

**RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE**  
**Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique**



UNIVERSITÉ DES SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE HOUARI BOUMEDIENE  
FACULTE DE GENIE CIVIL

MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du diplôme de MAGISTER

En GENIE CIVIL  
Spécialité : Construction  
Par

**ABDELFETAH ZENATI**  
Thème

**CONTRIBUTION À L'ETUDE DES BÉTONS DE  
POUDRES RÉACTIVES À BASE DE FIBRES**

Soutenu le : 19 juillet 2007, devant le jury suivant :

M<sup>me</sup> F.KHARCHI

M<sup>r</sup>. M.N.OUDJIT

M<sup>r</sup>. BRAHMA

M<sup>r</sup>. A.AHMED BEN YAHIA

M<sup>r</sup>.S.HADDADI

Professeur, USTHB

Maître de conférences, USTHB

Professeur, U. Blida

Professeur, USTHB

Chargé de recherche, USTHB

Présidente

Directeur de Thèse

Examineur

Examineur

Examineur

## DÉDICACE

À Mes Chères Parents,  
À Mon Épouse Nabila,  
À Mes Aimables Enfants:  
Islem et Manel

À Tous Mes Frères et Sœurs.  
À Toute Ma belle famille.

## REMERCIEMENTS

La présentation de ce mémoire est l'occasion pour moi de remercier tous ceux qui m'ont apporté aide, conseils et encouragements durant toute la durée de ce travail.

J'exprime ma profonde reconnaissance à mon directeur de thèse, Mohamed Nadjib OUDJIT, pour ses précieux conseils, sa disponibilité, sa patience et sa gentillesse tout au long de ces années de travail. J'ai pu apprécier ses compétences scientifiques étendues (qui ne sont plus à démontrer), mais également ses grandes qualités humaines.

Il nous est agréable de remercier le Professeur F.KHARCHI, Professeur à l'USTHB, que nous a fait l'honneur de présider notre jury.

Il m'est aussi agréable de remercier le Professeur A.BRAHMA, Professeur à l'Université de Blida, qui a accepté d'être examinateur et membre de ce jury, je lui suis très reconnaissant pour l'accueil compréhensif qu'il m'a réservé.

J'adresse un grand merci au professeur A.AHMEDBENYAHIA, Professeur à l'USTHB, m'a fait le grand honneur d'examiner mes travaux et de participer à ce jury.

Je remercie Aussi S.HADDADI. Chargé de cours à l'USTHB, d'avoir accepté avec un accueil chaleureux de participer à ce jury.

Je remercie le professeur D.BENOUAR, Directeur du Laboratoire Bâti dans l'Environnement, pour sa contribution morale et matérielle pour la concrétisation de ce travail.

J'exprime mes plus sincères remerciements à mon ami A.BENMOKHTAR qui m'a toujours encouragé à dépasser mes limites, à aller de l'avant, à avoir confiance en moi.

Je tiens à remercier tous mes amis enseignants chercheurs, personnels techniques et administratifs, de la faculté de Génie Civil.

Je tiens à remercier aussi mes collègues : K.ABDELLI, M.LANEZ, K.ARROUDJ, R.NACIR, Z.ABIB, S.DEBIECHE, M.BENELDJOUZI. M.KENDEL, B.BOUAROUR, M.MANAA, M.KADDEM.

Je tiens à remercier toute ma famille qui sans elle ce travail n'aura jamais vu le jour.

## ملخص

إن تحسين الرص للمصفوفة الاسمنتية تولد عنه جيل جديد من الخرسانة، يسمى هذا النوع ذو التركيب المعقد، بالخرسانة ذات الدقائق المتفاعلة.

لقد إعتدنا في دراستنا هاته على الخرسانات ذات الدقائق المتفاعلة التي تتكون اساسا من اضافات غنية بالسيليس (دخان السيليس، رمل الكثبان المسحوق، خبث الأفران العالية) و إدخال الألياف الفلاذية القصيرة. ان استعمال ملدنات فعالة متوافقة مع الإسمنت المستعمل مكنتنا من الحصول على خلطة ذات نسبة ضعيفة من كمية الماء على الإسمنت.

إستعملت الإضافات لتعويض الإسمنت بنسبة 15 بالمائة من وزنه على شكل ثنائي و ذلك للأخذ بعين الإعتبار التأثيرات الناتجة عن تفاعلاتها البوزولانية و مدى تأثيرها على اللدانة و المقاومات الميكانيكية.

إن النتائج المحصل عليها توضح تأثير نعومة الإضافات و اشكالها البنيوية على التصرف الريولوجي و الميكانيكي لهذه الخرسانات المدروسة.

كما إستطعنا إيجاد علاقة بين نتائج المقاومات الميكانيكية و تلك المحصل عليها بالأشعة السينية واضعين بعين الإعتبار التأثيرات الفيزيائية و البوزولانية لمختلف الإضافات على تكثيف المصفوفة الإسمنتية.

إن تدعيم الخرسانات ذات الدقائق المتفاعلة بالألياف الفلاذية الدقيقة، يسمح لنا بمضاعفة مقوماتها للشد كذلك تخفيض إنتشار الشقوق.

### كلمات مفتاحية:

خرسانة، خرسانة ذات الدقائق المتفاعلة، الياف فلاذية، اسمنت، رمل الكثبان، خبث الأفران، دخان السيليس، بوزولان، مقاومة ميكانيكية، الرص، ريولوجي، ملدن، الأشعة السينية.

## RÉSUMÉ

L'amélioration de la compacité de la matrice cimentaire a donné naissance à une nouvelle génération de bétons de composition complexe, appelée béton de poudres réactives (BPR).

Notre étude a porté sur des BPR à base d'ajouts riches en silice (Fumée de silice (FS) - sable de dunes broyé (SD) - laitier de hauts fourneaux (LH)) et l'incorporation de courtes fibres d'acier. L'emploi des superplastifiants compatibles avec le ciment utilisé nous a permis de les gâcher avec un très faible rapport eau/liant. Les ajouts ont été utilisés par substitution au ciment à raison de 15% de son poids sous forme binaire (FS-SD; FS-LH; SD-LH) en prenant en considération les effets induits par leurs pouzzolanicités sur la maniabilité et les résistances mécaniques.

Les résultats obtenus mettent en relief l'influence des ajouts, de par leur finesse et leur forme allotropique, sur le comportement rhéologique et mécanique des BPR testés. Nous avons pu établir une corrélation entre les résultats des résistances mécaniques et ceux obtenus par DRX mettant en évidence les effets physiques et pouzzolaniques des différents ajouts sur la densification des matrices cimentaires.

Le renforcement des BPR par des micro-fibres d'acier, nous a permis de doubler leurs résistances en traction et de réduire la propagation des fissures.

**Mots clés :** Bétons, Bétons de poudres Réactives, Fibres d'acier, Ciment, Sable des Dunes, Laitier, Fumée de Silice, Pouzzolane, Résistance mécanique, Compacité, Rhéologie, Superplastifiant, Diffraction aux rayons - X.

## ABSTRACT

The improvement of cementitious matrix compacity gave rise to a new generation of concretes of complex composition, named Reactive Powder Concrete (RPC).

Our study concerned RPC with siliceous additions (silica fume SF, crushed sand of dunes DS, slag of furnaces S) and the incorporation of short steel fibers. The use of superplasticizer compatible with cement enabled us to use a mixture with a low water/binder ratio. The additions were used by substitution for cement at a rate of 15% of its weight in binary format (SF-DS; SF-S; SD-S) by taking into account the effects induced by their pozzolanities on the workability and mechanical strength.

The results obtained highlight the effect of the additions, from their fineness and their allotropic form, on the rheological and mechanical behaviour of the RPC tested.

We established a correlation between the results of mechanical strength and those obtained by XRD highlighting the physical and pozzolanic effects of the various additions on the increase of the cementitious matrix density.

The reinforcement of the RPC by steel microfibers, enabled us to double their tensile strength and to reduce the cracks propagation.

**Key words:**

Concrete, Reactive Powder Concrete, Portland cement, Cement, Dune sand, Slag, Silica fume, Steel fibers, Pozzolane, Mechanical strength, Compacity, Rheology, Superplasticizer, X Rays Diffraction.

## TABLE DES MATIÈRES

DÉDICACE .....	I
REMERCIEMENTS .....	II
ملخص.....	III
RÉSUMÉ.....	IV
ABSTRACT .....	V
LISTE DES TABLEAUX.....	IX
LISTE DES FIGURES .....	X
LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS .....	XI
INTRODUCTION.....	1

### Première Partie : Synthèse bibliographique .....3

<b>CHAPITRE 1 GÉNÉRALITES SUR LE MATÉRIAU BETON.....</b>	<b>4</b>
1.1 Historique : des bétons ordinaires aux bétons à Ultra Hautes Performances .....	4
1.2 Évolution des BUHP.....	5
1.3 Le ciment Portland.....	7
1.3.1 Hydraulicité et hydratation du ciment Portland .....	9
1.3.1.1 Hydratation des silicates .....	10
1.3.1.2 Hydratation des aluminates .....	11
1.3.2 Réaction pouzzolanique .....	12
1.3.3 Microstructure de la pâte de ciment durcie .....	12
1.3.3.1 Les silicates de calcium hydratés (C-S-H).....	13
1.3.3.2 La Portlandite et les aluminates hydratés.....	14
1.3.3.3 Porosité de la pâte de ciment durcie.....	14
1.3.3.4 Composition de la solution interstitielle .....	16
1.4 Les superplastifiants.....	17
1.4.1 Classification chimique des superplastifiants .....	18
1.4.2 Compatibilité entre le ciment et le superplastifiant.....	18
1.5 Les ajouts cimentaires.....	20
1.5.1 Les laitiers .....	20
1.5.2 Les pouzzolanes .....	21
1.5.3 Les fillers.....	21
<b>CHAPITRE 2 PRÉSENTATION DES BÉTONS DE POUDRES RÉACTIVES...22</b>	<b>22</b>
2.1 Principes de formulation des BPR .....	22
2.1.1 Amélioration de l'homogénéité.....	22
2.1.1.1 Réduction de la taille des gros granulats.....	23
2.1.1.2 Suppression de l'auréole de transition .....	23

2.1.1.3	Amélioration des propriétés mécaniques de la pâte .....	24
2.1.1.4	Limitation du dosage en sable .....	24
2.1.2	Optimisation de la compacité .....	24
2.1.2.1	Optimisation du mélange granulaire .....	24
2.1.2.2	Le Pressage avant et pendant la prise .....	25
2.1.3	Amélioration de la microstructure par traitement thermique .....	26
2.1.4	Amélioration de la ductilité par l'emploi de microfibres .....	30
2.1.4.1	Sélection du type de fibre .....	30
2.1.4.2	Définition de la longueur des fibres .....	30
2.1.4.3	Détermination du rayon de la fibre .....	32
2.1.4.4	Forme et ancrage des fibres .....	32
2.1.4.5	Dosage pondéral .....	33
2.2	Matière première utilisée pour la fabrication des BPR .....	33
2.2.1	Ciment .....	33
2.2.2	Fumée de silice .....	34
2.2.3	Quartz broyé .....	35
2.2.4	Sable fin .....	35
2.2.5	Superplastifiants .....	36
2.2.6	Fibres métalliques et non métalliques .....	36
2.3	Mise en œuvre des BPR .....	37
2.3.1	Malaxage du béton .....	37
2.3.2	Dosage en superplastifiant .....	37
2.3.3	Mise en place .....	38
2.3.4	Problèmes particuliers rencontrés lors de la mise en oeuvre .....	39

<b>CHAPITRE 3</b>	<b>COMPORTEMENT RHEOLOGIQUE ET MECANIQUE</b>	
	<b>DES BPR .....</b>	<b>40</b>
3.1	Propriétés rhéologiques et mécaniques des BPR .....	41
3.1.1	Caractéristiques rhéologiques .....	41
3.1.2	Comportement à la compression .....	42
3.1.3	Comportement en traction et en flexion .....	44
3.1.4	Retrait .....	49
3.2	Microstructure et durabilité des BPR .....	52
3.2.1	Microstructure des BPR .....	52
3.2.2	Propriétés de transfert .....	52
3.2.3	Durabilité des BPR .....	53
3.2.3.1	Porosité .....	53
3.2.3.2	Perméabilité, Résistance au gel-dégel et Abrasion .....	54
3.2.3.3	Résistance à la corrosion .....	54
3.2.3.4	Résistance aux agents agressifs .....	55
3.2.3.5	Résistance au feu .....	55
3.3	Propriétés et domaines d'application des BPR .....	55

<b>Deuxième partie : Étude expérimentale .....</b>	<b>57</b>
<b>CHAPITRE 4 MÉTHODES D'ESSAIS.....</b>	<b>58</b>
4.1 Analyse minéralogique par DRX.....	58
4.2 Rhéologie et point de saturation .....	60
4.3 Mesure de la maniabilité.....	61
4.4 Masse volumique .....	62
4.5 Malaxage des bétons avec et sans ajouts .....	62
4.6 Mise en place des bétons.....	63
4.7 Essais mécaniques.....	63
4.7.1 Essai de traction par flexion trois points .....	63
4.7.2 Essai de compression .....	64
<b>CHAPITRE 5 CARACTÉRISTIQUES ET IDENTIFICATION DES MATÉRIAUX.....</b>	<b>65</b>
5.1 Caractérisation des matériaux anhydres utilisés .....	65
5.1.1 Le ciment Portland .....	65
5.1.2 La chaux .....	68
5.1.3 Les ajouts .....	68
5.1.4 Le sable .....	71
5.1.5 Les adjuvants.....	72
5.1.6 Les fibres d'acier.....	73
5.1.7 L'eau de gâchage.....	73
5.2 Caractérisation minéralogique des mélanges en pâte de chaux par DRX .....	73
<b>CHAPITRE 6 COMPORTEMENT RHÉOLOGIQUE DES BPR .....</b>	<b>77</b>
6.1 Détermination des points de saturation sur coulis .....	77
6.2 Composition des BPR.....	81
6.2.1 Fabrication des mélanges .....	82
6.2.2 Essais de maniabilité .....	83
<b>CHAPITRE 7 ÉTUDE DES PROPRIÉTÉS DES BPR.....</b>	<b>85</b>
7.1 Fabrication des éprouvettes.....	85
7.2 Mûrissement des éprouvettes.....	85
7.3 Essais mécaniques.....	86
7.3.1 Essai de résistance à la compression .....	86
7.3.2 Essai de résistance à la flexion 3 points .....	89
<b>CONCLUSION et RECOMMANDATIONS .....</b>	<b>94</b>
<b>REFÉRENCES.....</b>	<b>96</b>
<b>ANNEXE : Appareillage utilisé .....</b>	<b>102</b>

## LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1-1 : Composition chimique moyenne d'un ciment Portland. ....	8
Tableau 1-2 : Composition minéralogique d'un clinker .....	8
Tableau 1-3 : Catégories de ciment.....	9
Tableau 3-1 : Résistances des bétons à la compression .....	40
Tableau 3-2 : Résumé des principales propriétés en compression des BPR [43] .....	43
Tableau 3-3 : Résumé des principales propriétés en traction et flexion des BPR [43] ....	47
Tableau 3-4 : propriétés de transfert des BUHP et des BO.....	53
Tableau 3-5 : Principales caractéristiques de durabilité du BPR 200 .....	54
Tableau 4-1 : Schéma de l'essai de traction par flexion 3 points.....	63
Tableau 5-1 : Caractéristique physique du ciment.....	66
Tableau 5-2 : Caractéristiques chimiques du ciment .....	66
Tableau 5-3 : Composition minéralogique du ciment (Bogue).....	66
Tableau 5-4 : Propriétés mécaniques du ciment .....	66
Tableau 5-5 : Composition chimique des ajouts minéraux utilisés.....	69
Tableau 5-6 : Caractéristique physique des ajouts minéraux utilisés. ....	69
Tableau 5-7 : Courbe granulométrique du sable de dunes.....	72
Tableau 5-8 : Caractéristiques du superplastifiant.....	73
Tableau 5-9 : Combinaisons binaires des ajouts dans les mélanges. ....	74
Tableau 6-1 : Composition des coulis avec et sans ajouts T, FS, LH et SD .....	78
Tableau 6-2 : Formulation et caractéristiques des BPR non fibrés.....	81
Tableau 6-3 : Formulation et caractéristiques des BPR fibrés.....	82
Tableau 6-4 : Séquence de malaxage des mélanges [56].....	83
Tableau 6-5 : Maniabilité des bétons en fonction de dosage en SP30 avec $E/L=0.20$ ...	83
Tableau 6-6 : Maniabilités des bétons étudiés en fonction de $E/L$ avec 1.8% SP .....	84
Tableau 7-1 : Superposition des résultats en compression des bétons non fibrés et fibrés.....	86
Tableau 7-2 : Superposition des résultats en traction des bétons non fibrés et fibrés.....	90

## LISTE DES FIGURES

Figure 1-1 : Illustration de la contraction LE CHATELIER dans une pâte de ciment et de l'autodessiccation [36].....	15
Figure 1-2 : Evolution de la composition de la solution interstitielle d'un béton [38].....	17
Figure 1-3 : Représentation schématique des diverses interactions entre le clinker, les .	19
Figure 2-1 : Relation semi quantitative : Résistance / Porosité / Taux de cristallisation [48].....	27
Figure 2-2 : Diagramme de phases des C-S-H [49].....	28
Figure 2-3 : Variation du taux de dessiccation en fonction de la température.....	29
Figure 2-4 : Couture des granulats par embiellage.....	31
Figure 3-1 : Courbe contrainte-déformation d'un BPR200 en compression simple [65].	42
Figure 3-2 : Comportement en compression d'un BPR200 [60].	43
Figure 3-3 : Courbe charge/flèche au centre d'une poutrelle de BPR fibre soumise à un	45
Figure 3-4 : Comparaison des déformations en traction et en compression sur une éprouvette de BPR200 sollicité en flexion [65].	46
Figure 3-5 : Relation entre la contrainte et l'ouverture de fissure pour une éprouvette de BPR fibre sollicité en traction directe [64].	46
Figure 3-6 : Relation entre la charge et la déformation d'une matrice DSP [66].	48
Figure 3-7 : Comportement en traction directe d'une matrice de DSP contenant différents dosage en microfibres d'acier de 150 $\mu\text{m}$ x 6 mm [64].	48
Figure 3-8 : Comparaison du retrait d'auto-dessiccation de trois BPR avec un BHP et un BTHP [73].	50
Figure 3-9 : Évolution du degré d'hydratation des BPR avec le temps [73].	51
Figure 4-1 : Représentation schématique de l'analyse par DRX	58
Figure 4-2 : Principe de BRAGG.....	59
Figure 5-1 : Diffractogramme X du ciment anhydre utilisé.....	67
Figure 5-2 : Diffractogrammes X de la chaux utilisée.....	68
Figure 5-3 : Diffractogrammes X des ajouts utilisés a) : FS - b) : LH - c) : SD).....	70
Figure 5-4 : Diffractogrammes X des mélanges étudiés à deux mois d'hydratation.....	75
Figure 6-1 : Temps d'écoulements des coulis avec et sans ajouts en fonction de dosage en superplastifiant.....	80
Figure 7-1 : Évolution de la résistance à la compression des bétons non fibrés.....	87
Figure 7-2 : Évolution de la résistance à la compression des bétons fibrés.....	88
Figure 7-3 : Évolution de la résistance à la traction des bétons non fibrés (BPR NF).....	91
Figure 7-4 : Évolution de la résistance à la traction des bétons fibrés.....	92

## **LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS**

BHP	Béton Haute Performance
BO	Béton Ordinaire
BPR	Béton de poudres réactives
BTHP	Béton à très haute performance
BUHP	Béton à ultra haute performance
DRX	Diffraction par rayons X
RMN	Résonance magnétique nucléaire

## INTRODUCTION

Parmi les alternatives pour améliorer les performances de pièces en béton armé ou béton précontraint figure l'amélioration du matériau lui-même. On a ainsi assisté au développement des bétons à hautes performances - BHP- (résistance à la compression de 50 à 60 MPa) et à très hautes performances - BTHP- (résistance à la compression pouvant dépasser légèrement 100 MPa) qui représente un progrès significatif par rapport aux bétons courants (résistances à la compression comprise entre 25 et 45 MPa), l'obtention de ces performances a été possible dès l'apparition des superplastifiants réducteurs d'eau et de la fumée de silice, qui allaient permettre de révolutionner le béton avec la création d'une nouvelle génération de matériau résistant appelée Bétons de Poudres Réactives (BPR). Ces nouvelles matrices à ultra haute performance sont un mélange de minéraux fins, subissant un traitement thermique après durcissement, et qui sont caractérisés par une forte teneur en fumée de silice, et par un très faible rapport eau/ciment. Le BPR est un matériau dont les plus gros granulats, en l'occurrence du sable, ont une dimension maximum d'environ 600 $\mu$ m. Outre une résistance en compression élevée (200 – 800 MPa), le BPR présente une faible perméabilité, ce qui lui confère une excellente durabilité.

C'est la direction scientifique de Bouygues (France) qui a mis au point le BPR. Ce nouveau concept de béton ductile à ultra haute performance a été développé à partir d'expérience acquise dans la formulation et la mise en œuvre de plusieurs centaines de milliers de mètres cubes de béton.

La plupart des formulations des BPR contiennent du quartz broyé, celui-ci se comporte comme une pouzzolane lorsque le mélange est placé en autoclave, cependant, les traitements thermiques communément adopté dans les laboratoires ou le milieu industriel ne dépassent pas 90°C. Le quartz broyé, était-il encore nécessaire dans ces conditions ? De plus, malgré l'utilisation rationnelle de superplastifiants, l'ouvrabilité des BPR demeure une des principales difficultés de leur mise en œuvre. Enfin, en raison

de leur teneur élevée en ciment, on observe en général un fort dégagement de chaleur d'hydratation.

La tendance actuelle de certains auteurs est d'accroître l'utilisation des ajouts minéraux en remplacement du ciment Portland. Outre des raisons d'ordre économique ou écologique, les additions cimentaire améliorent certaines caractéristiques du béton tant frais que durci [1].

Le premier objectif de ce mémoire est donc d'évaluer l'influence de différents ajouts minéraux comme le laitier et le sable des dunes broyé qui sont des matériaux locaux, sur la rhéologie et sur les résistances mécaniques des BPR.

Le béton est caractérisé par sa résistance à la compression, la résistance à la traction est beaucoup plus faible, résistance à la traction/résistance à la compression égal à 1/10, (traction/compression égal à 1/20 pour les Bétons à ultra hautes performances (BUHP) [2], l'ajout d'armatures continues dans les zones tendues permet de palier cette faiblesse du béton en reprenant les contraintes de traction par le biais d'efforts de frottement ou de butée. On peut aussi ajouter comme renforcement des fibres discontinues au béton, ces fibres agissent à une plus petite échelle et ont comme principales fonctions de contrôler l'ouverture des fissures et l'amélioration du comportement en traction du matériau.

**Première Partie :**  
**Synthèse bibliographique**

## CHAPITRE 1 GENERALITES SUR LE MATERIAU BETON

Même si les traces des premiers mortiers datent de 10 000 ans avant J.C. (maçonnerie de Mureybat en Syrie et Ain Mallaber en Palestine), on peut prêter aux grands bâtisseurs, qui étaient les Pharaons du temps de la grande Egypte, le développement de ces matériaux par la standardisation de produits tels que les briques, leur permettant l'édification d'habitation et de tombeaux. Mais il aura fallu, tout de même, attendre le dernier siècle de ces 12 millénaires passés pour que les matériaux de construction que sont les mortiers et les bétons prennent leur plein essor. Ceci n'est pas sans lien, naturellement, avec les besoins du marché, mais aussi avec les avancées technologiques dans différents domaines tels que les moyens d'investigations (analyses chimique, microscopique, ...), de calculs, mais aussi de fabrication et de contrôle des bétons [3].

C'est ainsi, qu'à l'aube du 3<sup>ème</sup> millénaire, les bétons à hautes performances (BHP) ont révolutionné le génie civil par leurs caractéristiques mécaniques accrues et leur facilité de mise en œuvre. Parmi les BHP, les bétons de poudres réactives (BPR) s'approprient à détrôner certains matériaux tels que l'acier et la fonte, dans des domaines aussi vastes que sont le blindage ou les blocs moteurs [4].

### 1.1 Historique : des bétons ordinaires aux bétons à Ultra Hautes Performances

Yve Malier [5] mentionne que Smeaton (1756), Vicat (1818), Apsdin (1825) sont parmi les inventeurs des bétons modernes. Monier et Lambot (1848), Coignet (1852), Hennebique (1880) réalisèrent avec ce matériau les premières constructions en béton armé. Il s'ensuivit un siècle pendant lequel le béton resta un mélange de granulats, de ciment et d'eau.

L'utilisation des fluidifiants dans les bétons permet de produire la floculation de grains de ciments et aussi de diminuer le rapport E/C [6]. Les fluidifiants ont été à l'origine de l'obtention des bétons de hautes performances. Ces derniers ont des

résistances en compression variant de 50 à 100 MPa. Ils ont été utilisés pour la construction du Mid continental « plaza building » à Chicago depuis 1972 avec un béton ayant une résistance en compression à 28 jours ( $f_c$ ) de 60 MPa [7]. C'est dans la zone de Chicago que furent construits les premiers grattes-ciel en BHP. Au Canada, la plateforme pétrolière Hibernia (1996) et le pont de la confédération (1997) sont deux ouvrages récents réalisés en BHP [8]. En France, le pont de Joigny (1988) atteignit une résistance de 78 MPa [9]. En 1993, on construisit le pont de Normandie avec un béton de 60 MPa. A l'époque, il s'agissait du plus long pont à haubans au monde [8].

Pour gagner encore quelques Mégapascals, Bache (1981) suggéra de réduire la porosité des pâtes de ciment par ajout d'ultrafines particules de fumée de silice en présence d'un superplastifiant. Cela a permis d'atteindre un béton de 118 MPa. Ce dernier a été utilisé pour la construction de l'édifice Two Union Square à Seattle [10]. Une nouvelle génération de béton venait de naître. Les bétons à très hautes performances (BTHP) ( $f_c$  de 100 à 150 MPa).

Les bétons à ultra-hautes performances (BUHP) nécessitent une approche différente en faisant appel à des constituants de qualité exceptionnelle et à de nouveaux processus d'élaboration (autoclavage, serrage, ...). Pour la plupart, ces matériaux font l'objet d'un brevet. La passerelle piétonne de Sherbrooke et l'un des premiers ouvrages réalisés en (BUHP). Une moyenne de 200 MPa en compression (écart type de 8,7 MPa) a pu être maintenu tout au long de la production de 50 m<sup>3</sup> de béton de poudres réactives (BPR) [11].

## 1.2 Évolution des BUHP

Le principe de base pour concevoir des bétons ultra performants et de diminuer au maximum la porosité. Pour ce faire, différents moyens sont employés. Cependant, les matériaux ainsi créés, se caractérisent par leur comportement fragile.

En 1972-1973, Brunauer a mis au point une pâte de ciment peu poreuse possédant une résistance en compression de 240 MPa [12]. Sa technique consistait à broyer le

clinker très finement et à ajouter un réducteur d'eau, un lignosulfonate, afin de diminuer le rapport E/C jusqu'à 0,2. A cette époque, le pouvoir dispersant des superplastifiants tels que le polynaphtalène et le polymelamine n'était pas encore très connu. Bache (1981) a développé et breveté un béton du type « *densified system containing homogeneously arranged ultrafine particles (DSP)* ». Ces bétons sont basés sur l'action combinée de la fumée de silice et du super plastifiant. L'ajout de granulats très durs (granite, diabase ou bauxite calcinée) lui ont permis d'obtenir une résistance en compression de 268 MPa.

Birchall et coll (1981) ont développé les « *Macro Defect Free (MDF)* ». Le principe de base consiste à utiliser un malaxeur à haut cisaillement en présence d'un polymère PVA (alcool polyvinyle) qui agit d'abord comme un agent dispersant très puissant, puis comme un agent liant. Un tel matériau a permis d'obtenir une résistance en flexion de 200 MPa.

Le problème principale des MDF et qu'ils se désagrègent dans l'eau, ce qui limite considérablement leur utilisation. Young (1995) poursuit les recherches pour résoudre ce problème de sensibilité à l'eau et améliorer les MDF. Roy (1995) a créé des bétons très résistants dont les propriétés se rapprochent des céramiques, les « *compacts* » à partir d'études précédentes sur l'optimisation de matrices cimentaires chauffées et comprimée pendant la prise [13]. Une résistance en compression de 650 MPa a été atteinte avec ces matériaux.

La ductilité étant primordiale dans la conception d'un ouvrage, les chercheurs ont essayé de rendre les BUHP ductiles, notamment en leur ajoutant des fibres. Ainsi, le DSP devient le CRC (*Compact Reinforced Composite*) grâce à l'addition de 6% en volume de fibres métalliques [14].

Le béton de poudres réactives BPR, développé par P.RICHARD et le DUCTAL<sup>©</sup> sont parmi les derniers – nés de la famille des BUHP, avec des résistances en compression variant de 200 à 800 MPa selon le mode de fabrication et de mûrissement.

Ces nouveaux composites possèdent des caractéristiques particulières que nous présenterons plus en détail dans le chapitre 2.

