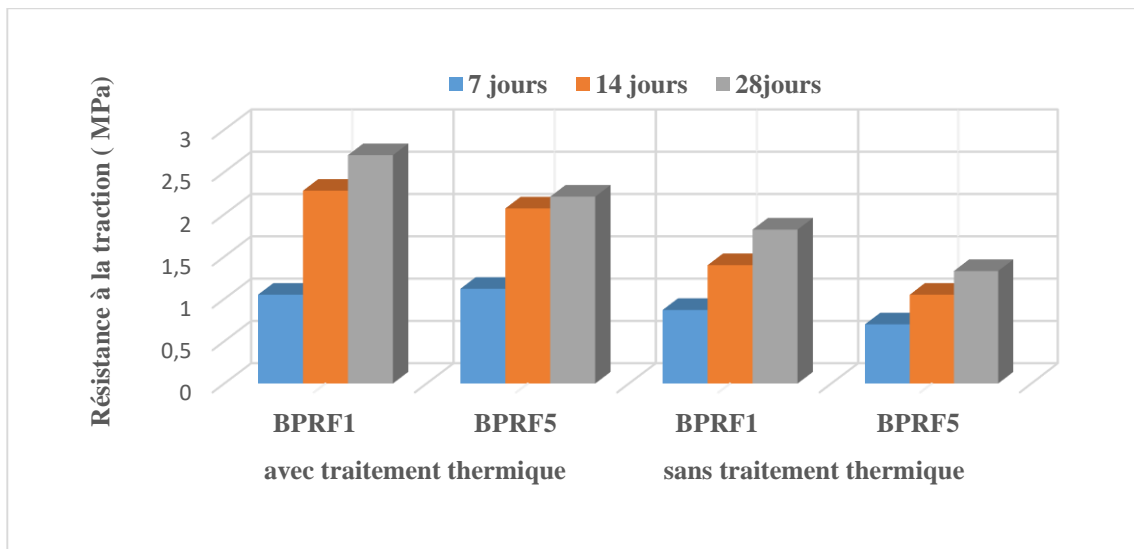
## Chapitre IV : Présentation et discussion des résultats

Ces résultats montrent que l'étuvage améliore la résistance en compression des BPRF et que cette augmentation de résistance est d'autant plus élevée que la température d'étuvage est importante.

Ces résultats confirment d'autres études menées sur ces types de bétons incorporant de la fumée de silice et du quartz broyé [Richard et al, 1995] [Verbeck et al, 1995], [Bonneau, 1995], [Ducat et al, 1995], [Tafraoui et al, 2009].

### IV.2.1.2 : La résistance à la traction par flexion

Les résistances à la flexion des BPRF à 7, 14, et 28 jours avec et sans traitement thermique sont données dans la figure IV.2.



**Figure IV.2 :** Evolution de la résistance à la traction des BPRF en fonction de traitement thermique.

D'après les résultats de la figure IV.2, on constate que les valeurs de la résistance à la traction de BPRF1 à base de (25% de fumée de silice +1% de fibre métallique) présentent les meilleures valeurs en fonction de temps avec et sans traitement thermique. Le croisement de la résistance à la traction BPRF1 est 32,59% avec et sans traitement thermique.

## Chapitre IV : Présentation et discussion des résultats

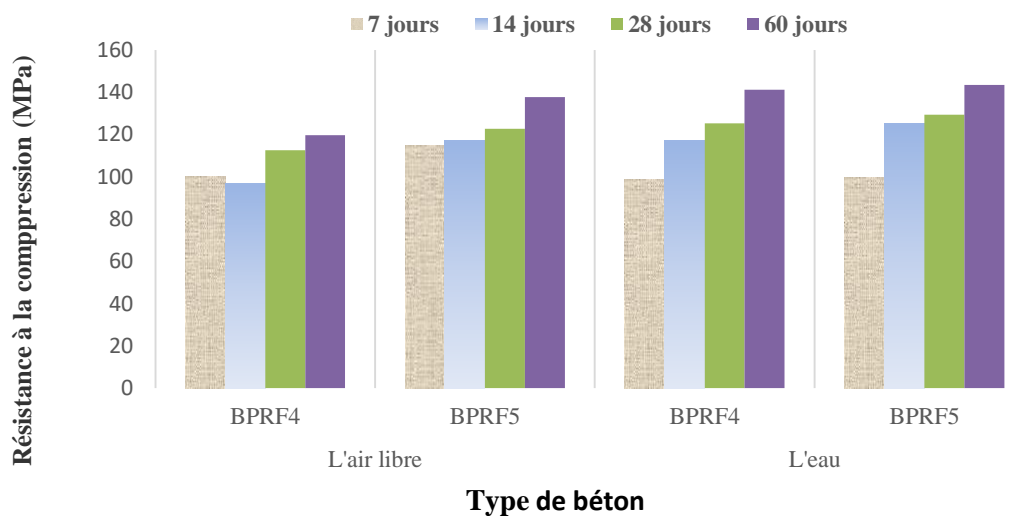
### IV.2.2 L'étude des propriétés mécanique de différentes formulations des BPRF à l'air libre et dans l'eau

Cet essai est effectué sur les éprouvettes de la 1<sup>ère</sup> formulation et la 2<sup>ème</sup> formulation des BPRF qui sont traité thermiquement au vapeur d'eau à 24 heures avant l'écrasement.

Les éprouvettes de 1<sup>ère</sup> formulation des BPRF sont placées dans l'eau et les éprouvettes de 2<sup>èmes</sup> formulations des BPRF à l'air libre.

#### IV.2.2.1 La résistance à la compression

Les résistances à la compression des bétons BPRF à 7, 14, 28 et 60 jours dans les deux milieux de conservations (l'eau et l'air) sont données dans la figure IV.3.

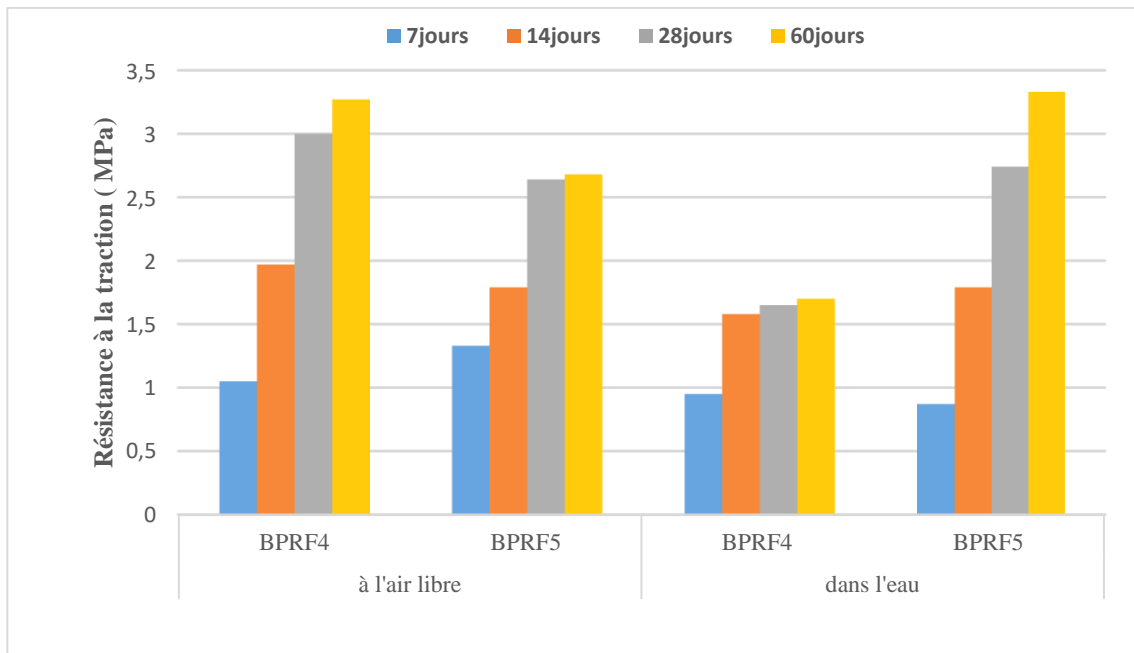


**Figure. IV.3 :** Evolution de la résistance à la compression des BPRF à l'air libre et à l'eau

#### IV.2.2.2 La résistance à la traction par flexion

La Figure IV.4 présente l'évolution de la résistance à la traction par flexion des BPRF à l'air libre et dans l'eau.





**Figure. IV.4** : Evolution de la résistance à la traction par flexion des BPRF à l'air libre et dans l'eau

D'après les figures illustrées ci-dessus, on remarque que :

Les résistances des bétons conservés à l'air libre et dans l'eau augmentent d'une façon continue jusqu'à l'âge de 60 jours avec un écart entre les deux modes de conservation, donc on trouve comme il été indiqué précédemment, que la résistance d'un béton conservé à l'eau augmente en fonction du temps, et atteinte des valeurs très élevées.

Ce phénomène est dû essentiellement par le fait que le béton est bénéficié et d'être conservé à l'eau pendant la période d'hydratation c'est-à-dire il n'y a plus de départ d'eau, qui empêche l'hydratation du ciment, par contre, le béton conservé à l'air, perd son eau pendant la période de l'hydratation ce qui empêche l'hydratation de se continuer, ceci peut être expliqué par le fait que la quantité des hydrates formées est très faible ce qui influe sur la structure interne du béton.

Il apparait donc, que le mode de conservation a une influence particulière sur les propriétés du béton, quand ce dernier n'était pas protégé, il perdait son eau par évaporation et sa résistance était considérablement réduite, donc, l'humidité interne d'un béton varie dans le

## Chapitre IV : Présentation et discussion des résultats

même sens que celle du milieu ambiant. Cependant, pour obtenir un béton relativement imperméable, il faudrait une conservation totale à l'eau. C'est-à-dire un degré d'humidité de 100%.

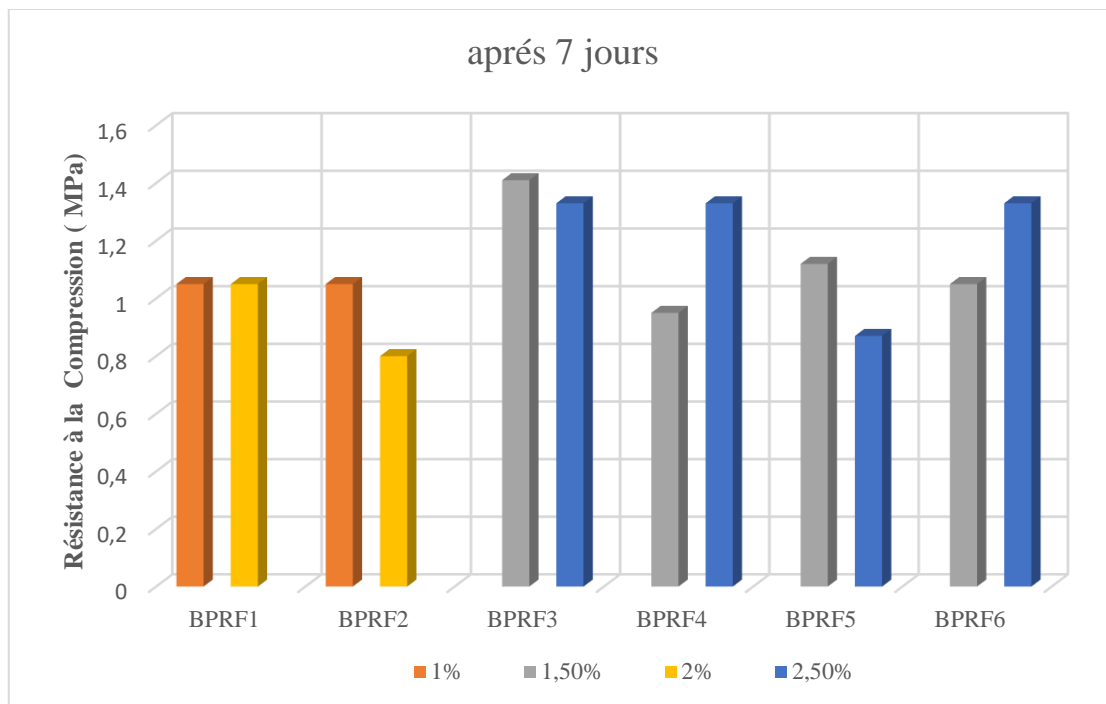
Le BPRF5 donne la bonne résistance à la compression 143,5 MPa de croissance est 4% et la bonne résistance à la traction par flexion 3,33MPa de croissance est 48%.

### IV.2.3 L'étude des propriétés mécaniques de différentes formulations des BPR sans et avec fibre métallique

#### IV.2.3.1 La résistance à la compression

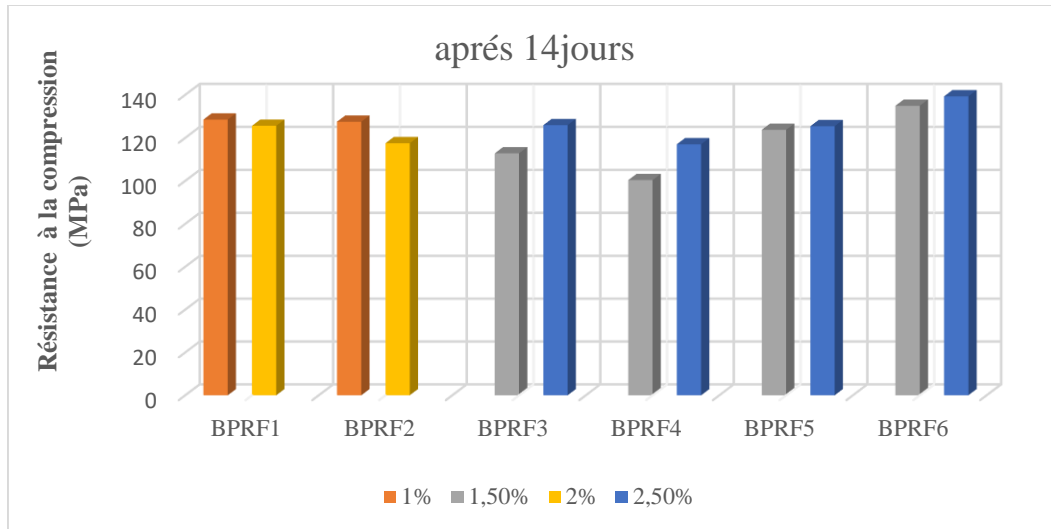
Les valeurs de résistances en compression des BPRF étudiés en fonction du temps et les pourcentages des fibres sont données dans les figures suivantes :

- **Après 7 jours**



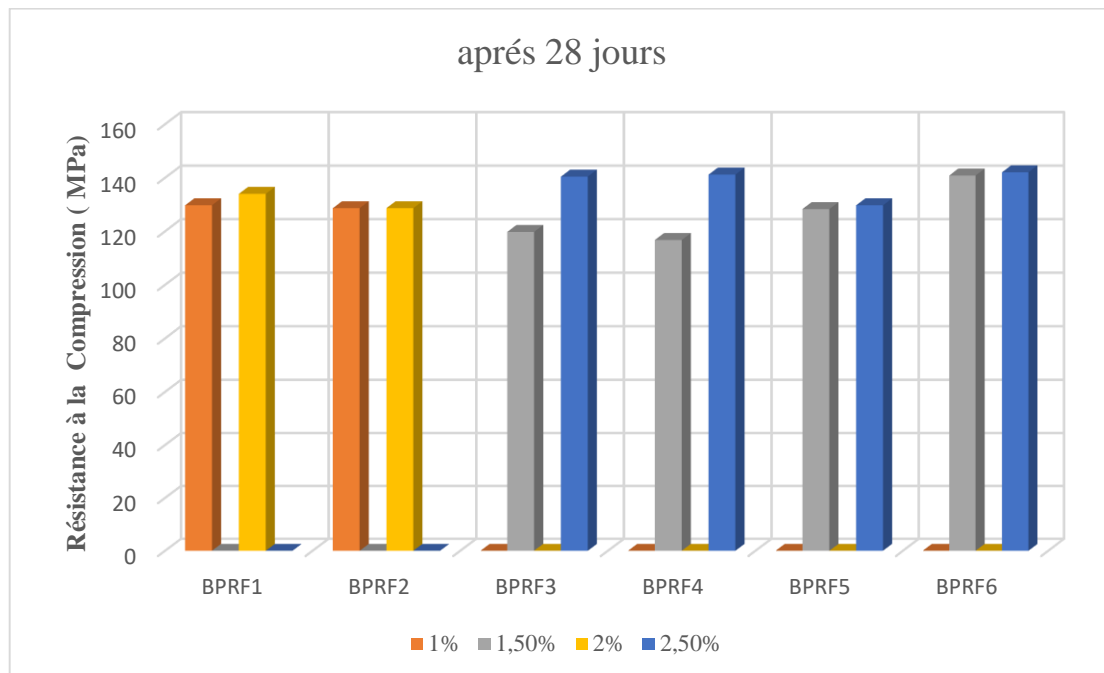
**Figure IV.5 :** Evolution de la Résistance à la compression en fonction des pourcentages des fibres après 7 jours

- Après 14 jours



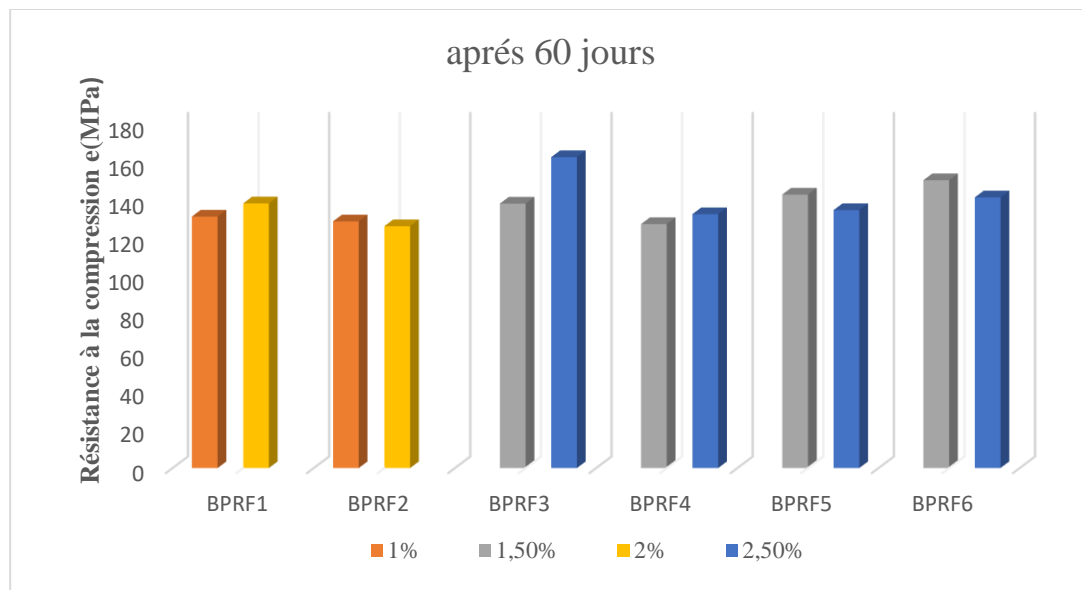
**Figure IV.6 :** Evolution de la Résistance à la compression en fonction des pourcentages des fibres après 14 jours

- Après 28 jours



**Figure IV.7 :** Evolution de la résistance à la compression en fonction les pourcentages des fibres après 28 jours

- Après 60 jours



**Figure IV.8** : Evolution de la résistance à la compression en fonction des pourcentages des fibres après 60 jours

La résistance mécanique en compression constitue une caractéristique essentielle du béton et l'un des critères fondamentaux de notre étude. Nous avons donc déterminé la résistance mécanique en compression des six BPRF étudiés à 7, 14, 28, et 60 jours. Les éprouvettes étaient conservées dans la salle humide à température et humidité contrôlées ( $20 \pm 2^\circ\text{C}$  et  $95 \pm 5\%$  HR) conformément aux normes (NF EN 12390, 2009).