En France, on notera deux BUHP récents :

Le « béton fibré multimodal à ultra haute performance (BFMUHP) » dont la particularité est de comporter deux types de fibres, l'une pour agir à l'échelle du matériau durant la phase de microfissuration, et l'autre pour agir à l'échelle de la structure durant la phase de macrofissuration. Les résistances obtenues avoisinent les 200 MPa en compression et 40 MPa en traction par flexion [15, 16].

Le « Béton Spécial Industriel (BSI) » qui se propose de combler le vide entre BUHP de 100 MPa déjà sur le marché et les BPR. Ce matériau a d'ailleurs été utilisé dans le projet des tours de refroidissement de la centrale nucléaire de Cattenom aux côtés des BPR [17]. Une résistance en compression de 180 MPa à 28 jours a été obtenue sans traitement thermique.

La compréhension de ces matériaux passe d'abord par la connaissance du ciment Portland, constituant commun à tous les bétons et les nouveaux ajouts chimiques tel que les adjuvants (superplastifiants) et les ajouts minérales riches en silice (laitier des hauts fourneaux, les pouzzolanes, les fillers calcaires) dans ces dernières générations des bétons.

### **1.3 Le ciment Portland**

Le ciment Portland est un mélange de clinker et de sulfate de calcium finement broyé, auquel on peut aussi y ajouter des laitiers, cendres volantes, pouzzolanes ou fillers. Le clinker est obtenu par réaction chimique à haute température (environ 1450°C) de la matière première (le cru) contenant de la silice ( $\text{SiO}_2$ ), de l'oxyde d'aluminium ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), de l'oxyde de calcium ( $\text{CaO}$ ) et de l'oxyde de fer ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) dans des proportions appropriées. Le clinker contient quatre phases principales qui représentent environ 90% de la masse du ciment Portland et déterminent ses propriétés.

L'analyse chimique moyenne d'un ciment Portland est présentée dans le Tableau 1-1.

**Tableau 1-1 : Composition chimique moyenne d'un ciment Portland.**

SiO <sub>2</sub>	19-25%
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2-9%
CaO	62-67%
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1-5%
MgO	0-3%
SO <sub>3</sub>	1-3%
K <sub>2</sub> O	0.6%
Na <sub>2</sub> O	0.2%

Les principaux constituants du clinker ainsi que leur teneurs massiques moyennes sont donnés dans le Tableau 1-2 (notation cimentière).

**Tableau 1-2 : Composition minéralogique d'un clinker**

Minéraux	%
C <sub>3</sub> S=3CaO.SiO <sub>2</sub> = silicate tricalcique (Alite)	60-65
C <sub>2</sub> S=2CaO.SiO <sub>2</sub> = silicate bicalcique (Bélite)	20-25
C <sub>3</sub> A=3CaO.Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> = aluminate tricalcique (Celite)	8-12
C <sub>4</sub> AF=4CaO.Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> = alumino-ferrite titrascalique	8-10

A partir de la composition chimique, BOGUE (1947) a mis au point un mode de calcul qui permet de déterminer la composition potentielle du ciment Portland en : (C<sub>3</sub>S+C<sub>2</sub>S +C<sub>3</sub>A+C<sub>4</sub>AF+, gypse + CaO libre). Pour mieux préciser la structure minéralogique du ciment, il est préférable de recourir à d'autres méthodes, telle que la diffraction des rayons X quantitative ou la microscopie optique.

En France, les ciments sont normalisés par la norme NF P 15-301 qui a fait l'objet d'une révision en 1994. Le but de cette révision était d'assurer la transition entre la définition des ciments selon NF P 15-301 et selon la nouvelle norme européenne NF EN

197-1 datant de 2001. Le Tableau 2-3 résume les différentes catégories de ciment d'après les différentes normes.

**Tableau 1-3 : Catégories de ciment.**

<b>NF P 15-301 avant 1994</b>	<b>NF P 15-301 (1994)</b>	<b>Norme européenne</b>
Ciment Portland artificiel : CPA	Ciment Portland : CPA-CEM I	Ciment Portland CEM I
Ciment Portland composé : CPJ	Ciment Portland composé : CPJ-CEM II/A CPJ-CEM II/B	Ciment Portland composé CEM II
Ciment de haut fourneau : CHF	Ciment de haut fourneau : CHF-CEM III/A CHF-CEM III/B CHF-CEM III/C	Ciment de haut fourneau CEM III
Ciment de laitier au clinker : CLK		
	Ciment pouzzolanique : CPZ-CEM IV/A CPZ-CEM IV/B	Ciment pouzzolanique : CEM IV

### 1.3.1 Hydraulicité et hydratation du ciment Portland

Au siècle dernier, deux théories d'hydraulicité ont été proposées pour expliquer la réaction du ciment avec l'eau. Selon LE CHATELIER [18], il s'agirait d'une dissolution des grains de ciment suivie d'une recristallisation des composés de base ( $C_3S$ ,  $C_2S$ ,  $C_3A$ ,  $C_4AF$ ) sous une autre forme. Pour MICHAELIS [19], il s'agirait d'un mécanisme sans passage en solution, l'hydratation se fait par réaction topochemique à l'état solide, la réaction évolue à la surface des particules de silicates et d'aluminates. La silice étant insoluble dans une solution de chaux même faiblement concentrée, une réaction de type topochemique s'effectuerait par hydrolyse et serait suivie d'une réorganisation du solide.

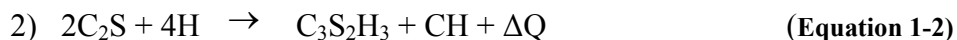
Les études modernes n'ont pas élucidé complètement la réaction d'hydratation, mais toutes s'accordent sur le principe de base : il y a formation de composés insolubles dans la solution interstitielle du béton (fortement basique et alcaline) qui donnent avec le temps une structure rigide mécaniquement résistante. Les principaux produits d'hydratation formés sont les silicates de calcium hydratés (C-S-H), la Portlandite ou chaux hydratée (CH) et les aluminates hydratés.

Il est possible de simuler le processus d'hydratation du ciment en utilisant la théorie de la percolation [20, 21, 22]. Le processus est le suivant :

- les hydrates se développent autour des grains de ciment isolés ;
- des amas se forment par liaison entre les grains ;
- lorsque le degré d'hydratation critique est atteint, il y a création d'un chemin continu traversant l'éprouvette (seuil de percolation) permettant le développement de la résistance mécanique.

### 1.3.1.1 Hydratation des silicates

Les silicates représentent 75-85 % des composés de base du ciment. Leur hydratation donne naissance aux silicates de calcium hydratés (C-S-H) et à la Portlandite. Les réactions d'hydratation des silicates tricalcique ( $C_3S$ ) et bicalcique ( $\beta C_2S$ ) sont des réactions exothermiques et peuvent être décrites par les équations suivantes :

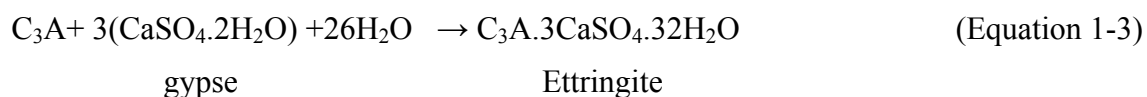


En moyenne, une pâte de ciment contient 50 à 70 % en masse de C-S-H et 20 à 25 % de Portlandite. Les C-S-H constituent l'agent liant le plus important de la pâte de ciment hydraté. Ils sont responsables de la prise et du durcissement du béton ainsi que de la stabilité volumétrique et de la résistance mécanique. La Portlandite se présente sous forme de plaquettes hexagonales et semble peu contribuer à la résistance de la pâte. De

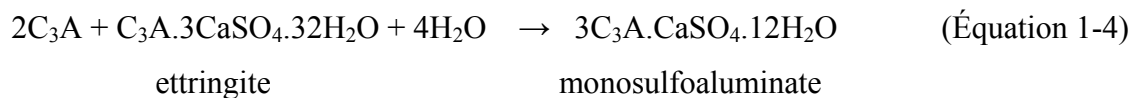
plus elle diminue la durabilité des bétons. En effet, c'est la phase solide la plus soluble des hydrates (2.4 g/l) et elle est facilement lixivée lorsque le béton entre en contact avec de l'eau faiblement minéralisée.

### 1.3.1.2 Hydratation des aluminates

La réaction de l'aluminate tricalcique ( $C_3A$ ) avec l'eau est instantanée et se fait avec un très fort dégagement de chaleur. Elle donne lieu à la formation congruente des espèces  $C_2AH_8$ ,  $C_4AH_{13}$  et  $C_3AH_6$ . Une pâte de ciment contenant uniquement du  $C_3A$  perd rapidement toute maniabilité. Pour éviter cette prise éclair, le cimentier ajoute du sulfate de calcium (du gypse par exemple) lors du broyage du clinker. L'ajout de gypse retarde l'hydratation du  $C_3A$  par suite de la formation de l'ettringite selon la réaction :



L'ettringite cristallise sous forme de fines aiguilles à base hexagonale [23]. De l'ettringite continue à se former tant qu'il y a des ions sulfates ( $SO_4^{2-}$ ) disponibles. Lorsque le gypse est épuisé, l'ettringite se dissout et devient la source d'ions sulfates pour former avec le  $C_3A$  excédentaire le monosulfoaluminate hydraté [24] :



Le  $C_3A$  influe surtout sur la prise initiale de la pâte. Il contribue peu au gain de résistance.

Cependant, le dosage du gypse dans le ciment doit être adapté à la quantité de  $C_3A$ . En effet, s'il n'y a pas assez de gypse, une prise éclair se produit (rigidification prématurée de la pâte irréversible). Par contre, une trop grande quantité de gypse peut

aussi occasionner une prise rapide due à l'enchevêtrement des aiguilles d'Ettringites. De plus il produira de l'ettringite secondaire qui est expansive et peut fissurer la pâte durcie. LI [23] résume les différentes écoles de pensées reconnues pour expliquer ce phénomène. Un apport externe de sulfates (eau de mer, par exemple) peut également causer des dommages similaires et affecter la pérennité d'un ouvrage en béton, par suite de la formation d'Ettringite secondaire.

Le  $C_4AF$  donne les mêmes hydrates que  $C_3A$ . Leur formule s'obtient par simple substitution  $Al \rightarrow Fe$  [24].

### 1.3.2 Réaction pouzzolanique

On appelle <<matériaux pouzzolaniques >> les composés qui réagissent avec la portlandite issue de l'hydratation du ciment Portland pour former de nouveaux C-S-H selon la réaction :



Les C-S-H pouzzolaniques sont plus riches en silice que les C-S-H primaires (rapport C/S plus faible) [25].

Il est à noter que la réaction pouzzolanique consommant également de l'eau, elle peut influencer sur le degré d'hydratation final du ciment, surtout dans le cas de bétons de très faible E/C.

### 1.3.3 Microstructure de la pâte de ciment durcie

La pâte de ciment durcie constitue un système hétérogène comprenant un solide poreux et des phases liquide et gazeuse présentes dans les pores. Le solide est formé de grains de ciment plus ou moins bien hydratés.

### 1.3.3.1 Les silicates de calcium hydratés (C-S-H)

Le terme C-S-H désigne une famille de composés du système ternaire CaO-SiO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O. De plus, des atomes Al, Fe ou S peuvent se substituer aux Si des C-S-H. Il s'agit de composés mal cristallisés du fait de leur germination rapide. Ils sont souvent appelés « gel de C-S-H » en raison de leur forte teneur en eau et de leur faible degré de cristallinité. Les C-S-H occupent plus de 70% du volume de la pâte hydratée. La composition de ces hydrates dépend de plusieurs facteurs tels que la composition chimique du ciment, la présence de pouzzolanes, la quantité d'eau de gâchage, l'âge, la température de formation, etc. En particulier, le rapport C/S évolue avec la composition de la solution interstitielle en contact avec le solide [26] [27].

Plusieurs chercheurs ont tenté de schématiser la structure des C-S-H. TAYLOR [28] assimile la structure des C-S-H à celle des minéraux naturels. Suite aux travaux de FELDMAN [29], TAYLOR [30] considère que les C-S-H possèdent une structure lamellaire composée de jennite et de tobermorite.

VIEHLAND et coll. (1996) [31] ont montré expérimentalement la nanocristallinité des C-S-H à l'aide d'observations en microscopie électronique à transmission (TEM) couplées à des analyses chimiques par émission de rayons X (EDAX). La diffraction des électrons lents (SAED) a également été utilisée. Les auteurs corroborent ainsi l'essentiel des hypothèses émises par Taylor et mettent en évidence l'existence d'un ordre local dans les C-S-H.

La résonance magnétique nucléaire (R.M.N) est une autre méthode récente d'investigation de la structure des C-S-H. CONG et KIRKPATRICK [34] suggèrent une structure possible des C-S-H à l'aide de cette méthode. ZANNI et coll. [35] expliquent comment cette technique permet de déterminer la polymérisation des chaînes de C-S-H en fonction de divers facteurs : hydratation, température de cure, présence de pouzzolanes, etc. La classification actuelle des silicates repose sur le degré de connectivité des tétraèdres SiO<sub>4</sub>.

Ainsi, les auteurs ont pu déterminer que la structure des C-S-H curés à température ambiante était basée sur une charpente de tétraèdres  $\text{SiO}_4$  plutôt courte (statistiquement « trimère »). Par contre, à  $120^\circ\text{C}$ , les chaînes de silicates s'allongent.

### 1.3.3.2 La Portlandite et les aluminates hydratés

La Portlandite ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) est la seule phase solide de la pâte de ciment durcie qui soit relativement pure. Il s'agit d'un composé très bien cristallisé qui se présente sous forme de plaquettes hexagonales empilées entre les grains de ciment partiellement hydratés. Ses dimensions varient entre 0,01 et 0,1 mm. Elle occupe près de 18 % du volume de la pâte hydratée.

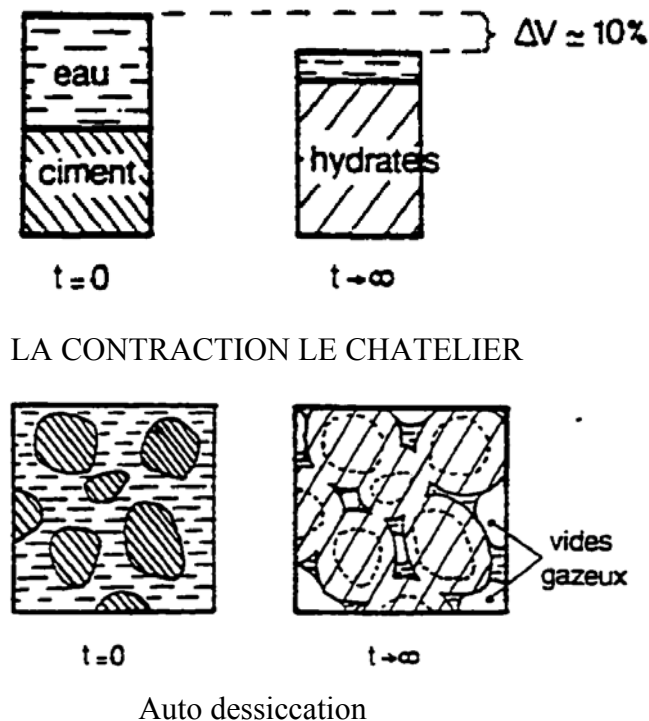
L'ettringite (AFt) cristallise sous forme d'aiguilles à base hexagonale (parfois creuses) qui souvent rayonnent autour des grains de ciment anhydres comme un oursin. Ses dimensions sont d'environ  $10\ \mu\text{m} \times 1\ \mu\text{m}$ . Le monosulfoaluminate cristallise plutôt en fines plaquettes hexagonales de  $1\ \mu\text{m} \times 0,1\ \mu\text{m}$  environ. Ces deux types de cristaux occupent ensemble 13 % du volume de la pâte de ciment durcie et se retrouvent parsemés dans les fibres de C-S-H.

Les AFm ( $\text{C}_2\text{AH}_8$  et  $\text{C}_4\text{AH}_{13}$ ) sont des phases de structure hexagonale obtenues par substitution du calcium par l'aluminium dans la structure de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ . Quant à  $\text{C}_3\text{AH}_6$ , il appartient à la famille des hydrogrenats et cristallise en cristaux cubiques. Il est plus stable que les AFm.

### 1.3.3.3 Porosité de la pâte de ciment durcie

Dans la réaction d'hydratation, le volume molaire des hydrates formés est inférieur à la somme des volumes molaires du ciment anhydre et de l'eau participant à la réaction. Ce phénomène est appelé « contraction LE CHATELIER ». Pour une « hydratation complète », cette contraction est de l'ordre de 10 % du volume initial de la pâte. Si le matériau est isolé de toute source d'eau extérieure, la contraction LE CHATELIER provoque une autodessiccation de la pâte, c'est-à-dire une dessiccation interne

progressive. Après la prise, le squelette formé par les hydrates du ciment s'oppose, par sa rigidité, à la contraction LE CHATELIER. Il se forme ainsi progressivement des vides gazeux et des ménisques dans les capillaires de la pâte de ciment et un retrait endogène dit aussi d' « autodessiccation » (Figure 1.1). L'autodessiccation d'une pâte de ciment augmente lorsqu'on diminue le rapport eau/liant.



**Figure 1-1 : Illustration de la contraction LE CHATELIER dans une pâte de ciment et de l'autodessiccation [36]**

Les différents hydrates se forment et se développent dans les espaces situés entre les grains de ciment initiaux. Ce mode de remplissage engendre donc un réseau poreux très complexe et très tortueux. Ces pores inter-grains résiduels sont généralement appelés « capillaires ». En outre, les C-S-H tels que décrits par TAYLOR (1986) [32] possèdent également une structure poreuse :

- les pores inter-cristallites situés entre les particules de C-S-H ;
- les pores intra-cristallites extrêmement fins situés entre les feuillets d'une particule.

D'après le modèle de POWERS ET BROWNYARD [37], la porosité intrinsèque des C-S-H serait d'environ 28 % indépendamment du rapport E/C et du degré d'hydratation.

Ainsi, la pâte de ciment durcie présente d'une part des pores capillaires et d'autre part, une porosité relative aux hydrates. Au total, les matériaux cimentaires ont une distribution porale s'étalant sur plusieurs ordres de grandeur: du nanomètre au millimètre. C'est une caractéristique importante des bétons qui conditionnent leur comportement à long terme.

#### **1.3.3.4 Composition de la solution interstitielle**

L'eau présente dans la pâte de ciment durcie (eau de gâchage résiduelle ou humidité provenant du milieu ambiant) est un constituant à part entière de la microstructure. On distingue quatre états de l'eau :

- eau libre ;
- eau capillaire ;
- eau adsorbée ;
- eau chimiquement liée.

L'eau chimiquement liée est celle qui a été consommée lors des différentes réactions d'hydratation et qui fait désormais partie des hydrates. Les trois autres états sont fonction de la taille des pores dans lesquels l'eau se trouve. L'eau adsorbée est celle qui est retenue sur la surface solide des pores sous l'action des forces de VAN DER WAALS (liaisons physiques). L'eau capillaire désigne la phase condensée remplissant le volume poreux au-delà des couches adsorbées et qui est séparée de la phase gazeuse par des ménisques. L'eau libre est présente dans les gros pores. Elle est en équilibre avec la phase gazeuse par l'intermédiaire d'une interface plane.

La solution interstitielle est très basique et rapidement saturée au cours de l'hydratation par tous les éléments solubles libérés, notamment les alcalins et alcalino-terreux. Sa composition varie avec l'âge du matériau. Son pH est compris entre 12,4 et

13,5. LONGUET et coll., [38] ont analysé la composition de la solution interstitielle au cours du temps grâce à un essai d'extraction mécanique de la phase aqueuse par compression (Figure 1-2). On notera le minimum atteint par les sulfates après 7 jours. Il correspond à la dissolution de l'ettringite qui reprécipite sous forme de monosulfoaluminate, moins riche en sulfates.

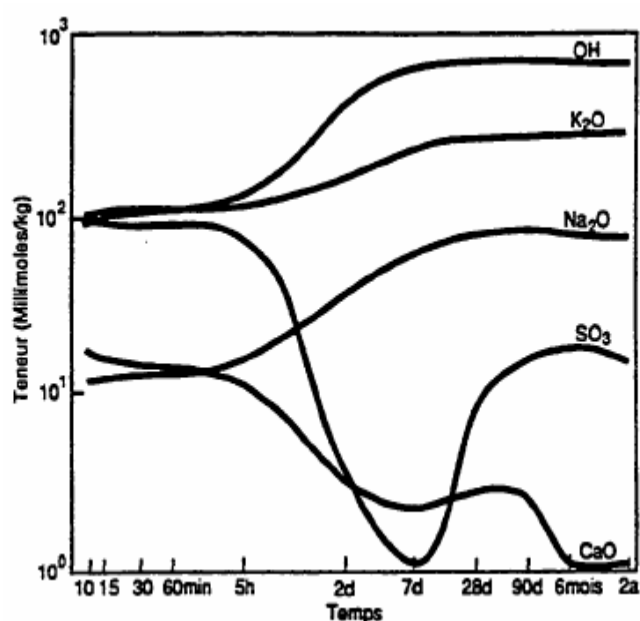


Figure 1-2 : Evolution de la composition de la solution interstitielle d'un béton [38]

L'eau joue un rôle essentiel dans le comportement à long terme du béton. En effet, la plupart des processus chimiques et physiques de dégradation nécessitent de l'eau. Par exemple, la pénétration des agents agressifs tels que les sulfates (formation d'ettringite secondaire gonflante) et les chlorures (corrosion des armatures) se fait via la solution contenue dans le réseau poreux.

#### 1.4 Les superplastifiants

Les superplastifiants sont des adjuvants ajoutés au béton en faible teneur, permettant de modifier la fluidité du béton et de réduire la proportion d'eau de gâchage.

### 1.4.1 Classification chimique des superplastifiants

Les superplastifiants sont des adjuvants chimiques qui permettent d'obtenir une maniabilité adéquate du béton frais de faible rapport eau/ciment, pendant une période appropriée, sans affecter la prise et le durcissement d'un ciment. En termes chimiques, les superplastifiants sont des polyelectrolytes organiques qui appartiennent à la catégorie des dispersants polymériques. Les principales classes sont les sulfonates de polynaphtalène (PNS) les sulfonates de polyméline (PMS), les lignosulfonates modifiés (MLS) et plusieurs polyacrilates partiellement estérifiés [39].

### 1.4.2 Compatibilité entre le ciment et le superplastifiant

Afin de remplir sa fonction principale dans le béton, le superplastifiant doit être compatible avec le ciment. Une faible compatibilité ciment-superplastifiant peut se manifester par une maniabilité initiale insatisfaisante, ou une perte prématurée de maniabilité. L'origine des problèmes d'incompatibilité devrait être liée aux changements provoqués par la présence du superplastifiant. Par conséquent, une bonne connaissance de la chimie d'hydratation du ciment en présence de superplastifiant des interactions ciment-superplastifiant sont ainsi d'importance fondamentale pour prévoir et contrôler la rhéologie des bétons.

Le schéma de la figure 1-3 illustre la complexité des interactions ciment-superplastifiant.

L'aluminate tricalcique,  $C_3A$ , est le composant le plus réactif du ciment Portland, il a donc un effet significatif sur l'hydratation et la rhéologie initiale du béton frais, tel que discuté à la section précédente. L'hydratation de ce composant est contrôlée par l'ajout du sulfate de calcium qui peut apparaître dans différentes formes. Ce système complexe et hétérogène interagit simultanément avec une solution de superplastifiant, aussi complexe, rendant la prévision de comportement du système global presque impossible. Cependant, il est possible de définir les paramètres susceptibles d'affecter la compatibilité ciment-superplastifiant :

- Composition chimique et minéralogique du ciment, particulièrement la teneur en  $C_3A$  et sa réactivité ;
- Finesse du ciment ;
- Forme du sulfate de calcium présent dans le ciment ;
- Rapport  $C_3A/SO_4^{2-}$
- Présence des alcalis.

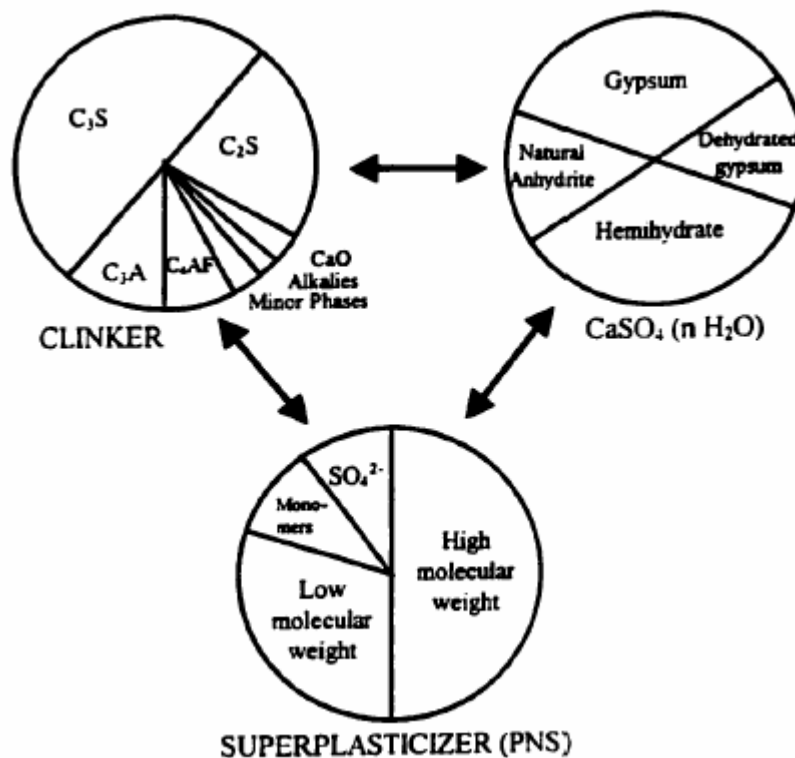


Figure 1-3 : Représentation schématique des diverses interactions entre le clinker, les différentes formes de sulfate de calcium et un superplastifiant [40].

L'influence de la composition minéralogique du ciment sur la compatibilité ciment-superplastifiant a été étudiée par de nombreux auteurs. Hanna et coll., [41] ont montré que l'effet d'un superplastifiant sur le comportement rhéologique d'une pâte de ciment est fonction de la teneur en  $C_3A$  et de la finesse de ciment : si ces paramètres sont élevés, l'effet fluidifiant du superplastifiant est faible.

Basile et coll., (à partir de) [42] ont étudié l'effet de la forme de  $\text{CaSO}_4$  sur la rhéologie de la pâte de deux clinkers, chacun mélangé soit avec du gypse, soit avec de l'hémihydrates, et ont été examinés sans ajout de PNS et en sa présence. Les résultats ont montré que la fluidité de la pâte de ciment avec superplastifiant est toujours plus élevée avec du gypse qu'avec de l'hémihydrate, quelque soit la composition minéralogique des clinkers. Des conclusions semblables ont été faites par Nawa et coll., (à partir de) [42]. Ces derniers ont constaté que dans les pâtes avec une teneur en alcalis moyenne ou élevée, la fluidité augmente dans l'ordre : hémihydrate < anhydrite < gypse.

## **1.5 Les ajouts cimentaires**

L'utilisation de certains ajouts minéraux en remplacement du ciment est très importante, car en plus des économies d'énergie et de la diminution de l'émission de  $\text{CO}_2$ , ces ajouts minéraux améliorent les propriétés du béton frais et durci.

Les ajouts au ciment Portland, qui sont en règle générale effectués par co-broyage, peuvent être ramenés à trois types différents de minéraux naturels ou artificiels, ce qui permet de moduler les propriétés d'usage du béton :

### **1.5.1 Les laitiers**

Les laitiers sont des sous-produits de la fabrication de la fonte. Ils ont la composition silicoaluminates de chaux moins riche en chaux que les clinkers mais avec des teneurs en alumine et silice plus élevées. Les laitiers, en présence de la chaux libérée par l'hydratation de ciment Portland et des sulfates présents, subissent une activation. Leur réactivité contribue à la formation d'hydrates et en particulier de C-S-H. L'ajout de laitier entraîne donc une diminution de la Portlandite CH et, à long terme, une augmentation de la résistance du béton.

### **1.5.2 Les pouzzolanes**

Ce sont des matières ne contenant pas (ou peu) de chaux mais riche en silice et en alumine, suffisamment réactives pour se combiner avec la chaux et former des hydrates C-S-H (effet pouzzolanique). La qualité d'une pouzzolane est donc fonction de son aptitude à fixer la chaux libérée par l'hydratation du ciment, cette réactivité pouvant être favorisée par un traitement thermique du matériau (cas du BPR). Comme pouzzolane utilisées nous pouvant citer les roches d'origine volcanique, les argiles et schistes grillés, les cendres volantes silicoalumineuses des centrales thermiques et la fumée de silice qui résulte de la fabrication du silicium ou de silico-alliage. Comme avec le laitier les hydrates formés sont pour la plupart très proches de ceux obtenus avec l'hydratation de ciment Portland. L'ajout de pouzzolane entraîne également une diminution de la Portlandite et une augmentation des résistances à long terme.