Les évolutions des résistances en compression moyennes, ainsi que leur cinétique d'évolution sont présentées sur les Figures (Figure. IV.5, Figure. IV.6, Figure. IV.7 et Figure. IV.8). Nous rappelons que toutes les éprouvettes sont soumises à un traitement thermique.

On peut tout d'abord constater que le BPRF augmente en fonction du pourcentage des fibres. Le béton BPRF6 à base de (2,5% fibre métallique) présente une résistance très remarquable elle atteint 135,8 MPa à 7 jours. Les BPRF1 et BPRF2 à base de (1% fibre métallique) et sans fibre métallique ont enregistré des valeurs proches est faible par rapport à autre béton.

## Chapitre IV : Présentation et discussion des résultats

---

Après 28 jours de conservation, les formulations à base de (2,5% de fibre métallique) ont donné les meilleures valeurs de la résistance à la compression par rapport à autres bétons fibrés.

Ces évolutions de résistance en compression sont conformes à celles généralement observées pour les BPRF cités dans la littérature [Malier et al, 1995], [Richard et al, 1995], [Aitcin, 1996], [Long et al, 2002], [Maeder et al, 2004], [CSTB, 2005] et [Tafroui et al, 2009].

Après 60 jours de conservation ; Le BPRF3 à base de (2,5% de fibre métallique) a connu une évolution importante à la compression qui dépasse 26%,

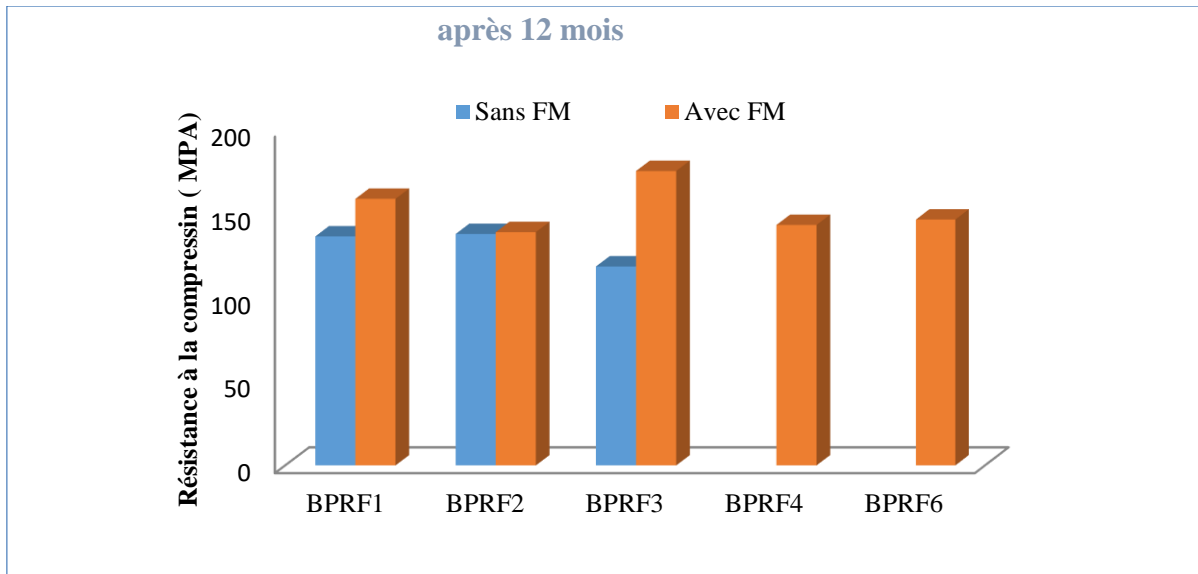
Pour ce qui concerne la teneur en eau, les bétons BPRF6 avec un faible rapport Eau/Liant, égale à 0,22 et des résistances atteindre de l'ordre de 143 MPa à 60 jours ; ces résultats confirment les travaux de (Richard et Cheyrezy, 1995).

Ces résultats sont en concordance avec ceux de Mehta (Mehta, 1980). L'auteur a expliqué ce phénomène ; que pour des valeurs de E/C inférieures à 0,2. Pour de telles valeurs, la quantité d'eau n'est pas suffisante pour hydrater la totalité du ciment, ce qui implique qu'une part importante du ciment demeure non hydratée et joue le rôle d'un filler, mais demeure suffisante pour procurer une cohésion et structurer le matériau.

Les grains de ciment anhydre sont plus résistants que les principaux hydrates du ciment (la portlandite ou les gels silico-calciques). Ainsi, ils peuvent contribuer à l'augmentation des performances mécaniques et confèrent au matériau une capacité d'auto-cicatrisation en présence d'eau.

## Chapitre IV : Présentation et discussion des résultats

- L'effet des fibres sur la résistance mécanique après 12 mois



**Figure IV.9 :** Evolution de la résistance à la compression avec et sans fibre après 12 mois.

Les résultats de la figure IV.9, montrent clairement que la présence des fibres métalliques produit une augmentation de la résistance à la compression pour les bétons fibrés par rapport aux formulations non fibré.

L'augmentation de la résistance à la compression des BPRT sans fibres après 12 mois ne dépasse pas 12 MPa, avec un taux d'augmentation 8,25% par rapport à 60 jours. Par ailleurs les BPR fibrés après 12 mois présentent une augmentation de la résistance à la compression plus de 20 MPa, soit un taux de 12,63%.

Effet de la teneur en fibres métalliques : la confrontation des deux formules BPRF3 avec 2,5% de FM et BPRF3 avec 1,5% de FM, qui ne se distinguent que par leur dosage en fibres, met en évidence que la réduction de la quantité de fibres provoque une baisse de la résistance en compression de 14,24% à 60 jours.

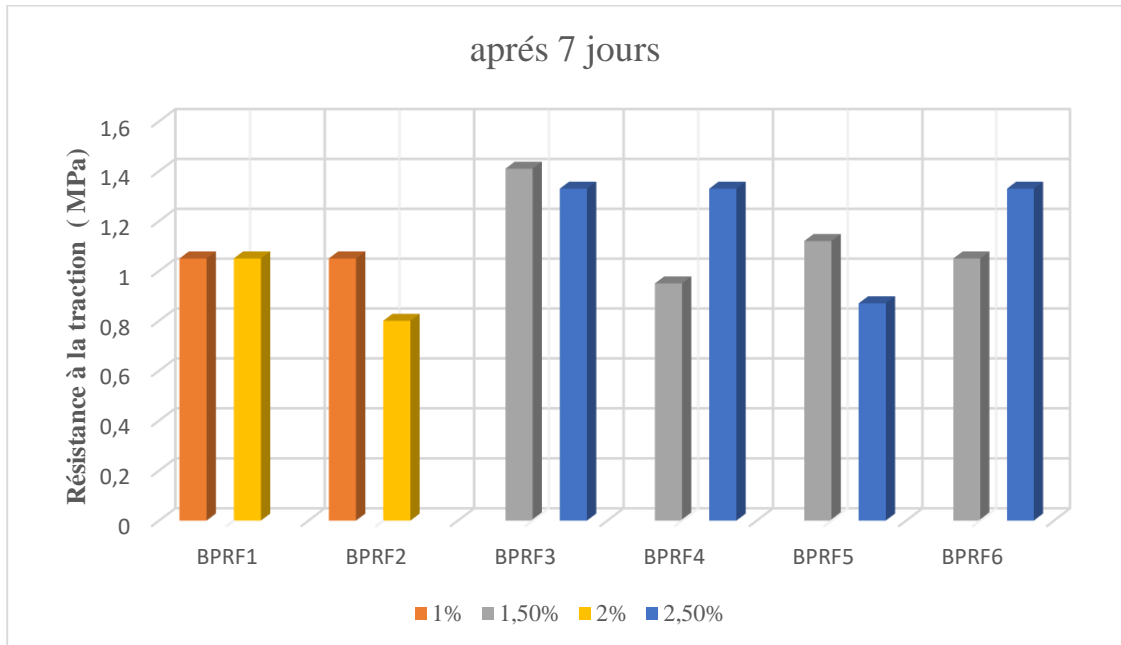
Ce résultat confirme les tendances observées par (Bonneau et al. 1997) et (Taфраoui et al. 2009).

## Chapitre IV : Présentation et discussion des résultats

### IV.2.3.2 La résistance à la traction par flexion

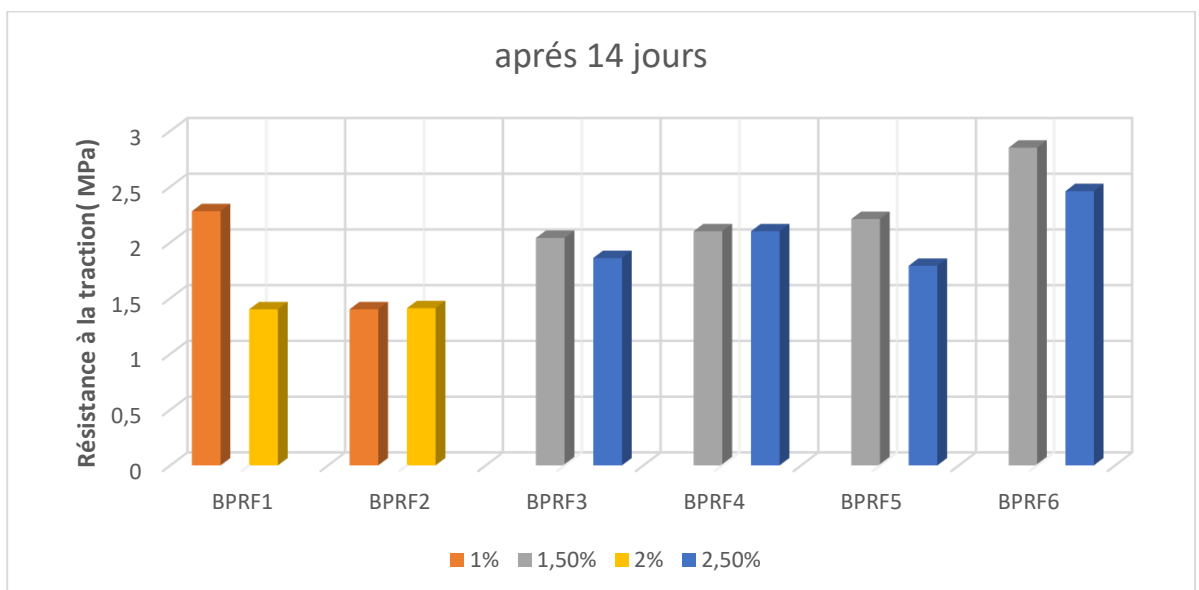
Pour chaque formulation BPRF, trois éprouvettes prismatiques sans entaille ont été testées en flexion 3 points. Les résultats obtenus sont donnés dans les figures suivantes

- **Après 7 jours**



**Figure. IV.10** : Evolution de la Résistance à la traction par flexion en fonction les pourcentages des fibres après 7 jours

- **Après 14 jours**



**Figure. IV.11** : Evolution de Résistance à la traction par flexion en fonction les pourcentages des fibres après 14 jours

- Après 28 jours

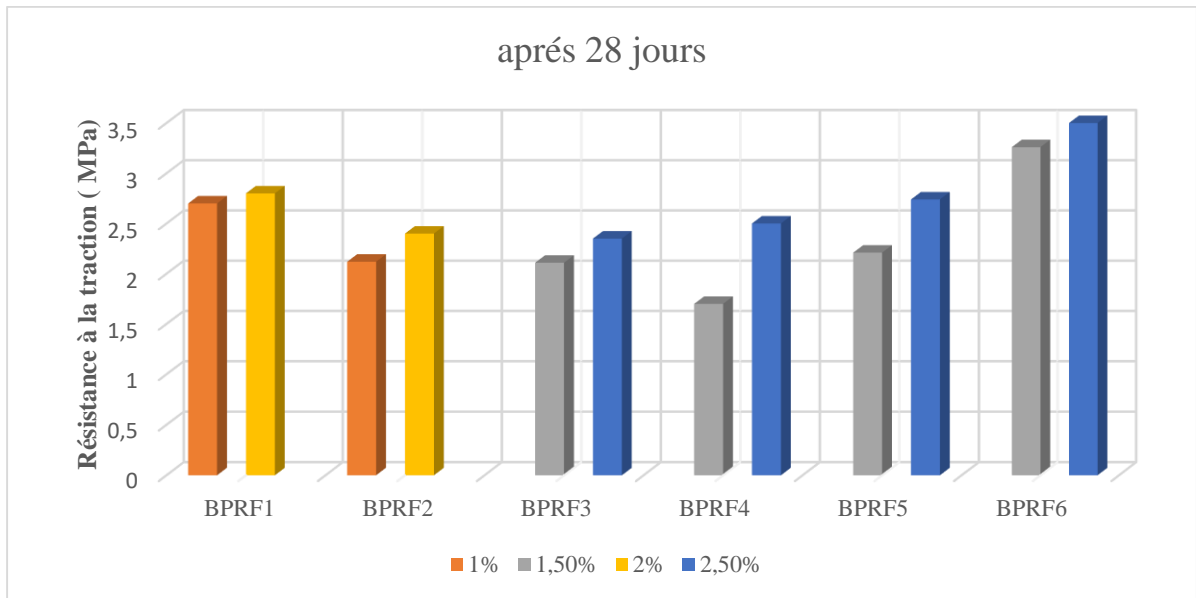


Figure IV.12 : Evolution de la résistance à la traction par flexion en fonction les pourcentages des fibres après 28 jours

- Après 60 jours

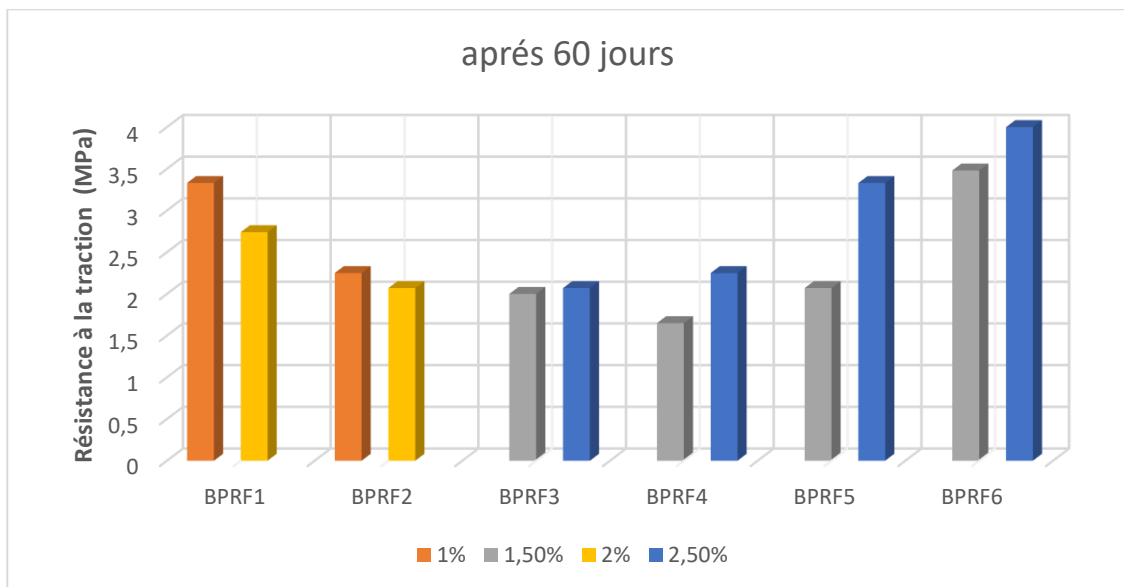
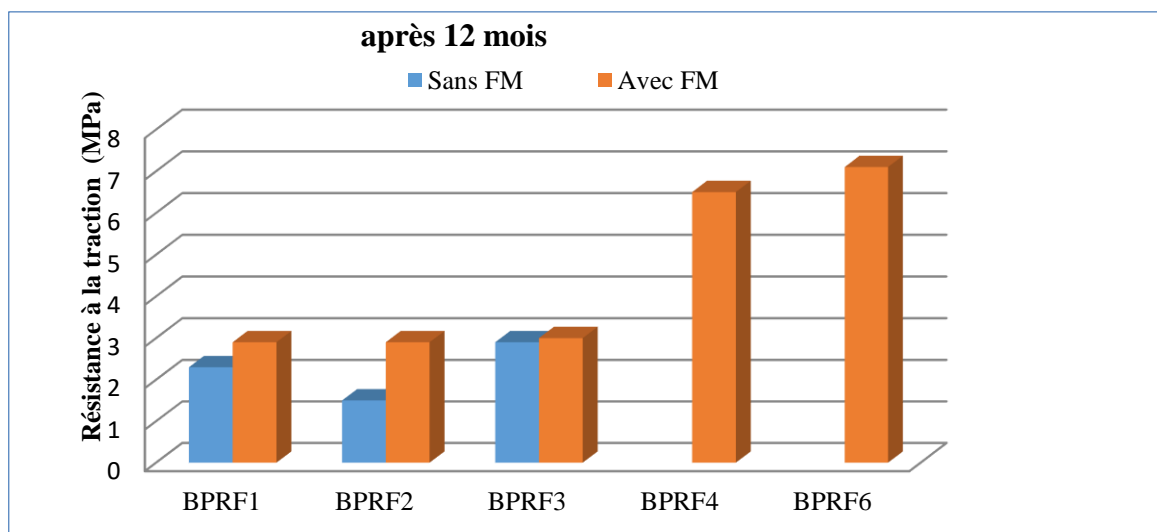


Figure IV.13 : Evolution de la Résistance à la traction par flexion en fonction les pourcentages des fibres après 60 jours



- Après 12 mois



**Figure. IV.14** : Evolution de résistance à la traction par flexion avec et sans fibre après 12 mois.

D'après les résultats obtenus, nous pouvons constater que la résistance en traction par flexion est dépasser 4 MPa pour la plupart des formulations de béton. Les valeurs maximales sont obtenues pour les BPRF6 avec une croissance de 66,75% par rapport la résistance de BPRF6 d'après 7 jours.