### **1.5.3 Les fillers**

Les fillers sont des matières qui n'ont pas de propriétés hydrauliques. Néanmoins, à cause de leurs finesses élevées, ils améliorent la rhéologie et entraînent une meilleure compacité de la pâte car ils permettent de parfaire le remplissage granulaire dans le domaine des grains ultra-fins. Ils ont donc seul un effet physique sur le matériau et sont qualifiés d'inertes. En générale, on utilise du calcaire. En fait, de par la petite taille des billes de microsilice (moyenne 0.5  $\mu\text{m}$ ) constituant la fumée de silice, celle-ci peut jouer le rôle de filler et, par opposition aux fillers inertes, elle est qualifiée d'active. Elle a donc un double rôle, effet physique et chimique [36].

## **CHAPITRE 2 PRÉSENTATION DES BÉTONS DE POUDRES RÉACTIVES**

Ce chapitre présente tout d'abord les principes de formulation utilisés pour le développement des BPR. Il décrit par la suite les principales matières premières servant à la fabrication des BPR ainsi que les particularités de leur mise en œuvre.

### **2.1 Principes de formulation des BPR**

Les principes utilisés pour la fabrication des BPR sont en fait les mêmes que ceux utilisés pour formuler les BHP et les BTHP. Cependant dans le cas des BPR, ces principes sont développés à l'extrême. Alors la conception des BPR s'est faite en se basant sur les règles suivantes [43]:

- Amélioration de l'homogénéité par suppression des gros granulats ;
- Amélioration de la compacité par optimisation du mélange granulaire et optionnellement par pressage avant et pendant la prise ;
- Amélioration de la microstructure par traitement thermique après la prise ;
- Amélioration de la ductilité par l'emploi de microfibres métalliques ;
- Fabrication et mise en place aussi proche que possible des pratiques existantes.

#### **2.1.1 Amélioration de l'homogénéité**

Le béton est un matériau hétérogène, et cela à plusieurs titres, les granulats et le sable qui le composent forment un squelette rigide enrobé d'une pâte cimentaire aux propriétés mécaniques, thermiques et chimiques différentes. Lorsqu'une inclusion sphérique, rigide et isolée dans une matrice homogène est soumise à une charge uniaxiale, il y a déviation du champ de contraintes. On observe alors à son interface des forces de cisaillement et de traction au niveau de l'équateur [44]. Cette répartition peut favoriser l'apparition de fissures dont la dimension est proportionnelle au diamètre de l'inclusion. La diminution de la taille du plus

gros granulat permet ainsi de réduire la microfissuration. Toute mesure qui permet d'accroître l'homogénéité du matériau a comme effet de diminuer la concentration de contrainte autour des granulats et par conséquent, d'améliorer les propriétés mécaniques du béton, ainsi l'amélioration de l'homogénéité du BPR, est liée aux facteurs suivants :

### **2.1.1.1 Réduction de la taille des gros granulats**

On observe dans les bétons que la réduction de la taille maximale des gros granulats a pour effet d'augmenter les résistances mécaniques du béton. Cette amélioration est attribuable à la réduction de la perturbation du champ de contrainte, ainsi qu'à la diminution de la taille des microfissures qui se forment autour des granulats [43]. Sous une charge uniaxial, le champ de contraintes de cisaillement à l'interface d'une inclusion rigide sphérique dans une matrice homogène est maximale à 45°, il en va de même pour les contraintes de tractions normales à l'effort axial, la pâte qui enrobe un granulat (comparé à l'inclusion sphérique), se fissure dans les zones plus tendues et/ou cisillées à l'interface pâte-granulat dans la zone appelée ``auréole de transition``. La diminution de ces fissures est directement proportionnelle au diamètre de l'inclusion. Le BPR avec une réduction par facteur d'environ 50 de la taille du plus gros granulat (600µm au lieu de 20 mm) va présenter une réduction considérable de la taille des microfissures [43], qui sont d'origine :

- mécanique (charges extérieures) ;
- chimique (auto-dessiccation conduisant à un retrait de la pâte) ;
- thermique (dilatation différentielles entre la pâte et le granulat en cas de traitement thermique).

### **2.1.1.2 Suppression de l'auréole de transition**

Le fort dosage en fumée de silice des BPR, augmente considérablement la compacité de la pâte de ciment à l'interface pâte - granulat. Dans de nombreux cas la disparition complète de l'auréole de transition a été observée. De plus, dans le cas de traitement thermique, une liaison chimique s'établit entre la pâte et le sable siliceux.

### **2.1.1.3 Amélioration des propriétés mécaniques de la pâte**

L'amélioration des propriétés mécaniques de la pâte, et en particulier, l'augmentation de son module d'élasticité, réduit aussi la perturbation du champ de contrainte attribuable à la différence de rigidité entre la matrice cimentaire et les granulats.

### **2.1.1.4 Limitation du dosage en sable**

Dans un béton traditionnel les granulats (sable + gravier) sont les composants majoritaires en volume et ils forment un squelette rigide de grains en contact les uns contre les autres. Une partie importante du retrait de la pâte est bloquée par le squelette granulaire ce qui conduit à une augmentation de la porosité.

Lors de l'hydratation du ciment Portland, le volume des hydrates produits est inférieur à celui de ses phases anhydres et de l'eau. La contraction volumique qu'en résulte, appelée contraction de LE CHATELIER, peut provoquer une microfissuration du matériau si elle est bloquée par les granulats. Pour éviter ce phénomène dans les BPR, le volume de la pâte est d'où moins 20% supérieur à l'indice des vides du sable non compacté, ce qui fait qu'on utilise une quantité de sable par volume de moins 0.83 fois la masse spécifique apparente du sable non compacté. Ainsi les granulats ne forment plus un squelette rigide mais un réseau d'inclusions noyées dans une matrice cimentaire continue [45]. Si le retrait de la pâte est toujours bloqué localement autour de chaque granulats, il ne l'est plus dans son ensemble, les grains pouvant se déplacer les uns par rapport aux autres et être entraînés par la pâte.

## **2.1.2 Optimisation de la compacité**

### **2.1.2.1 Optimisation du mélange granulaire**

Plus un matériau est compact, plus sa résistance à la compression est élevée, ainsi, l'optimisation de la compacité d'un mélange granulaire est un concept utilisé pour la formulation des bétons traditionnels incorporant généralement au moins trois phases distinctes, c'est-à-dire la pâte, le sable et le granulats. La diminution du volume des vides laissés entre les

particules engendre l'augmentation de la compacité granulaire d'un béton. Plusieurs méthodes analytiques ont été développées pour accroître la compacité du squelette granulaire d'un béton [46]. Dans le cas des BUHP, l'originalité de la démarche vient du fait que c'est la compacité des poudres (ciment + fumée de silice + quartz broyé + ajouts minéraux) que l'on tente d'optimiser. Ce qui complique le processus, car cela implique des interactions plus complexes entre les particules qui sont liées par des forces chimiques et/ou électriques.

Deux approches différentes ont été utilisées pour accroître la compacité granulaire des BPR. La première approche est analytique et elle consiste à utiliser un modèle mathématique qui calcule l'indice des vides dans un empilement de particules (généralement sphériques) de tailles variées. On choisit alors les propriétés relatives des divers constituants afin de diminuer l'indice des vides. Les bétons de fibres Métalliques à ultra hautes performances ont été développés de cette façon en utilisant un logiciel développé au Laboratoire Centrale des Ponts et Chaussées de Paris [47].

La deuxième approche est expérimentale et elle consiste à mesurer la quantité d'eau nécessaire pour remplir tous les vides du squelette granulaire pour différents mélanges de béton. Le mélange de compacité maximale sera celui pour lequel la demande en eau est la plus faible [45].

### **2.1.2.2 Le Pressage avant et pendant la prise**

L'augmentation de la résistance en compression, est une fonction croissante de la densité relative. Un moyen efficace pour obtenir une augmentation de cette densité est d'appliquer un effort de serrage au béton frais.

Ce serrage permet de réduire fortement les vides correspondant à l'air occlus en quelques secondes ainsi qu'une partie de l'eau de gâchage. On peut aussi extraire l'eau des interstices (qui a été prise à cet effet dans les moules) en appliquant une pression importante pendant plus d'une demi-heure. De cette façon on peut extraire jusqu'à 25% de l'eau initialement introduite, en augmentant en même temps la compacité relative de 2% environ [45].

La pression de serrage maintenue pendant la prise du béton, soit de 6 à 12 heures après le malaxage, permet de refermer une partie de la porosité qui apparaît du fait du retrait chimique. Une microfissuration de l'échantillon apparaît due à la rupture des premiers ponts rigide qui ont été formés suite à l'expansion des granulats lors de la suppression de l'effort de serrage. Ces fissures vont se cicatrifier lors du durcissement ultérieur du BPR.

En finalité, l'ensemble des effets de pressage permet de réduire les densités relatives à 6% pour atteindre des valeurs avoisinant 0,91. Ces densités relatives correspondent à des résistances en compression très élevées, par contre, la résistance en traction n'est pas améliorée par le pressage.

### **2.1.3 Amélioration de la microstructure par traitement thermique**

Le traitement thermique constitue pour les BPR un moyen d'améliorer leurs performances mécaniques. Le processus s'effectue après la fin de la prise à la pression atmosphérique en ambiance humide (vapeur d'eau) ou sèche (air chaud).

Les BPR, qui contiennent des fumées de silice, présentent une forte réaction pouzzolanique à une température comprise entre 65°C et 90°C, ce qui modifie la structure des hydrates formés. Par contre, si on les expose à des températures supérieures à 100°C sous pression de vapeur d'eau saturante (conditions hydrothermales), les hydrates amorphes se transforment en produits cristallins comme la tobermorite et la xonotlite qui ont des propriétés mécaniques encore supérieures, Parce qu'il existe aussi des hydrates auront des propriétés mécaniques médiocres ( $C_2SH_n$ ), il faut donc définir, d'une part les conditions stoechiométriques et thermodynamiques favorisant la formation d'un pourcentage optimal d'hydrates cristallins ayant les meilleures propriétés mécaniques possible et d'autres part les conditions hydrothermales optimales qui vont mener à extraire une quantité maximale d'eau du béton durci.

Il est aussi très important de définir les conditions hydrothermales optimales qui vont mener à l'extraction d'une quantité maximale d'eau du béton durci comme on peut le voir dans le diagramme de la figure 2.1.

Le point A représente un béton ordinaire de 25 MPa de résistance en compression, ayant une porosité de 50 % et sans hydrates cristallins. Sans changer la porosité, si on augmente progressivement la proportion des produits cristallins, on va parcourir la droite ABCD. La résistance du béton augmente jusqu'au point C où elle atteint un maximum de 70 MPa mais si on force la formation d'hydrates cristallins au-delà de cette valeur, la résistance décroît et on peut finalement atteindre une résistance inférieure à celle obtenue en l'absence d'hydrates cristallins (10 MPa en D). Il devient logique que pour chaque niveau de porosité il existe un pourcentage optimal d'hydrates cristallins.

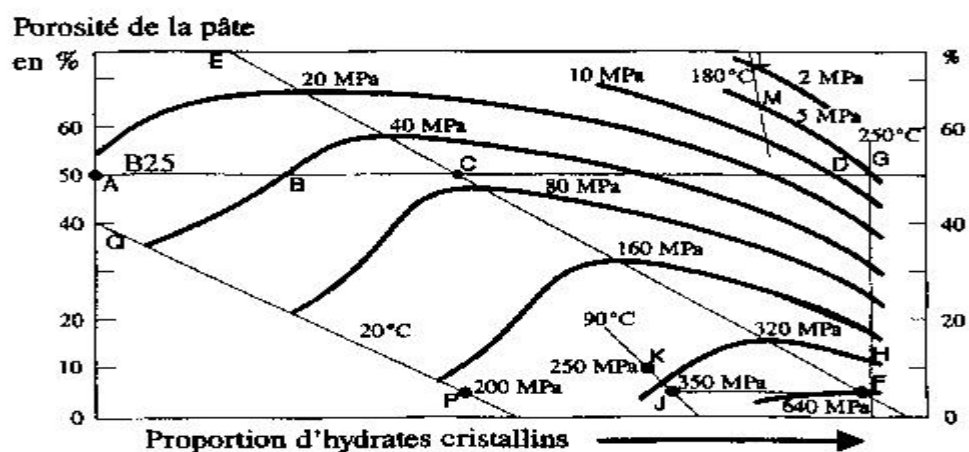


Figure 2-1 : Relation semi quantitative : Résistance / Porosité / Taux de cristallisation [48]

La droite ECF montre aussi que plus la porosité est faible, plus la proportion d'hydrates cristallins doit être élevée pour obtenir des gains de résistance, ce qui est le cas des BPR, donc la porosité peut être inférieure à 8 %.

Parce que la production d'hydrates cristallins est fonction de la température et de la porosité, on peut tracer sur le diagramme les isothermes à 20°C (droite QP), 90°C (droite KJ), 180°C (droite LM) et 250°C (droite GF). De même, les BPR de porosité minimale, traités à haute température, entre 250°C et 400°C, ont des résistances maximales de 630 à 680 MPa qui

correspondent approximativement au point F, de plus la résistance acquise par serrage augmente avec la température (points K.J et H.F).

Si on veut aller plus loin dans le mécanisme de formation d'hydrates cristallins a hautes performances mécaniques, il faut examiner la diagramme de phases des produits d'hydratation des silicates bi et tricalciques présenté dans la figure 2 -2.

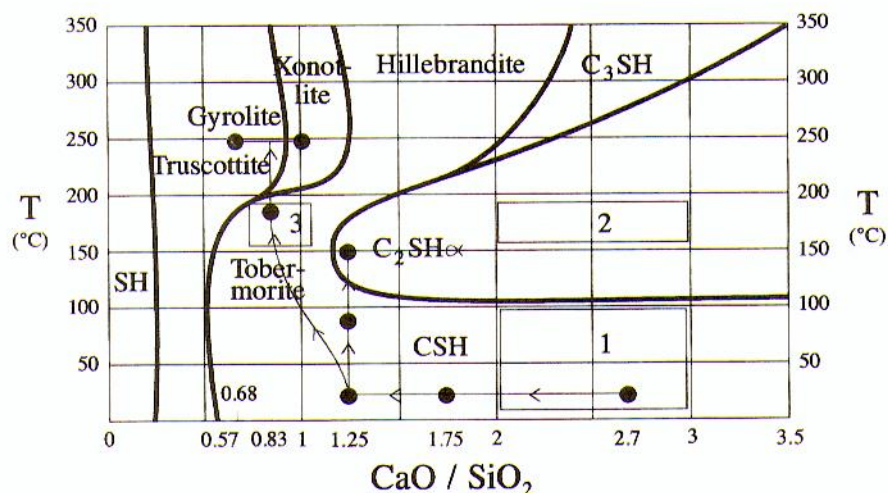


Figure 2-2 : Diagramme de phases des C-S-H [49]

Les silicates bi et tricalciques constituent les composantes majoritaires du ciment. On remarque que les produits cristallins commencent à se former à des températures supérieures à 100°C et que leur nature dépend du rapport molaire CaO et SiO<sub>2</sub>, noté « rapport C/S ».

Un ciment ordinaire a un C/S de l'ordre 2,7 (point A de la région 1), après l'hydratation le C/S tombe à 1,75 (point B), car lors de l'hydratation il se forme de la portlandite CH dont le rapport C/S est infini. Si on chauffe la pâte de ciment au dessus de 105°C, du C<sub>2</sub>SH<sub>α</sub> (dans la région 2) qui a des propriétés mécaniques médiocres apparaît, sa haute densité (≈2,75) va augmenter la porosité de la pâte. En plus cet hydrate cristallin comporte des plans de clivage qui constituent des zones d'initiation de fissures.

En ajoutant de la fumée de silice, le rapport C/S passe de 1,75 à 1,25 (point C), mais en chauffant au-delà de 110°C on ne peut pas éviter la formation de C<sub>2</sub>SH<sub>α</sub> (point D). Pour éviter

ce phénomène, il faut atteindre le point E sur le diagramme, dans la région 3, ce qui correspond à la formation de la tobermorite. On peut former de la tobermorite dans la région 3, en ajoutant du quartz broyé, de telle façon que le rapport C/S initial soit égal à celui de la tobermorite, soit 0.83 .

Dans les BPR où l'on a ajouté du quartz broyé, et que l'on a traité à 180 – 200°C, on observe une amélioration modérée de la résistance en compression. Pour passer du point C au point E, il faut encore extraire de l'eau parce que le rapport C/H (C=CaO et H=H<sub>2</sub>O) de la tobermorite formée est égal 1, et est voisin de celui des hydrates .

Si on continue a chauffer au-dessus de 200°C, on transforme la tobermorite (C<sub>5</sub>S<sub>6</sub>H<sub>5</sub>) en xonotlite C<sub>6</sub>S<sub>6</sub>H (à 250°C, point F). Avant cette transformation, on observe dans la figure 2.2 que le rapport C/S varie peu, mais dans la figure 2.3 on observe que 80% de l'eau de la tobermorite doit être évacuée.

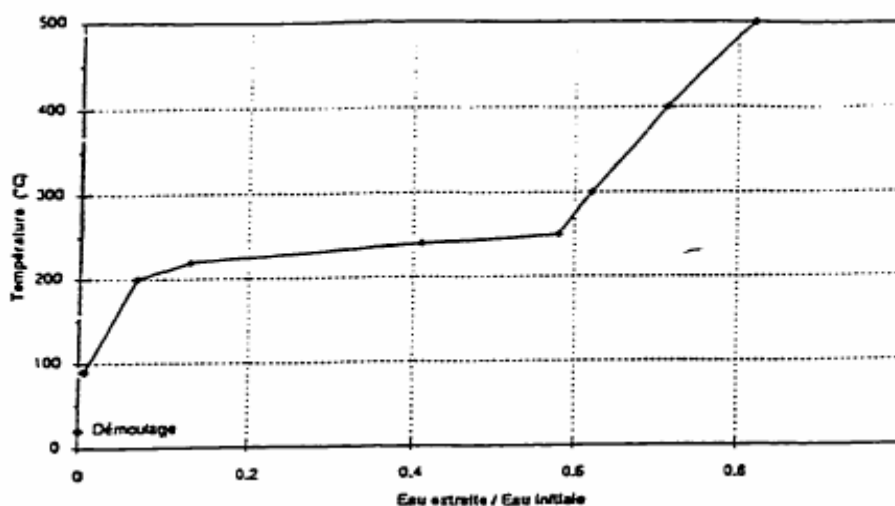


Figure 2-3 : Variation du taux de dessiccation en fonction de la température

L'eau peut être extraite par dessiccation ou par chauffage à sec ou à la vapeur d'eau. Au delà de 400°C l'eau résiduelle est liée, ce qui est favorable à la durabilité.

Pour les BPR un traitement thermique à 180°C et à 200°C donne de la tobermorite et s'accompagne d'une dessiccation modérée et donc par une augmentation de résistance aussi modérée.

Au contraire, la formation de la xonotlite est accompagnée d'une dessiccation intense, que correspond donc à un gain de résistance important. Si on continue à chauffer, à 400°C, on va commencer à évacuer de l'eau liée aux hydrates alumineux, sans modifier la nature des hydrates cristallins, ceci permet d'améliorer aussi les résistances.

#### **2.1.4 Amélioration de la ductilité par l'emploi de microfibres**

D'une manière générale, les matrices des BPR ont une bonne résistance en compression mais une faible énergie de fracturation ce qui rend le matériau très fragile. Cela constitue une grave déficience pour un matériau de génie civil et pour y palier, il faut ajouter des fibres au matériau afin de suppléer la perte de résistance en traction de la matrice au droit d'une fissure. Ainsi la fibre contrôle l'apparition de la fissure et ne permette pas l'augmentation et la propagation de celle-ci. Les paramètres à définir concernant le choix de la fibre sont les suivants [43] :

- La nature de la fibre,
- La longueur, le diamètre,
- La forme et/ou l'ancrage aux abouts,
- Le dosage pondéral.

##### **2.1.4.1 Sélection du type de fibre**

La fibre a pour fonction essentielle de suppléer la perte de résistance en traction de la matrice au droit d'une fissure. Il importe que la mobilisation de l'effort de traction dans la fibre ne nécessite pas une ouverture importante de la fissure. En effet, toute augmentation de la largeur d'une fissure s'accompagne d'une extension de celle-ci qui va à l'encontre de l'objectif recherché de contrôle de fissuration. Les fibres doivent donc avoir un module élastique élevé ce qui conduit à préférer les fibres métalliques aux fibres de carbone ou de polymères.

##### **2.1.4.2 Définition de la longueur des fibres**

La longueur minimale des fibres est définie en retenant les deux critères suivants :

- la fibre ancrée de part et d'autre d'une fissure, transmet à la matrice, par adhérence, l'effort de traction qui la sollicite. Pour réaliser une couture efficace de l'ensemble fibre/granulat par des mini bielles comprimées, il est nécessaire que la fibre ait une longueur suffisante (figure 2-4). Lorsque une fibre traverse une fissure elle comporte d'un côté, un ancrage court et, de l'autre un ancrage long. Les conditions de glissement sont entièrement déterminées par l'ancrage court dont la longueur maximale est  $L/2$  et la longueur moyenne est  $L/4$ . Pour un embiellage efficace, il convient que :

$$L/2 > 10 D_{\max}$$

$D_{\max}$  désigne la taille maximale des granulats.

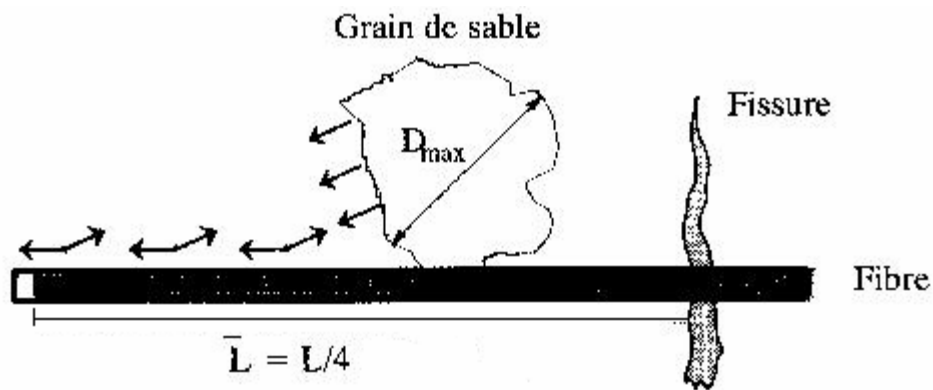


Figure 2-4 : Couture des granulats par embiellage.

- En outre, pour une bonne efficacité de la fibre, il convient qu'après le glissement correspondant au plein développement d'une fissure soit environ 0.2 mm, l'effort d'adhérence de l'ancrage court conserve au moins 80 % de sa valeur initiale.

L'énergie dissipée par extraction complète d'une fibre par développement d'une macrofissure est théoriquement proportionnelle à la longueur de la fibre. C'est la somme de ces énergies élémentaires qui constitue l'énergie de fracture d'un échantillon.

La longueur maximale est déterminée par un critère de résistance dans le quel le rayon est à prendre en compte et par un critère technologique de facilité de mise en place de la fibre dans la matrice, de tenue au malaxage et de fabrication des pièces minces [43].

On retenu, pour les fibres, une longueur de 13 mm qui satisfait à l'ensemble des conditions indiquées ci-dessus.

### 2.1.4.3 Détermination du rayon de la fibre

Une fibre traversant une fissure est efficace si elle peut glisser dans la matrice sans se rompre. Cela se traduit par la condition suivante :

$$L/4 \times 2\pi R \times f_b < \pi R^2 f_s$$

$$\frac{L}{R} < \frac{f_s}{f_b}$$

Avec :

L : Longueur de la fibre,

R : Rayon de la fibre,

$f_s$  : Résistance à la rupture de l'acier de la fibre,

$f_b$  : Contrainte d'adhérence fibre/matrice.

Pour les BPR  $f_s$ , est égal à 2200 MPa et  $f_b$  est d'environ 10MPa.

Le rapport  $f_s/f_b$  est donc égal à 220.

D'où :

$$R > 0.06 \text{ mm}$$

$$\varnothing > 0.12 \text{ mm}$$

On choisit des fibres de 0.15 mm de diamètre.

L'analyse développée ci-dessus ne prend pas en compte le fait que les fibres ne sont pas normales au plan des fissures. L'orientation oblique moyenne des fibres renforce leur efficacité par la couture des fissures [43].

### 2.1.4.4 Forme et ancrage des fibres

Il serait intéressant d'améliorer l'ancrage des fibres par déformation des abouts. Mais sur le plan pratique, il est difficile de déformer les fibres de petit diamètre et de haute limite

élastique. D'autre part la fibre droite et lisse se comporte bien au malaxage et permet d'obtenir des compacités relatives élevées.

#### **2.1.4.5 Dosage pondéral**

Le dosage en fibres est défini de façon expérimentale. Pour ce qui concerne la résistance en traction par flexion et l'énergie de fracturation on obtient d'excellents résultats avec un pourcentage de fibres de 2 % en volume, soit environ 155 kg/m<sup>3</sup>.

## **2.2 Matière première utilisée pour la fabrication des BPR**

Les BPR ont été fabriqués à partir des matériaux suivants :

- Un ciment Portland de type 20M;
- La fumée de silice;
- Un sable siliceux;
- Un quartz broyé;
- Un superplastifiant (polynaphtalène);
- L'eau;
- Les fibres d'acier.

### **2.2.1 Ciment**

Les ciments les plus utilisés pour la fabrication des BPR sont ceux de type 10 et 20M ou de type 50 (Canada) en (France) ils utilisent le CPA52.5 et le PM ES CP2, ceux sont des ciments à faible teneur en C<sub>3</sub>A et d'une mouture plus grossière et ils sont plus performants, surtout sur le plan rhéologique [50, 43]. La demande en eau de ces ciments plus faible que les autres types de ciment, car leur surface volumique est moins élevée et qu'ils produisent moins d'étringite, cela permet de réduire considérablement la quantité d'eau tout en maintenant une bonne maniabilité. Bentz et coll., montrent aussi par une étude récente que la distribution granulométrique des grains de ciments influence peu le degré maximal d'hydratation obtenu pour des faibles rapports Eau/Liant (E/L).

### 2.2.2 Fumée de silice

La fumée de silice a trois fonctions principales dans les BPR :

- 1) le remplissage des vides entre les grains de classe granulométrique supérieurs, grâce à sa grande finesse qui varie de 14000 à 22000 m<sup>2</sup>/Kg (effet filler);
- 2) l'amélioration de la rhéologie, en facilitant le glissement entre les grains de ciment grâce à la parfaite sphéricité de ses particules (effet lubrifiant);
- 3) elle produit des hydrates secondaires C-S-H par réaction pouzzolanique avec la portlandite produite lors de l'hydratation primaire (effet pouzzolanique).

L'efficacité de la fumée de silice est principalement fonction de sa finesse, de la présence d'impuretés notamment du carbone et des alcalins [52]. Ainsi que de la tendance de ses particules à s'agglomérer [50,43]. Il semble que la tendance des particules à s'agglomérer soit le paramètre dominant.

Aussi lors d'une étude de la cinétique d'hydratation du ciment Portland en présence de fumée de silices (CSF I et CSFII) issues d'un même four de fabrication [53] montre que le carbone retarde considérablement l'hydratation des principaux constituants du ciment Portland (C<sub>3</sub>S et C<sub>3</sub>A) ainsi que la réactivité pouzzolanique des fumées de silice sans pour autant l'éliminer.

En effet, la teneur en C<sub>3</sub>S en présence de la variété II est pratiquement constante durant les sept premiers jours d'hydratation, alors qu'en absence de la variété I elle est voisine de celle du témoin (CPA non substitué). Ce retard d'hydratation du C<sub>3</sub>S, causé par le CSF II est confirmé par l'apparition tardive de la portlandite (CH); apparition au septième jour d'hydratation pour la variété II alors qu'une quantité de importante est déjà formée dans le cas du CSF I et du témoin à la même époque.

Dans le cas de CSF II, la plus grande quantité d'ettringite formée est attribuable à l'apport en aluminium, calcium et sulfates du CSF II et donc diminution de formation de C<sub>4</sub>AH<sub>13</sub>, OUDJIT.M.N. a conclu que la teneur totale des impuretés n'est donc pas un facteur prépondérant, beaucoup plus important est le rôle joué par le carbone du fait que :

- la variété I, a peu modifié l'hydratation des constituants principaux du ciment Portland.

La légère accélération de l'hydratation est liée à sa teneur élevée en potassium;

- la variété II; a un rôle retardateur très prononcé sur l'hydratation du ciment Portland;
- le chauffage de la variété II à 500°C (noté CSF III) a permis d'extraire le carbone continu dans cette dernière et a contribué à l'amélioration de sa réactivité.

### 2.2.3 Quartz broyé

La poudre de quartz cristallin employée dans la fabrication des BPR est constituée de particules dont le diamètre moyen est inférieur à 15  $\mu\text{m}$  [45] Il est généralement employé lorsque le béton est soumis à un traitement thermique. Dans le cas des BPR non traité thermiquement, le quartz broyé est considéré comme un composé granulaire inerte ou faiblement réactif. Sa fonction principale est de fournir une source de silice afin d'abaisser le rapport calcium sur silicium (C/S) pour permettre la formation des hydrates cristallins de meilleure qualité. Le dosage pondéral utilisé, correspond alors à l'optimum stoechiométrique (C/S=0.83) [2]. Toutefois, la réactivité du quartz est liée à la température de cure. Pour une température de 90°C, une étude récente a en effet conclu que le quartz broyé était chimiquement réactif, à condition que cette température soit maintenue d'où moins 24 heures [54]. Une autre étude est réalisée par les mêmes chercheurs a démontré que le quartz pouvait ne pas être réactif même après 48 heures de cure humide à 90°C [55]. Des résultats récents indiquent que le quartz broyé peut montrer une réaction pouzzolanique mais que cette réactivité est négligeable lorsque le diamètre des particules est supérieur à une taille d'environ 5  $\mu\text{m}$  [56].