On peut conclure que les résultats expérimentaux de la résistance à la traction par flexion des bétons BPRF renforcés de fibres métalliques témoignent bien de la plus grande efficacité des fibres pour ce type de sollicitation.

### III.3 Effet du quartz broyé

L'introduction du quartz broyé dans les BPRF ne conduit pas globalement à une augmentation importante des résistances à la flexion (3,33 %) mais influe favorablement sur les résistances en compression (20,69 %).

- en flexion, les effets sont légèrement positifs lorsqu'on associe le quartz broyé et les fibres métalliques (8,45 %) et plus fortement négatifs lorsqu'on associe le quartz broyé et le traitement thermique (6,33 % pour le traitement à 90°C) ;

## Chapitre IV : Présentation et discussion des résultats

---

- en compression, les effets sont significativement négatifs lorsqu'on associe le quartz broyé et les fibres métalliques (3,5 %) et positifs lorsqu'on associe le quartz broyé et le traitement thermique (8,6 % pour le traitement à 90°C).

L'amélioration des résistances mécaniques en compression des BPRF traités thermiquement en présence de quartz broyé est certainement liée à l'apparition de nouvelles phases hydratées comme décrit par [Malier et al, 1995], [Maeder et al, 2004] et [Tafraoui et al, 2009]. La baisse de ces mêmes résistances en présence de fibres et de quartz broyé pourrait être liée à une compacité plus faible liée à un desserrement de l'empilement granulaire (plus sensible en compression qu'en flexion).

La réduction des résistances en flexion des BPRF renfermant du quartz broyé et traités thermiquement à 90°C pourrait s'expliquer par une compétition entre la formation de nouveaux hydrates (effet favorable) et l'augmentation des défauts liés au traitement thermique (effet défavorable), ces derniers l'emportant à température de traitement plus élevée (90 °C).

### IV.4 Effet des fibres métalliques

L'introduction de fibres métalliques est le paramètre le plus important dans le gain des résistances en compression (+17,20 %) et surtout en flexion (+48,27 %). Ces améliorations de résistances sont à relier au dosage très important des BUHP en fibres métalliques et sont en accord avec les résultats obtenus par d'autres chercheurs tels que [Cheyrezy, 1998] ,[Jianxin et al, 2002] et [Tafraoui et al, 2009].

Du point de vue des interactions du 1<sup>er</sup> ordre, la présence de fibres lors des traitements thermiques s'avère être un paramètre très influent : en effet, le gain de résistance en flexion est de 32,59 % lorsque les BPRF sont fibrés et traités thermiquement à 90°C.

Ceci est à relier aux fortes contraintes qui se développent dans les BPRF au cours des traitements thermiques et qui sont reprises par les fibres sous peine de rupture précoce. En compression, l'effet est moins prépondérant et peut même être considéré comme négligeable (respectivement 12,63 % à 90°C).

## Chapitre IV : Présentation et discussion des résultats

### IV.5 Effet des traitements thermiques

Le traitement thermique à 90°C conduit à une baisse significative des résistances en flexion (6,33 %) et à une augmentation plus importante des résistances en compression (+20,7 %).

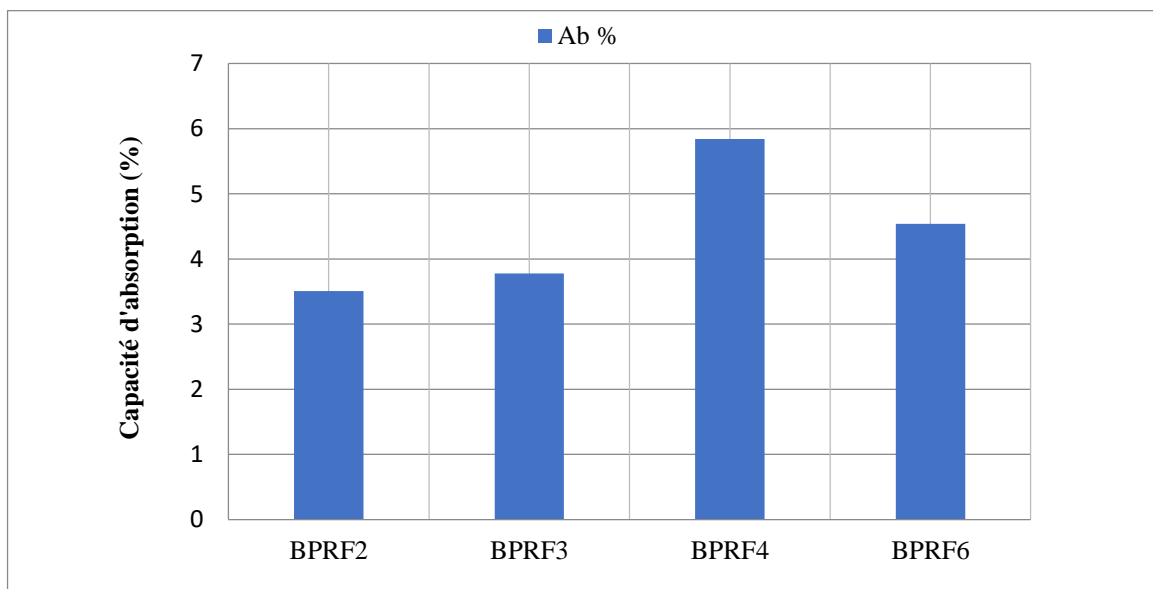
D'après [Malier et al, 1995], [Jianxin et al, 2002] et [Tafraoui et al, 2009] le traitement thermique à 150°C améliore les deux types de résistances mesurées, le gain en compression (+33,3 %) étant plus élevé que celui en flexion (+11,6 %).

Ce phénomène est certainement à relier à la formation de nouveaux hydrates réputés plus résistants [Tafraoui et al, 2009].

### IV.6 Etude de la durabilité du béton à poudre réactive fibré

#### IV.6.1 Absorption d'eau par immersion

Les résultats d'essai d'absorption d'eau par immersion pour les différentes formulations des bétons de poudre réactives fibrés sont présentés sur la Figure IV.15.



**Figure IV.15** : Capacité d'absorption d'eau des différentes formulations du BPRF.

D'après la figure IV.15 on remarque que le coefficient d'absorption d'eau par immersion est clairement plus faible pour le béton de poudre réactive fibré (BPRF2 avec 23% FS, 35% QB et sans laitier broyé) par conséquent une plus grande compacité. L'augmentation de la teneur en fines engendre une baisse de l'absorption d'eau.

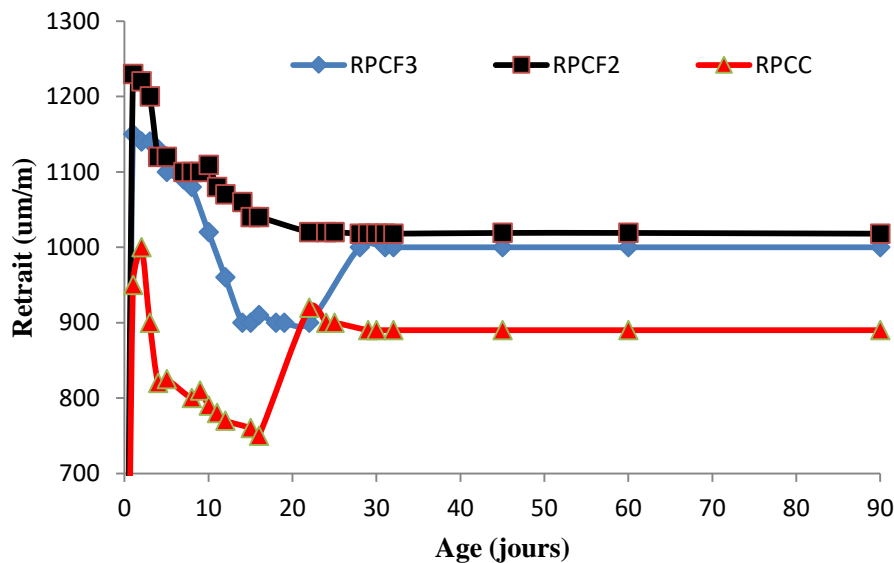
## Chapitre IV : Présentation et discussion des résultats

Ces résultats sont attribués à la porosité des différents BPRF plus la porosité diminue plus le coefficient d'absorption d'eau diminue. D'autre part la formulation BPRF4 présente un volume de vide le plus élevé c.-à-d. la formulation de plus faible compacité.

A savoir que l'augmentation de la teneur en fines de sable engendre une diminution du coefficient d'absorption d'eau. De ce fait, une teneur en fines élevée signifiait une porosité réduite et un coefficient d'absorption d'eau minimisé.

### IV.6.2 Le Retrait à l'air

Les essais de retrait, ont été effectués sur des éprouvettes prismatiques ( $40 \times 40 \times 160$  mm<sup>3</sup>) conservées à l'air libre et à une température ambiante du laboratoire ( $20 \pm 2$ C). Les résultats obtenus à l'âge de 90 jours, sont sur la figure (IV -16) qui donne l'évolution du retrait en fonction de l'âge jusqu'au 90<sup>ème</sup> jours.



**Figure IV.16 :** Influence de la nature des ajouts sur le retrait des bétons en fonction du temps

une première phase que nous constatons un retrait rapide pour les premier trois jours de  $1000 \mu\text{m/m}$  pour un béton à poudre réactive sans fibres métalliques BPRF avec ( $E/C=0,27$ ,  $FS=0,25$ ,  $QB=0,23$ ) ;  $1150 \mu\text{m/m}$  pour BPRF3 avec ( $E/C=0,27$ ,  $FS=0,25$ ,  $QB=0,23$  ;  $FM=2,5\%$ ) et  $1230 \mu\text{m/m}$  pour BPRF2 avec ( $E/C= 0,23$  ;  $FS=0,23$  ;  $QB=0,35$  ;  $FM=2\%$ ). On remarque que le retrait a diminué de  $230 \mu\text{m/m}$  pour une baisse de  $E/C$  de  $0,27$  à  $0,23$ , donc les bétons sans

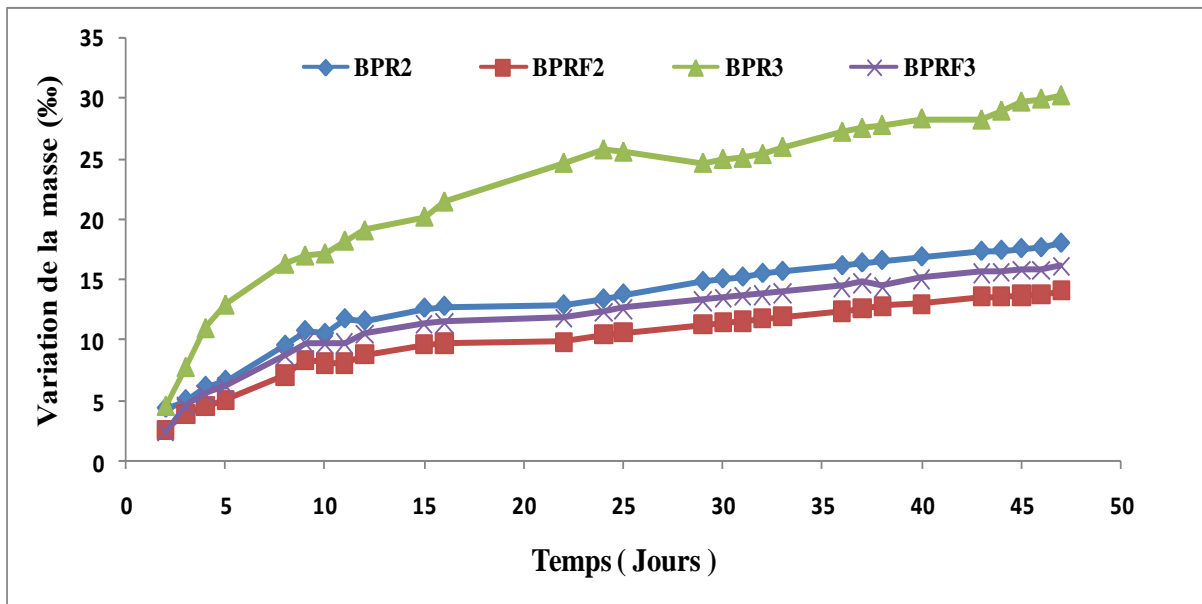
## Chapitre IV : Présentation et discussion des résultats

fibres ont un retrait plus faible que celui de béton avec fibres à différents âges ; après une diminution rapide du volume des trois échantillons.

- la deuxième phase entre 3 jours jusqu'à 20 jours est une phase de gonflement ;
- la troisième phase, entre les 20 jours et 45 jours, est la deuxième phase du retrait à l'état durci ;
- enfin la dernière phase, à partir de 45 jours est la partie stable de la courbe, durant laquelle la variation volumique de l'échantillon continue à l'état durci. En termes d'intensité de déformation, les bétons avec quartz développent des déformations supérieures.

### IV.6.3 La variation de la masse dans l'air

Les résultats de la variation de la masse dans l'air nous ont permis de tracer le graphe de la figure IV.17



**Figure IV.17** : Variation de la masse dans l'air des bétons en fonction de l'âge des éprouvettes

Les résultats montrent une augmentation de la perte de masse du BPR2 à 8,51% entre 2 et 9 j par ailleurs elle ne dépasse pas 7,23 % entre 9 et 47 j ce qui explique l'existence de deux pente de perte de masse sur la courbe en question.

La courbe de la perte en masse du BPRF2 en fonction du temps montre que l'augmentation du poids dans la même durée soit entre 2 et 9 j est de 5,82% et de 5,72%. Inversement à ce qui été trouvé pour les BPR2 et BPRF2 L'examen de la courbe de la perte en poids du BPR3 montre que l'allure de la courbe présente deux pentes soit entre 2 et 23j pour un

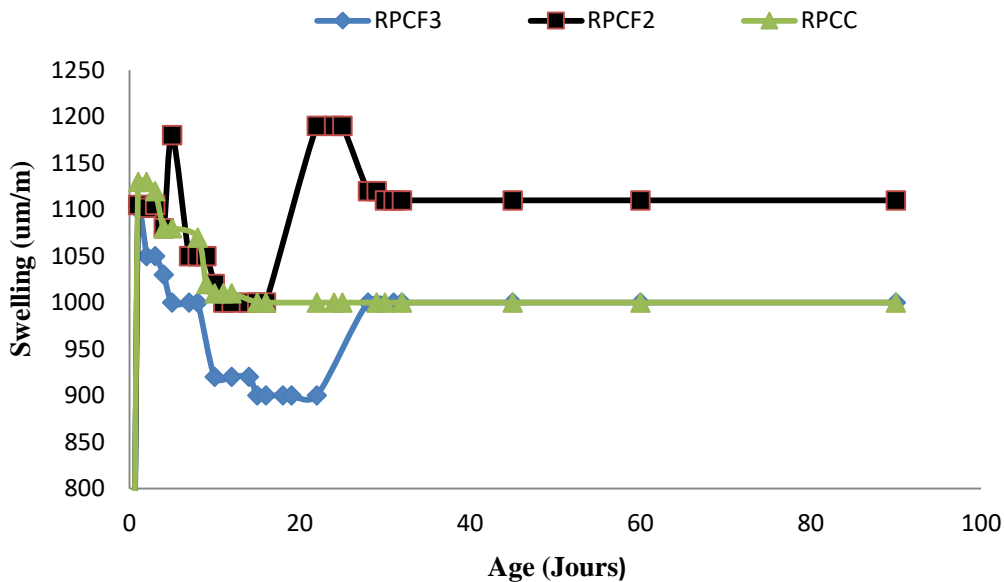
## Chapitre IV : Présentation et discussion des résultats

taux de 21,25% et un taux de 4,48 % entre 23 et 47j. Lors du suivi de la perte de masse du BPRF3 il s'est avéré qu'un taux de 9,45% a été enregistré entre 2 et 9j ainsi cette valeur augmente vers 16,11% à 47j.

### IV.6.4 Gonflement à l'eau

La mesure du gonflement des éprouvettes en BPRF doit se faire dans la même heure qui suit leur sortie du bac d'eau. Ensuite on procède à un séchage des plots à l'aide d'un torchon afin d'éliminer les particules d'eau qui risquent d'influencer sur les résultats.

Les résultats du gonflement à l'eau nous ont permis de tracer le graphe de la figure IV.18



**Figure IV.18** : Influence de la nature des ajouts sur le gonflement des bétons en fonction du temps

L'analyse des résultats (Figure IV.18) montre que BPRF3 avec ( $E/C=0.27$ ,  $FS=25\%$ ,  $QB=23\%$ ,  $LB=15\%$ ,  $FM=2\%$ ) présentent des gonflements moins importants que ceux de béton témoin BPRT. Cette variation dimensionnelle est d'autant plus importante après la modification de la distribution granulaire.

Cependant, le BPRF2 avec ( $E/C=0.23$ ;  $FS=23\%$ ;  $QB=35\%$ ;  $FM=2\%$  et sans laitier broyé) a subi un gonflement assez important. De ce fait on peut constater que l'évolution du

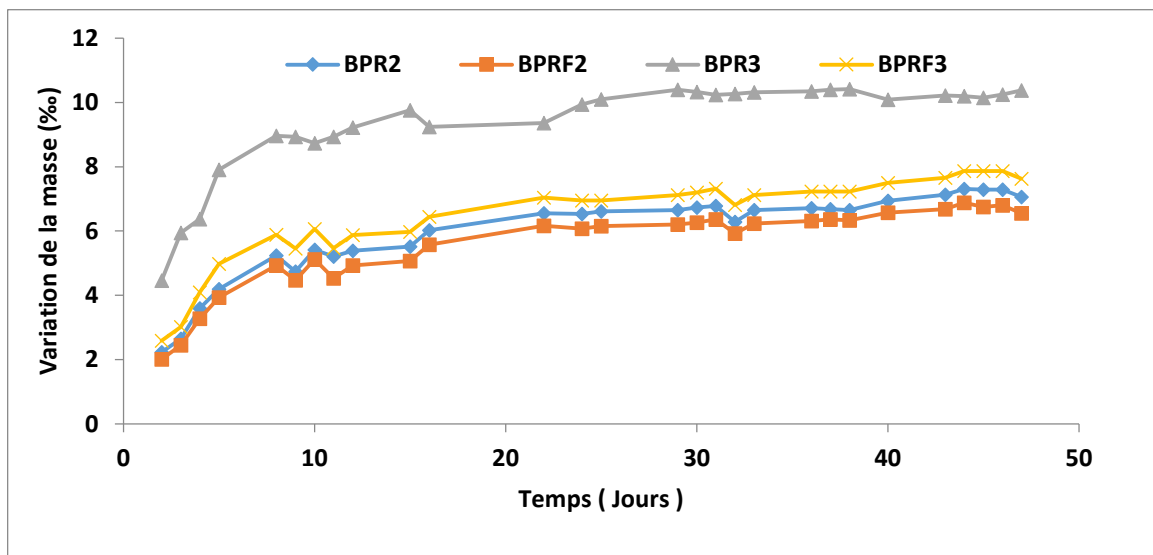
## Chapitre IV : Présentation et discussion des résultats

gonflement est liée à la teneur en fines de sable d'une part et à la répartition de la distribution granulaire d'autre part.

L'examen de la courbe de gonflement montre que la cinétique de gonflement à la même tendance que celui du retrait d'où la valeur final est presque identique à celle enregistrée pour le retrait à l'air libre soit  $1200 \mu\text{m/m}$ .

### IV.6.5 La variation de la masse dans l'eau

Les résultats de la variation de la masse dans l'eau nous ont permis de tracer le graphique de la figure IV.19



**Figure IV.19** : Variation de la masse dans l'eau des bétons en fonction de l'âge des éprouvettes

Les résultats montrent qu'une valeur de 2,23‰ d'augmentation de poids directement proportionnelle au temps à 7,06‰ à 47j, d'où cette augmentation est de l'ordre de 4,83‰ du BPR2. L'or de l'immersion du BPRF2 dans l'eau, il s'est avéré que la perte en masse voit une augmentation sensible et ce dans la même échéance soit entre 2 et 9 j pour un taux de 2,46‰ et un taux de 2,08‰ entre 9 et 47 j. l'ordre de 4,83‰.

D'après la courbe de la figure IV.19 nous avons constaté qu'une augmentation majoritaire soit une valeur de 4,45‰ commencé en 2<sup>ème</sup> j cette dernière développe vers 10,38‰

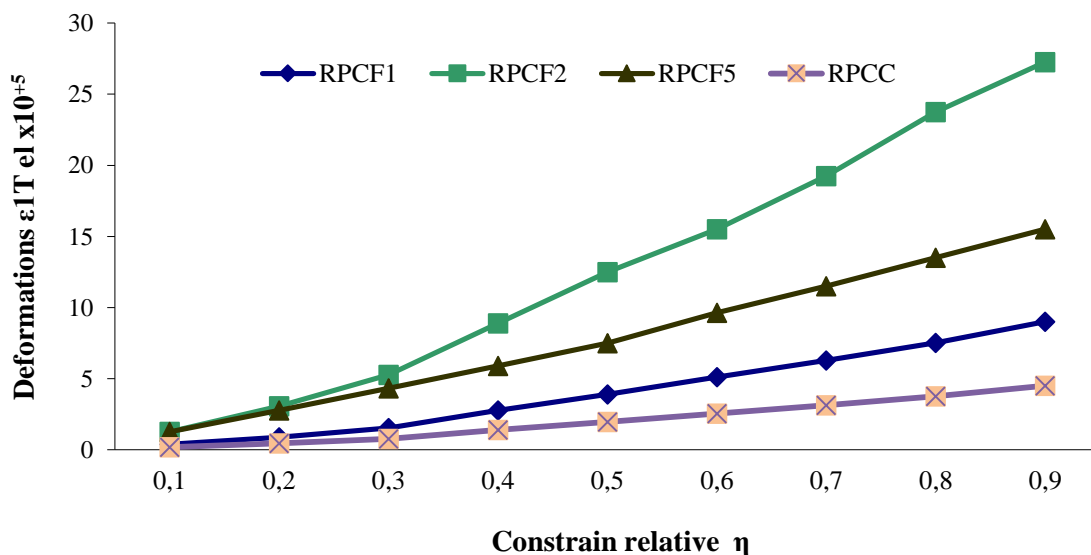
## Chapitre IV : Présentation et discussion des résultats

à 47j du BPR3. D'après la figure IV.19 on constate une augmentation considérable de perte de masse de 2,59‰ à 2 j et 7,63‰ à 47 j du BPRF3.

### III.6.6 Déformabilité

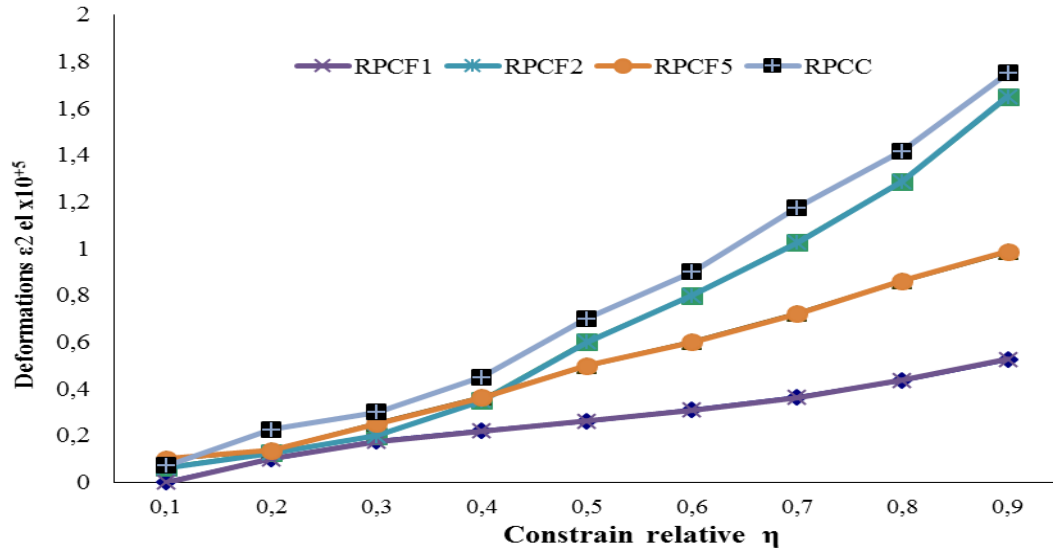
Les graphes de la Figure IV. 20 et IV.21 représentent l'évolution des déformations élasto-instantanées longitudinales et transversales à l'instant (t) et les déformations relative) avec l'augmentation de la contrainte relative ( $\eta$ ).

Le module de déformabilité, le module d'élasticité ainsi qu'une comparaison entre les résistances à la compression cubiques et prismatiques sont représentés dans les figures (IV.22, IV.23, IV.24).

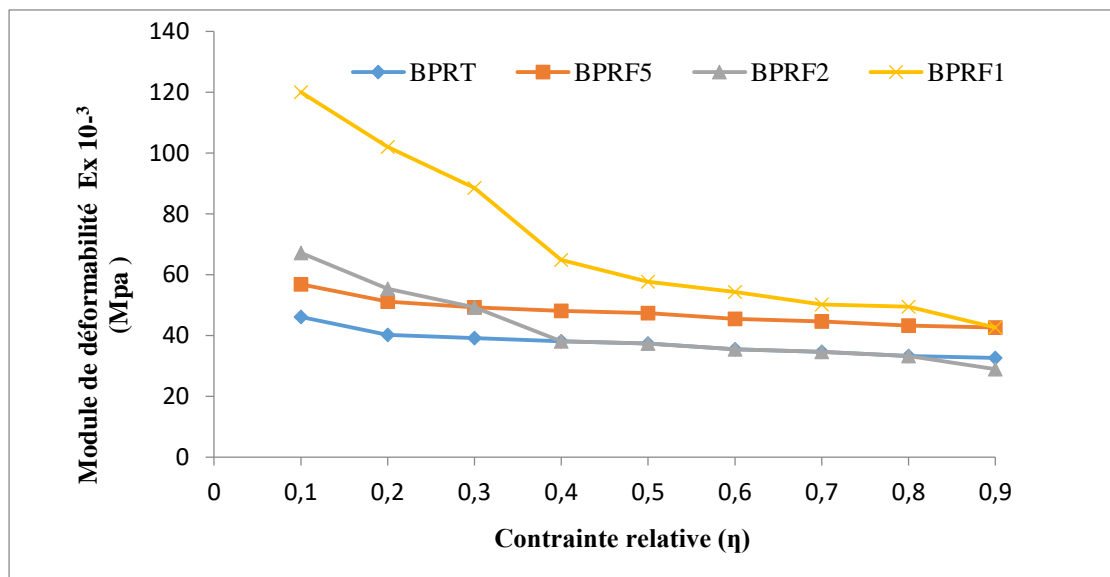


**Figure IV.20:** Déformation élastique instantanée longitudinale du béton  $\epsilon_1 T$  en fonction des contraintes relatives  $\eta$  pour la série de prismes BPRF1, BPRF2, BPRF5 et BPRT.

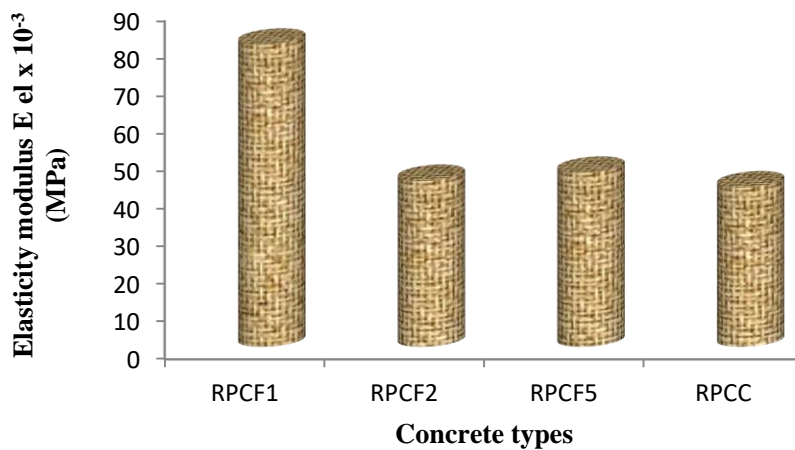




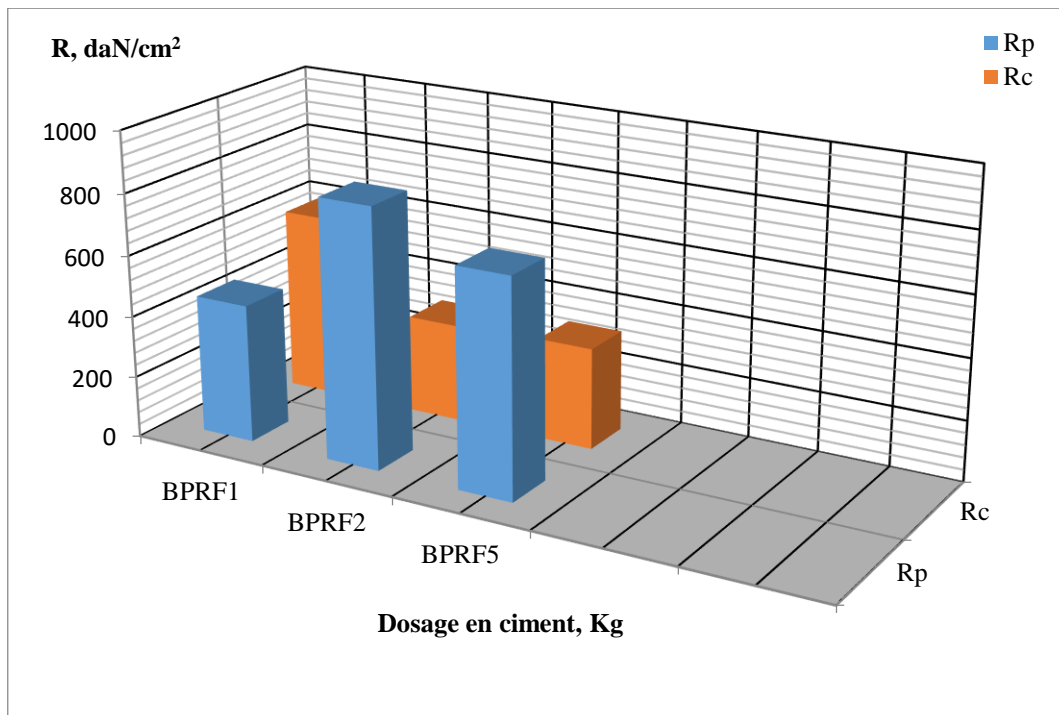
**Figure IV.21:** Déformation élastique instantanée transversale du béton  $\epsilon_2$  Tel en fonction des contraintes relatives  $\eta$  pour la série de prismes BPRF1, BPRF2, BPRF5 et BPRT



**Figure IV.22:** Module de déformabilité  $E$  du béton en fonction des contraintes relatives  $\eta$  pour les séries de prismes BPRF1, BPRF2, BPRF5 et BPRT.



**Figure IV.23:** Module d'élasticité des bétons BPRF1, BPRF2, BPRF5 et BPRT



**Figure IV.24:** Résistance mécanique à la compression cubiques (Rc) et prismatiques (Rp) en fonction du dosage en ciment

L'analyse des graphes nous a permis de constater que:

La courbe contrainte –déformations longitudinales des bétons ayant une résistance à la compression qui dépasse 100 MPa est très linéaire, et la déformation des BPRF à la rupture est plus grande que celle du béton témoin BPRT.

## Chapitre IV : Présentation et discussion des résultats

---

Concernant le comportement en compression la courbe contrainte- déformation se divise en deux parties :

**Partie 1 : (0,1-0,3)**, à signaler que la valeur de la déformation longitudinale en compression est petite c.-à-d. le béton se comporte élastiquement .Lorsque l'effort est supprimé il revient à son état d'origine, soient les microfissures préexistantes ne se propagent pas, soient les nouvelles microfissures formées se renferment après relâchement.

**Partie 2 : (0,3-0,9)**, à constater que la valeur de la déformation est grande et surtout le BPRF2 (23% FS ,35% QB ,2% FM et E/C= 0,23) donc le béton étant microfissuré surtout à l'interface mortier- granulats, après cette phase la rupture se produit plutôt brutalement sans avertissement par fissuration préalable ou par déformation importante, traduisant un comportement très fragile.

Le béton BPRT présente des déformations transversales ( $\epsilon_{2el}$ ) et ( $\epsilon_{2Tel}$ ) plus élevées que celles des autres types de béton.

Le module de déformation diminue avec l'augmentation de la contrainte relative. Le module de déformation des bétons avec ajout 25% FS présente un module de déformation plus élevé que le béton témoin.

Le béton BPRF1 présente un module d'élasticité plus élevé par rapport aux autres types de béton, suivi du béton BPRF5. Les modules d'élasticité des bétons BPRF2 et BPRT sont équivalents et présentent les plus bas modules d'élasticité.

### IV.6.7 Attaques chimiques et sulfatiques

Pour évaluer la durabilité des bétons vis-à-vis l'attaque chimique, nous avons déterminé la résistance à la compression en fonction de la durée d'immersion. Les figures ci-dessous représentent la variation de la résistance à la compression de différentes formulations du BPRF après 12 mois.