### 2.2.4 Sable fin

Le sable utilisé dans la formulation du BPR possède un diamètre moyen de particules ( $D_{50}$ ) de 250  $\mu\text{m}$  et un fuseau granulaire compris entre 150 et 600  $\mu\text{m}$ , ce sable est obtenu par tamisage du sable de concassage qui présente une forte angularité, ou du sable naturel qui possède une meilleure sphéricité. Afin d'obtenir de bonnes résistances il est préférable de choisir un sable de bonne qualité. Pour la plupart des BPR le sable à haute teneur en quartz est

le plus utilisé, à cause de sa grande dureté, qui permet d'obtenir d'excellentes interfaces pâte – granulats, il est largement disponible et peu onéreux.

### **2.2.5 Superplastifiants**

Le développement des superplastifiants performants a permis de réduire fortement le rapport E/L nécessaire à la fabrication des BPR. Cependant, le choix du superplastifiant est basé sur sa compatibilité avec le ciment et de son efficacité. Le dosage, le type de superplastifiant utilisé et le moment d'introduction dans la séquence de malaxage sont aussi des paramètres importants dans la composition du BPR. Parmi les familles usuelles des polynaphtalènes sulphonés et polymélamines, une famille plus récente de polyacrylates qui inclut la dernière génération de polycarboxylates. Pour la fabrication des BPR, CHEYREZY et RICHARD rapportent que les superplastifiants les plus efficaces sont des dispersants à base de polyacrylates qui présentent eux même des effets de retard qui peuvent être gênant pour les applications pratiques [45, 57].

### **2.2.6 Fibres métalliques et non métalliques**

Les matrices de BPR ont une très bonne résistance en compression, mais une faible résistance à la traction (énergie de fracturation de quelques dizaines de  $J/m^2$ ). En ce sens ce sont des matériaux très semblables aux céramiques industrielles. Pour compenser cet inconvénient, il faut ajouter des fibres, qui ont comme fonction essentielle de suppléer la perte de résistance en traction de la matrice au droit d'une fissure. La fibre contrôle l'apparition de la fissure et ne permet pas l'augmentation et la propagation de celle-ci [43, 58]. Donc, les fibres doivent avoir un module d'élasticité élevé.

Pour les BPR une longueur maximale de fibre de 13 mm environ est satisfaisante, quant au diamètre de la fibre, il peut être compris entre 0,13 mm et 0,20 mm.

Il est bien entendu qu'à cause de l'utilisation de fibres courtes, l'énergie de fracturation et la résistance en flexion sont fortement diminuées. En mélangeant des fibres de longueur différente, on atteint des résultats intermédiaires [58].

## 2.3 Mise en œuvre des BPR

### 2.3.1 Malaxage du béton

Le très faible rapport E/C et les dosages élevés en superplastifiant et en fumée de silice nécessitent un malaxage efficace pour la dispersion des poudres et des superplastifiants. La séquence de malaxage est donc plus longue que dans le cas des bétons conventionnels. Les séquences utilisées par [59] pour la fabrication d'un BPR sont:

- Malaxage des poudres à sec	1 à 2 minutes
- Introduction de l'eau avec la moitié du superplastifiant	5 à 10 minutes
- Introduction de la seconde moitié du superplastifiant	non indiqué
- Ajout des fibres	1 minute
- Malaxage final	5 minutes

Le temps de malaxage dépend du type de malaxeur utilisé: plus le malaxeur est performant, plus la séquence de malaxage est courte. Le taux de remplissage du malaxeur ne doit pas dépasser 80 % de sa capacité utile. Une séquence de malaxage semblable a été utilisée pour la fabrication en usine d'un BPR, le temps de malaxage total était de 18 minutes [60].

### 2.3.2 Dosage en superplastifiant

Les propriétés rhéologiques des BUHP sont fortement liées au type et au dosage en superplastifiant utilisé. Comme pour le béton conventionnel, il existe un dosage optimum au-dessus duquel les caractéristiques rhéologiques ne sont pas améliorées. Les diverses formulations de BUHP répertoriées dans la documentation scientifique utilisent un dosage en superplastifiant qui varie de 0.5 à 3.0% (en extrait sec par rapport à la masse de ciment) selon le type de superplastifiant et la composition du mélange. La composition du mélange influence grandement les caractéristiques rhéologiques obtenues pour un même dosage en superplastifiant. Yamamoto et Kobayashi [61] ont observé une amélioration de la maniabilité d'un béton avec le remplacement d'une certaine quantité de ciment par divers fillers. D'ailleurs, les recherches menées par Bonneau [57] ont démontré que l'optimum rhéologique en

superplastifiant est fonction de cinq paramètres majeurs qui caractérisent l'interaction ciment-superplastifiant-fines. Il s'agit de :

- la finesse du ciment (caractérisé par sa surface spécifique Blaine) ;
- la teneur en  $C_3A$  du ciment ;
- la finesse de la fumée de silice (caractérisé par sa surface spécifique Blaine) ;
- la finesse du quartz broyé (caractérisé par sa surface spécifique Blaine) ;
- la nature de l'adjuvant.

Bonneau [54] propose d'ailleurs un modèle de prédiction de la quantité optimale de superplastifiant qui tient compte de ces cinq paramètres. Un des éléments essentiels de ce modèle est l'interaction chimique et physique entre le superplastifiant et les particules fines.

Chacun des constituants fins du BPR adsorbe une certaine quantité de superplastifiant qui n'est alors plus disponible pour la fluidification. Il y a donc une variation importante du dosage optimal en superplastifiant selon les proportions et le type des constituants fins utilisés. Selon les résultats présentés, les constituants utilisés adsorbaient une quantité croissante de superplastifiant ( $mg/m^2$ ) selon l'ordre suivant: fumée de silice, quartz broyé, ciment. Il faut noter que l'adsorptivité donnée est relative à la surface volumique, donc même si la fumée de silice est considérée comme moins adsorbante, sa surface spécifique étant beaucoup plus élevée, la quantité totale de superplastifiant adsorbée demeure donc très élevée. C'est d'ailleurs ce qu'ont observé Nehdi et coll. [62] qui rapportent que pour une même maniabilité, la fumée de silice demande beaucoup plus de superplastifiant que les autres fillers utilisés dans leur étude.

### 2.3.3 Mise en place

Roux et Barrvco [59] soutiennent que le BPR peut se mettre en place avec les méthodes traditionnelles. Par contre, la forte thixotropie du matériau nécessite l'utilisation d'une vibration énergique lors de la mise en place. D'autres méthodes de mise en place ont aussi été utilisées, comme par exemple l'utilisation d'une trémie sous pression négative pour retirer l'air occlus,

l'injection sous pression l'extrusion, un procédé de laminage ou la fabrication d'un béton sec compacté mécaniquement.

#### **2.3.4 Problèmes particuliers rencontrés lors de la mise en oeuvre**

La mise en oeuvre d'un béton traditionnel peut influencer ses caractéristiques mécaniques, les principaux facteurs étant l'occlusion d'air et la ségrégation lors de la mise en place. Dans le cas des BPR la mise en oeuvre est généralement plus difficile car ce sont des bétons contenant souvent beaucoup de fibres discontinues ce qui pose des problèmes particuliers non négligeables [63] comme par exemple :

- l'orientation préférentielle des fibres ;
- les effets de voûte ou d'écran ;
- les effets de cheminée ;
- la ségrégation des fibres ;
- l'approvisionnement en fibres ;
- l'effet des fibres sur la maniabilité du béton.

En résumé, il faut porter une attention particulière à l'anisotropie du matériau qui est liée à la distribution et à l'orientation des fibres. Cela est particulièrement vrai dans le cas des pièces de petite dimension car le rapport entre la taille du moule et la longueur des fibres est faible, ce qui implique que l'orientation spatiale des fibres sera grandement influencé par la technique de mise en place qui sera utilisée [64].

### **CHAPITRE 3    COMPORTEMENT RHEOLOGIQUE ET MECANIQUE DES BPR**

Depuis les 30 dernières années ; la technologie du béton est en constante évolution. La recherche intensive menée au cours de cette période a permis une amélioration surprenante des propriétés du béton. Parmi ces développements, notons la production de superplastifiants de plus en plus performants qui permettent de réduire grandement le rapport eau/ciment (E/C) du béton, aussi l'ajout de fillers minéraux pouzzolanique permettent d'améliorer la compacité et la durabilité de la matrice cimentaire, l'utilisation des principes de formulations performants tels que l'optimisation de la compacité granulaire, la réduction de la dimension des granulats, l'application de traitements mécaniques ou thermiques au béton. Etc. Cette évolution a permis de développer une large gamme de bétons que l'on peut classer à prime abord, selon leur résistance à la compression comme l'indique le tableau ci-dessous :

**Tableau 3-1 : Résistances des bétons à la compression**

Béton	Résistance à la compression MPa
Béton ordinaire (BO)	20 à 50
Béton à haute performance (BHP)	50 à 100
Béton à très haute performance (BTHP)	100 à 150
Béton à ultra haute performance (BUHP)	Plus de 150

Les bétons de poudres réactives (BPR) développés par P.Richard, et le Ductal<sup>®</sup> sont parmi les derniers-nés de la famille des BUHP. Comme notre étude leurs est consacré, nous les présenterons plus en détail dans ce chapitre.

La mise en oeuvre du béton est importante dans la mesure où elle peut influencer ses propriétés. Par exemple, l'efficacité du malaxage influence la dispersion des constituants qui influence à son tour les propriétés rhéologiques et mécaniques du béton. L'efficacité du

malaxage dépend de plusieurs paramètres : le type de malaxeur. l'énergie de malaxage, le temps de malaxage et la séquence d'introduction des constituants. La méthode de mise en place peut aussi influencer les caractéristiques mécaniques du béton. On peut penser à la ségrégation des constituants. Une orientation préférentielle des fibres l'incorporation de gosses bulle d'air etc. Comme la rhéologie du béton influence beaucoup la mise en oeuvre du béton. Le dosage en superplastifiant est aussi un facteur important à considérer.

### **3.1 Propriétés rhéologiques et mécaniques des BPR**

#### **3.1.1 Caractéristiques rhéologiques**

Il a été observé que, dans certaines conditions, les BPR avaient un comportement rhéologique Binghamien [57]. Cela signifie qu'ils peuvent être caractérisés par un seuil de cisaillement et une viscosité relative. Ces caractéristiques sont obtenues par une mesure avec un rhéomètre spécialement adapté au matériau. Il s'agit en fait de mesurer le couple développé pour une gamme de vitesses de rotation d'un élément géométrique immergé dans le béton. Le seuil de cisaillement représente l'effort qui doit être fourni pour mettre en mouvement le béton frais. La viscosité caractérise la résistance que le béton offre au mouvement lorsque celui-ci est déjà amorcé. Plusieurs paramètres importants ont ainsi été mis en évidence comme la composition et la finesse du ciment, la provenance et la finesse de la fumée de silice et le type de superplastifiant.

L'évaluation de la maniabilité des BPR, sans le recours à un rhéomètre spécialement conçu à cette fin, est particulièrement difficile étant donné le caractère fortement thixotropique des BPR. Selon Roux et Barranco [59] la mesure traditionnelle de l'affaissement n'est pas appropriée. Il faut plutôt utiliser une méthode dynamique comme le maniabilimètre à mortier ou la table à secousses. Le temps est aussi un facteur important étant donné qu'on observe une perte de maniabilité rapide lorsque le BPR n'est plus en mouvement.

### 3.1.2 Comportement à la compression

Les BPR possèdent généralement une résistance à la compression supérieure à 150 MPa. Cependant les BPR non fibrés présentent un comportement très fragile à la rupture. C'est pourquoi, même à la compression, l'utilisation des fibres confère une certaine ductilité au matériau. La figure 3.1 présente une courbe typique contrainte-déformation obtenue lors d'un essai de compression uniaxial. Les déformations longitudinales, volumiques et transversales ont été mesurées jusqu'à la rupture de l'éprouvette. Le matériau montre un comportement élastique linéaire jusqu'à environ 60% de sa contrainte ultime qui est de l'ordre de 200 MPa. La figure 3.2 montre l'effet des fibres sur le comportement post-rupture de l'éprouvette en compression. On voit bien que la présence de fibres empêche l'éclatement du béton et permet ainsi d'obtenir une rupture plus progressive.

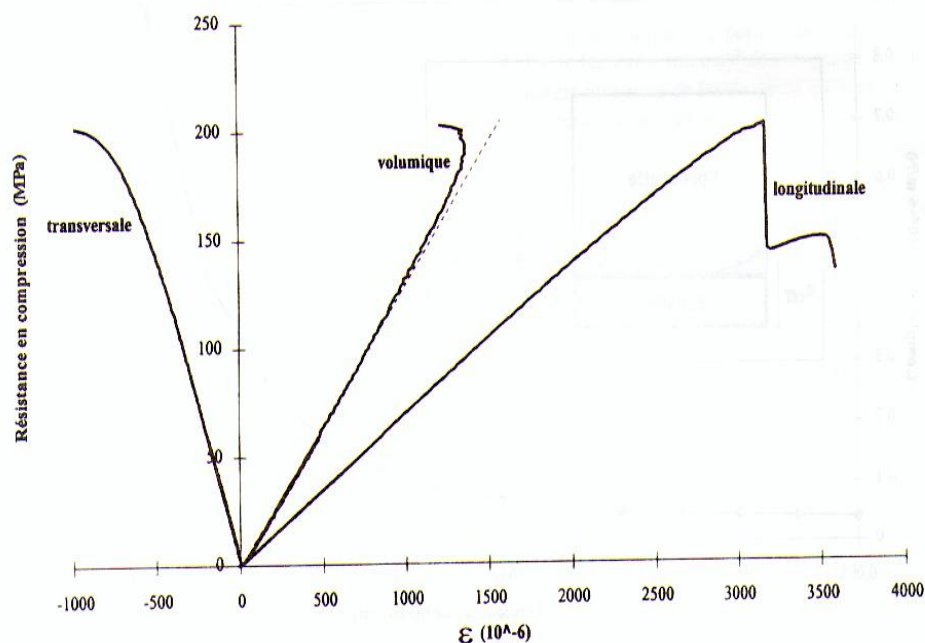


Figure 3-1 : Courbe contrainte-déformation d'un BPR200 en compression simple [65]

Les caractéristiques générales des BPR200 et BPR800 en compression sont données au tableau 3.2 Richard et Cheirezy (1995) proposent d'adopter les relations suivantes qui estiment le module élastique du béton à partir de sa résistance à la compression :

$$\text{BPR200 : } E = 4000\sqrt{f_c}$$

$$\text{BPR800 : } E = 3000\sqrt{f_c}$$

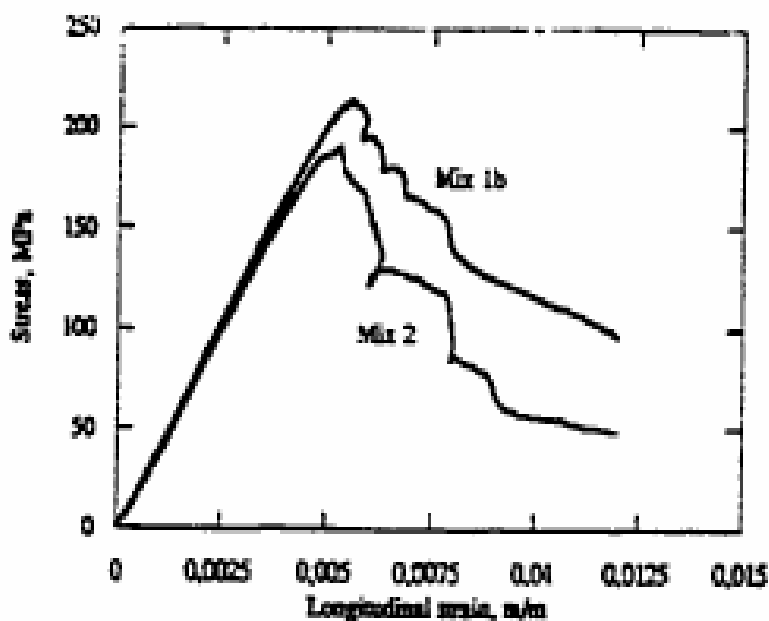


Figure 3-2 : Comportement en compression d'un BPR200 [60].

Tableau 3-2 : Résumé des principales propriétés en compression des BPR [43]

	<b>BPR200</b>	<b>BPR800</b>
Traitement thermique	20 à 90°C	250 à 400°C
Résistance à la compression	170 – 230 MPa	490 – 810 MPa
Module d' Young	50 – 60 GPa	65 – 75 GPa
Coefficient de poisson	0.22 à 0.24	0.19 à 0.28

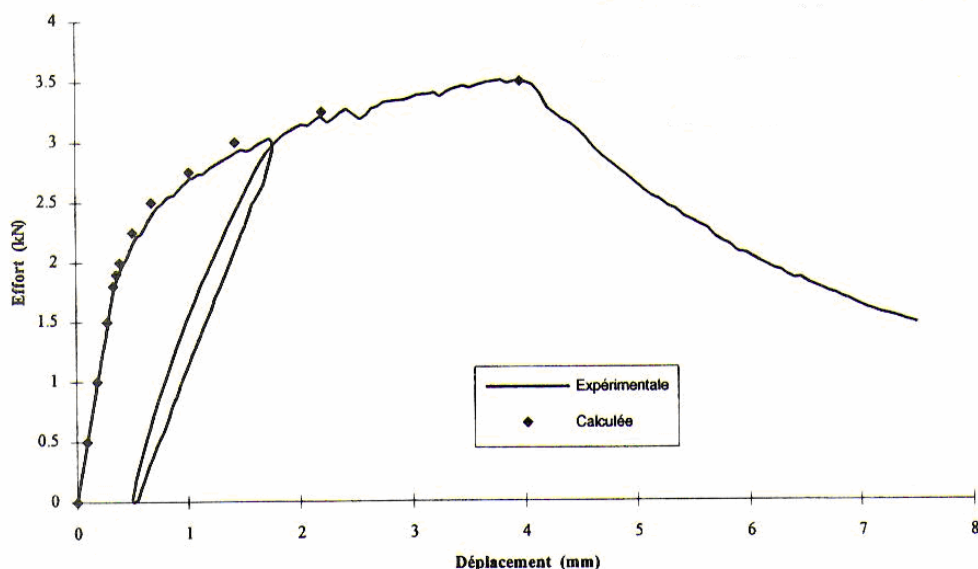
### 3.1.3 Comportement en traction et en flexion

Comme pour les bétons traditionnels, le point faible des bétons BUHP demeure leur résistance à la traction. D'ailleurs l'augmentation de la résistance à la traction des BUHP n'est pas aussi importante que celle de leur résistance à la compression. Le rapport des résistances à la traction et à la compression pour un béton traditionnel est d'environ 1/8 à 1/10 alors que pour les BUHP, il est d'environ 1/20 [64]. L'utilisation de fibres dans ces bétons permet d'améliorer significativement leur comportement à la traction d'autant plus que l'ancrage des fibres est amélioré par la qualité de la matrice.

La figure 3.3 montre un exemple de courbe charge obtenue lors d'un essai de flexion 4 points sur une éprouvette de BPR contenant 2% de fibres de 150  $\mu\text{m}$  de diamètre et 13 mm de longueur. On voit que la relation charge/flèche est linéaire jusqu'à la résistance à la traction de la matrice (environ 10 MPa) ce qui correspond à l'apparition d'une première fissure à la fibre inférieure de l'éprouvette. Par la suite le comportement est écrouissant. Ce type de comportement montre bien que les fibres sont efficaces pour contrôler la microfissuration et donner de la ductilité au matériau. Par contre, le dosage en fibres utilisé est insuffisant pour contrôler la microfissuration et ainsi améliorer la résistance à la traction du matériau. On remarque aussi que la charge maximale est atteinte pour un déplacement relativement élevé. Pour cet essai la flèche mesurée à la charge maximale est environ 10 fois plus élevée que celle correspondant à l'apparition de la première fissure (qui correspond à la perte de linéarité de la courbe charge/flèche). Ce comportement est associé à la multifissuration du matériau. La formation à l'ouverture simultanée de plusieurs macrofissures dans la zone tendue de l'éprouvette faite en sorte que le matériau conserve une bonne capacité portante associée à une augmentation importante de la déformation.

Ce phénomène est bien illustré à la figure 3.4 qui montre la déformation de la fibre supérieure comprimée en fonction de la déformation de la fibre inférieure tendue. Dans la partie linéaire de la courbe (avant l'atteinte de la résistance à la traction de la matrice) les déformations sont identiques jusqu'à l'apparition de la première fissure. Par la suite, la fibre inférieure tendue se déforme beaucoup plus rapidement que la fibre supérieure comprimée. Ce

phénomène résulte de la multifissuration subie par le matériau et l'écart entre les deux courbes correspond à l'ouverture des fissures. La multifissuration du matériau est possible parce que les fibres transmettent efficacement l'effort au droit d'une fissure.



**Figure 3-3 : Courbe charge/flèche au centre d'une poutrelle de BPR fibre soumise à un essai de flexion 4 points [65].**

D'ailleurs, la relation entre la contrainte de traction à l'ouverture de la fissure qui est obtenue lors d'un essai de traction directe (figure 3.5) montre bien l'efficacité avec laquelle les fibres transmettent l'effort au cours de leur extraction de la matrice. Sur cette figure, la contrainte semble diminuer très rapidement avec l'ouverture de la fissure. Dans les BUHP sollicités en flexion, les ouvertures des fissures demeurent très faibles même pour des valeurs de flèche important.

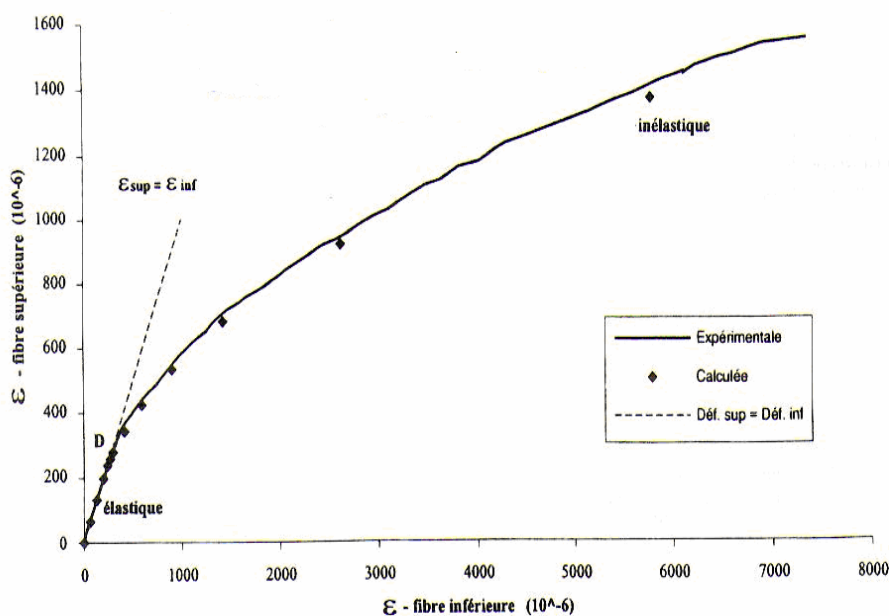


Figure 3-4 : Comparaison des déformations en traction et en compression sur une éprouvette de BPR200 sollicitée en flexion [65].

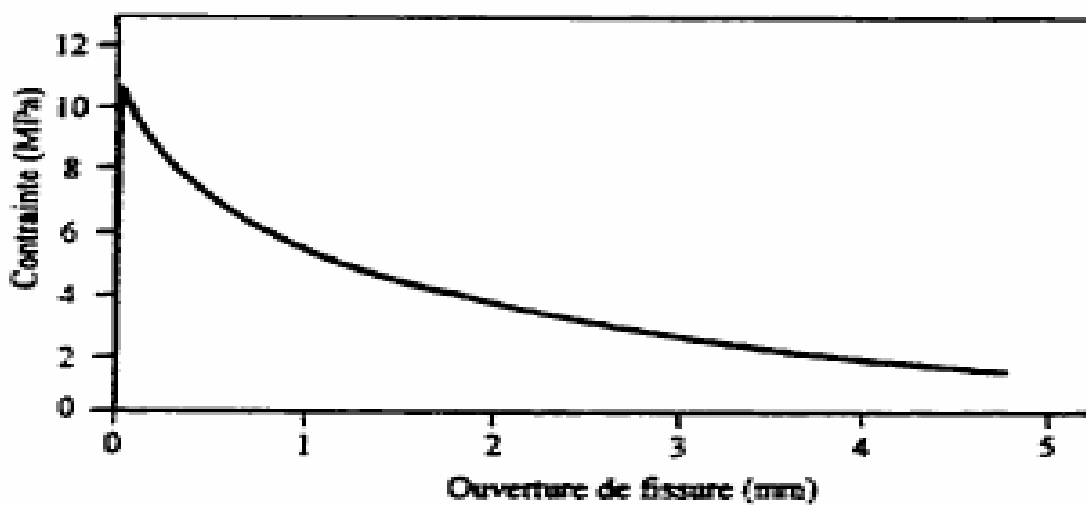


Figure 3-5 : Relation entre la contrainte et l'ouverture de fissure pour une éprouvette de BPR fibre sollicitée en traction directe [64].

Les caractéristiques générales des résistances à la traction et à la flexion des BPR sont données au tableau 3.3.

**Tableau 3-3 : Résumé des principales propriétés en traction et flexion des BPR [43]**

	<b>BPR200</b>	<b>BPR800</b>
Traitement thermique	20 à 90°C	250 à 400°C
Résistance à la traction	10 MPa	-
Module de rupture (flexion)	30 à 60 MPa	45 à 145 MPa
Energie de fracturation	20000 à 40000 J/m <sup>2</sup>	1200 à 20000 J/m <sup>2</sup>
Déformation à la rupture	5000 à 7000 µm/m	-

Il est aussi possible d'augmenter la contrainte du matériau dans la partie linéaire de la courbe charge/flèche d'un essai de flexion. L'utilisation de fibres plus courtes et de plus petit diamètre permet en effet l'incorporation d'un nombre beaucoup plus élevé de fibres, ce qui permet de limiter la propagation des microfissures. Ainsi Tjiptobroto et Hansen [66] ont utilisé des fibres de 150 µm de diamètre et 6 mm de longueur. Les résultats obtenus sont présentés à la figure 3.6 qui montre la relation charge/déformation en traction pour une matrice DSP contenant 3 % et 12 % de fibres (en volume) et soumise à un essai de flexion 4 points. Cette figure montre une augmentation du module de rupture dans le domaine des faibles déplacements ainsi qu'un comportement ductile écrouissant après fissuration de la matrice. La fissuration est donc mieux contrôlée et on peut penser que, pour des dosages élevés en fibres. Celles-ci seraient assez nombreuses pour retarder et limiter la propagation des microfissures. On a donc une augmentation de la résistance à la traction du matériau.

Cette augmentation est aussi illustrée à la figure 3.7 qui montre la relation contrainte/déformation obtenue lors d'essai de traction directe sur un matériau semblable à celui utilisé, pour l'essai de flexion figure 3.6. La résistance à la traction passe successivement de 6 MPa, pour la matrice sans fibres à 10 MPa pour un volume de 3 % de fibres puis à environ 12.5 MPa pour un volume de 6 % de fibres. Par contre on ne note pas d'augmentation de résistance lorsque le volume de fibres passe de 6 % à 12 %. La résistance à la traction du mélange contenant 6 % de fibres est supérieure de 2.5 MPa à celle du mélange contenant 3 % de fibres (cela représente un gain de résistance d'environ 25 %). Il y a donc un contrôle effectif de la microfissuration qui permet cette augmentation de résistance dans le domaine des

déformations élastiques. Il est intéressant de noter, qu'en traction directe, l'augmentation de la résistance est importante avec l'ajout de seulement 3 % de fibres (cette résistance passe alors de 6 à 10 MPa). Cela est dû, du moins en partie, au fait que la matrice sans fibres possède une très faible résistance pour un matériau dit à ultra haute performance. Cette faible résistance est d'ailleurs liée à la grande fragilité du matériau. Des résultats d'essais de traction directe montrent qu'en ajoutant entre 1% à 3 % (en volume) de fines armatures continues dans une matrice de DSP non-fibrée, la contrainte de fissuration de la matrice passe de 6 à 9 MPa.