# Chapitre IV : Présentation et discussion des résultats

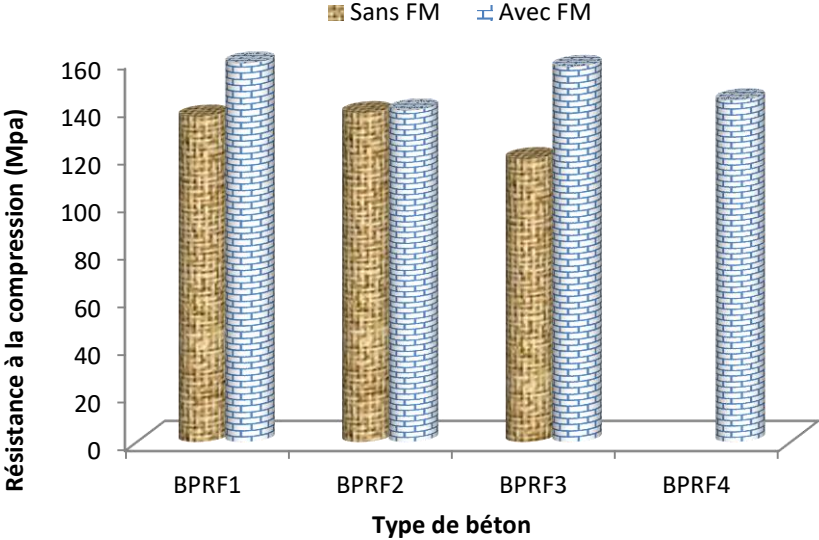


Figure IV.25: Résistance à la compression en fonction du temps d'immersion dans l'eau potable après 12 mois

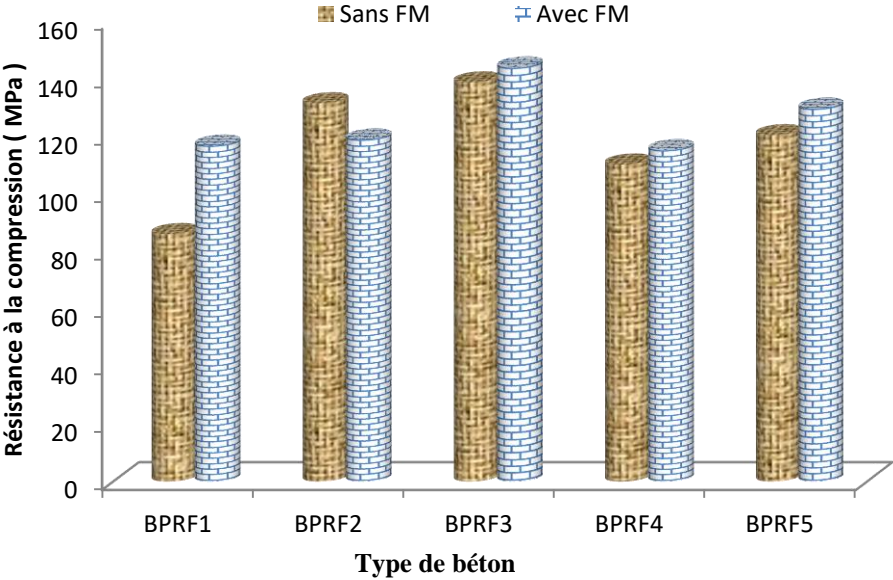
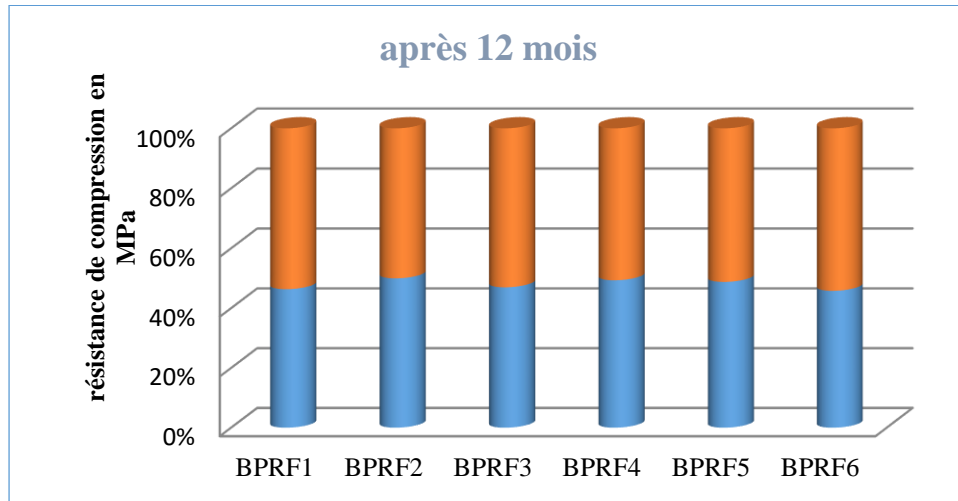


Figure IV.26: Résistance à la compression en fonction du temps d'exposition au sulfate, après 12 mois.



**Figure IV.27:** Résistance à la compression des formulations du BPRF immergé dans hydroxyde de sodium (NaOH) à 12 mois.

D'après les résultats représenté sur l'histogramme des figures (IV.25, IV.26, IV.27) montrent que :

Afin d'évaluer la durabilité du béton dans un environnement chimique agressif, la résistance à la compression d'une série d'échantillons de béton a été déterminée en fonction de leur temps d'immersion dans une solution de sulfate à 5% et 10% hydroxyde de sodium.

Il est remarquable que la résistance à la compression des éprouvettes en béton réactif renforcé de fibres (BPRF), lorsqu'elles sont immergées dans l'eau potable, augmente régulièrement avec l'âge et ne montre aucune chute après 12 mois (figure IV.25). Cependant, un léger gain de force est noté pour les spécimens immergés dans la solution agressive jusqu'à l'âge de 90 jours (Benamara et al., 2015).

Les résistances à la compression du béton de contrôle et celle du béton en poudre réactive renforcé par des fibres, montrant la solution agressive (Figure IV.26), ont montré une tendance à la diminution. Cette baisse de résistance à la compression est attribuée à la réaction entre la portlandite résultant de l'hydratation du ciment et les sulfates pour former du gypse et l'étrangéité secondaire expansive provoquant des microfissures entraînant une réduction de la résistance (Benamara et al., 2015 et G uettela et al., 2011).

Le béton en poudre réactif renforcé par des fibres 3 (BPRF3) a la meilleure résistance à la compression (175,01 MPa) à 12 mois. Toutes les additions sont utilisées dans cette

## Chapitre IV : Présentation et discussion des résultats

---

formulation (25% de fumée de silice + 23% de quartz broyé + 15% de laitier broyé et 2,5% de fibre métallique).

BPRF1 montre une résistance à la compression significative à l'âge de 12 mois. Cela représente une augmentation de 22,29 MPa par rapport à celle du béton en poudre réactif (BPR1) sans fibres.

BPRF2 a une résistance à la compression inférieure à celle des autres types de béton, c'est-à-dire BPRF1 et BPRF3. Il varie en proportion de la teneur en fumée de silice.

La formation de gypse et d'ettringite secondaire peut être retardée ou même empêchée.

En outre, la valeur finale de l'expansion du béton dépend fortement du temps. L'autre retarde l'expansion, le mineur sa valeur ultime, car l'étrangéité a suffisamment de temps pour se déplacer dans l'espace vacant des pores capillaires du béton en poudre réactif renforcé de fibres où la fumée de silice est utilisée comme substitut partiel du ciment.

Par contre les échantillons mis en solution basique d'hydroxyde de sodium NaOH (figure IV.27), ne sont pas dégradés, le changement de la résistance n'a pas dépassé 1%. Les couleurs des faces extérieures de ces éprouvettes sont devenue claires (presque blanchâtres) par rapport aux faces intérieures, ce qui traduit la continuité des réactions, d'hydratation.

Parmi ces deux milieux agressifs il semble que le  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  a une influence majeure sur la résistance à la compression en particulier pour les formulations non fibré. Le NaOH porte un effet positif pour la résistance à la compression pour toutes les formulations.

### IV.6.8 Analyse aux rayons X

Les analyses ont été faites au laboratoire de DRX à l'université de BISKRA. L'appareil utilisé est un Diffractométrie (**D8 ADVANCE BRUKER**).

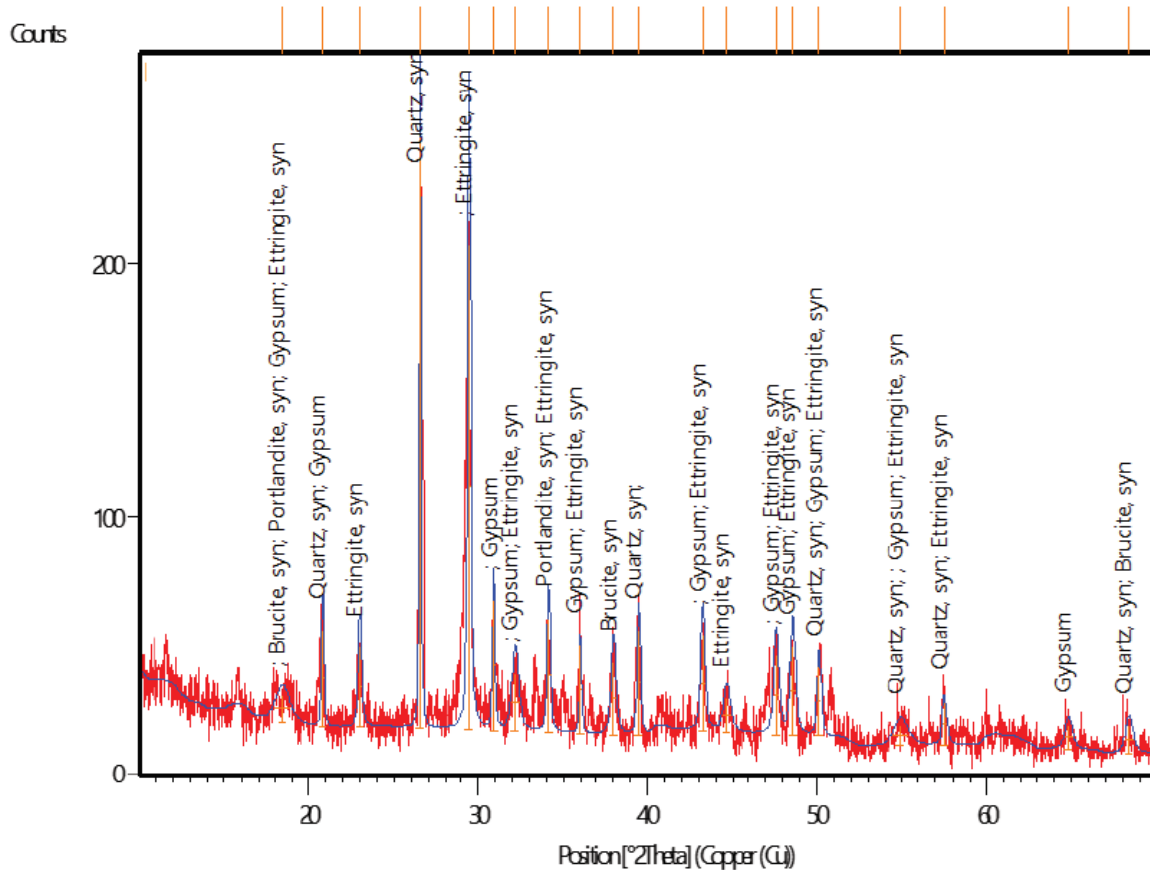
L'utilisation des deux logiciels **X'Pert High Score** et **Origine Pro** permis d'exploiter et de tracer des résultats se forme du diagramme (diagramme de diffraction ou diffractogramme). La diffraction aux rayons X est effectuée sur les fines particules des bétons broyés ( $\varnothing \leq 80\mu\text{m}$ ).

Une analyse aux rayons X a permis de mettre en évidence l'apparition de phases cristallines au niveau de la surface des échantillons exposés aux milieux agressifs.

Pour distinguer les différents modes de conservation nous allons les classer par ordre.

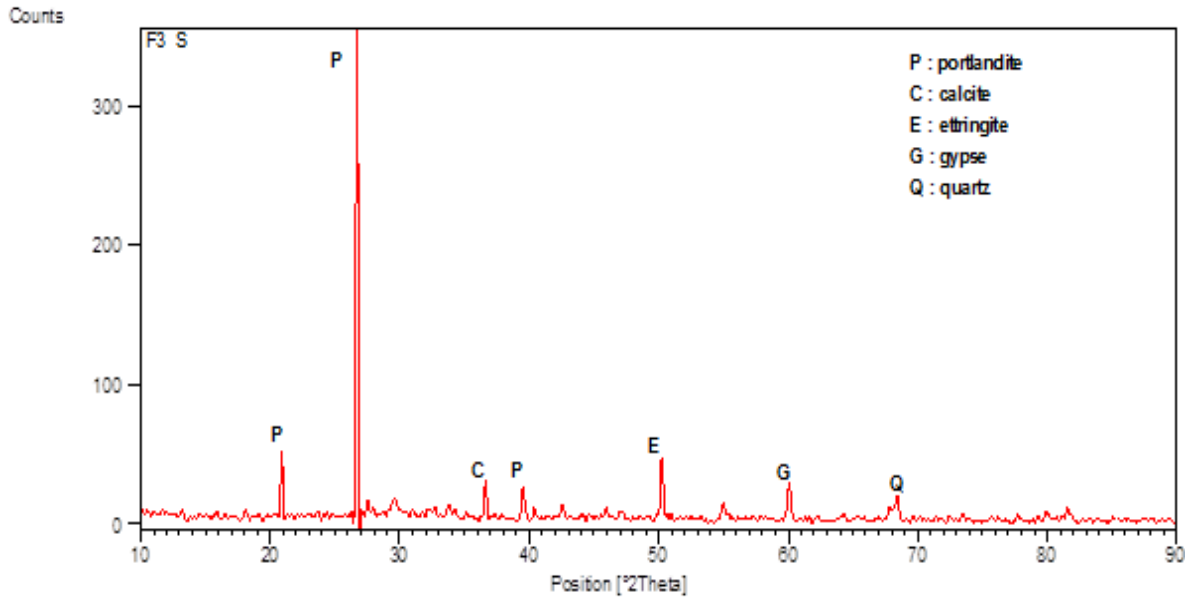
## Chapitre IV : Présentation et discussion des résultats

**Mode 1** : conservation dans des bacs d'eau sous une température d'environ 20°C, les éprouvettes sont immergées totalement jusqu'au jour de l'essai.

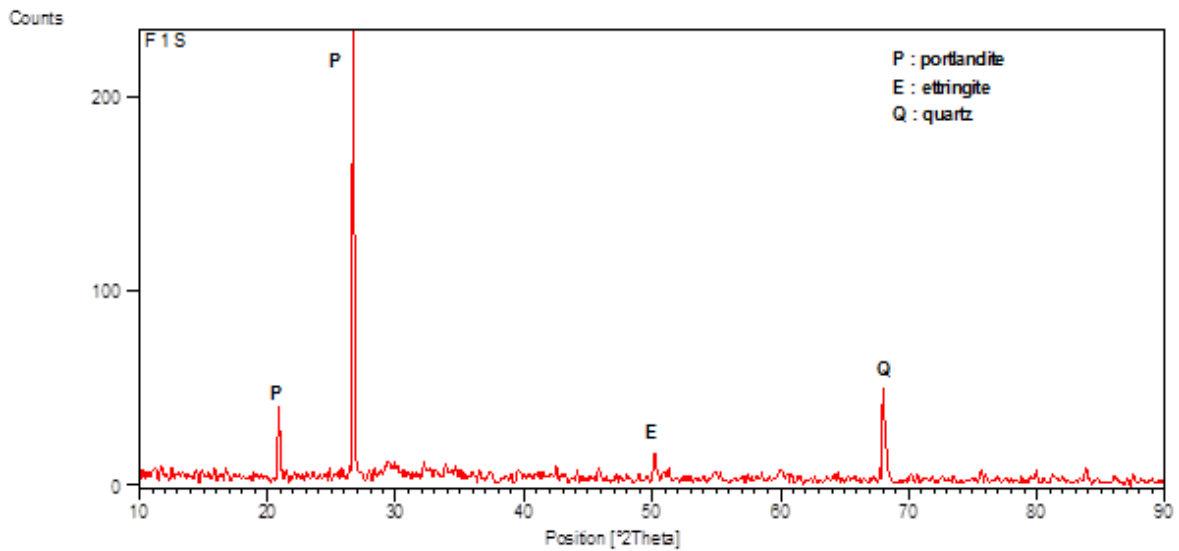


**Figure IV.28:** Béton réactif renforcé de fibres (BPRF) immergé dans l'eau après 365 jours.

**Mode 2** : conservation dans une solution de 5% de  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  les éprouvettes sont immergées totalement dans des bacs jusqu'au jour de l'essai sous une température ambiante du laboratoire.



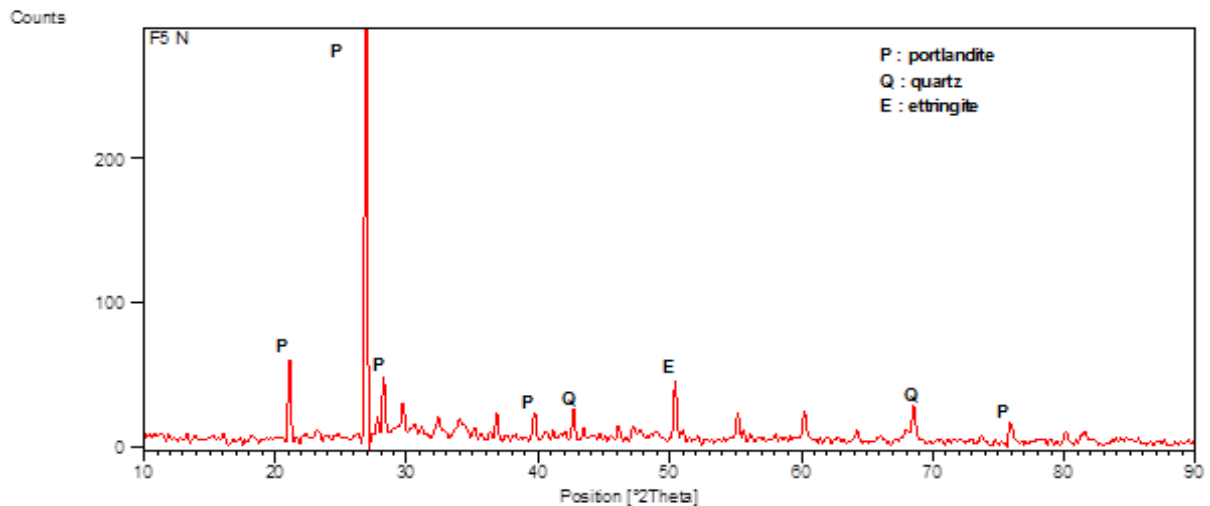
**Figure IV.29** : Diffractogramme du BPRF3 en (mode 2).



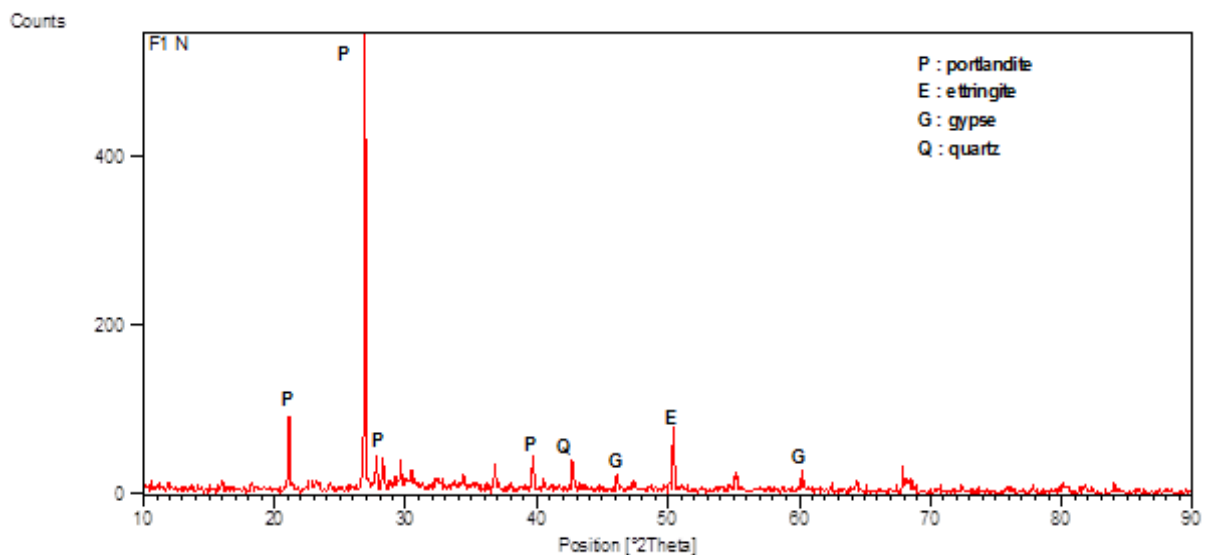
**Figure IV.30**: Diffractogramme du BPRF1 en (mode 2).