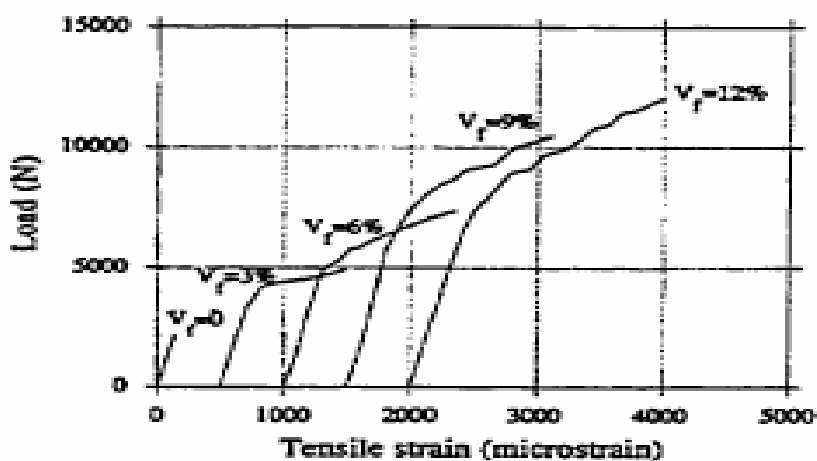


Figure 3-6 : Relation entre la charge et la déformation d'une matrice DSP [66].

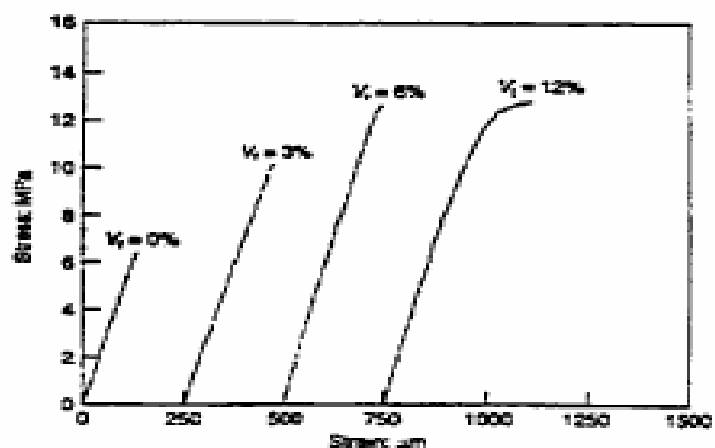


Figure 3-7 : Comportement en traction directe d'une matrice de DSP contenant différents dosage en microfibres d'acier de 150 µm x 6 mm [64]

L'utilisation de microfibres aux forts dosages permet donc d'obtenir un contrôle raisonnable de la fissuration pour des faibles déformations. Par contre, ces fibres sont généralement trop courtes pour conférer au matériau une ductilité suffisante. C'est d'ailleurs pour cela que ces fibres sont souvent utilisées avec des petites armatures continues.

Il est également possible d'utiliser plusieurs types de fibres afin d'agir simultanément à plusieurs niveaux du processus de fissuration des matrices cimentaires [68, 69]. Rheaume a effectué des essais sur des mélanges hybrides de microfibres d'acier et de mésofibres de polypropylène dans le but d'augmenter la résistance à la première fissuration et d'obtenir de la ductilité post-fissuration [70]. Mais étant donné le faible module élastique des fibres de polypropylène, le niveau de contrainte obtenu après fissuration de la matrice était assez faible. Au cours de la même période, Rossi et coll. [15] ont utilisé le concept de renforcement multimodal qui consiste à utiliser un « cocktail » de fibres afin d'agir sur la microfissuration et la macrofissuration. Ces auteurs ont utilisé un mélange de 5% de petites fibres de 250  $\mu\text{m}$  de diamètre et 5 mm de longueur avec 2 % de macrofibres de 300  $\mu\text{m}$  de diamètre à 25 mm de longueur. Ils obtiennent alors un matériau possédant une résistance à la première fissuration d'environ 20 à 25 % supérieure à la matrice sans fibres (18 à 20 MPa par rapport à 15 MPa) et un comportement post-fissuration écrouissant jusqu'à un module de rupture d'environ 40 MPa. La performance limitée des petites fibres de 5 mm face au contrôle de la microfissuration est vraisemblablement liée à leur diamètre trop élevé. Pour contrôler efficacement les microfissures et obtenir une bonne amélioration de la résistance à la première fissuration il est impératif d'utiliser des microfibres beaucoup plus petites [71].

### **3.1.4 Retrait**

Une étude comparant le retrait d'auto-dessiccation entre trois formulations de BPR avec un BHP (béton de haute performance) et un BTHP (béton de très haute performance) a été réalisée par Loukili et coll. [72]. Il s'agit de bétons dont les proportions massiques (par rapport au ciment) de la fumée de silice et du sable ont été gardées constantes et dont on a utilisé des

rappports E/L. variant de 0.25 à 0.09. Les mesures de déformations ont débute 58 heures après le contact eau ciment.

La figure 3.8 montre l'évolution de la déformation due au retrait d'auto-dessiccation pour les cinq bétons étudiés. On observe une diminution du retrait d'auto-dessiccation avec la diminution du rapport E/L. D'après les auteurs, ce phénomène pourrait être attribuable à la diminution du degré d'hydratation du ciment pour des très faibles rapports E/L. La figure 3.9 montre d'ailleurs le degré d'hydratation calculé à partir de la quantité d'eau non évaporable qui a été mesurée sur les trois BPR À 28 jours, ce degré d'hydratation varie entre 38% et 58%. On remarque cependant que les trois BPR subissent le même retrait malgré des rapports E/L différents (0.13 ; 0.11 et 0.09). Ce comportement apparemment contradictoire, peut s'expliquer en examinant attentivement les courbes de la figure 3.9 qui indiquent que, dans l'intervalle de temps considéré, la cinétique d'hydratation est la même pour les trois BPR même si le degré d'hydratation du ciment peut varier. Cela suggère qu'une grande partie du retrait d'auto-dessiccation se soit probablement déjà produit avant même le début des mesures. En effet la figure 3.9 montre qu'environ 6% du ciment s'est hydraté entre le début des mesures (2 jours) et l'échéance de 28 jours. Ce qui ne représente qu'environ 13 % à 16% de l'hydratation totale du ciment à 28 jours. De plus, la comparaison entre les bétons n'est pas stricte car elle n'est pas faite à un volume de pâte constant mais plutôt à un rapport massique constant. Le béton contenant plus d'eau étant aussi celui possédant le plus grand volume de pâte cela amplifie les phénomène de retrait.

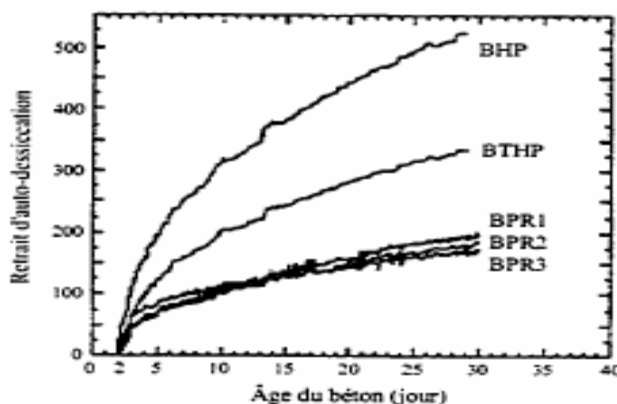


Figure 3-8 : Comparaison du retrait d'auto-dessiccation de trois BPR avec un BHP et un BTHP [73].

Une autre étude plus récente, menée par les mêmes auteurs, porte sur l'évolution du retrait endogène et de l'humidité relative sur des éprouvettes de CRC fibrés et non fibrés [72]. Le rapport E/L du matériau testé était de 0.16 et cette fois-ci les mesures du retrait endogène ont débuté à 24 heures. Parallèlement aux mesures de retrait, l'humidité relative à l'intérieur d'une éprouvette témoin a été mesurée à l'aide d'une sonde insérée dans une cavité. Les résultats indiquent un retrait endogène de 450  $\mu\text{m}/\text{m}$  à 28 jours. Après 24 heures, le retrait avait déjà atteint 45 % de sa valeur maximale et, à 10 jours, 95 %. De plus, le taux d'hydratation du ciment calculé atteint déjà 42 % après 24 heures comparativement à 57 % après 28 jours. Il se peut donc qu'une partie du retrait endogène n'ait pas pu être mesurée lors des 24 premières heures. Cependant, la mesure d'humidité relative dans le béton indique un taux supérieur à 95% au début des mesures, ce qui suggère que le retrait antérieur n'est pas trop important. Par ailleurs, les mesures croisées d'humidité relative et du taux d'hydratation révèlent que l'hydratation du ciment se fait surtout dans les 7 premiers jours, ce qui correspond à une humidité d'environ 75%. Par la suite, l'hydratation et la diminution de l'humidité relative se poursuivent mais à un taux beaucoup plus lent.

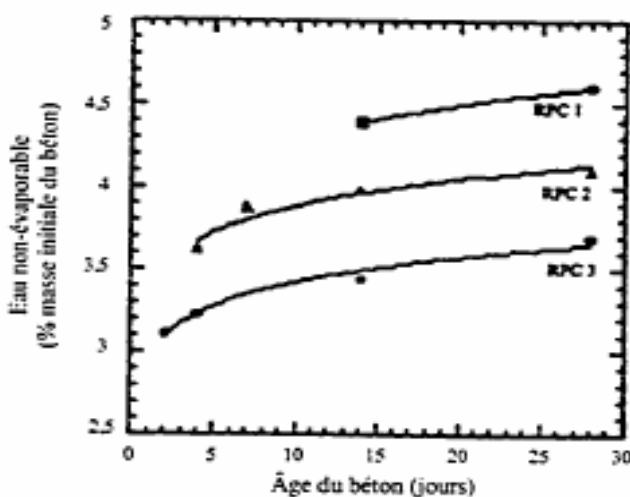


Figure 3-9 : Évolution du degré d'hydratation des BPR avec le temps [73].

## **3.2 Microstructure et durabilité des BPR**

### **3.2.1 Microstructure des BPR**

La très faible quantité d'eau, l'optimisation de la compacité des poudres constituant le BUHP et la pouzzolanité de la fumée de silice font en sorte que la matrice des BUHP possède une structure très dense. Elle est composée de C-S-H, de particules de fumée de silice partiellement consommées, de grains de ciment partiellement hydratés et parfois de grains de quartz. La proportion de grains de ciment non hydratés est très élevée dans les BUHP étant donné que la quantité d'eau ajoutée n'est pas suffisante pour l'hydratation complète du ciment. Le degré d'hydratation varie typiquement entre 40% et 60% pour des rapports E/L variant entre 0.09 et 0.16 [72, 73, 74]. Ces particules de ciment anhydre peuvent être considérées comme des micro-granulats à surface réactive possédant un module élastique très élevé (environ 120 GPa) [75]. La réaction pouzzolanique entre la fumée de silice et la Portlandite est aussi un facteur contribuant à la densification de la matrice. Il a été observé pour les BPR que, selon le traitement thermique appliqué au matériau, le taux de pouzzolanité (consommation de la chaux) variait entre 75% et 90%, pour des températures de 20°C et 90°C, pour atteindre presque 100% pour des températures supérieures à 200°C [43]. À cette structure très dense est associée une porosité très faible, typiquement comprise entre 1% et 4% [43, 74]. Les différentes mesures de porosité au mercure indiquent que la porosité capillaire est très faible, voire inexistante. D'autres techniques ont aussi permis d'identifier une porosité dominante pour des pores d'environ 1.5 à 3 nm de diamètre ce qui correspond à la porosité des C-S-H [74].

### **3.2.2 Propriétés de transfert**

Comme la porosité capillaire des BUHP est très faible, voire inexistante, les propriétés de transfert dans ces matériaux sont principalement contrôlées par la porosité des C-S-H [74]. Avec les techniques traditionnelles de mesure de la perméabilité et de la diffusivité, on obtient des valeurs correspondantes à la précision des techniques de mesure. Il est donc difficile d'obtenir des coefficients de perméabilité et de diffusion pour ces matériaux car les échanges se font principalement à travers les pores des C-S-H [76]. Les valeurs suivantes donnent une

indication de l'ordre de grandeur des propriétés de transfert des BUHP (BO = bétons ordinaires) :

**Tableau 3-4 : propriétés de transfert des BUHP et des BO.**

	BUHP	BO	Auteurs
Perméabilité au gaz (m <sup>2</sup> )	10	35000	[76]
Absorption d'eau à 15 jours kg/m <sup>2</sup>	3	2.75	[59]
Coefficient de diffusion Cl <sup>-</sup> m <sup>2</sup> /s	2.10 <sup>-14</sup>	1800.10 <sup>-4</sup>	[76]

### 3.2.3 Durabilité des BPR

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 : l'application des deux premiers principes énoncés au paragraphe 2.1 ont pour effet de diminuer la porosité et d'augmenter l'homogénéité du matériau [43].

#### 3.2.3.1 Porosité

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

La porosité entre 6 nm et 100 mm a été mesurée à l'aide d'un porosimètre à mercure. On observe pour le BPR une absence totale de porosité capillaire, celle qui est à l'origine des principaux mécanismes de diffusion dans les matériaux à matrice cimentaire. La porosité accessible à l'eau du BPR, mesurée selon le mode opératoire AFREM, vaut 2 %.

### 3.2.3.2 Perméabilité, Résistance au gel-dégel et Abrasion

La très faible porosité et l'absence d'eau libre dans les pores capillaires ont une influence directe sur les caractéristiques de perméabilité à l'air, de résistance au gel-dégel et de résistance à l'abrasion (voir le tableau 3-5).

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

**Tableau 3-5 : Principales caractéristiques de durabilité du BPR 200**

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

### 3.2.3.3 Résistance à la corrosion

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

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

Des essais de diffusion et de migration accélérée des ions chlores ont montré une parfaite imperméabilité du BPR à ces agents (cf. tableau 3). La carbonatation est insignifiante. Enfin, le réseau de fibres n'étant pas continu, la corrosion ne peut se propager aux fibres incluses dans la masse.

#### **3.2.3.4 Résistance aux agents agressifs**

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

#### **3.2.3.5 Résistance au feu**

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

Une formulation particulière peut être utilisée qui porte cette valeur à 60 min pour une structure non chargée et à 30 min pour une structure chargée. Pour obtenir une tenue au feu supérieur, il convient d'employer des protections anti-feu additionnelles.

### **3.3 Propriétés et domaines d'application des BPR**

Le BPR est un matériau deux fois plus résistant que n'importe quelle roche naturelle connue, et dix fois plus résistant en compression que les bétons à haute performance (BHP) [3]. Selon sa formulation, il peut atteindre 800 MPa en résistance à la compression et 150 MPa en résistance à la traction. L'adjonction de microfibres métalliques permet d'obtenir une ductilité de presque la moitié de celle de l'acier, alors que dans les bétons classiques, elle avait apporté des performances beaucoup plus modestes. Sous des contraintes extrêmes, le matériau se déforme progressivement et prévient avant la rupture. La dissipation d'énergie se fait par glissement des fibres par rapport à la matrice.

Composé de poudres (sable fin, ciment, quartz, fumée de silice) dont le plus gros élément ne dépasse pas quelques centaines de micron (mètres), le BPR est fabriqué dans des conditions semblables à celles des bétons classiques, mais avec une très faible quantité d'eau.

Un traitement thermique appliqué après la prise permet de moduler la qualité du béton en fonction des besoins. La micro structure est la clé de la performance des BPR. Elle leur confère une très faible porosité, une perméabilité à la limite du mesurable et une très grande durabilité par comparaison avec un béton classique, on observe un changement structural complet des hydrates, qui se traduit par une structure continue de la phase limitée à l'échelle microscopique.

Au niveau macroscopique, la matrice des BPR constitue un milieu quasi imperméable à l'air et aux agents agressifs. La très grande résistance au gel – dégel, et une autre conséquence de pores capillaires. La résistance à la traction élevée et la grande ductilité des BPR fibrés permettent leur utilisation dans les structures sans armatures passives.

D'un point de vue économique, nous pouvons citer certains avantages présentés par l'emploi des BPR comme matériau de construction.

- La suppression des armatures passives permet d'éviter le travail long et coûteux de calcul, de dessin, de façonnage et de mise en place de celle-ci ;
- Les caractéristiques élevées du BPR permettent de réaliser des structures fines et élancées avec une réduction importante du volume de matériaux à mettre en œuvre ;
- Du fait du rapport des densités, les structures en BPR sont aussi légères que celles en acier, mais deux à trois fois moins lourdes que le béton usuel. Il en résulte un gain en poids qui peut être considérable sur les structures porteuses ou les fondations ;
- La durabilité des BPR assure aux structures situées dans des milieux agressifs une longévité supérieure, qui peut se traduire par des gains d'exploitations importants.

**Deuxième partie :**  
**Étude expérimentale**

## CHAPITRE 4 METHODES D'ESSAIS

Dans ce chapitre, nous exposons les différentes méthodes expérimentales utilisées pour l'identification des bétons de poudres réactives (BPR) à l'état anhydre et hydraté.

### 4.1 Analyse minéralogique par DRX

Parmi les diverses méthodes possibles nous ne verrons ici que la méthode diffractométrique sur les poudres la plus utilisée dans les déterminations d'usage. L'appareillage est représenté sur la photo 7 en annexe.

Le matériau broyé en grains  $< 30\mu$  est placé dans un porte échantillon, offrant ainsi une face plan au rayonnement. Il tourne à une vitesse de  $\theta/\text{min}$ .

Un détecteur, fixé sur un goniomètre et animé d'une vitesse de rotation  $2\theta/\text{min}$ , mesure le rayonnement diffracté figure 4-1.

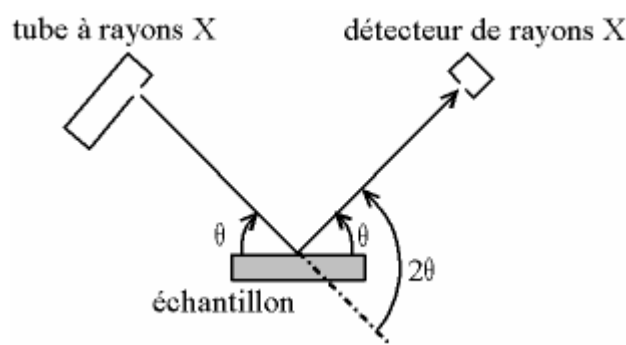


Figure 4-1 : Représentation schématique de l'analyse par DRX

Soit un cristal frappé par un faisceau de rayons X, parallèle, monochromatiques. Considérons les atomes du plan réticulaire le plus près de la surface : ils diffusent un rayonnement secondaire, d'intensité bien plus faible que le rayonnement incident. Ces

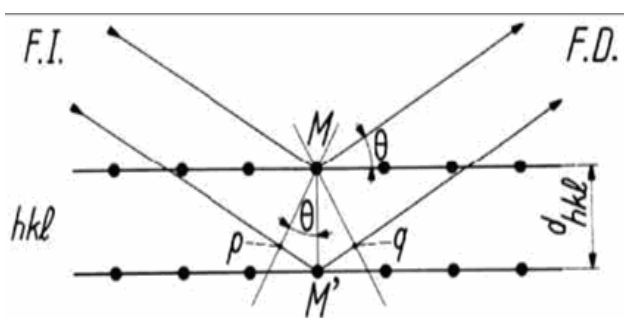
rayonnements interfèrent et conduisent à des maxima dans la direction où ils sont en phase : c'est la direction du rayon réfléchi.

Si, en optique, seul intervient la couche superficielle (faible présentation des rayons lumineux) il n'en n'est pas de même pour les rayons X qui, ont un grand pouvoir pénétrant vont, donc interférer des ondes diffusées par un grand nombre de plans réticulaires d'une même famille : là encore on observera un maximum, dans la direction du rayon réfléchi, si toutes les ondes sont en phase.

La figure 4-2 montre que pour des plans d'équidistance  $d$  frappés sous un angle  $\theta$  par un rayonnement de longueur d'onde  $\lambda$ , la différence de marche d'un plan au voisin sur la direction de réflexion est  $\delta = pM' + M'q = 2d \cdot \sin\theta$ .

La condition pour qu'il y ait accord de phase donc diffraction est :  $2d \cdot \sin\theta = n \cdot \lambda$

C'est la condition de réflexion sélective, due à BRAGG.



**F.D** : Fuseau de rayons X diffractés

**F.I** : Fuseau de rayons X incidents

**hkl** : famille des plans réticulaires

Figure 4-2 : Principe de BRAGG

L'analyse par diffraction aux rayons X utilisant la méthode des poudres, trouve son principal emploi dans la détermination des minéraux. Chaque corps cristallin produit un spectre ou diffractogramme X qui rend compte de sa structure interne et de la nature des minéraux le composant.

On peut considérer que tout diffractogramme X est une sorte « d'empreinte digitale » spécifique, qui permet de distinguer un minéral d'un autre.

Pour identifier un corps, à partir de son diffractogramme X, on dispose d'un fichier ASTM ou les minéraux sont classés en fonction de leurs trois raies principales ( $d_1$ ,  $d_2$  et  $d_3$ ) dont l'intensité du pic principal est fixé à 100.

Si le matériau étudié contient plusieurs espèces minérales, son diffractogramme X sera constitué de la juxtaposition des diagrammes élémentaires.

On peut obtenir, en définitive, un diagramme caractéristique du matériau, comportant des raies d'intensité bien définie pour des valeurs angulaires elles mêmes définies. Le dépouillement du diagramme conduit à identifier le (ou les) minéral (aux) renfermé (s) dans le matériau.

Ce procédé de diagnose présente de nombreux avantages :

- rapidité d'exécution ;
- possibilité, dans certains cas, de dosages quantitatifs ;
- identification de minéraux et pas seulement, comme le fait l'analyse chimique, d'éléments.

C'est en effet une erreur, malheureusement répandue en Génie Civil que de vouloir résoudre de nombreux problèmes par analyse chimique. Or la plupart des propriétés des matériaux sont liées aux minéraux et non aux éléments chimiques et c'est bien l'analyse diffractométrique qu'il faut choisir.

## **4.2 Rhéologie et point de saturation**

La rhéologie des BPR est semblable à celle des bétons à hautes performances (BHP). Elle est étroitement liée à l'utilisation des superplastifiants. Le comportement rhéologique des BPR varie rapidement dans le temps car il est influencé par les caractéristiques physico-chimiques et minéralogique de la matrice (phase liante).

Les essais visant la détermination des temps d'écoulement sont réalisés à l'aide du cône de Marsh. Les coulis utilisés ont été testés en utilisant un superplastifiant à base de polycarboxylates.

Ces essais permettent d'évaluer la compatibilité ciment/superplastifiant et de déterminer le point de saturation en ce superplastifiant. Le point de saturation correspond au dosage minimum au-delà duquel toute addition supplémentaire de superplastifiant n'affecte en aucune façon la fluidité des mélanges.

Le malaxage des coulis est obtenu dans un malaxeur de capacité de 5 litres à axe vertical selon le mode opératoire suivant :

- Mettre le malaxeur en rotation à vitesse lente (140 t/min)
- Introduire la quantité d'eau nécessaire additionnée de la moitié du superplastifiant
- Introduire le liant (ciment avec ou sans ajouts) dans l'eau en cours d'agitation
- Malaxer pendant 2 minutes à vitesse lente.
- Ajouter l'autre moitié du superplastifiant et malaxer pendant 2 minutes à vitesse rapide (280 t/min)

Après l'arrêt total du malaxeur, le coulis est déversé dans le cône, tout en maintenant fermée sa buse d'écoulement. Avant toute mesure, on laisse d'abord s'écouler librement quelques gouttes de coulis afin de chasser l'eau résiduelle.

Au moment de l'essai, on ouvre la buse et on enregistre à l'aide d'un chronomètre, le temps d'écoulement, à travers un orifice de diamètre  $\varnothing = 10$  mm, correspondant au remplissage d'un récipient de capacité de 1 litre (voir Annexe photo 1). Ce temps, exprimé en secondes, détermine la fluidité du coulis.

### **4.3 Mesure de la maniabilité**

La caractérisation de la maniabilité d'un BPR ne peut pas être faite par la mesure traditionnelle de l'affaissement car celle-ci n'est pas représentative du comportement rhéologique du BPR lors de sa mise en œuvre, du fait qu'il présente un caractère thixotropique très élevé. Il est conseillé de mesurer la maniabilité des BPR par une méthode dynamique comme le maniabilimètre à mortier (LCPC type B, voir annexe photo2).

La mesure de la maniabilité est déterminée, selon le mode opératoire suivant :

- Introduire le mélange dans la partie la plus grande délimitée par la cloison et mis en place par piquage en couches.
- Retirer la cloison, ce qui provoque la mise en route du vibreur. Sous l'effet de la vibration le mélange s'écoule.
- Déclencher le chronomètre
- Arrêter le chronomètre quand le mélange atteint le trait repère sur la paroi opposée du boîtier.

Le temps écoulé pour atteindre ce repère, caractérise la maniabilité du mortier testé.

#### 4.4 Masse volumique

La mesure de la masse volumique du béton frais s'effectue comme suit :

- Remplir un récipient de volume  $V$  et de masse  $M_0$  d'un échantillon de béton frais, en deux couches, chaque couche est vibrée durant 30 secondes.
- Araser et lisser la surface du béton à l'aide d'une truelle,
- Peser le récipient rempli, soit  $M$  sa masse.

La masse volumique du béton frais est donnée par :

$$\rho_{app} = \frac{M - M_0}{V} \quad (\text{g/cm}^3)$$

#### 4.5 Malaxage des bétons avec et sans ajouts

La confection des bétons de poudres réactives se fait dans un malaxeur de 20 litres à axe vertical (voir Annexe photo 3) comme suit :

- Malaxage des poudres à l'état anhydre.....1 minute
- Introduction de l'eau et de la moitié de l'adjuvant et malaxage.....2 minutes
- Fluidification du mélange avec l'introduction de la seconde partie de l'adjuvant (après 2 minutes) et malaxage .....3 minutes
- Malaxage final.....2 à 3 minutes

## 4.6 Mise en place des bétons

Les BPR confectionnés selon le mode décrit précédemment sont mis dans des moules à trois compartiments de  $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$ . Le serrage dans les moules est obtenu en introduisant le mélange en deux couches soumise chacune à 60 chocs (voir Annexe photo 4). Les moules sont ensuite arasés et recouvert d'un film en plastique pour éviter l'évaporation d'eau libre.

Après 24 heures on procède au démoulage. Les éprouvettes sont alors immergées dans des bacs d'eau régulés en température à  $20^\circ\text{C}$ . La cure est un processus de maintien d'une humidité satisfaisante et d'une température favorable dans le béton, durant la période d'hydratation du ciment. Les corps d'épreuve sont retirés de l'eau aux moments des essais.

## 4.7 Essais mécaniques

### 4.7.1 Essai de traction par flexion trois points

Les essais mécaniques en traction et en compression (voir Annexe photos 5 et 6) ont été réalisés conformément à la Norme EN 196-1 sur des éprouvettes ( $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$ ).

La résistance à la traction par flexion est déduite à partir du schéma statique suivant :

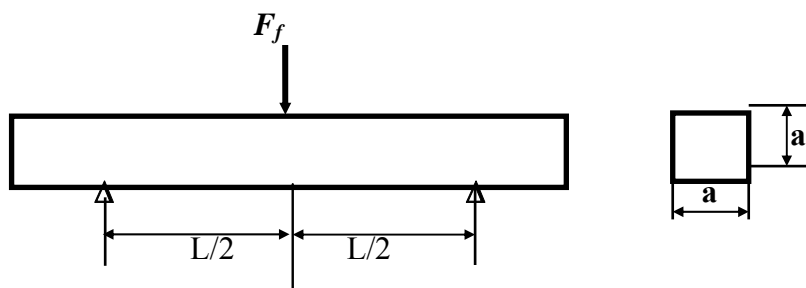


Tableau 4-1 : Schéma de l'essai de traction par flexion 3 points

La résistance à la flexion est donnée par:

$$R_t = 0.66R_f \quad \text{Avec} \quad R_f = 1.5F_f l / a^3 \quad [68]$$

$F_f$  : charge appliquée

$a$  : arrête du cube

$L$  : longueur = 100 mm.

#### 4.7.2 Essai de compression

Quant à la résistance en compression, elle est déterminée sur les six demi-prismes, de 40 mm de côté, issues des essais de flexion.

$$R_c = p_{\max} / A$$

Où :  $R_c$  : résistance à la compression (MPa)

$P_{\max}$  : charge maximale de compression (N)

$A$  : aire de la section chargée (mm<sup>2</sup>)

## CHAPITRE 5 CARACTÉRISTIQUES ET IDENTIFICATION DES MATÉRIAUX

Le présent chapitre traite de l'identification physico-chimique, mécanique et minéralogique des matériaux utilisés à l'état anhydre et hydratés

### 5.1 Caractérisation des matériaux anhydres utilisés

Les matériaux utilisés dans le cadre de ce travail sont :

- Ciment Portland : Ciment algérien du type CEM II/A.
- Chaux : Chaux pure de laboratoire.
- Sable siliceux des dunes non broyé (Boussaâda, Algérie) (**SD**) ;
- Fumée de silice (**FS**) (Canada) ;
- Laitier des hauts fourneaux (El Hadjar, Algérie) (**LH**) ;
- Sable siliceux des dunes broyé (Boussaâda, Algérie) (**SD**);
- Superplastifiant de nature Polycarboxylates (**SP**);
- Eau;
- Fibres d'acier.

#### 5.1.1 Le ciment Portland

Nous avons effectué nos travaux de formulation des BPR avec un ciment composé de classe 42,5 MPa du Type CEM II/A. produit par la cimenterie ACC de M'SILA.