**Mode 3** : conservation dans une solution de 10% NaOH les éprouvettes sont immergées totalement dans des bacs jusqu'au jour de l'essai sous une température ambiante du laboratoire.





**Figure. IV.31:** Diffractogramme du BPRF5 en (mode 3).



**Figure IV.32:** Diffractogramme du BPRF1 en (mode 3).

La diffraction des rayons X a été utilisée pour identifier les produits formés dans le béton en poudre réactif renforcé de fibres durcies qui est conservé dans la solution de sulfate de sodium à 5% et 10% NaOH . Cette méthode a été utilisée pour confirmer et affiner les résultats obtenus à partir des essais sur béton (BPRF). Le diffractomètre (x'Pert) utilisé était couplé à un système informatique.

## Chapitre IV : Présentation et discussion des résultats

---

En ce qui concerne les différents types de béton préparés, certains échantillons de poudre ont été prélevés à la surface des spécimens ayant atteint l'âge de 365 jours. L'analyse des spectres affichés sur les figures permet de confirmer la présence de:

- des traces de portlandite [P]  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ,
- le gypse [G]  $(\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O})$ ,
- ettringite [E]  $(\text{C}_3\text{a} \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O})$ .

Il est évidemment illusoire que pour les éprouvettes de béton (BPRF) avec ou sans adjonction, la quantité de portlandite soit faible dans le milieu témoin (eau potable), ce qui explique l'absence d'attaque (figure IV.28). D'autre part, dans le milieu agressif (Figure IV.32), les pics caractérisant le gypse (G), l'ettringite (E) et la portlandite (P) sont plus visibles et plus intenses dans le béton témoin que dans le béton réactif renforcé. La portlandite, présente dans le béton témoin, est responsable de la formation de gypse et d'ettringite secondaire (Benamara et al., 2015).

Dans une conservation au mode 2 ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ). La fixation de la portlandite est plus importante dans la formulation du BPRF1 par rapport au BPRF3 selon l'équation suivante :



Ceci est expliqué par la faible intensité de la portlandite dans la formulation du BPRF1 par rapport au BPRF3. Cela prouve que l'incorporation des ajouts porte un effet bénéfique vis-à-vis la résistance au  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ .

Dans une conservation au mode 3 ( $\text{NaOH}$ ), le raie caractéristique de la portlandite ( $2\theta=26.91$ ) est plus intense dans la formulation du BPRF5 par rapport au BPRF1 ainsi qu'à un autre mode de conservation (1 et 2) cela justifie l'augmentation de la résistance à la compression des formulations conservées au ( $\text{NaOH}$ ).

## Chapitre IV : Présentation et discussion des résultats

---

### IV.9 Conclusions

A l'issue de cette étude sur le BPRF permet de tirer les conclusions suivantes :

L'incorporation des fibres métallique dans le BPRF provoque une bonne augmentation de résistance à la traction par flexion.

Les BPR sans fibre une réduction de résistance à la traction par flexion après 12 mois a été enregistrée.

Le BPRF est un matériau très résistant en compression.

La présence des fibres jouer un rôle de stabilisateur après rupture par contre le BPRT sans fibre se désagrège rapidement après fissuration, les BPRF continuent à reprendre des efforts même que la charge maximale soit atteinte.

Le traitement thermique et la présence de fibres métalliques sont les paramètres majeurs permettant d'obtenir des performances mécaniques élevées, aussi bien en flexion qu'en compression.

Le quartz broyé n'est pas un paramètre majeur de la formulation des BPRF pour les résistances en flexion mais il contribue de manière importante à l'obtention de fortes résistances à la compression.

Les déformations élastiques instantanées (longitudinales et transversales) du béton à additions inertes (BPRF) sont plus faibles que celles du béton témoin. Cela signifie que BPRF est fragile.

Le module d'élasticité du béton durci dépend de sa résistance mécanique. De plus, les facteurs affectant le module d'élasticité sont similaires à ceux qui influent sur la résistance du béton. Les bétons sans fibres ont des déformations de retrait plus faibles par rapport à celles contenant des fibres. La cinétique de rétraction et de gonflement est inversement proportionnelle à la quantité de fibres ajoutées.

La microstructure BPRF dépend du traitement thermique ou de la condition à la cure. Les études de RDX ont permis de mieux comprendre les micro-changements structurels induits par les conditions de durcissement. Il montre que l'échantillon d'eau chaude à la cure conduit à une modification plus rapide de la microstructure des hydrates C-H-S.

**CONCLUSION  
GENERALE  
Et PERSPECTIVE**

### Conclusion générale et perspective

Les bétons de poudres réactives fibrés se caractérisent par les performances mécaniques et de durabilité les plus élevées des matériaux à base cimentaire. Néanmoins, leur développement demeure freiné par leur coût qui le rend souvent peu compétitifs par rapport à des solutions techniques plus traditionnelles.

L'objectif de ce travail est de fabriquer un BPRF performant et économique à base de matériaux disponible localement. Un BPRF ayant des propriétés (mécanique, physique, élastique, durabilité et de mise en œuvre) très élevé.

La première partie de la thèse a été consacrée à l'étude bibliographique qui a permis de dresser un bilan non exhaustif de l'état de connaissances sur les BPRF. Ces matériaux à base cimentaire aux propriétés exceptionnelles se distinguent par des résistances caractéristiques à la compression supérieures à 150 MPa, et pouvant aller jusqu'à 250 MPa. Bien qu'il n'existe pas de méthode de formulations, il faut privilégier l'utilisation de ciment de type CEM I PM ES de faible teneur en  $C_3A$ , de sable siliceux fins de grains de forme ronde, d'additions hautement pouzzolaniques telles que la fumée de silice ou le métakaolin, et des fibres métalliques, pour des BPRF structuraux, dont le dosage volumique offrant le meilleur compromis coût/performance est compris entre 2 et 2,5% (AFGC, 2013).

En outre, le rapport E/C doit être faible, autour de 0,2 voire inférieur, d'où l'ajout de superplastifiant haut réducteur d'eau pour assurer une bonne ouvrabilité. La clé des performances des BPRF réside dans leur grande compacité qui requiert une quantité de liant très souvent supérieure à 1000 kg. L'utilisation de tous ces matériaux induit un coût bien plus élevé que celui des bétons ordinaires.

La deuxième partie de la thèse, a été destinée à caractériser les matériaux employés en présentant leurs propriétés chimiques et physiques. Les compositions des bétons sont détaillées après avoir expliqué la méthode de formulation utilisée. Les procédures de fabrication et de séquence de malaxage mises en place seront également définies.

## Conclusion générale et perspective

---

Ensuite elle a été consacrée à présenter les résultats expérimentaux des tests réalisés sur les différentes formulations de BPRF, une étude mécanique proprement dite, une étude des déformations différées, une étude de durabilité et enfin, une étude de microstructure. Les paramètres étudiés sont le type d'addition fumée de silice, la présence de fibres (avec ou sans fibre), de quartz broyé (avec ou sans quartz broyé) et de laitier broyé (avec ou sans laitier broyé) ainsi que le traitement thermique (sans traitement, avec traitement à 90 °C).

Les résultats ont démontré l'intérêt de la substitution de la fumée de silice et confirmé les intérêts respectifs de la présence des fibres, du quartz broyé et du traitement thermique pour obtenir des performances très élevées.

D'après les résultats des essais effectués, on constate :

- ✓ L'ajout binaire (fumée de silice et laitier granulé) augmente la surface spécifique du liant qui entraîne une demande d'eau supplémentaire et conduit ainsi à une eau de consistance plus importante dans toutes les pâtes de ciment.
- ✓ Le temps de prise des premières heures pour les bétons formulés avec laitier granulé et fumée de silice est plus faible ; cela est dû à la nature de ce type d'addition avec le processus d'hydrations lent formulé à jeune âge.
- ✓ Pour des BPRT plus plastiques, l'incorporation de la fumée silice et laitier granulé affecte positivement la maniabilité du béton.
- ✓ Le ciment de la classe CPA42.5 avec du sable dunaire, des ajouts fins riches en silice, un très faible rapport E / C, des fibres métalliques et un traitement thermique à des températures supérieures à 90 ° C, peut donner des performances exceptionnelles au béton.
- ✓ Les conditions de conservation ont un impact important sur les propriétés du béton. Quand il n'est pas protégé, il perd son eau par évaporation et sa force est considérablement réduite. Par conséquent, l'humidité interne du béton varie en fonction des conditions environnementales. Cependant, la rétention d'eau totale serait

## Conclusion générale et perspective

---

nécessaire pour avoir un béton relativement imperméable, c'est-à-dire 100% d'humidité.

- ✓ Il est possible de fabriquer des BPRF ayant une résistance à la compression supérieure à 140 MPa (à 28 jours), avec une plasticité adéquate, malgré la simplicité des moyens et des matériaux
- ✓ Le broyage poussé des ajouts nous a permis d'atteindre un bon comportement physico- mécanique et durabilité.
- ✓ Le module d'élasticité du béton durci est en fonction de sa résistance mécanique. Cependant, les facteurs agissant sur le module d'élasticité, sont les mêmes que ceux agissant sur la résistance.
- ✓ L'effet des ajouts minéraux sur l'évolution du module élasticité est significatif. Par conséquent, on remarque que le béton renfermant un ajout, présente toujours un module supérieur à celui du béton témoin, ce qui est lié à leur grande compacité.
- ✓ Les déformations élasto- instantanées longitudinales du béton avec ajouts est plus grande que celle obtenu au béton ordinaire tandis que la déformation élasto- instantanées transversales du béton contrairement aux déformations élasto- instantanées.
- ✓ L'incorporation des ajouts finement broyés a favorisé l'accroissement de la compacité des bétons, phénomène visualisé par l'augmentation de la masse volumique, conséquence de la densification de la matrice. En favorisant la formation d'un squelette plus compact, ce qui a entraîné en conséquence, une amélioration relative de la résistance mécanique malgré les actions préjudiciables.
- ✓ La perte de masse et le retrait des bétons avec ajouts cimentaires aux différentes échéances sont plus faibles que ceux mesurés sur le béton de référence (témoin). Par exemple le retrait des bétons aux ajouts cimentaires se trouve entre 387 $\mu\text{m}/\text{m}$ , alors que celui du béton de référence est 525  $\mu\text{m}/\text{m}$ .

## Conclusion générale et perspective

---

- ✓ Malgré la longue période de conservation dans des milieux agressifs, les caractéristiques de ces bétons ne sont que légèrement affectées par les dégradations quel que soit le milieu agressif, comparativement au béton témoin, probablement à cause de la compacité très élevée qui est un frein à la pénétration des agents agressifs et aussi un frein à la sortie des cations.
  
- ✓ La présence des ajouts minéraux améliore la durabilité des bétons par rapport à celle non adjuventer par des additions minérales.
  
- ✓ Le NaOH n'a pas d'influence significative sur la résistance à la compression des BPRF et par conséquent sa durabilité.
  
- ✓ L'incorporation des fibres métallique dans le BPRF provoque une bonne augmentation de résistance à la traction par flexion par rapport à celle non fibré.
  
- ✓ La présence des fibres jouer un rôle de stabilisateur après rupture par contre le BPR sans fibre se désagrège rapidement après fissuration, les BPRF continuent à reprendre des efforts même que la charge maximale soit atteinte.
  
- ✓ Le traitement thermique et la présence de fibres métalliques sont les paramètres majeurs permettant d'obtenir des performances mécaniques élevées, aussi bien en flexion qu'en compression
  
- ✓ L'analyse aux rayons X effectuée sur des échantillons prélevés des couches superficielles des éprouvettes exposées dans les solutions de  $(\text{Na}_2\text{SO}_4)$  à l'âge de 12 mois montrent l'apparition des phases cristallines comme le gypse et l'ettringite secondaire qui sont deux produits un peu néfastes.



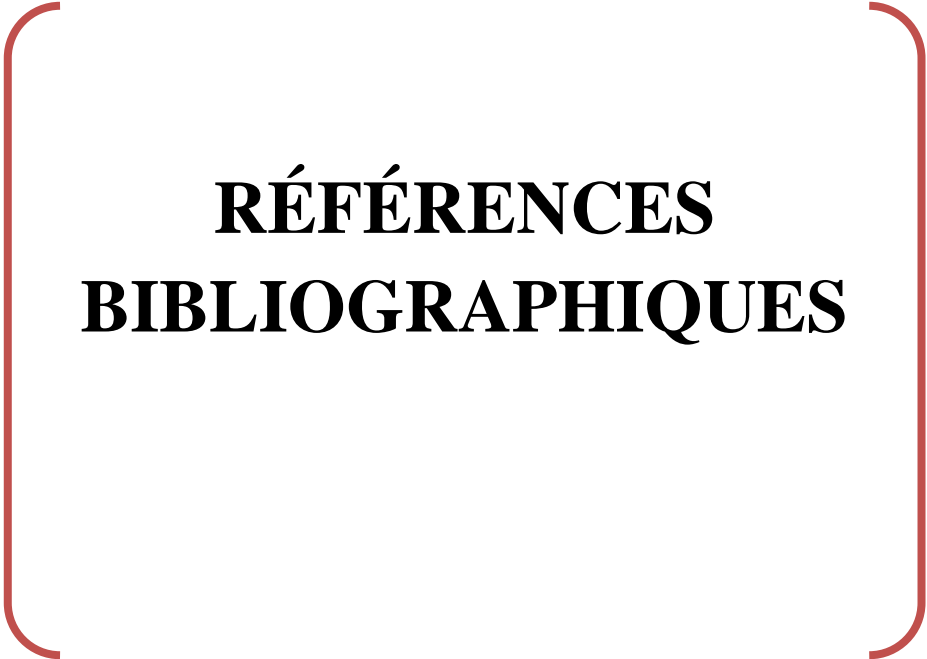
## Conclusion générale et perspective

---

### Perspectives et recommandations

Cette étude reste toujours insuffisante à cause des nombres de propriétés des BPRF mal connues. En perspective nous proposons les axes de recherches suivantes :

- ✓ Nous sommes limités à un traitement thermique de 90°C. Or, la bibliographie nous indique que des changements d'hydrates se produisent au-delà de 200-250°C. Il conviendrait d'atteindre ces températures et de tester le pressage pour essayer d'obtenir des BPRF encore plus résistants ;
- ✓ Étudier la ductilité et le fluage des bétons à hautes performances ;
- ✓ Étudier l'évolution de la chaleur d'hydratation et en fonction des résultats obtenus, recommander la destination de chacun des bétons.
- ✓ Étudier l'effet des ajouts cimentaires sur la fixation de la portlandite (la chaux) par les analyses thermiques différentielle et gravimétrique.
- ✓ Mesurer la perméabilité des bétons aux ions chlore.
- ✓ Pour l'élaboration d'un béton à très hautes performances sans difficultés il est préférable d'utiliser un ciment sans ajouts tel que un CPA 52,5 (Actuellement ce type de ciment est introuvable en Algérie).
- ✓ Ces nouveaux bétons ont besoin d'un contrôle rigoureux et continu, parce qu'une variation d'un paramètre peut modifier les caractéristiques de ce béton



**RÉFÉRENCES  
BIBLIOGRAPHIQUES**

### **Références bibliographiques**

[A, Jayaranjini, 2016]: A, Jayaranjini. and B, Vidivelli., “Durability proper Ties of high performance concrete Using industrial byproducts”, ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences, vol 11, no. 7, April, pp 4370- 4381, **2016**.

[Adnan, 2013]: Adnan, A.S. and Rodger, E., “Behaviour of masonry wallettes made from a new concrete formulation under combination of axial compression load and heat exposure: Experimental approach”, Engineering Structures, 48, pp 193-204, **2013**.

[Andrade, 2013]: Andrade C, Torres J, “Long term carbonation of UHPC”. In: Toutlemonde F, Resplendino J, eds. Proceedings of International Symposium on Ultra-High Performance Fiber-Reinforced Concrete. Marseille, France. 249–256, **2013**.

[Acker, 2003] : P. Acker, “ Sur les origines du retrait et du fluage”, Revue française de génie civil, volume 7, n° 6, pages 761-776, **2003**.

[Acker, 2001]: P. Acker, F.-J. Ulm, “Creep and shrinkage of concrete: physical origins and practical measurements”, Nuclear Engineering and Design, 203, pages 143-158, **2001**.

[Aitkin, 1998]: Aitkin, P.-C., Lachemi, M., Adeline, R., Richard, P., “The Sherbrooke reactive powder concrete footbridge”. Struct. Eng. Int. 8, 140–144, **1998**.

[A.Tafraoui, 2006] : A.Tafraoui., “ Contribution à la valorisation de sable de dune de l’erg occidental Algérie”.Journal of Applied Sciences 12/2006 ; 6(13). DOI:10.3923/jas.2833.2836, **2006**.

[Aitcin, 2003]: Aitcin, P.C. (), “The durability characteristics of high performance concrete”, A review, Cement and Concrete Composites”, Vol 25, pp 409-420, **2003**.

[Aitcin, 1996]: Aitcin P.C, Richard P., “The pedestrian bikeway bridge of Sherbrook 4th International Symposium of utilization of high”. Strength performance concrete, Paris, p 1399-1406, **1996**.

## ***Bibliographie***

---

[**Aitcin, 1998**] : Aitcin P.C., Neville A., Acker P., “Les différents types de retrait du béton”. bulletin du LCPC 215, réf.4184, mai-juin, pp. 41-51, **1998**.

[**Allan, 2007**]: Allan C.L.Wong., Paul A Child., Richard Berndt., Tomy Macken.,Gang-Ding Peng., Nadarajah Gowripakan., “Simultaneous measurement of shrinkage and temperature of reactive powder concrete at early-age using fibre Bragg grating sensors ”. Cement and Concrete Composites, 29, pp. 490-497, **2007**.