Les principales propriétés et caractéristiques physico-chimique, minéralogique et mécaniques du ciment utilisé sont présentées dans les tableaux suivants :

**Tableau 5-1 : Caractéristique physique du ciment.**

Masse volumique réelle	[g/cm <sup>3</sup> ]	3.04
Masse volumique apparente	[g/cm <sup>3</sup> ]	1.04
Surface Blaine	[cm <sup>2</sup> /g]	3605
Consistance normale		25 - 27.5
Expansion		0.75
Début et fin de prise	[min]	DP : 162 FP : 226

**Tableau 5-2 : Caractéristiques chimiques du ciment**

Eléments dosés	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO*	MgO	SO <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	P,F	Cl-	R,Ins
%	19.35	3.5	3.09	62.31	1.82	1.9	0.16	0.59	5.98	0.019	1.59

*CaO\* : une partie de la chaux (soit 6.53%) est combinée dans CaCO<sub>3</sub>*

**Tableau 5-3 : Composition minéralogique du ciment (Bogue)**

Composition	C <sub>3</sub> S	βC <sub>2</sub> S	C <sub>3</sub> A	C <sub>4</sub> AF	CŠH <sub>2</sub>
%	47	20	4	9.4	4

**Tableau 5-4 : Propriétés mécaniques du ciment**

Compression (MPa)			Flexion (MPa)		
2j	7j	28j	2j	7j	28j
20.0	34.1	45.9	4.4	6.7	8.4

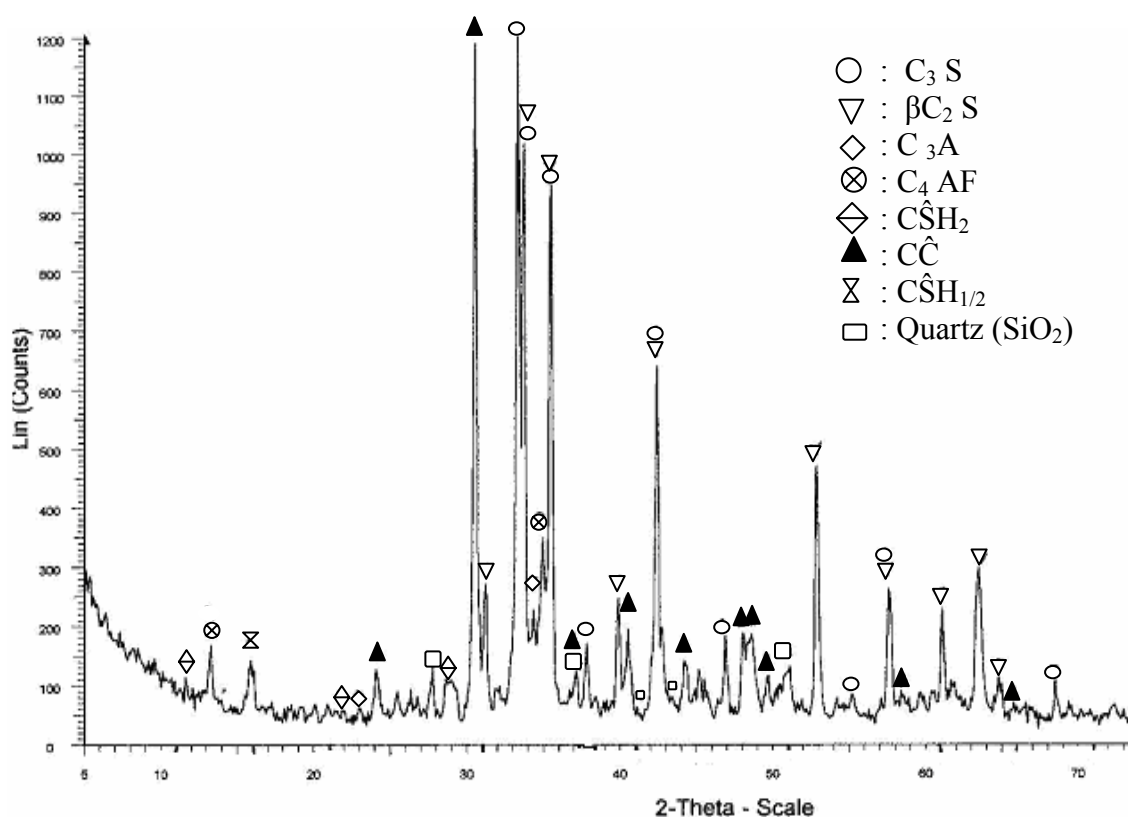


Figure 5-1 : Diffractogramme X du ciment anhydre utilisé

L'identification du diffractogramme X à partir des fiches ASTM montre que notre ciment est formé des minéraux suivants :  $C_3S + \beta C_2S + C_3A + C_4AF + C\hat{S}H_2 + C\hat{C}$

En conformité avec l'analyse chimique le diffractogramme X met en évidence la présence de carbonate de calcium ( $CaCO_3$ ) sous forme calcite. Cette dernière est ajoutée au ciment portland pour former un ciment composé du type CPJ42.5.

Le ciment de ce type est un ciment à faible chaleur d'hydratation. Cette dernière est attribuable aux faibles teneurs en  $C_3S$  et  $C_3A$ . Par conséquent ce ciment est peu réactif à court terme.

La teneur maximale en aluminat tricalcique est de 4 %, car le  $C_3A$  est la phase qui dégage plus de chaleur lors de son hydratation. La quantité maximale de  $SO_3$  est comprise entre 1.92 et 2.03 %. En ce qui concerne la teneur en alcalis, la limite maximale est de 0,8 %.

La faible chaleur d'hydratation des ciments de Type CPJ 42.5 constitue leur principal avantage pour fabriquer des bétons de masse. Par contre leur prise et leur durcissement sont relativement lents.

Compte tenu de sa composition chimique; présence d'une forte teneur en CaO non combinée tableau 5-2, et minéralogique ; présence de raies de calcite figure 5-1, ce type de ciment est bien un ciment composé à base de clinker et de calcaire.

### 5.1.2 La chaux

La chaux utilisée est une chaux pure de laboratoire de par l'apparition des seules raies de  $\text{Ca(OH)}_2$  sur le diffractogramme X.

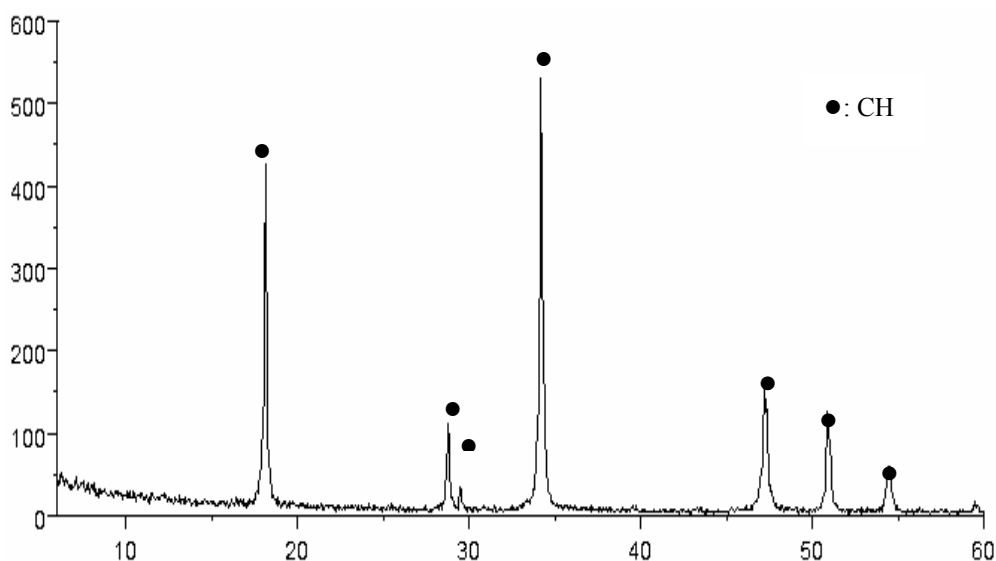


Figure 5-2 : Diffractogramme X de la chaux utilisée

Cette chaux a une finesse supérieure à  $10.000 \text{ cm}^2/\text{g}$  qui dépasse les limites tolérées par la méthode Blaine.

### 5.1.3 Les ajouts

A l'exception de la fumée de silice qui est de provenance canadienne, les ajouts utilisés (LH, SD) sont d'origine locale (algérienne). Les données chimiques et physiques des

différents ajouts minéraux utilisés pour la fabrication des BPR sont résumées dans les tableaux 5.5 et 5.6.

**Tableau 5-5 : Composition chimique des ajouts minéraux utilisés.**

Eléments dosés	Pourcentage massique		
	Fumée de silice (FS)	Sable broyé (SD)	Laitier broyé (LH)
SiO <sub>3</sub>	96.00	94.90	39.59
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.90	1.48	9.73
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.6	0.48	3.56
CaO	1.58	0.90	41.23
Na <sub>2</sub> O	0.17	0.10	0.01
K <sub>2</sub> O	0.96	0.20	0.58
MgO	0.2	0.97	3.38
SO <sub>3</sub>	0.45	0.03	0.67
Perte au feu	/	/	-1.33
Cl <sup>-</sup>	/	/	0.007
R, Ins	/	/	/

De par sa composition chimique, la FS serait de **Classe A** conformément à la norme NF P18-502 vu qu'elle renferme plus de 85% de SiO<sub>2</sub>. Néanmoins sa teneur en CaO est supérieure à 1.2 proscrit par la dite norme.

**Tableau 5-6 : Caractéristique physique des ajouts minéraux utilisés.**

	Fumée de silice	Sable broyé	Laitier broyé
Masse volumique réelle [g/cm <sup>3</sup> ]	2.20	2.62	2.82
Masse volumique apparente [g/cm <sup>3</sup> ]	0.5	1.45	1.07
Surface Blaine [cm <sup>2</sup> /g]	/	5873	3350
Surface B.E.T [cm <sup>2</sup> /g]	200 000	/	/

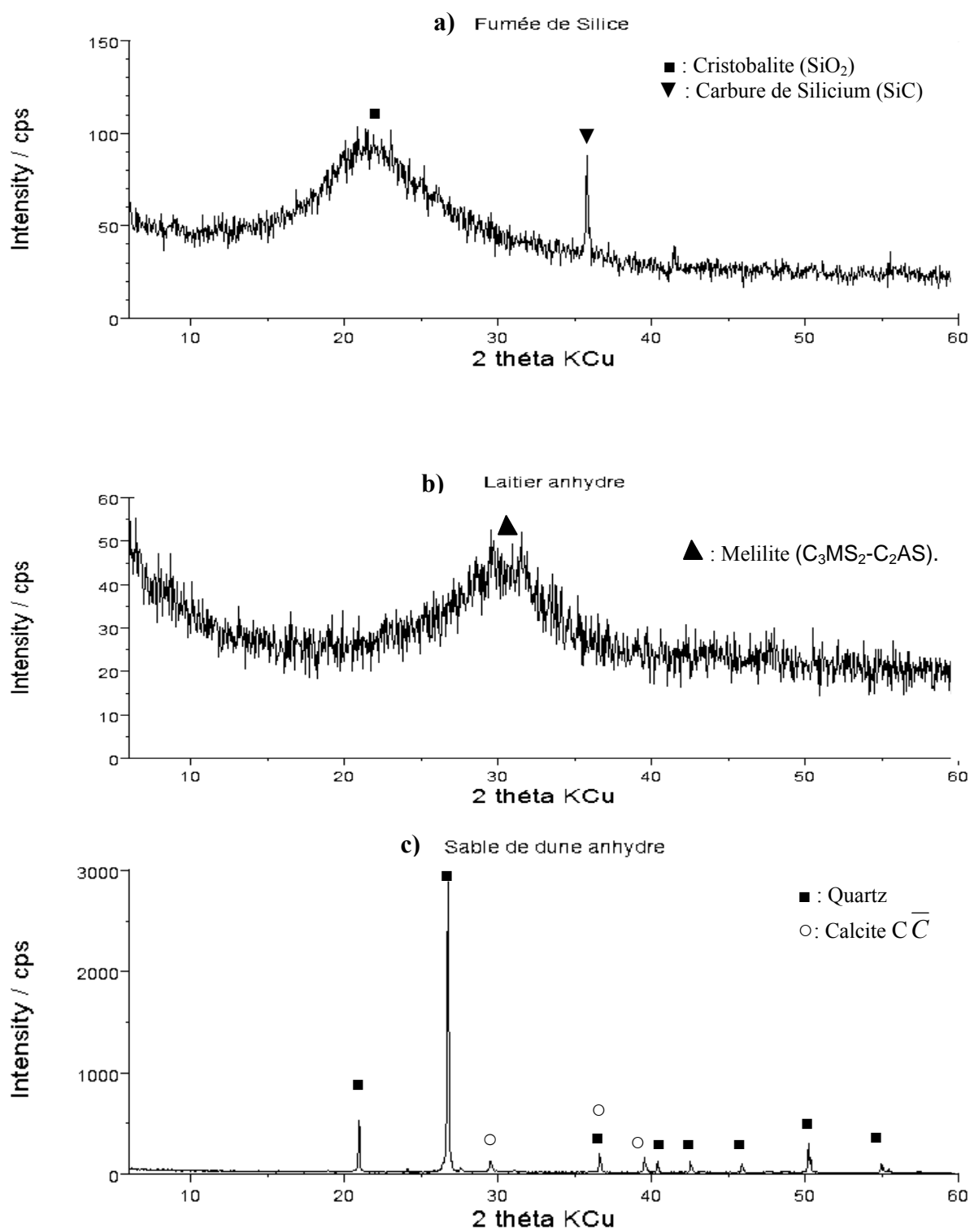


Figure 5-3 : Diffractogrammes X des ajouts utilisés a) : FS - b) : LH - c) : SD)

Les diffractogrammes X des différents ajouts (Fumée de Silice, laitier et Sable des dunes) sont illustrés sur la figure 5-3.

L'examen des diffractogrammes X de cette figure montre que :

- La Fumée de Silice présente une structure amorphe caractérisée par un important halo centré à  $4.04 \text{ \AA}^\circ$  correspondant à la raie principale de la *Cristobalite*, forme la plus proche thermodynamiquement du verre de silice. Néanmoins elle contient une faible quantité de carbure de silicium (SiC) cristallisé résultant de la réaction chimique entre le mono-oxyde de silicium (SiO) et le carbone (C) de la charge, dans la zone la plus chaude, au dessus des électrodes du four [8]. Le SiO, étant thermodynamiquement instable dans cette zone ( $T=1000^\circ\text{C}$ ) a tendance à se transformer en silicium (Si) et dioxyde de silicium ( $\text{SiO}_2$ ) selon la réaction :



Par contre, en présence de carbone, la réaction (1) s'effectue autrement :



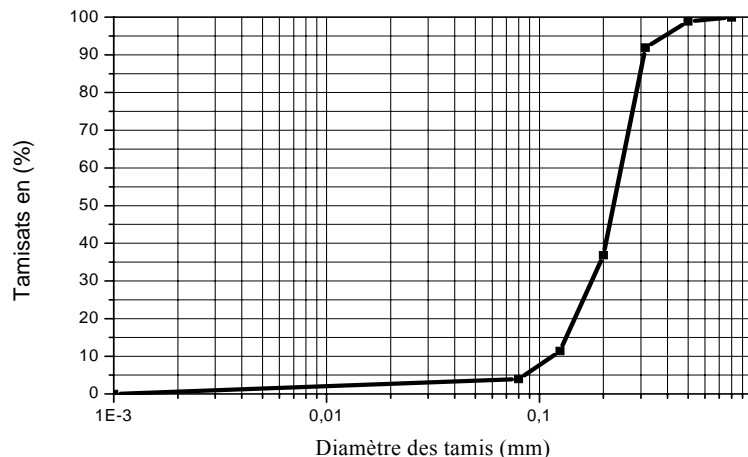
Le carborundum SiC est présent inévitablement dans toutes les fumées de silice issues des dépoussiérages des fours élaborant des alliages de silicium (Si) ou de ferro-silicium (FeSi) [53].

- Le Laitier présente une structure amorphe, de par le halo centré à  $30^\circ$  2théta correspondant à la *Ménilite* de formule :  $\text{C}_3\text{MS}_2\text{-C}_2\text{AS}$
- Le Sable des dunes finement broyé présente une structure siliceuse cristallisée du type *low-quartz* :  $\text{SiO}_2$

#### 5.1.4 Le sable

Nous avons utilisé un sable naturel siliceux de dunes de la région de BOUSSAADA dont la composition chimique et forme allotropique sont données dans le tableau 5.5 et figure 5-3c.

La granulométrie de ce sable est présentée dans la figure 5.7.



**Tableau 5-7 : Courbe granulométrique du sable de dunes**

Le Module de finesse du sable =  $\Sigma$ refus cumulés /100 sur les tamis 0.16 -0.315- 0.63 est de 0.95  $\rightarrow$   $M_f = 1$  ; caractéristique des sables très fins.

De par sa faible finesse à l'état naturel son utilisation sera très économique pour la confection des BPR vu qu'il ne nécessite pas de broyage préalable. De plus il présente une forme sphérique qui est un avantage supplémentaire comparé à ceux issus du broyage, qui présentent une forte angularité. Cette sphéricité leur confère une faible exigence en eau. De plus le broyage induit des microfissures dans les grains et du coup réduisent les résistances mécaniques des mélanges auxquels ils sont incorporés.

### 5.1.5 Les adjuvants

L'adjuvant utilisé est un superplastifiant à base de polycarboxylates, commercialisé par la société GRANITEX. Les caractéristiques de ce superplastifiant sont présentées dans le tableau 5.8.

**Tableau 5-8 : Caractéristiques du superplastifiant.**

Type	MEDAPLAST flow SP 30
Forme	Liquide
Couleur	Jaunâtre
Densité	1.07
PH	6-6.5
Teneur en chlore	< 1g/l

### 5.1.6 Les fibres d'acier

Les fibres utilisées ont été découpées par nos soins à partir de fil d'acier lisse de diamètre  $D = 0.2$  mm dont le module d'élasticité est de 210 GPa.

Ces fibres sont droites et ont une longueur  $L = 13$  mm et un élancement :  $L/D = 65$ .

### 5.1.7 L'eau de gâchage

Pour les coulis et les bétons que nous avons fabriqués, nous avons utilisé l'eau du robinet qui n'a subi aucun traitement particulier.

## 5.2 Caractérisation minéralogique des mélanges en pâte de chaux par DRX

Après avoir déterminé les caractéristiques physico- chimiques et minéralogiques des constituants à l'état anhydre, nous nous sommes intéressés à l'évolution de l'hydratation des mélanges en pâte par analyse diffractométrique aux rayons X.

A cet effet nous avons utilisé six combinaisons ternaires pour mettre en évidence la cinétique de fixation de la chaux par les ajouts siliceux en pâte de chaux.

Les pâtes ont été confectionnées par gâchage manuel puis conservées dans des tubes en PVC fermés hermétiquement et conservés dans une salle régulée en température à 20°C.

A l'échéance fixée, une partie de la pâte est broyée en poudre très fine (à une finesse telle que le diamètre maximum des grains reste inférieur à 40  $\mu\text{m}$ ) pour être testée par DRX.

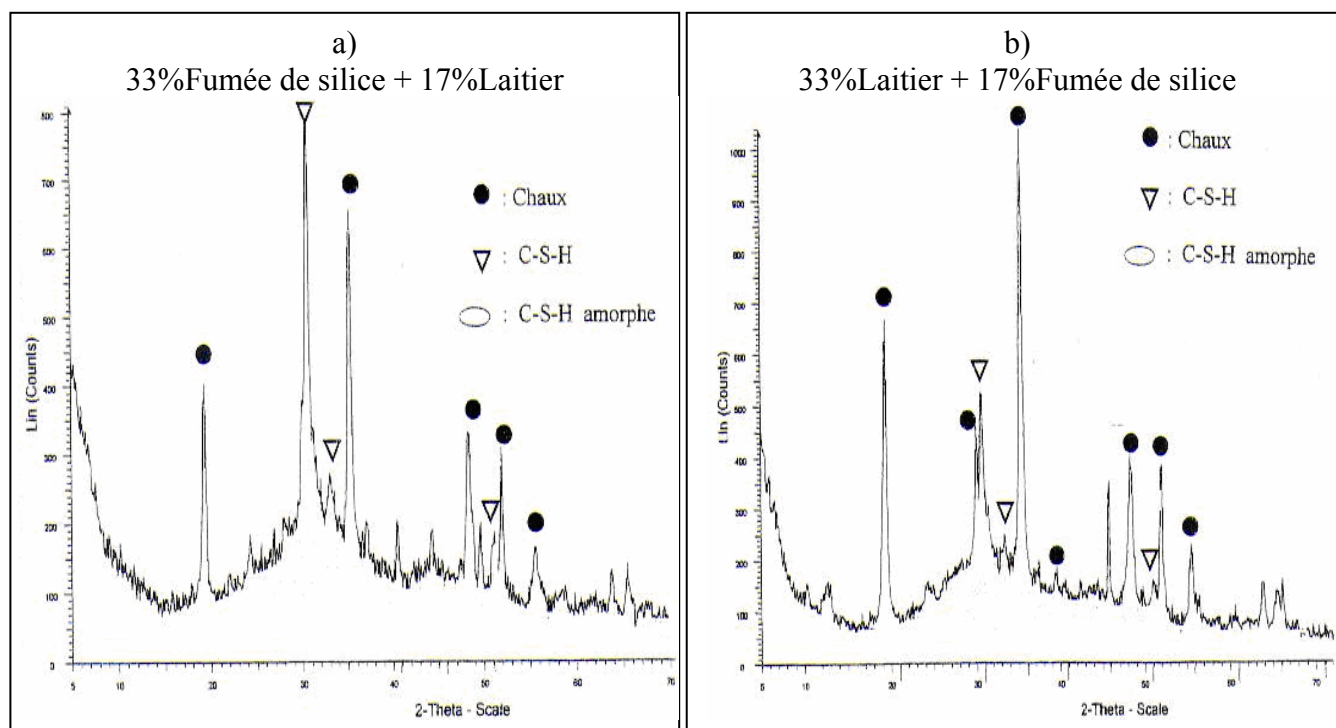
Les combinaisons utilisées sont résumées dans le tableau 5-.

**Tableau 5-9 : Combinaisons binaires des ajouts dans les mélanges.**

AJOUTS	FS +SD		FS +LH		SD+LH	
<b>Combinaisons</b>						
<b>50% Chaux</b>	33%FS	17%FS	33%FS	17%FS	33%SD	17%SD
+	+	+	+	+	+	+
<b>50% Ajouts</b>	17%SD	33%SD	17%LH	33%LH	17%LH	33%LH

Afin de mettre en évidence la réactivité pouzzolanique des ajouts siliceux utilisés, nous avons mené une étude par diffractométrie aux rayons X sur des pâtes contenant 50% de chaux pure + 50% d'ajout. La méthode expérimentale est décrite au chapitre 4.

Les résultats de ces analyses après deux mois d'hydratation sont présentés dans la figure 5-4.



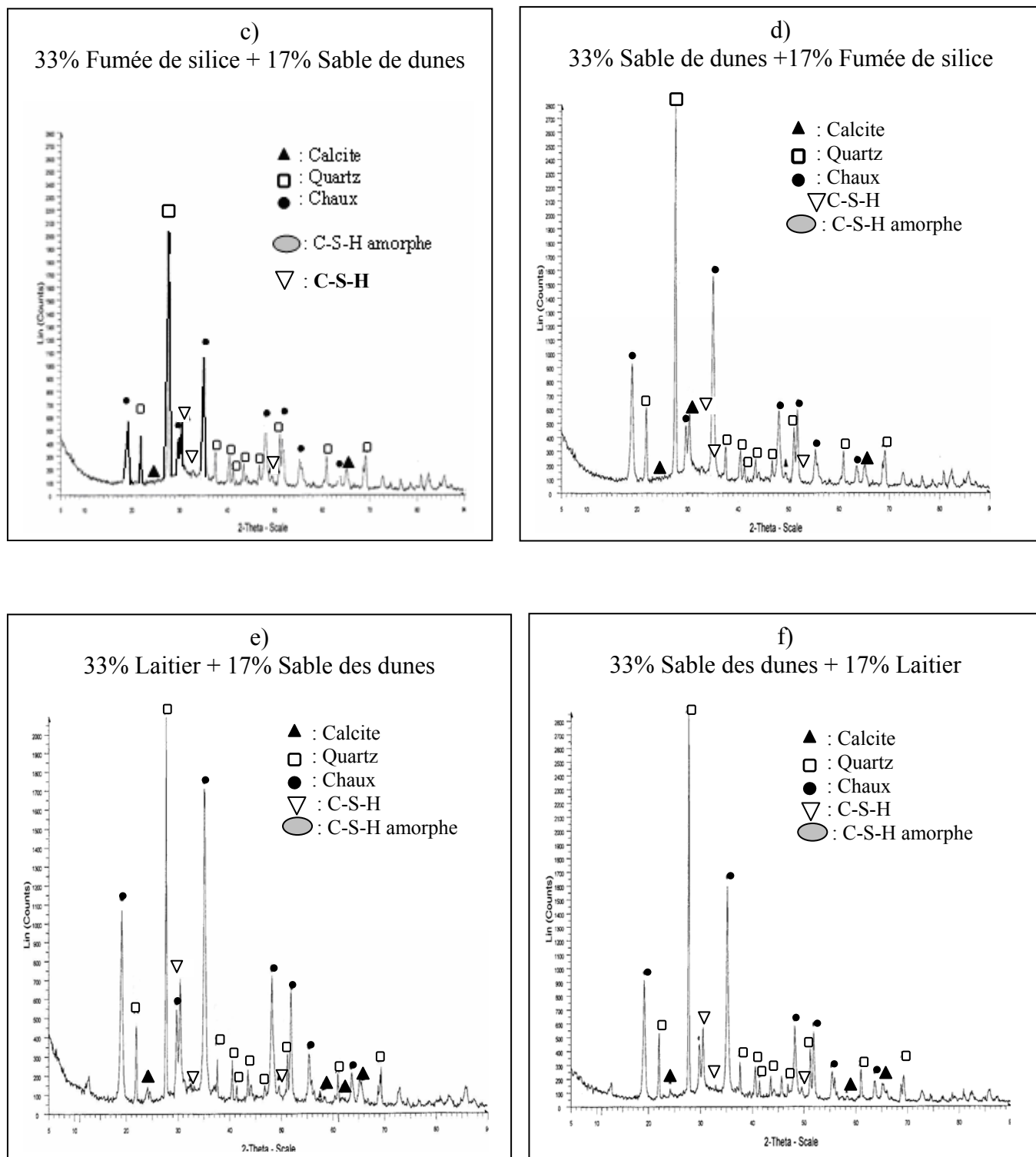


Figure 5-4 : Diffractogrammes X des mélanges étudiés à deux mois d'hydratation

A deux mois d'hydratation, les diffractogrammes X des mélanges à base d'ajouts mettent en évidence la forte réactivité des matériaux amorphes (FS et LH).

L'intensité des raies de la chaux diminue en fonction des ajouts utilisés, traduisant ainsi leur fixation par les grains de silice (réaction pouzzolanique) pour former des C-S-H selon la réaction :



Cela est aussi caractérisé par des halos centrés sur les raies des C-S-H.

Les C-S-H obtenus sont semi cristallisés et sont caractérisés par les réflexions  $hk0$  :  $3.06 \text{ \AA}$  (220);  $2.80 \text{ \AA}$  (400);  $1.83 \text{ \AA}$  (040). De plus la surface des halos est d'autant plus grande que les mélanges contiennent de fortes teneurs en FS. Cette dernière est reconnue pour sa forte réactivité pouzzolanique [39] due à sa finesse élevée et sa haute teneur en silice ( $\text{SiO}_2$ ).

Cependant elle contient une faible quantité de SiC cristallisée dont l'intensité de sa raie principale reste constante traduisant ainsi son inertie lors de l'hydratation des pâtes.

La réactivité pouzzolanique du sable de dune est partielle et moins importante que celle du laitier broyé, puisque ce dernier présente une structure amorphe contrairement à celle du sable de dune broyé qui est cristallisé.

On peut conclure que la silice amorphe est capable de fixer des quantités importantes de chaux dans le rapport  $\text{CaO/SiO}_2 > 1$ . Ce qui est confirmé par la faible teneur en silice contenue dans le laitier.

Ces résultats sont très intéressants dans la technologie des bétons. Ils permettent d'améliorer les performances des bétons suite à la fixation de la portlandite sous forme de C-S-H de seconde génération. De plus ces bétons s'obtiennent à moindre coût vu que les ajouts siliceux (laitier et sable des dunes) sont abondants en Algérie.

## CHAPITRE 6 COMPORTEMENT RHEOLOGIQUE DES BPR

La principale difficulté rencontrée lors de la formulation des bétons adjuvantés réside dans la mesure du couple (ciment, superplastifiant). Ce dernier doit permettre une réduction maximale de la quantité d'eau de gâchage tout en garantissant une bonne ouvrabilité et une rhéologie satisfaisante pendant le temps de mise en oeuvre.

La complexité du mode d'action des superplastifiants rend difficile la compréhension de l'évolution théorique de son potentiel. La meilleure façon d'évaluer la compatibilité d'un superplastifiant avec un ciment est d'étudier directement les caractéristiques et le comportement rhéologique d'un coulis à base de ces deux matériaux (ciment et superplastifiant) [2].