[**Alparidi, 1998**]: Alparidi M., “Admixtures used to enhance placing characteristics of concrete”. Cement and concrete composites, vol. 20, no2/3, April-June, pp. 103-112, **1998**.

[**Alparidi, 1997**]: Alparidi S., Coppolla R., Troli R., Alparidi M., “Mechanical properties of modified reactive powder concrete”. Proceedings, 5th CANMET/ACI international conference on superplasticizer and other chemical admixtures in concrete, SP-173, Rome, Italy, pp. 1-21, **1997**.

[**Adeline, 1999**] : Adeline, R., “Béton de poudres réactives”, Techniques de l'ingénieur (C 2 216), **1999**.

[**Argouges, 2011**] : M. Argouges, R. Gagné, “Mécanismes et cinétique de l'autocicatrisation dans des mortiers cimentaires” : influence de la refissuration, actes des 12ème journées scientifiques du (RF) <sup>2</sup>B, Luxembourg, **2011**.

[**A. Loukili, 1999**]: A. Loukili, A. Khelidj, and P. Richard, “Hydration kinetics, change of relative humidity, and autogenous shrinkage of ultrahigh-strength concrete,” Cement and Concrete Research, vol. 29,no. 4, pp. 577–584, **1999**.

[**Anstice et al., 2005**] Anstice D.J, Page C.L, Page M.M, “The pore solution phase of carbonated cement pastes”, Cement and Concrete Research, vol. 35, n°2, , pp 377-383. **2005**.

[**Benboudjema, 2011**]: F. Benboudjema, J-M. Torrenti, “Prediction of drying shrinkage in concrete structures: study of size effect”, RILEM International Conference on Advances in Construction Materials Through Science and Engineering, Honk-Kong Chine, **2011**.

[**Bache, 1981**]: Bache H.H., “Densified cement/ultrafine particle-based materials”. 2nd international conference on superplasticizers in concrete Ottawa, Canada, june 10-12, **1981**.

## ***Bibliographie***

---

[**Brühwiler, 2013**]: Brühwiler, E., Denarié, E., “Rehabilitation and strengthening of concrete structures using ultra-high performance fibre reinforced concrete”. *Structural Engineering International*, 23(4):450–457, **2013**.

[**Baron, 1992**] : Baron J., Ollivier J.P., “La durabilité des bétons”. Presses de l’école nationale des Ponts et chaussées, **1992**.

[**Behloul, 1995**] : Behloul M., “Définition d’une loi de comportement du BPR”. *Annales de l’ITBTP*, no.532, mars-avril, p. 122-127, **1995**.

[**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**.

[**Bonneau, 1998**] : Bonneau, O., Vernet, C., Moranville, “Optimization of the rheological behavior of reactive powder concrete”. Presented at the Proceedings of the First International Symposium on HPC and RPC, Sherbrooke, Canada, pp 99–118, **1998**.

[**Boulet, 2001**]: D. Boulet, P. Rougeau, “Les bétons à ultra hautes performances (BUHP) ”, rapport CERIB DDP 24, **2001**.

[**Bouteille, 2005**]: S. Bouteille, J. Resplendino, “Derniers développements dans l’utilisation des bétons fibrés ultra-performants en France”, actes de la conférence GC’2005, Paris, **2005**.

[**Braïke, 2002**]: Braïke, S., Massicotte, B., Charron, J. P., “Conception des ponts en bétons fibres à haute et ultra haute performance”. Collection de la Presses de l’école nationale des Ponts et Chaussées LCPC, **2002**.

[**Benamara, 2015**]: D, Benamara., L, zeghichi. and B, mezghiche., “Béton de sable haute Performance : formulation, propriétés physico-mécaniques et durabilité”, *annales du bâtiment et des travaux publics* juillet, pp 6-15, **2015**.

[**Brindha, 2010**]: Brindha D, Baskaran T and Nagan S, “Assessment of corrosion and durability characteristics of copper slag admixed concrete”, *International Journal of Civil and Structural Engineering*, Vol.1, No. 2, pp. 192-211, **2010**.

[**Blom, 2004**]: Blom J. et Kaptijn N. “A New Bridge Deck for the Kaag Bridges. The First CRC (Compact Reinforced Composite) Application in Civil Infrastructure.

## ***Bibliographie***

---

Kassel”, Proceedings of the 1st International Symposium on Ultra High Performance Concrete, septembre **2004**.

[**Bentur et Mitchell, 2008**]: Bentur A, Mitchell D. “Material performance lessons”. Cement and Concrete Research, 38, 259-272. 2008.

[**Chong, 2012**]: Chong Wang, Changhui Yang, Fang Liu, Chaojun Wan, Xincheng Pu, “Preparation of Ultra high performance concrete with common technology and materials”, Cement and concrete composites 34, pp 538-544, **2012**.

[**Cheyrezy, 1998**] : Cheyrezy M., “Applications structurales du BPR”. Conférence AFPC-AFREM sur les Bétons à Hautes Performances et les bétons à Ultra Hautes Performance, INSA de Lyon, 3 juin, **1998**.

[**Cazacliu, 2006**] : Cazacliu, B., Loukili, A., Abdi, B., Le Roy, R., 2006. “Malaxage d’un béton fibré à ultra-hautes performances”. Bull. Lab. Ponts Chaussées 107–120, **2006**.

[**Cim-béton, 1970**] : Collection Technique Cim-béton, “Les bétons aux nouvelles Performances” ; rédigé par un groupe de travail composé d’experts du SNBPE, du SNPB et de CIMBETON, **1970**.

[**CIM-BÉTON, 1970**] : “histoire du béton naissance et développement”, 1818 – 1970 Ecole Française du Béton.

[**Colleparidi, 1997**]: Colleparidi, S., Coppola, L., Troli, R., Colleparidi, M. “Mechanical properties of modified reactive powder concrete”. ACI Spec. Publ. 173, **1997**.

[**Corinaldesi, 2012**]: Corinaldesi, V., Moriconi, G, “Mechanical and thermal evaluation of Ultra High Performance Fiber Reinforced Concretes for engineering applications”. Constr. Build. Mater. 26, 289–294, **2012**.

[**Cwirzen, 2008**]: Cwirzen, A., Penttala, V. and Vornanen, C., “Reactive powder based concretes: Mechanical properties, durability and hybrid use with OPC”, Cem.Concr. Res., vol. 38, no. 10, pp 1217-1226, **2008**.

[**Cauberg, 2009**]: Cauberg N., Piérard J. et Remy O. “Evaluation of Durability and Cracking Tendency of Ultra High Performance Concrete”. Londres, Taylor & Francis Group, Proceedings of the 8<sup>th</sup> International Conference on Creep, Shrinkage and Durability Mechanics of Concrete and Concrete Structures, **2009**.

## ***Bibliographie***

---

[Care et Derkx, 2011] Caré S, Derkx F. “Determination of relevant parameters influencing gas permeability of mortars”. doi:10.1016/j.conbuildmat.2010.09.028. Construction and Building Materials, 25 (3)- 1248-1256. 2011.

[Dunstetter, 2011] : Dunstetter F., “Hydratation, retrait et durabilité de bétons de Poudre Réactive Extrudables”, 29èmes Rencontres Universitaires de Génie Civil - AUGC2011, Tlemcen, 29-31, Mai 2011.

[Delsol, 2012] : Delsol, S., “Évaluation du coefficient d’orientation dans les bétons renforcés de fibres métalliques”. École Polytechnique de Montréal, 2012.

[De Larrard, 1999] : De Larrard F., Sedran T., “Une nouvelle approche de la formulation des Bétons”. Annales du bâtiment et des travaux publics, no.6, pp. 39-54, Décembre 1999.

[De Larrard, 1989]: De Larrard F., “Ultra-fine particles for the making of very high strength concretes”. Cement and concrete research, vol. 19, no.2, pp. 161-172, 1989.

[Dubey, 1998]: Dubey A., Banthia N., “Influence of high-reactivity métakaolin and silica fume on the flexural toughness of high-performance steel fiber-reinforced concrete”. ACI Materials Journal, pp. 284-292, May-June 1998.

[Dreux, 1998]: Dreux, G., Festa, J.,. “Nouveau guide du béton et de ses constituants”. Eyrolles, 1998.

[Duy, 2013]: Duy, L.N., Dong, J. K., Gum, S. R. and Kyung, T.K. (), “Size effect on flexural behavior of ultra-high-performance hybrid fiber-reinforced concrete”, Composites: Part B 45, 2013.

[Dakhmouche, 2009] : Dakhmouche Fatima-Zohra, “Carbonatation de bétons adjuvantes a base de ressources locales Algériennes”, Thèse Doctorat, Université d’Orléans et de l’Université Mentouri de Constantine, P240, 2009.

[Darcy, 1856] : Darcy, “ Les fontaines publiques de la ville de Dijon”, Edition Dalmont, 1856.

[Duval, 1992] : Duval R. “ La durabilité des armatures et du béton d’enrobage, dans La durabilité des bétons”, Collection de l’ATHIL, Presses de l’École Nationale des Ponts et Chaussées, pp 492. 1992.

## ***Bibliographie***

---

[**Emmanuel, 1988**]: Emmanuel K, Attiogbe and Rizkalla S H, “Response of concrete to sulfuric acid attack”, ACI Materials Journal, Vol.85-M46, pp. 481-488, **1988**.

[**Feylessoufi, 1997**]: Feylessoufi A., Crespin M., Dion P., Bergaya F., Vandamme H., “Controlled rate thermal treatment of reactive powder concretes. Advanced cement based materials”, vol. 6, pp. 21-27, **1997**.

[**Fornasier et al., 2003**]: Fornasier G, Fava C, Fernández Luco L, Zitzer L. “Design of Self Compacting Concrete for Durability of Prescriptive vs. Performance-Based Specifications”, ACI SP 212:197-210. **2003**.

[**Guettala, 2011**]: A, Guettala., B, Mezghiche., “Compressive strength and hydration with age of cement pastes containing dune sand powder”, Construction and building materials, 25, pp 1263-1269, **2011**.

[**Guettala, 2011**]: S, Guettala. and B, Mezghiche., “Influence De L’addition Du sable De Dune En Poudre au Ciment sur Les Propriétés Des bétons”, European Journal Of Environmental and Civil Engineering - Taylor & Francis vol 15(10), Décembre, pp 1483-1507, **2011**.

[**Habert, 2013**]: Habert, G., Denarié, E., Šajna, A., Rossi, P. “Lowering the global warming impact of bridge rehabilitations by using Ultra High Performance Fibre Reinforced Concretes”. Cement and Concrete Composites, 38, pp 1-11, **2013**.

[**Hassan, 2012**]: Hassan, A., Jones, S., Mahmud, G., “Experimental test methods to determine the uniaxial tensile and compressive behaviour of ultra high performance fibre reinforced concrete (UHPRFC)”. Constr. Build. Mater. 37, 874–882, **2012**.

[**Harish, 2011**]: Harish K V, Dattatreya J K and Neelamegam M “Effect of fiber addition, heat treatment, and preset pressure on mechanical properties of ultrahigh-strength mortars”. Transportation Res. Rec. J. Transp.Res. Board 2240: pp 59–69, **2011**.

[**Herold, 2004**]: Herold G, Müller HS. “Measurement of porosity of ultra high strength fibre reinforced concrete”. International Symposium on Ultra High Performance Concrete, pp. 685–694, **2004**.

[**Hewayde, 2007**]: Hewayde E, Nehdi M L, Allouche E and Nakhla G, “Using concrete dmixtures for sulphuric acid resistance”, Construction Materials, Vol. 160-CM1, pp. 25-35, **2007**.



## ***Bibliographie***

---

[**Hamdy, 2014**]: Hamdy, K., Shehab, E., Heba, A.M., Mahmoud, K. and Sayed, A., “Mechanical Properties of Ultra-High Performance Fiber Reinforced Concrete”, International Journal of Engineering and Innovative Technology (IJEIT) Vol 4, Issue 4, October, pp 4-10, **2014**.

[**Habert, 2013**]: Habert, G., Denarié, E., Šajna, A., Rossi, P., “Lowering the global warming impact of bridge rehabilitations by using Ultra High Performance Fibre Reinforced Concretes”. Cement and Concrete Composites, 38, 1-11, **2013**.

[**Hyvert, 2009**] Hyvert N. “Application de l’approche probabiliste à la durabilité des produits préfabriqués en béton”, Thèse de doctorat de l’Université Paul Sabatier, Toulouse III, 2009.

[**Houst, 1992**] Houst Y.F, “Diffusion de gaz, carbonatation et retrait de la pâte de ciment durcie”, Thèse de doctorat de l’École Polytechnique Fédérale de Lausanne, **1992**.

[**Houst et Wittmann, 2007**]: Houst Y.F, Wittmann F.H. “Depth profiles of carbonates formed during natural carbonation”, Cement and Concrete Research, vol. 32, , pp 565-578. **2007**.

[**Ho et Lewis 1987**]: Ho D.W.S, Lewis R.K. “Carbonation of concrete incorporating fly ash or a chemical admixture”, 1st International Conference on The Use of Fly Ash, Silica Fume, Slag and other Mineral By-Products in Concrete, Montebello, 1983.

[**Ipek, 2011**]: Ipek, M., Yilmaz, K., Sümer, M. and Saribiyik, M., “Effect of pre-setting pressure applied to mechanical behaviours of reactive powder concrete during setting phase”, Constr. Build. Mater, vol. 25, no. 1, pp 61-68, **2011**.

[**Ipek, 2012**]: Ipek, M., Yilmaz, K. and Uysal, M.,”The effect of pre-setting pressure applied flexural strength and fracture toughness of reactive powder concrete during the setting phase”, Constr. Build. Mater, vol. 26, no. 1, pp 459-465, **2012**.

[**Kono, 2013**]: Kono, K., Musha, H., Kawaguchi, T.,. “Durability study of the first PC bridge constructed with ultra-high strength fiber reinforced concrete in Japan”, **2013**.

[**Matte, 1999**]: Matte V and Moranville M, “Durability of reactive powder composites: influence of silica fume on the leaching properties of very low water/binder pastes”, Cement and Concrete Composites, Vol. 21, pp. 1-9, **1999**.

## ***Bibliographie***

---

[**Moriconi, 2009**]: Moriconi, G. and Corinaldesi, V., "Cement-based composites for structural use: Design of reactive powder concrete elements", Excellence in concrete construction through Innovation, pp 239-244, **2009**.

[**Mezghiche, 1996**]: Mezghiche, B., "Résistance et déformabilité des bétons basiques", actes du premier Séminaire National en Génie Civil, pp 86-93, **1996**.

[**Mahesh, 2010**]: Mahesh, K. M., Chetan, D. and Modhera, A., "Comparative study of reactive powder concrete containing steel fibers and recron 3s fibers", Journal of Engineering Research and Studies, JERS, Vol. I, Issue I, July-Sept. pp 83-89, **2010**.

[**Mahesh, 2012**]: Mahesh, M., "Elastic characteristic of optimized composition of reactive powder concrete", International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering, Vol 2, Issue 10, October, **2012**.

[**Malhotra, 1987**]: **Malhotra, R. Ramachandran, R. Feldman, et P.C. Aïtcin.** "Condensed Silica Fume in Concrete", *CRC Press*, Boca Raton, FL, USA, ISBN 0-8493-5657-1-221. **1987**.

[**M. Auperin, 1989**] : **M. Auperin , F. Richard et al.** "Retrait et fluage des bétons à hautes performances". I.T.B.T.P.N° 474, Mai **1989**.

[**Muchel Awkal, 1966**] : **Muchel Awkal**, "A fusionner avec analyse thermogravimétrique", journal, vol.26 p320, **1966**.

[**Mellas Mekki, 2003**] : **Mellas Mekki**, "L'utilisation du microscope électronique a balayage et les diffractions par rayons X dans l'étude des ciments et bétons". Thèse de doctorat, Université Mohamed Khider, Biskra, **2003**.

[**Nischer, 1984**]: Nischer P. "The quality of the concrete texture", *Betonwerk und Fertigteil- Technik*, 52 (6), 363-368. **1986**.

[**NF EN 933-1, 2006**]: NF EN 933-1, "Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats" - Partie 1: Détermination de la granularité - Analyse granulométrique par tamisage, **2006**.

[**Park, 2012**]: Park, S.H., Kim, D.J., Ryu, G.S. and Koh, K.T., "Tensile behavior of ultra high performance hybrid fiber reinforced concrete", *Cement Concrete Compos.*; 34:172-84, **2012**.

## ***Bibliographie***

---

[**Pierre, 1995**]: Pierre Richard, Marcel Cheyrezy, “Composition of Reactive Powder Concrete”, Cement and Concrete Research Journal, 25(7), pp 1501-1511, **1995**.

[**Paillere, 1990**] : **Paillere A. M., Serrano J.J et Grimaldi G.** “ Influence du dosage et du mode d’introduction des super plastifiants sur le maintien de la maniabilité optimale des bétons à hautes performances avec et sans fumée de silice”. Bulletin. Liaison. P. et ch. 170. **1995**.

[**Parrott, 1987**]. Parrott L.J. “A review of carbonation in reinforced concrete”, British Cement Association, , 126 p. 1987.

[**Reda, 1999**]: Reda M M, Shrive N G and Gillott J E, “Microstructural investigation of innovative UHPC”, Cement and Concrete Research, Vol. 29, pp. 323-329, **1999**.

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

[**Rahman, 2014**]: Rahman, M., Baluch, M., Malik, M. “Thixotropic behavior of self compacting concrete with different mineral admixtures”. Constr. Build. Mater. 50, 710–717, **2014**.

[**Rossi, 2013**]: Rossi, P., Charron, J.P., Bastien-Masse, M., Tailhan, J.-L., Le Maou, F., Ramanich, S. “Tensile basic creep versus compressive basic creep at early ages: comparison between normal strength concrete and a very high strength fibre reinforced concrete”. Mater. Struct.doi:10.1617/s11527-013-0150-1, **2013**.

[**Roux, 1996**]: Roux N, Andrade C and Sanjuan M A, “Experimental study of durability of reactive powder concrete”, Journal of Materials in Civil Engineering, Vol. 8, No.1, pp. 1-6, **1996**.

[**Resplendino, 2010**]: Resplendino, J. “Introduction: What is a UHPFRC In Toutlemonde, F. et Resplendino, J., éditeurs: Designing and Building with UHPFRC: State of the Art and Development”, pages 3–14. John Wiley & Sons, Inc, **2010**.