Ce chapitre traite de l'analyse du comportement rhéologique de différents coulis de ciment. L'objectif principal est de déterminer le dosage en superplastifiant au point de saturation pour le coulis de ciment. Ce dernier étant substitué, à raison de 15% de son poids, par différentes combinaisons d'ajouts siliceux comme décrit au tableau 6-1.

### 6.1 Détermination des points de saturation sur coulis

Dans le but d'analyser le comportement rhéologique des coulis de ciment avec et sans ajouts (FS, LH, SD), nous avons mesuré leur temps d'écoulement à l'aide du cône de Marsh. Cette méthode permet de déterminer le dosage en super plastifiant au point de saturation qui correspond à la quantité minimale en superplastifiant nécessaire pour assurer la meilleure dispersion des grains du ciment.

Ce dosage minimum en superplastifiant, au delà duquel la fluidité du coulis n'est plus affectée, coïncide avec le plus faible temps d'écoulement.

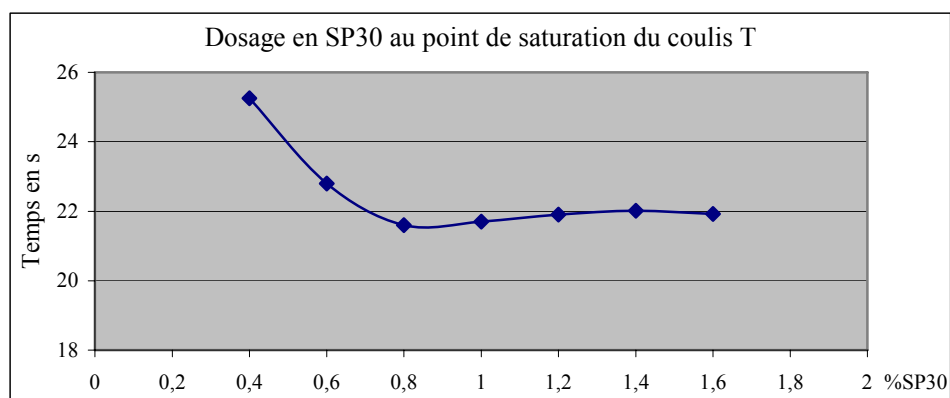
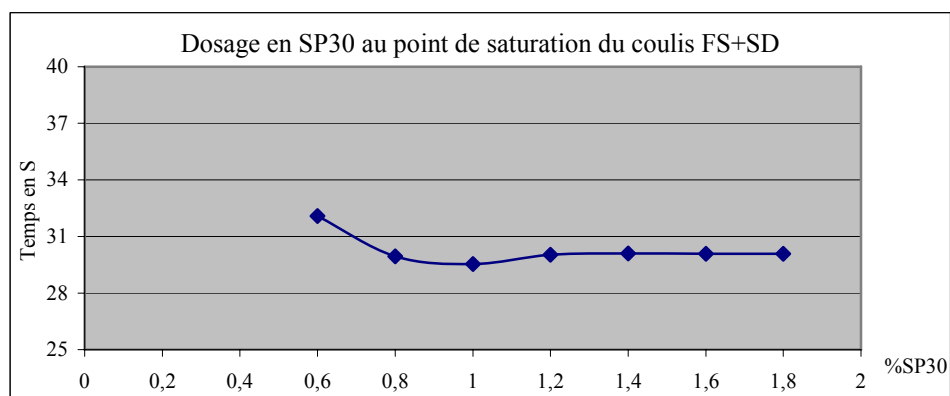
Les essais ont été réalisés pour différents pourcentages, en extrait sec, du superplastifiant conformément au mode opératoire décrit au chapitre 4.

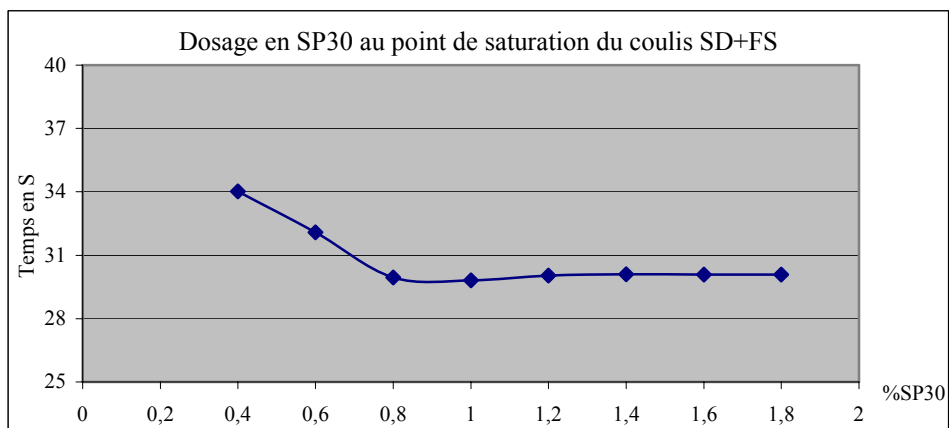
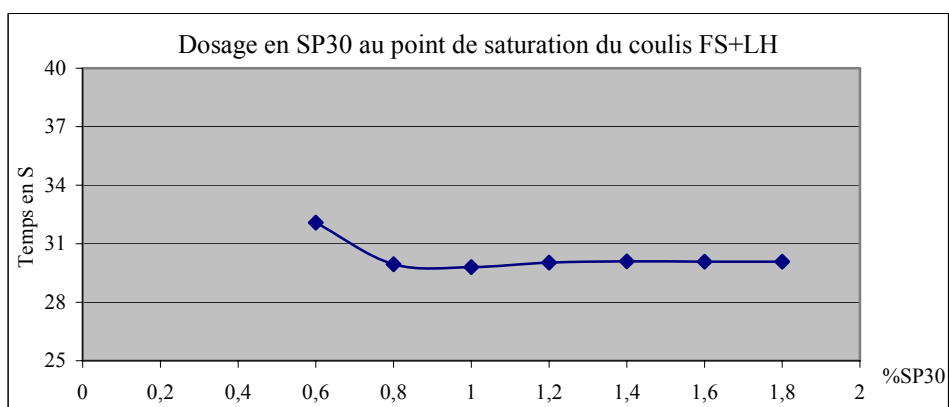
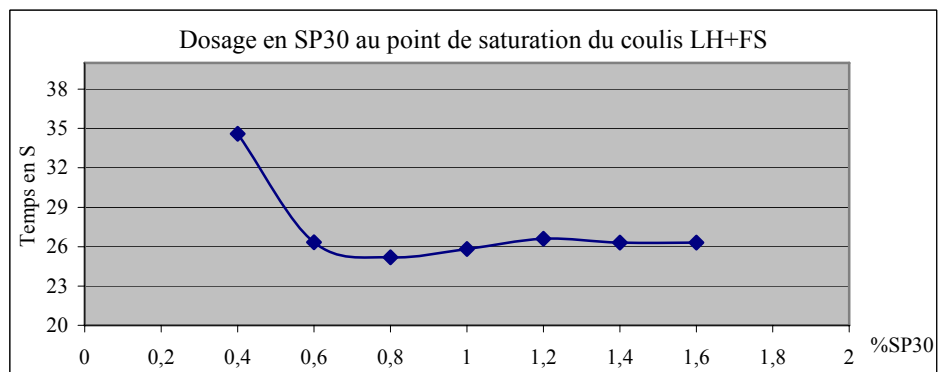
Les différentes compositions des coulis étudiées sont résumées dans le tableau ci après :

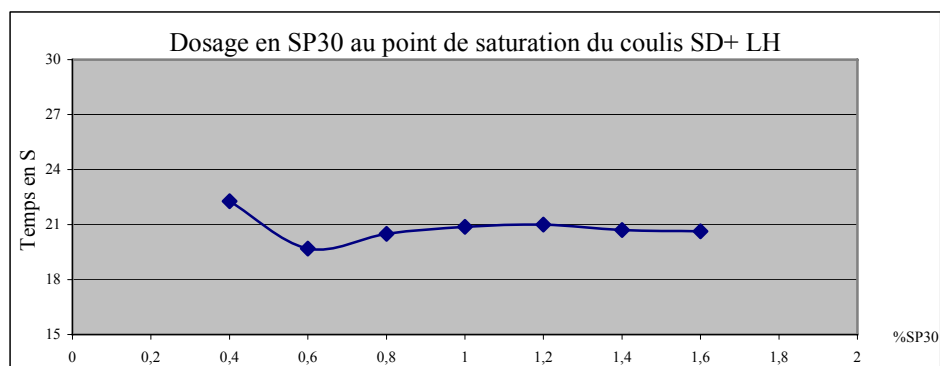
**Tableau 6-1 : Composition des coulis avec et sans ajouts T, FS, LH et SD**

	E/C	C (g)	Ajouts		SP30 (%)
			10%	5%	
Témoin (T)	0,35	2000	0	0	0.8
10%FS + 5%SD	0,35	1700	200	100	1
10%SD + 5%FS	0,35	1700	200	100	0.8
10%FS + 5%LH	0,35	1700	200	100	1
10%LH + 5%FS	0,35	1700	200	100	0.8
10%SD + 5%LH	0,35	1700	200	100	0.6
10%LH + 5%SD	0,35	1700	200	100	0.6

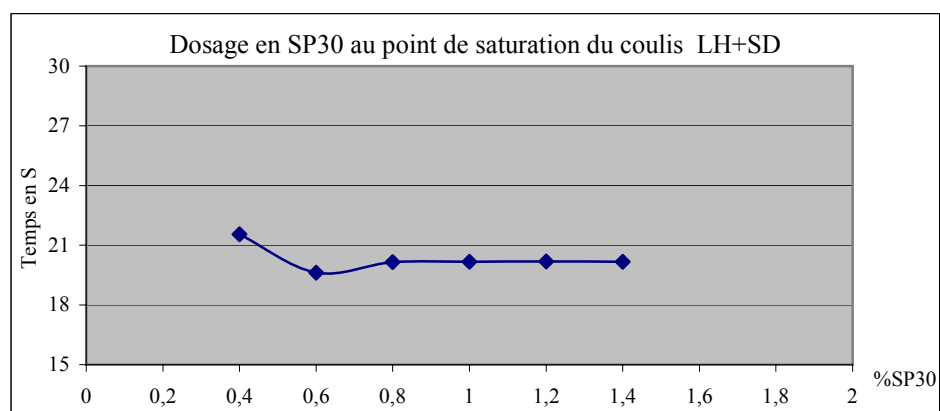
Les résultats des essais d'écoulement effectués sont illustrés dans la figure 6.1

**a) coulis sans ajout****b) coulis avec FS+SD**

**c) coulis avec SD+FS****d) coulis avec FS+LH****e) coulis avec LH+FS**



**f) coulis avec SD+LH**



**g) coulis avec LH+SD**

**Figure 6-1 : Temps d'écoulements des coulis avec et sans ajouts en fonction de dosage en superplastifiant**

Les FS réputées pour jouer un rôle de lubrifiant dans les mortiers à base de superplastifiant, perdent ce pouvoir lubrifiant lorsqu'elles sont densifiées. Les résultats trouvés au maniabilimètre LCPC ne concordent pas avec ceux trouvés par d'autres chercheurs [39].

Les résultats expérimentaux présentés dans la figure 6-1 montrent que :

- Le dosage en SP a une influence sur le temps d'écoulement des différents coulis de ciment avec et sans ajouts.
- Les points de saturation mesurés au cône de Marsh varient selon les constituants et la nature du coulis utilisé.
- Pour le coulis de ciment sans ajout (Témoin), le point de saturation est atteint à 0.8%. L'incorporation des ajouts réduit la demande en superplastifiant, étant donné, que

l'utilisation du coulis avec LH et SD (10%SD+5%LH et 10%LH+5%SD) nécessite un dosage au point de saturation de 0.6% seulement. Les temps d'écoulement mesurés sont plus faibles, notamment pour le coulis à base de Sable de dunes qui présente une finesse plus grande que celle du Laitier.

- Par ailleurs, bien que la quantité du ciment diminue avec l'incorporation de la FS dans la combinaison avec le SD ou le LH à un taux de 10%, le point de saturation augmente et est de l'ordre de 1%. Ceci est attribué, à la très grande finesse de celle ci dont le diamètre est 30 fois moindre comparé au LH et au SD broyés.

## 6.2 Composition des BPR

La formulation des bétons a été menée en vue d'obtenir un mélange de deux phases :

- la première phase est constituée d'un squelette granulaire inerte (sable)
- la deuxième phase est constituée d'une pâte liante (ciment, ajouts, eau et superplastifiant).

Dans le cas des BPR, on fait en sorte que le volume de la pâte soit supérieur d'au moins 20 % à l'indice des vides du sable non compacté. Cela revient à utiliser une quantité de sables par unité de volume inférieure à 0.83 fois la masse spécifique apparente du sable non compacté. Cette formulation de base, tel que préconisé par P.Richard et M.Cheyrezy [45], nous a permis d'obtenir une formulation à base de matériaux localement disponibles. Les BPR obtenus se caractérisent d'une part, par une bonne ouvrabilité et d'autre part par des résistances mécaniques élevées.

Les tableaux 6-1 et 6-2 résument les formulations adoptées pour la fabrication des BPR fibrés et non fibrés ainsi que leurs caractéristiques physico-mécaniques.

**Tableau 6-2 : Formulation et caractéristiques des BPR non fibrés**

BPR T	BPR1	BPR2	BPR3	BPR4	BPR5	BPR6
Composition des BPR (kg/m <sup>3</sup> )						

Ciment	882	750	750	750	750	750	750
Fumée de Silice	-	88	44	88	44	-	-
Sable broyé	-	44	88	-	-	88	44
Laitier broyé	-	-	-	44	88	44	88
Sable	1235	1235	1235	1235	1235	1235	1235
Superplastifiant	16	16	16	16	16	16	16
Eau	212	212	212	212	212	212	212
Caractéristiques du béton frais							
M.V (kg/m <sup>3</sup> )	2282	2192	2167	2200	2234	2176	2251
Écoulement (s)	5	9	5	11	5	4	4

**Tableau 6-3 : Formulation et caractéristiques des BPR fibrés**

	BPR T	BPR1	BPR2	BPR3	BPR4	BPR5	BPR6
Composition des BPR (kg/m <sup>3</sup> )							
Ciment	882	750	750	750	750	750	750
Fumée de Silice	-	88	44	88	44	-	-
Sable broyé	-	44	88	-	-	88	44
Laitier broyé	-	-	-	44	88	44	88
Sable Fin	1205	1205	1205	1205	1205	1205	1205
Superplastifiant	16	16	16	16	16	16	16
Eau	212	212	212	212	212	212	212
Fibres (13/0.2)	155	155	155	155	155	155	155
Caractéristiques du béton frais							
M.V (kg/m <sup>3</sup> )	2256	2239	2239	2246	2258	2257	2245
Écoulement (s)	6	11	7	12	7	6	6

### 6.2.1 Fabrication des mélanges

Tous les mélanges de ce projet ont été fabriqués à l'aide d'un malaxeur à mortier à axe vertical (voir Annexe photo 3) d'une capacité de 20 litres. L'eau et la moitié de superplastifiant sont mélangés et mis de côté. Les matériaux secs, mis à part les fibres d'aciers, sont mélangés uniformément dans le malaxeur. Le mélange d'eau et de superplastifiant est versé sur les matériaux secs. Le tout est mélangé jusqu'à consistance homogène. Les fibres d'aciers sont par la suite ajoutées lentement. Il est important d'exécuter cette étape graduellement afin de bien disperser les fibres et d'éviter qu'elles se forment des amas. Voir tableau 6-4 séquences de malaxage des mélanges :

**Tableau 6-4 : Séquence de malaxage des mélanges [56]**

Malaxage des poudres à sec	1 à 2 minutes
Introduction de l'eau et de la moitié de l'adjuvant et malaxage	2 minutes
Fluidification du mélange avec l'introduction de la seconde partie de l'adjuvant	3 à 10 minutes
Introduction des fibres	1 minute
Malaxage final	2 à 3 minutes

### 6.2.2 Essais de maniabilité

La nomenclature utilisée dans notre travail pour l'identification des formulations est représentée comme suit :

BPR T : formulation du béton témoin sans ajouts;

BPR1 : Béton avec 10% Fumée de Silice + 5% Sable des dunes, broyé ;

BPR2 : Béton avec 10% Sable des dunes broyé +5% Fumée de Silice ;

BPR3 : Béton avec 10%Fumée de Silice + 5% Laitier des Hauts Fourneaux ;

BPR4 : Béton avec 10% Laitier des Hauts Fourneaux + 5% Fumée de Silice ;

BPR5 : Béton avec 10% Sable des dunes broyé + 5% Laitier des Hauts Fourneaux ;

BPR6 : Béton avec 10% Laitier des Hauts Fourneaux + 5% Sable des dunes, broyé.

Pour les essais d'optimisation de la quantité de superplastifiant à base de polycarboxylates sur les BPR, nous avons utilisé un malaxeur à mortier classique. Cette optimisation a été effectuée à l'aide du maniabilimètre LCPC à mortier type B.

Nous avons travaillé avec différents pourcentages en superplastifiant et en eau, afin d'obtenir une maniabilité sensiblement constante.

**Tableau 6-5 : Maniabilité des bétons en fonction de dosage en SP30 avec E /L=0.20**

BPR T	BPR1	BPR2	BPR3	BPR4	BPR5	BPR6
-------	------	------	------	------	------	------

%SP	Temps d'écoulement						
	Terre humide	Terre humide	Terre humide	Terre humide	Terre humide	Terre humide	Terre humide
1.0	Terre humide	Terre humide	Terre humide	Terre humide	Terre humide	Terre humide	Terre humide
1.2	Boulettes de terre humide	Boulettes de terre humide	Boulettes de terre humide	Boulettes de terre humide	Boulettes de terre humide	Boulettes de terre humide	Boulettes de terre humide
1.4	> 7min	> 7min	> 7min	> 7min	> 7min	> 7min	> 7min
1.6	113 s	210 s	130 s	126 s	108 s	109s	109 s
1.8	108 s	179 s	134 s	119 s	100 s	98 s	99 s

Nos résultats (tableau 6-1) montrent que le comportement rhéologique est influencé par le dosage en superplastifiant. Plus le dosage augmente plus la consistance des mélanges diminue. Les temps d'écoulement restent cependant très élevés même après avoir atteint un dosage de 1.8% en superplastifiant. Dans un souci économique visant l'emploi des BPR sur chantier, nous avons alors conservé un dosage en adjuvant constant (1.8%) tout en augmentant la quantité d'eau de gâchage.

**Tableau 6-6 : Maniabilités des bétons étudiés en fonction de E/L avec 1.8% SP**

	BPR T	BPR1	BPR2	BPR3	BPR4	BPR5	BPR6
E/L	Temps d'écoulement (s)						
0.20	108	179	134	119	100	98	99
0.22	46	94	16	77	44	38	40
0.24	5	9	5	11	5	4	4

Les essais ont conduit à un optimum de 1.8% d'extrait sec en superplastifiant par rapport au poids du ciment avec un rapport E/L= 0.24.

## CHAPITRE 7 ETUDE DES PROPRIETES DES BPR

Le présent chapitre traite les procédures utilisées pour la fabrication des BPR, ainsi que les essais effectués pour l'étude de l'évolution des propriétés mécaniques en fonction de temps.

Les formulations avec et sans ajouts retenues pour réaliser ces essais sont celles illustrées dans les tableaux 6-1 et 6-2 du chapitre précédent.

### 7.1 Fabrication des éprouvettes

Pour chacun des mélanges, des éprouvettes destinées aux essais de compression, de traction par flexion (40x40x160 mm) ont été fabriquées. Ces éprouvettes ont été coulées dans les moules en deux couches et mises en place par vibration. Après malaxage des mélanges, on remplit les moules à trois compartiments de 4 x 4 x 16 cm. Le serrage dans le moule est obtenu en introduisant le mélange en deux couches et en appliquant 60 chocs à chaque couche (voir Annexe photo 4). Après quoi le moule est arasé et recouvert.

Suite au retard de durcissement la plupart des mélanges ont été démoulés après 24 heures. La cure est un processus de maintien d'une humidité satisfaisante et d'une température favorable dans le béton, durant la période d'hydratation du ciment. Après démoulage les éprouvettes sont immergées immédiatement dans l'eau. Elles sont alors retirées de l'eau aux moments des essais.

### 7.2 Mûrissement des éprouvettes

Suite à la mise en place, les éprouvettes ont été recouvertes d'une plaque (pellicule) plastique afin d'éviter toute évaporation d'eau. Ces précautions ont permis aux éprouvettes de subir une première cure de 24 heures. Après 24 heures, toutes les éprouvettes ont été démoulées et placées dans des bacs remplis d'eau, dans une chambre de mûrissement à température de  $20 \pm 2$  °C jusqu'au jour de l'essai. (Essai de compression et de flexion à 3, 7, 14, 28 et 90 jours).

### 7.3 Essais mécaniques

Afin de caractériser les bétons à l'état durci nous avons procédé à la détermination de leurs résistances mécaniques.

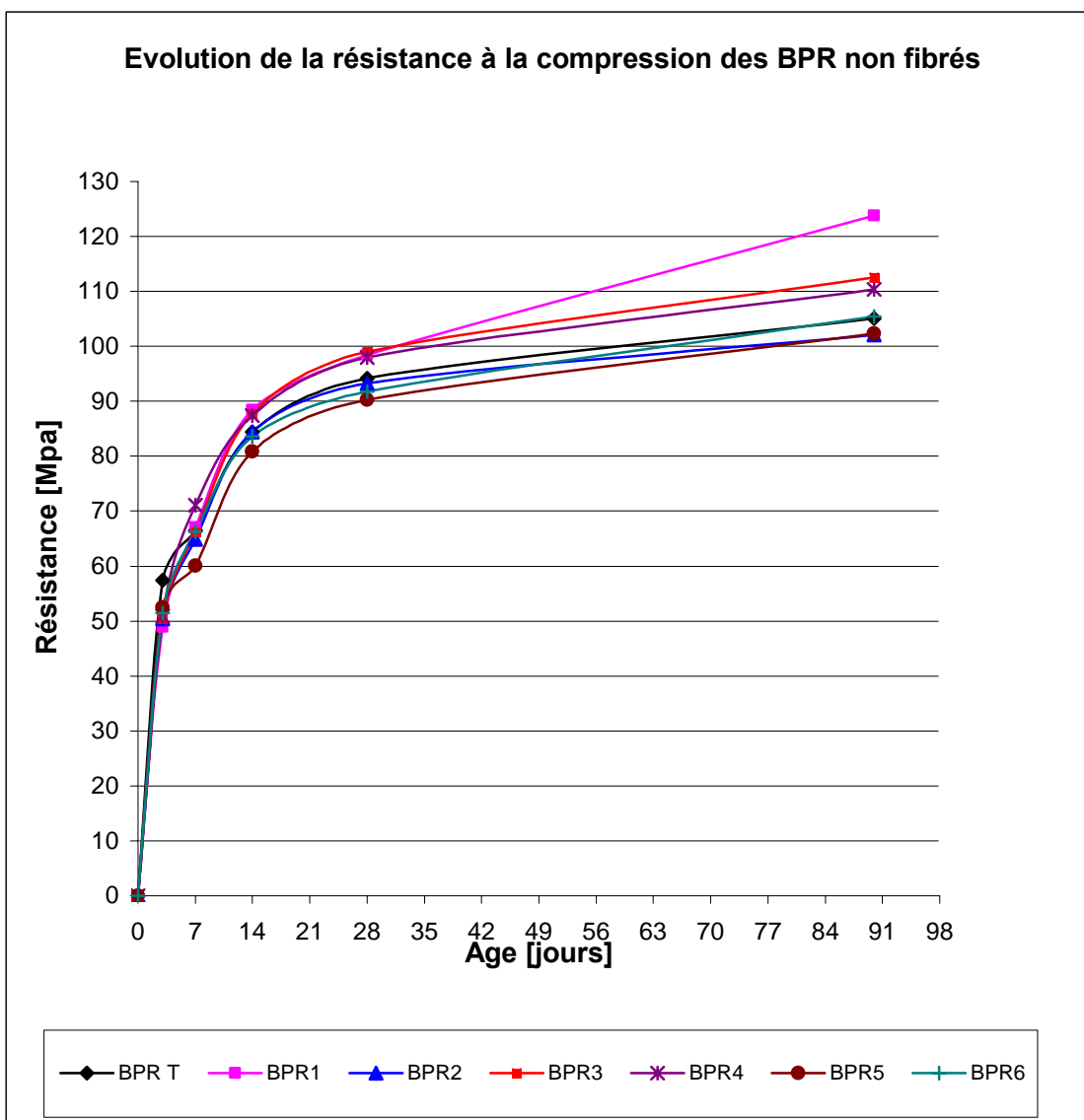
#### 7.3.1 Essai de résistance à la compression

La résistance à la compression,  $R_c$  (MPa), ne présente pas autant d'intérêt que la résistance à la flexion pour les matériaux cimentaires renforcés de fibres métalliques. Cependant, il est nécessaire de la mesurer puisqu'elle constitue une valeur de référence et de comparaison importante. Des cubes de 40x40x40 mm ont donc été soumis à des essais de compression. Seule la charge maximale  $P_{max}$  (N) a été enregistrée en prenant soin de conserver un taux de chargement fixe. La déformation de l'éprouvette n'a pas été prise en compte au cours de l'essai.

Les résistances à la compression obtenues sur des BPR fibrés et non fibrés, en fonction du temps, sont présentées dans les figures et les tableaux qui suivent.

Tableau 7-1 : Superposition des résultats en compression des bétons non fibrés et fibrés.

Age des bétons (jours)		Contrainte de compression exprimée en MPa				
		3j	7j	14j	28j	90j
BPR Témoin	BPR NF	57.45	66.50	84.46	94.21	105.10
	BPR F	52.3	61.72	82.29	92.53	102.42
BPR1	BPR NF	48.95	67.10	88.43	98.44	123.75
	BPR F	47.08	61.98	87.5	99.68	131.25
BPR2	BPR NF	50.41	64.90	84.37	93.22	102.08
	BPR F	48.54	58.33	82.56	95.83	130.73
BPR3	BPR NF	50.41	66.12	87.71	98.95	112.51
	BPR F	45.83	62.50	86.87	102.08	138.02
BPR4	BPR NF	50.83	71.04	87.35	97.91	110.41
	BPR F	45.62	65.86	86.46	101.04	136.3
BPR5	BPR NF	52.5	60.03	80.83	90.32	102.31
	BPR F	46.66	58.75	80.34	94.2	122.75
BPR6	BPR NF	51.45	66.25	83.60	91.81	105.42
	BPR F	44.58	62.40	80.20	96.92	123.39



**Figure 7-1 : Évolution de la résistance à la compression des bétons non fibrés**

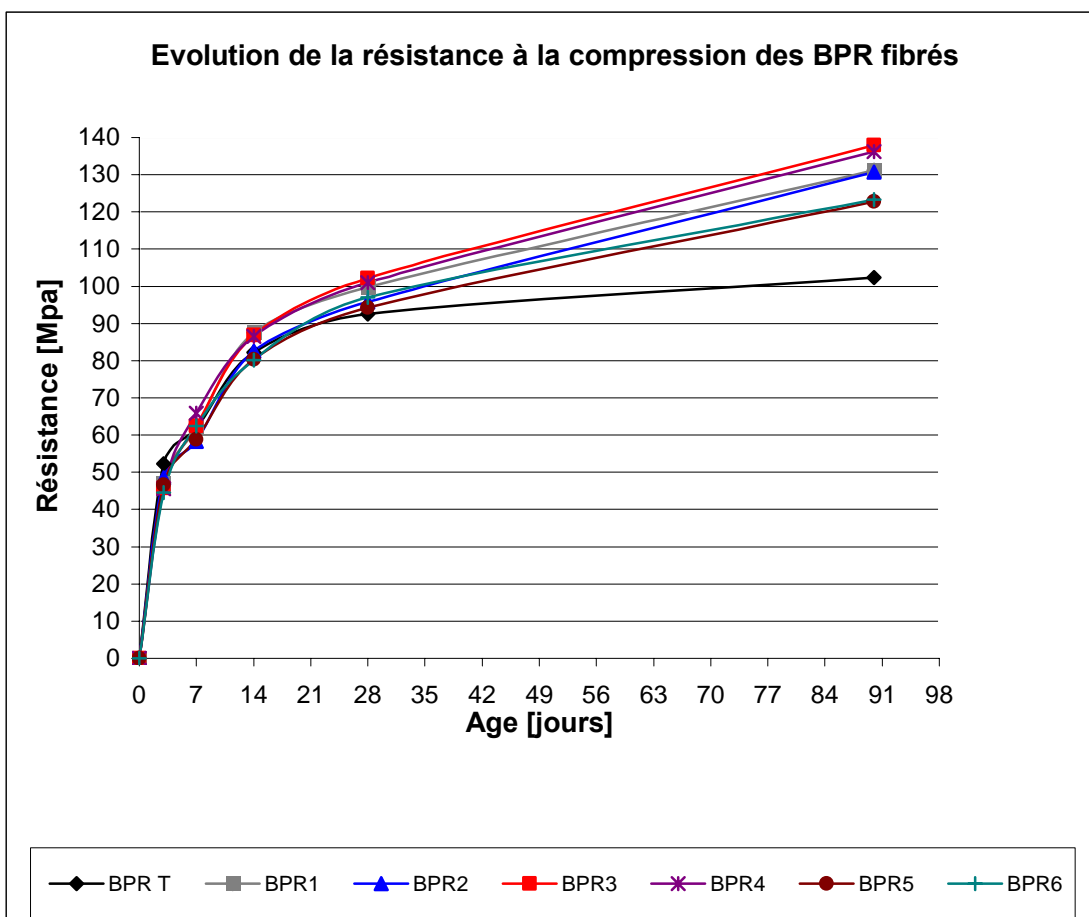


Figure 7-2 : Évolution de la résistance à la compression des bétons fibrés

La résistance en compression des BPR augmente en fonction du temps et ce indépendamment des ajouts utilisés et de la présence ou non de fibres.