[**Rossi, 2005**]: P. Rossi, A. Arca, E. Parant. and P. Fakhri., “Bending and compressive behaviors of a new cement composite”, Cement and concrete composites 35, pp 27-33, **2005**.

[**Robert, 2012**]: Robert Snyder; Jenkins Ron “Introduction to X-Ray Powder Diffractometry” Wiley Interscience, pp 335-341, **2012**.

## ***Bibliographie***

---

[**Staquet, 2002**]: Staquet S, Espion B. “Influence of cement and silica fume type on compressive strength of reactive powder concrete”. 6th International Symposium on High Strength /High Performance Concrete, pp. 1421–1436, 2002.

[**Snigdha, 2016**]: **S.Snigdha, M. and V.K. Visweswara, R.**, “A Study on the Mechanical Properties of Reactive Powder Concrete Using Granite”, International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology, Vol. 5, Issue 11, November, pp 19934-19944, **2016**.

[**Staquet, 2002**]: Staquet, S. and Espion, B., “Influence of cement and silica fume type on compressive strength of reactive powder concrete”, 6th International Symposium on High Strength /High Performance Concrete, pp 1421-1436,**2002**.

[**Somasekharaiah, 2015**]: H.M, Somasekharaiah., Mahesh, S. and Nelson, M. , “A study on fiber reinforced high performance concrete using multiple mineral admixtures”, International Journal of Research in Engineering and Technology, Vol 04 Issue: 10 | Oct-, pp 415-418, **2015**.

[**Santosh, 2014**]: Santosh, M.M. and Khadiranaikar, R., “Study on the durability characteristics of reactive powder concrete”, International Journal of Structural and Civil Engineering Research, Vol. 3, No. 2, May, pp 45-56, **2014**.

[**Shamsad, 2014**]: Shamsad, A., Ahmed, Z. and Mohammed, M., “Effect of the Key Mixture Parameters on Shrinkage of Reactive Powder Concrete”, The Scientific World Journal Volume, **2014**.

[**Toutlemonde, 2013**]: Toutlemonde, F., Resplendino, J., Eds. “Proceedings of International Symposium on Ultra-high Performance Fiber-Reinforced Concrete”. Marseille, France.239-248, **2013**.

[**Toutlemonde, 2013**]: Toutlemonde, F. et Resplendino, J., editeurs. UHPFRC – “Designing and Building with UHPFRC: from innovation to large-scale realizations”, Marseille, France.RILEM Pro087, **2013**.

[**Tafraoui, 2009**]: Tafraoui, A., Escadeillas, G., Lebaili, S., Vidal, T.,. “Metakaolin in the formulation of UHPC.Constr. Build. Mater. 23, 669–674, **2009**.

[**Tomasz, 2015**]: Tomasz Zdeb, “Influence of the physicochemical properties of Portland cement on the strength of reactive powder concrete”. 7th Scientific-Technical Conference Material Problems in Civil Engineering, MATBUD, **2015**.

## ***Bibliographie***

---

[**Tomasz, 2013**]: Tomasz Zdeb, “Ultra-high performance concrete – properties and technology”. Bull. Polish Acad. Sci. Tech. Sci., vol. 61, no. 1, pp. 183–193, **2013**.

[**Tebbal, 2016**]: Tebbal, N., Rahmouni, Z. and Belagraa, L., “Combined Effect of Granulated Slag and Silica Fume on the Characteristics of High Performance Concrete”, International Review of Civil Engineering (IRECE), 7 (2), pp 41-49, **2016**.

[**Vu, 2011**] : Vu N.T. “Contribution à l'étude de la corrosion par carbonatation du béton armé : approche expérimentale et probabiliste”, Thèse de doctorat de l'Université Paul Sabatier, Toulouse III, septembre, **2011**.

[**Widodo, 2015**]: Widodo Kushartomoa, Ika Balib, Budi Sulaimana, “Mechanical behavior of reactive powder concrete with glass powder substitute”, The 5th International Conference of Euro Asia Civil Engineering Forum (EACEF-5), **2105**.

[**Wille, 2011**]: Wille, K., Kim, D.J. and Naaman, A.E., “Strain-hardening UHP-FRC with low fiber contents”, Mater Struct, 44:583-98, **2011**.

[**Wille, 2011**]: Wille, K., Naaman, A.E. and El-Tawil, S., “Ultra high performance fiber reinforced concrete (UHP-FRC) record performance under tensile loading”, Concrete International, vol 33, no 9, September, pp 35-41, **2011**.

[**Yazıcı, 2009**]: Yazıcı H, Yardımcı MY, Aydın S, Karabulut AŞ. “Mechanical properties of reactive powder concrete containing mineral admixtures under different curing regimes”. Constr. Build. Mater., vol. 23, no. 3, pp. 1223–1231, **2009**.

# **LES ANNEXES**

## ANNEXE

Construction

Notice technique  
Edition janvier 2013  
Numéro 2.11  
Version n°136.2006 R\_001  
SIKA® VISCOCRETE® TEMPO 12

### SIKA® VISCOCRETE® TEMPO 12

Superplastifiant/Haut Réducteur d'eau polyvalent pour bétons prêts à l'emploi.

Conforme à la norme NF EN 934-2 Tab. 1, 3.1 et 3.2.

**Présentation** SIKA VISCOCRETE TEMPO 12 est un superplastifiant/haut réducteur d'eau polyvalent de nouvelle génération non chloré à base de copolymère acrylique.

**Domaines d'application**

- SIKA VISCOCRETE TEMPO 12 permet la fabrication de bétons plastiques à autoplacants transportés sur de longues distances et pompés.
- Dans les bétons autoplacants, SIKA VISCOCRETE TEMPO 12 améliore la stabilité, limite la ségrégation du béton et rend les formules moins susceptibles aux variations d'eau et des constituants.

**Caractères généraux** SIKA VISCOCRETE TEMPO 12 est un superplastifiant puissant qui confère aux bétons les propriétés suivantes :

- longue rhéologie (>2h),
- robustesse à la ségrégation,
- qualité de parement.



RHÉOLOGIE	RÉSISTANCES INITIALES	RÉDUCTION D'EAU
5	3	4

**Agréments, essais de laboratoire** ■ PV CNERIB : DTEM : 33/2010.

#### Caractéristiques

**Aspect** Liquide brun clair

**Conditionnement**

- Fûts de 230 kg
- CP de 1000 L
- Vrac

**Stockage** Dans un local fermé, à l'abri de l'ensoleillement direct et du gel, entre 5 et 30 °C. SIKA VISCOCRETE TEMPO 12 peut geler, mais, une fois dégelé lentement et réhomogénéisé, il retrouve ses qualités d'origine. En cas de gel prolongé et intense, vérifier qu'il n'a pas été déstabilisé.

**Conservation** 1 an en emballage intact

#### Données techniques

**densité** 1,06 ± 0,01

**pH** 6 ± 1

**Teneur en Na<sub>2</sub>O Eq.** ≤ 1 %

**Extrait sec** 30,2 ± 1,3 %

Teneur en ions Cl <sup>-</sup>	≤ 0,1 %
<b>Conditions d'application</b>	
Dosage	Plage d'utilisation recommandée : 0,2 à 3 % du poids du liant ou du ciment selon la fluidité et les performances recherchées. Plage d'utilisation usuelle : 0,4 à 1,5 % du poids du ciment ou du liant.
<b>Mise en œuvre</b>	SIKA VISCOCRETE TEMPO 12 est ajouté, soit en même temps que l'eau de gâchage, soit en différé dans le béton préalablement mouillé avec une fraction de l'eau de gâchage.
<b>Précautions d'emploi</b>	En cas de contact avec la peau, laver abondamment à l'eau. Consulter la fiche de données de sécurité.
<b>Mentions légales</b>	Produit réservé à un usage strictement professionnel. Nos produits bénéficient d'une assurance de responsabilité civile. «Les informations sur la présente notice, et en particulier les recommandations relatives à l'application et à l'utilisation finale des produits SIKA, sont fournies en toute bonne foi et se fondent sur la connaissance et l'expérience que la Société SIKA a acquises à ce jour de ses produits lorsqu'ils ont été convenablement stockés, manipulés et appliqués dans des conditions normales. En pratique, les différences entre matériaux, substrats et conditions spécifiques sur site sont telles que ces informations ou toute recommandation écrite ou conseil donné n'impliquent aucune garantie de qualité marchande autre que la garantie légale contre les vices cachés. Notre responsabilité ne saurait d'aucune manière être engagée dans l'hypothèse d'une application non conforme à nos renseignements. Les droits de propriété détenus par des tiers doivent impérativement être respectés. Toutes les commandes sont acceptées sous réserve de nos Conditions de Vente et de Livraison en vigueur. Les utilisateurs doivent impérativement consulter la version la plus récente de la fiche technique correspondant au produit concerné, qui leur sera remise sur demande.»



Sika (S) Djéazir  
08 route de l'Arbaa, 16111 Eucalyptus  
Alger ALGERIE  
Web : [dza.sika.com](http://dza.sika.com)

Tel: 213 (0) 21 50 21 04  
213 (0) 21 50 10 00 à 05  
Fax: 213 (0) 21 50 22 00





## ANNEXE

Notice Produit  
Edition Juin 2011  
Numéro 283  
Version 2011-192  
CONDENSIL S95 DP

### CONDENSIL S95 DP

Fumée de silice densifiée pneumatiquement pour bétons hautes performances et haute durabilité

Conforme à la norme NF P 15-802 et pr NF EN 12603-1



Construction

<b>Présentation</b>	La fumée de silice CONDENSIL S95 DP est une silice ultra fine issue de l'industrie de la fabrication du silicium ou des alliages à base de silicium.
<b>Domaines d'application</b>	La fumée de silice CONDENSIL S95 DP permet de fabriquer des : <ul style="list-style-type: none"><li>■ BHP et BTHP</li><li>■ Bétons résistants aux milieux agressifs :<ul style="list-style-type: none"><li>- domaines agricoles : ensilage, stockage d'engrais, aires de stabulation, ...</li><li>- milieu industriel : industriels chimiques et agro-alimentaires, sucreries, conserveries, laiteries, bacs de retentions, ...</li><li>- stations services : béton en contact d'huiles et de carburants</li><li>- aires de lavage</li><li>- milieu marin : digue, aménagement portuaire, ...</li><li>- zone de montagne : présence d'eau pure ou de sels de déverglaçage</li><li>- stations d'épuration, égouts, caniveaux, ...</li></ul></li><li>■ Bétons pompables</li><li>■ Bétons projetés</li></ul>
<b>Caractères généraux</b>	La fumée de silice CONDENSIL S95 DP confère aux bétons les propriétés suivantes : <ul style="list-style-type: none"><li>■ améliore les performances mécaniques à longs termes : résistances en compression, flexion et traction,</li><li>■ augmente le module d'élasticité,</li><li>■ réduit le fluage,</li><li>■ améliore la résistance à l'abrasion et à l'érosion,</li><li>■ améliore la durabilité en milieux agressifs,</li><li>■ diminue les risques d'expansion dus aux phénomènes d'alcali-réaction,</li><li>■ diminue la perméabilité aux gaz et aux liquides,</li><li>■ facilite le pompage de tous les bétons mêmes peu dosés en ciment,</li><li>■ réduit les risques de ségrégations.</li></ul>
<b>Caractéristiques</b>	
<b>Coloris</b>	Gris
<b>Conditionnement</b>	Vrac Big-Bags de 1 tonne
<b>Stockage</b>	Dans un local à l'abri de l'humidité.
<b>Conservation</b>	Dans son emballage d'origine intact, le produit se conserve 3 ans.



<b>Données techniques</b>	
Densité apparente	0,65 ± 0,10
Densité réelle (hélium)	2,24
Teneur en SiO <sub>2</sub>	95% (≥ 92%)
Teneur en Na <sub>2</sub> O <sub>éq.</sub>	0,60% (≤ 1,0%)
Teneur en SiC	1,50% (≤ 3,0%)
Teneur en C libre	1,50% (≤ 3,0%)
Teneur en S total	0,10% (≤ 0,20%)
Surface spécifique BET (m <sup>2</sup> /g)	23 (20 à 26)
Teneur en Oxydes (Fe, Al, Mg, Ca)	1,00% (≤ 1,50%)
Teneur en Cl	0,06% (≤ 0,20%)
<b>Conditions d'applications</b>	
Consommation / Dosage	Le dosage habituel est de 5 à 10 % du poids du ciment (pour tout autre dosage nous consulter).
<b>Mise en œuvre</b>	
	La fumée de silice CONDENSIL 895 DP doit être introduite avec le ciment. Afin de tirer toutes les performances de la fumée de silice CONDENSIL 895 DP, il est indispensable de défloculer complètement les micro-particules de silice. Pour cela, la fumée de silice CONDENSIL 895 DP doit être systématiquement associée avec un superplastifiant/haut réducteur d'eau de type SIKAPLACRETE.
<b>Précautions d'emploi</b>	
	La fumée de silice CONDENSIL 895 DP étant un produit pulvérulent, l'emploi d'un masque est préconisé lors de son utilisation.
<b>Mentions légales</b>	
	Produit réservé à un usage strictement professionnel. Nos produits bénéficient d'une assurance de responsabilité civile. «Les informations sur la présente notice, et en particulier les recommandations relatives à l'application et à l'utilisation finale des produits SIKKA, sont fournies en toute bonne foi et se fondent sur la connaissance et l'expérience que la Société SIKKA a acquises à ce jour de ses produits lorsqu'ils ont été convenablement stockés, manipulés et appliqués dans des conditions normales. En pratique, les différences entre matériaux, substrats et conditions spécifiques sur site sont telles que ces informations ou toute recommandation écrite ou conseil donné n'impliquent aucune garantie de qualité marchande autre que la garantie légale contre les vices cachés. Nos agences sont à votre disposition pour toute précision complémentaire. Notre responsabilité ne saurait d'aucune manière être engagée dans l'hypothèse d'une application non conforme à nos renseignements. Les droits de propriété détenus par des tiers doivent impérativement être respectés. Toutes les commandes sont acceptées sous réserve de nos Conditions de Vente et de Livraison en vigueur. Les utilisateurs doivent impérativement consulter la version la plus récente de la Notice correspondant au produit concerné, qui leur sera remise sur demande.»



Sika El Djazair  
05 route de l'Arbaa, 16111 Eucalyptus  
Alger ALGERIE  
Web : [dza.sika.com](http://dza.sika.com)

Tel: 213 (0) 21 50 21 84  
213 (0) 21 50 16 92 à 95  
Fax: 213 (0) 21 50 22 08



## ANNEXE

Construction

Notice technique  
Edition 03/2010  
Numéro 2.46  
Version n°2010.049  
SIKA® METAL FIBRES RL-45/50-BN

### SIKA® METAL FIBRES RL-45/50-BN

Fibres métalliques pour le renforcement des bétons.



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

**Domaines d'application**

- Sols industriels.
- Dalles sur colonnes ballastées

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

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

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

#### Caractéristiques

**Nature** Fil d'acier treillé sans revêtement

**Longueur** 50 mm

**Diamètre** 1,05 mm

**Étalement** 48

**Nombre de fibres** 2800 fibres/kg

**Résistance en traction** 1000 MPa (sur fil)



**Résistances** Les caractéristiques de résistance équivalente en flexion, au cisaillement et en traction axiale du béton dépendent du dosage de fibres et de la classe de résistance du béton.

Les valeurs de ductilité sont données dans le tableau ci-dessous :

Dosage en kg/m <sup>3</sup>	R <sub>e1,5</sub> (%)	R <sub>e3</sub> (%)
20	38	33
25	43	38
30	48	40
35	52	45
40	57	50
45	62	53
50	67	57

Valeurs basées sur une résistance moyenne en flexion de la matrice de 4,8 N/mm<sup>2</sup> à utiliser jusqu'à C40/50

**Conditionnement**

- Sacs papier de 20 kg
- palette de 60 sacs (1200 kg)
- Big-bag de 900 kg

**Stockage** Ne pas gerber les palettes.

**Conservation** Protéger les palettes de la pluie.

**Conditions d'application**

Consommation / Dosage

■ Pour les calculs de dimensionnement le tableau suivant donne la résistance équivalente en flexion pour des déflexions de 1,5 mm ou 3 mm suivant la norme NBN B 15-238, 239, JSCE-SF4 et CUR35.

Résistance en flexion	C25		C30		C35		C40		C45	
	C25		C30		C35		C40		C45	
Résistance en compression	Déflexion 3 mm	Déflexion 1,5 mm	Déflexion 3 mm	Déflexion 1,5 mm	Déflexion 3 mm	Déflexion 1,5 mm	Déflexion 3 mm	Déflexion 1,5 mm	Déflexion 3 mm	Déflexion 1,5 mm
20	18	13	17	13	18	14	19	17	2	18
25	19	14	18	14	2	17	21	18	22	2
30	2	19	22	19	23	19	24	21	25	22
35	22	18	24	2	25	21	28	23	27	24
40	24	21	26	22	27	23	30	25	29	26
45	26	23	28	24	29	25	32	27	31	27
50	28	24	3	25	32	27	35	28	34	29

■ Pour les applications de renforcement du béton dans les ouvrages en béton autoplaçant, les SIKAB® METAL FIBRES RL-45/50-BN sont employées au dosage minimum de 20 kg/m<sup>3</sup>.

**Mise en oeuvre** Il est recommandé d'ajouter les SIKAB® METAL FIBRES RL-45/50-BN directement dans le malaxeur de la centrale à béton, simultanément au sable et au gravillon dans la bécule à granulats.

Ne pas introduire les fibres en premier et ne pas jeter les sacs en papier dans le malaxeur.

Malaxer le mélange (béton + fibres) pendant 20 secondes avant l'introduction de l'eau de gâchage. Le temps de malaxage total est de 75 secondes.

## Précautions d'emploi

Lors de l'ouverture des sacs ou la manipulation des sacs ouverts, il est conseillé de porter des gants.  
Consulter la fiche de données de sécurité accessible sur Internet [www.sika.fr](http://www.sika.fr)

## Mentions légales

Produit réservé à un usage strictement professionnel

Nos produits bénéficient d'une assurance de responsabilité civile.

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

The Sika logo consists of the word "Sika" in a bold, sans-serif font, with a registered trademark symbol (®) to its right. The text is white and is set against a black triangular background.

SIKKA France S.A.  
84, rue Edouard Vaillant – BP 104  
93351 Le Bourget Cedex  
France

Tel. : 01 49 92 80 00  
Fax : 01 49 92 80 21  
[www.sika.fr](http://www.sika.fr)