Par contre des différences importantes apparaissent dans le comportement des BPR en fonction de la matrice cimentaire.

L'examen du tableau 7-1 qui est la compilation des différents résultats tirés à partir des courbes figure 7-1 et 7-2 nous a conduit aux remarques suivantes :

- Les bétons fibrés ont des résistances en compression nettement inférieures à celles des BPR fibrés sans ajouts [77].
- En présence d'ajouts l'ordre est inversé à partir de 28 jours et l'écart est d'autant plus important au 90<sup>ième</sup> jour.
- Les bétons à base d'ajouts ont des résistances mécaniques supérieures à celles du témoin à long terme.
- Les mélanges contenant des proportions élevées en ajouts de structure amorphe ont des résistances plus élevées traduisant une réactivité pouzzolanique plus importante.
- A 90 jours, les fines particules du SD participent à l'augmentation de la résistance en compression. Ceci traduit, le rôle pouzzolanique partiel du sable des dunes finement broyé bien qu'il soit cristallisé [78] [79].
- A 90 jours, un écart important de l'ordre de 20 MPa est constaté entre les BPR fibrés et non fibrés à base d'ajouts. La présence de fibres améliore la compacité de la matrice cimentaire. Ceci confère aux fibres une meilleure adhérence à la pâte de ciment durcie.

### **7.3.2 Essai de résistance à la flexion 3 points**

Les essais de flexion ont été réalisés sur des prismes de 40x40x160 mm à un taux de chargement de 50 N/s conformément à la norme EN 196-1. L'effort est appliqué par un seul appui au centre, le moment maximal se situe donc au droit de cet appui.

La résistance à la traction par flexion mesurée correspond à la contrainte maximale de traction à la base de l'éprouvette considérant une distribution uniforme de la contrainte le long de la section, elle est appelée module de rupture. Les hypothèses de calcul découlent de la

théorie des poutres, le module de rupture n'a plus de signification physique que ces hypothèses sont respectées. Dans le cas des essais de flexion sur poutrelles, on peut considérer que ces hypothèses sont respectées jusqu'à la fissuration de la matrice. Par la suite dans la partie post-fissuration, le module de rupture n'a pas de signification physique mais il demeure une valeur comparative de la résistance à la flexion.

Les essais de flexion les éprouvettes 40x40x160 mm (L = 100 mm) sont effectuées sur une presse d'une capacité de 160 kN.

**Tableau 7-2 : Superposition des résultats en traction des bétons non fibrés et fibrés.**

Age des bétons (jours)		Contrainte de traction exprimée en MPa				
		3j	7j	14j	28j	90j
BPR T	BPRNF	6.42	7.52	8.34	10.34	11.81
	BPRF	10.46	11.96	14.23	16.33	19.64
BPR1	BPRNF	6.34	7.57	8.66	11.15	12.07
	BPRF	13.26	16.94	19.08	21.20	22.21
BPR2	BPRNF	6.26	7.36	8.19	10.88	11.96
	BPRF	13.07	14.76	16.94	17.04	17.40
BPR3	BPRNF	6.86	7.47	8.59	11.31	12.64
	BPRF	11.76	14.11	17.54	18.62	19.47
BPR4	BPRNF	6.58	7.45	8.56	11.07	12.16
	BPRF	12.96	13.55	15.13	17.57	19.88
BPR5	BPRNF	6.07	6.88	7.87	9.75	9.74
	BPRF	11.53	12.87	16.00	16.98	17.05
BPR6	BPRNF	6.19	7.11	8.09	9.69	10.37
	BPRF	10.84	11.93	16.84	17.17	18.12

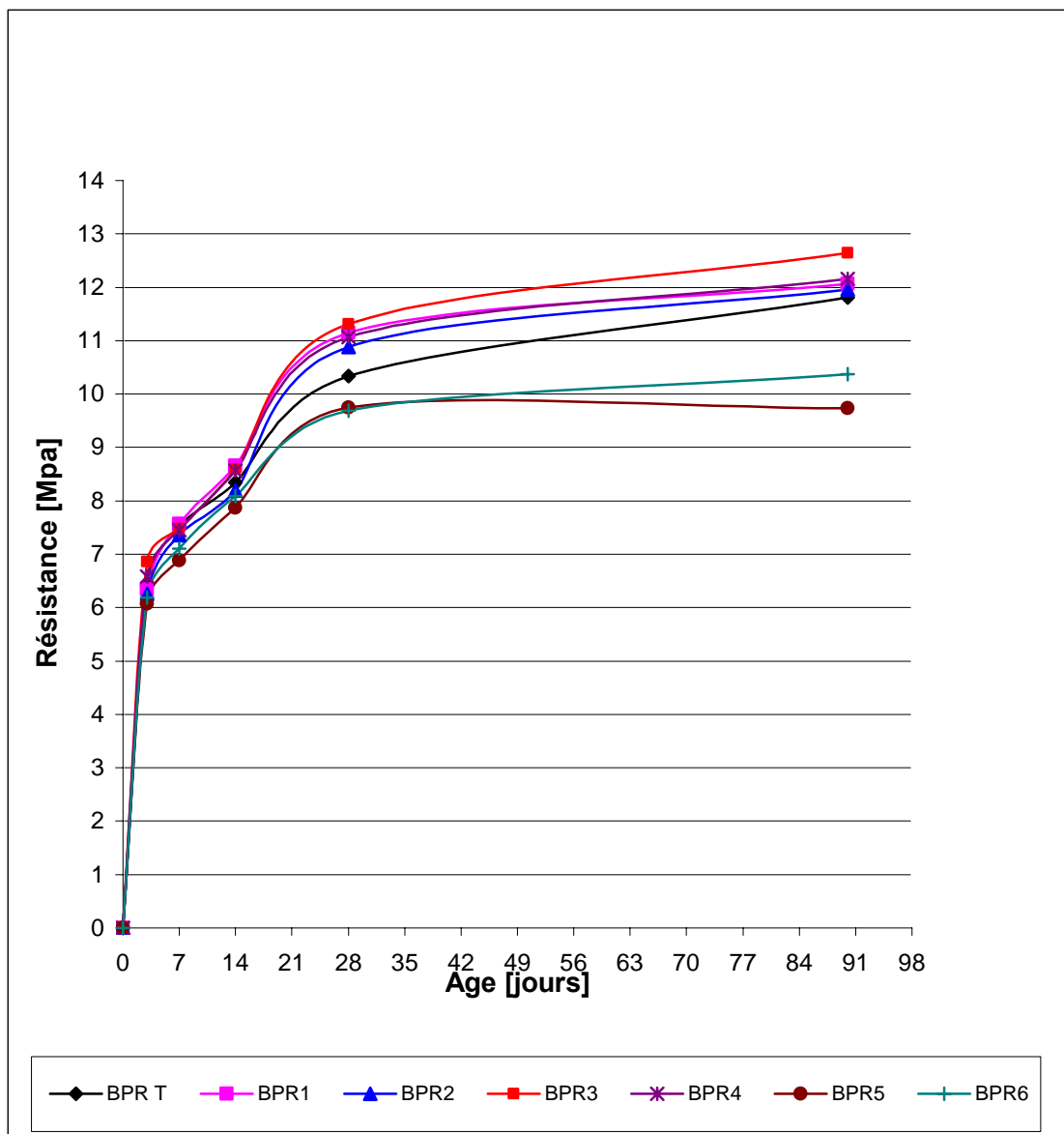


Figure 7-3 : Évolution de la résistance à la traction des bétons non fibrés (BPR NF)

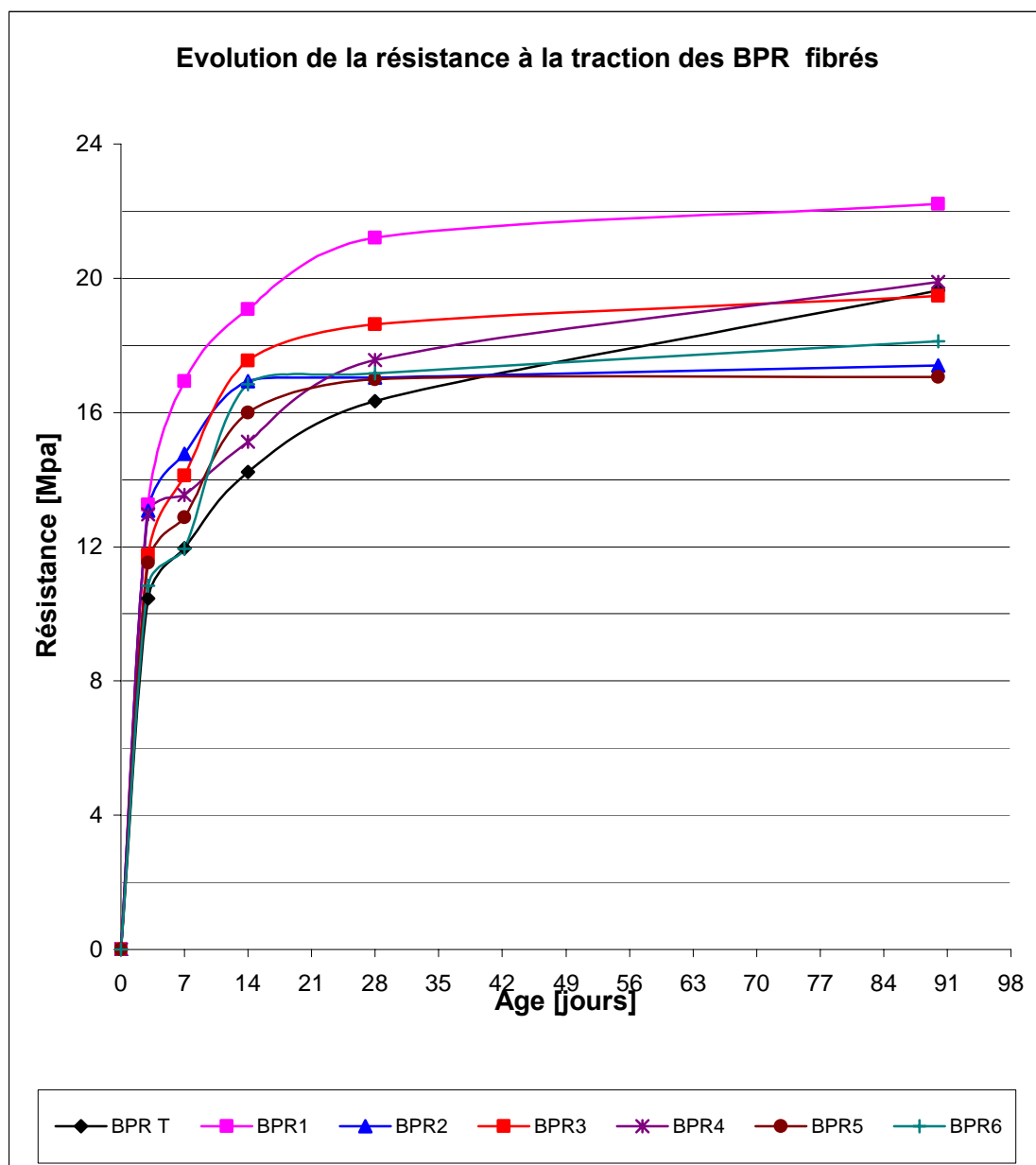


Figure 7-4 : Évolution de la résistance à la traction des bétons fibrés

La résistance en traction des BPR augmente en fonction du temps et ce indépendamment des ajouts utilisés et de la présence ou non de fibres.

La superposition de nos résultats en traction d'après les figures 7-3 et 7-4 montre que :

- Les bétons fibrés ont des résistances en traction nettement supérieures à celles des BPR non fibrés. Ceci traduit l'amélioration de la ductilité des BPR, avec ou sans ajouts, par les fibres.
- Les valeurs obtenues pour les BPR fibrés sont parfois de l'ordre du double de celles des BPR non fibrés.
- En présence de fibres, les résistances en traction des BPR à base d'ajouts sont supérieures à celles du témoin dès les jeunes âges. Par contre pour les BPR non fibrés les valeurs sont sensiblement identiques.
- Les mélanges contenant des ajouts de structure amorphe ont des résistances plus élevées traduisant une réactivité pouzzolanique plus importante.
- Les fines particules du SD participent à l'augmentation de la résistance en traction. Ceci traduit, une fois de plus, le rôle pouzzolanique partiel du sable des dunes finement broyé bien qu'il soit cristallisé.

## CONCLUSION et RECOMMANDATIONS

L'étude bibliographique montre que depuis la découverte des superplastifiants et de la fumée de silice de nouveaux procédés de fabrication ont permis d'améliorer considérablement les performances tant physiques que mécanique des bétons. Ceci s'est traduit par des améliorations de la durabilité des bétons. Par l'emploi conjoint ou non avec l'acier, les structures à base de FS et de superplastifiants sont devenues plus légères, plus esthétiques repoussant par là même les limites de l'imagination avec l'érection en 1997 du premier ouvrage en BPR.

Ce nouveau né qui se caractérise par un fort dosage en ciment et en fumée de silice, est traité thermiquement après démoulage afin d'activer les réactions d'hydratation et de pouzzolanité.

Outre, des performances mécaniques pouvant atteindre 800 MPa en compression, la faible porosité obtenue confère aux BPR une résistance importante face à l'agression extérieure.

Les essais effectués à partir de matériaux localement disponibles, ont permis de mettre en évidence l'augmentation des résistances mécaniques tant en compression qu'en traction.

La faible finesse à l'état naturel du SD rend son utilisation très économique pour la confection des BPR vu qu'il ne nécessite pas de broyage préalable. Il présente une forme sphérique qui est un avantage supplémentaire comparé à ceux issus du broyage qui présente une forte angularité. Cette sphéricité leur confère une faible exigence en eau. De plus le broyage induit des microfissures dans les grains et du coup réduisent les résistances mécaniques des mélanges auxquels ils sont incorporés.

L'adjonction de fibres aux BPR a permis d'améliorer d'une manière significative leur ductilité. Ceci s'est traduit par l'augmentation des résistances en tractions et ce dès les jeunes âges. Bien que le ciment utilisé soit un CPJ renfermant du calcaire, l'utilisation du SD et du LH en substitution binaire au ciment à raison de 15% a conduit à de nette augmentation des

résistances mécaniques. Ceci aura une incidence bénéfique tant sur le plan économique qu'écologique.

Nous sommes persuadés que les performances seront encore meilleures si les BPR venaient à être confectionnés avec des traitements thermiques.

Des observations au microscope électronique à balayage (MEB) avec un fort grossissement de l'ordre de 100 000 fois nous permettront de voir la morphologie des hydrates et plus particulièrement celles des C-S-H issus des réactions pouzzolaniques (C-S-H de seconde génération).

# RÉFÉRENCES

- [1] P.FONOLLOSA (2002) *Propriétés Mécaniques et Microstructurales de Nouvelles Matrices à Ultra Haute Performance (M.U.H.P.)*, thèse de doctorat, Université de Sherbrooke. 141 p.
- [2] D.BOULET (2001) *Etude des mécanismes de renforcement par les microfibres dans les bétons à ultra haute performance (BUHP) et les bétons cellulaires*, thèse de doctorat (Ph.D) Université Laval, 323 p.
- [3] L. GATTY (1996) *Caractérisations microtexturales et microanalytiques des Bétons de Poudres Réactives par microscopes électroniques*, thèse de Doctorat Université de Nantes, 148 p.
- [4] P.RICHARD; *La révolution des Bétons de Poudres Réactives*, La Tribune Desfossés, p16, 29 août 1995;
- [5] Y.MALIER (1992) *L'utilisation du BHP dans une approche « système » de la construction*, Les Bétons à hautes performances, Ed. Presse de l'Ecole Nat. des Ponts et Chaussées, p.3-21.
- [6] H.H.BACHE (1981) *Densified Cement / ultra-fine-particles-based materials*, The second international conference on superplasticizers in concrete, Ottawa, Canada, p.1-35.
- [7] M.LESSARD (1994) Les bétons à haute performance, Cours GCI 710 Liants hydrauliques, Université de Sherbrooke.
- [8] P.C.AITCIN (1998) *High performance concrete*, Modern Concrete Technology, 5, E & FN Spon, London 591 p.
- [9] Y.MALIER, D.BRAZILLIER, S.ROI (1992) *L'ouvrage expérimental de Joigny*, Les bétons à hautes performances, Ed. Presse de l'Ecole Nat. des Ponts et Chaussées, p. 457-470.
- [10] M.RALSTON, R.KORMAN (1989) *Put that in your pipe and cure it*, ENR, Février, p. 44-53.
- [11] M.LACHEMI, R.ADLINE, P.C.AITCIN P.RICHARD (1998) *The Sherbrooke RPC footbridge*, Structural Engineering International, Mai, vol.8, no 2, p. 140-144.
- [12] S.BRUNAUER, M.YUNDENFREUND, I.ODLER, J.SKALNY (1973) *Hardened Portland cement pastes of low porosity: VI mechanism of the hydration process*, Cement and Concrete Research, vol. 3, no. 2, p. 129-145.
- [13] D.M.ROY, G.R.GOUDA, A.BOBROWSKY (1972) *Very high strength cement pastes prepared by hot pressing and other high pressure techniques*, Cement and Concrete Research, vol. 2, no 3, p. 349-365.

- [14] H.H.BACHE (1987) *Introduction to Compact Reinforced Composite*, Nordic Concrete Research, no 6, p. 19-33.
- [15] P.ROSSI, S.RENWEZ, A.BELLOC (1995) *Les bétons fibrés à ultra hautes performances*, Bulletin de liaison des LPC, no 196, p. 61-66
- [16] P.ROSSI, S.RENWEZ, F.GUERRIER (1996) *Les bétons à ultra hautes performances fibrés : formulation, comportement mécanique, modélisation*, 2e Colloque international francophone sur les bétons renforcés de fibres métalliques, Toulouse,France, p. 217-231.
- [17] G. BIRELLI, G. GADORET, F. DUTALLOIR, T. THIBAUD (1998) *A new very high performance concrete: initial industrial application*, Symposium international sur les bétons à haute performance et de poudres réactives, Sherbrooke, canada, vol 3, p. 177-201.
- [18] LE CHATELIER (1889) *Recherches expérimentales sur la constitution des mortiers hydrauliques*, thèse, Paris.
- [19] W. MICHAELIS (1909) *Mode de durcissement des liants hydrauliques calcaires*, Revue des matériaux de constructions, n° 53, p. 198-202.
- [20] P. ACKER (1987) *Comportement mécanique du béton : apport de l'approche physico-chimique*, Thèse, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées.
- [21] D.P. BENTZ, E.J. GARBOCZI (1991) *Percolation of phases in three-dimensional cement paste microstructural model*, Cement and Concrete Research, vol.21, p. 325-344.
- [22] J. M. TORRENTI (1992) *La résistance du béton au très jeune âge*, Bull. liaison LPC, n°179, P. 31-41.
- [23] M. REGOURD (1981) *Microstructures et propriétés des ciments, mortiers et bétons*, Ciments, bétons, plâtres, chaux, n° 734 – 1/82, p. 41-48.
- [24] S. MINDESS, J.F. YOUNG (1981) *Concrete*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, USA, 671 p.
- [25] G. LI (1994) *Etude du phénomène d'expansion sulfatique dans les bétons : comportement des enrobés de déchets radioactifs sulfatés*, Thèse, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 242 p.
- [26] M. REGOURD (1982) *Hydratation du ciment Portland*, Le béton hydraulique, Paris, Ed Ecole Nat. Ponts et Chaussées, p. 193-221.
- [27] M. REGOURD, B. MORTUREUX, E. GAUTIER (1981) *Hydraulic reactivity of various pozzolans*. Fifth International Symposium on Concrete Technology, Monterey, Mexique.
- [28] P. BARRET, D. BERTRANDIE (1986) *Fundamental hydration kinetic features of the major cement constituents:  $Ca_3SiO_5$  and  $\beta Ca_2SiO_4$* , Journal de chimie physique, 83, n°11/12.

- [29] E.J. REARDON (1990) *An ion interaction model for determining ion equilibria cement/water systems*, Cement and Concrete research, vol.20,n° 1, p. 175-192.
- [30] H.F.W. TAYLOR (1964) *the chemistry of cements*, Academic press, London, vol. 1, 460 p.
- [31] R.F. FELDMAN (1981) *Pore structure, permeability and diffusivity as related to durability*, Principal report, Theme 4, 8<sup>th</sup> International Congress on the Chemistry of cement, Rio de Janeiro, vol.1, p.336-356.
- [32] H.F.W. TAYLOR (1986) *Proposed Structure for Calcium Silicate Hydrate Gel*, Journal of the American Ceramic Society, vol.6, n°69, p.464-467.
- [33] D.VIEHLAND, G.F .LI, L.J. YUAN, Z. XU (1996) *Mesostructure of calcium silicate hydrate (C-S-H) gels in Portland cement paste: short-range ordering, nanocrystallinity and local compositional order*, Journal of the American Ceramic Society, vol. 79, p.1731-1744.
- [34] X. CONG, R.J. KIRKPATRIK (1996) *<sup>29</sup>Si NMR study of the structure of calcium silicate hydrate*, Advances in Cements Research, vol. 3, p. 133.
- [35] H. ZANNI, R. RASSEM-BERTOLO, L. FERNANDEZ, S. MASSE, P. NIETO (1995) *La RMN : une technique pour l'étude des ciments*, Bull. liaison des Ponts et Chaussées, 195 réf. 3880, p. 61-72.
- [36] M. BUIL (1990) *Comportement physico-chimique du système ciment-fs*, Annales de l'I.T.B.T.P, n° 483, série béton 271, p. 19-29.
- [37] T.C. POWERS, T.L. BROWNYARD (1946) *Studies of the physical properties of hardened Portland cement pastes – Part 3: theoretical interpretation of adsorption data*, Journal of the American Concrete Institute, vol. 18, n° 4, p. 38-48.
- [38] P. LONGUET, L. BEUGLEN, A. ZELWER (1974) *La phase liquide du ciment hydraté*, Publication technique CERILH n° 219.
- [39] P.C. AITCIN (2001) *Béton à haute performance*. Edition Eyrolles.
- [40] V.S. RAMACHANDRAN, V.M. MALHATRA, C.JOLICOEUR, N. SPIRATOS (1998) *Superplasticizers : properties and applications in concrete*. Centre canadien de la technologie des minéraux et de l'énergie, canada.
- [41] E. HANNA, K. LUKE, D. PERRATON, P.C. AITCIN (1989) Dans Proceedings of the 3<sup>rd</sup> CANMET/ACI International Conference on Superplasticizer and Other Chemical Admixtures in Concrete, Ottawa, ACI SP,119-171.
- [42] N.MIKANOVIC (2001) *Interaction Superplastifiant-Ciment Durant l'Hydratation Initiale*. Mémoire de maitrise, Université de Sherbrooke, 123 p.
- [43] P. RICHARD, M. CHEYRIZY (1995a) *Les Bétons de Poudres Réactives*, Annales de l'Institut Du Bâtiment et des Travaux Publics, n° 532.

- [44] J. C. MASO (1982) *La liaison pâte-granulats, Le Béton Hydraulique*, Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, ISBN 2-85978-033-5, p. 247-269.
- [45] P. RICHARD, M. CHEYRIZY (1995b) *Composition of Reactive Powder Concretes*, Cement and Concrete Research, vol. 25, 7, p. 1501-1511.
- [46] F. de LARRARD, M. BUIL (1987) *Granularité et compacité dans les matériaux de génie civil*, Matériaux et constructions, vol. 20, p 117-126.
- [47] F. de LARRARD, T. SEDRAN (1994) *Optimization of Ultra-high Performance Concrete by using a Packing Model*. Cement and Concrete Research, vol. 24, n° 6, p. 997-1009.
- [48] R. J. FELDMAN, J. J. BEAUDOIN (1976) Cement and Concrete Research, vol.6, n° 3, p. 389-400.
- [49] H. F. W. TAYLOR (1977) *Discussion*, Cement and Concrete Research. Vol. 4, p. 465-468.
- [50] L. COPPOLA, R. TROLI, S. COLLEPARDI, A. BORSOI, T. CERULLI, M. COLLEPARDI (1996) *Innovative Cementitious Materials from HPC to RPC. PartII, the Effect of Cement and Silica Fume Type on the Compressive Strength of Reactive Powder Concrete*. L'Industria Del Cemento.2, p. 112-125.
- [51] D. P. BENTZ, C. J. HAEKER (1999) *an Argument for Using Coarse Cements in High-Performance Concretes*. Cement and Concrete Research, vol. 29, p. 615-618.
- [52] F. de LARRARD (1989) *Ultrafine Particules for the Making of very High Strength Concretes*, Cement and concrete Research, vol. 19, n° 1, p. 161-171.
- [53] M. N. OUDJIT (1986) *Réactivité des fumées de silice condensées en présence de chaux ou de ciment Portland*, Thèse de doctorat, INSA de TOULOUSE, 120 p.
- [54] H. ZANNI, M. CHEYREZY, V. MARET, S. PHILIPPOT, P. NIETO (1996) *Investigation of hydration and pozzolanic Reaction in Reactive Powder Concrete (RPC) using <sup>29</sup>Si NMR*. Cement and Concrete Research, vol. 26, n° 1, p. 93-100.
- [55] S. PHILIPPOT, V. MARET, H. ZANNI (1997) *Effect of Post Set Heat Treatment on Hydrate Formation in Reactive Powder Concrete Studied by <sup>29</sup>Si NMR*, Nuclear Magnetic Resonance Spectroscopy of Cement-Based Materials, Springer.
- [56] J. C. BENEZET, A. BENHASSAINE (1999) *Influence de la taille des particules sur la réactivité pouzzolanique de poudres de quartz*. Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées, n° 219, p. 17-28.
- [57] O. BONNEAU (1997) *Etude des effets physico-chimiques des superplastifiants en vue d'optimiser le comportement rhéologique des bétons à ultra hautes performances*. Thèse de doctorat, Université de Sherbrooke et ENS Cachan, 134 p.

- [58] P. ROSSI, A. L. BELLOC (1995) *Les Bétons Fibrés à Ultra-Hautes Performances*. Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Annales ITBTP, n° 196, (mars- avril), p. 61.
- [59] N. ROUX, M. BARRANCO (1995) *Mise en œuvre des bétons de poudres réactives (BPR) dans le BTP*. Annales ITBTP, n° 532, p. 128-132.
- [60] O.BONNEAU, M. LACHEMI, E. DLLAIRE, J. DUGAT, P. C. AITCIN (1997) *Mechanical Properties and Durability of two Industrial Reactive Powder Concretes*. ACI Materials Journal, July-August, p. 286-290.
- [61] Y. YAMAMOTO, M. KOBAYASHI (1982) *Use of Mineral Fines in High Strength Concrete-Water Requirement and Strength*. Concrete International, July 1982, p. 33-40.
- [62] M.NEHDI, S. MINDESS, P. C. AITCIN (1998) *Rheology of High Performance Concrete: Effect of Ultrafine Particles*. Cement and Concrete Research, vol. 28, n° 5, p. 687-697.
- [63] P. ROSSI (1998) *Les bétons de fibres métalliques*. Presse de l'ENPC.
- [64] M. BEHLOUL (1996) *Analyse et modélisation du comportement d'un matériau à matrice cimentaire fibrée à ultra hautes performances (BPR)*. Thèse de doctorat de l'Ecole normale supérieure de Cachan, 182 p.
- [65] J. DUGAT, N. ROUX, G. BERNIER (1995) *Etude Expérimentale de la Déformation sous Contrainte et du Comportement à la Rupture du BPR*. Annales ITBTP, n° 532, p. 112-121.
- [66] P.TJIPTOBROTO, W. HANSEN (1991) *Mechanism for Tensile Strain Hardening in High Performance Cement-based Fiber Reinforced Composites*. Cement and Concrete Research, vol. 13, p. 265-273.
- [67] M. J. SHANNAG, W. HANSEN (2000) *Tensile Properties of Fiber-Reinforced Very high Strength DSP Mortar*. Magazine of Concrete Research, vol. 52, n° 2, p. 101-108.
- [68] B.A. GRAYBEAL (2005) *CHARACTERIZATION OF THE BEHAVIOR OF ULTRA-HIGH PERFORMANCE CONCRETE*, thèse de doctorat (PhD), Université de Maryland, 383 p.
- [69] I.MARKOVIC (2006) *high performance hybrid-fibre concrete-development and utilisation*. Thèse de doctorat (PHD). Université Van belgrado, servié-228P.
- [70] M. RHEAUME (1996) *Etude du comportement mécanique des pâtes de ciment renforcées de micro-fibres*. Mémoire de maîtrise, Université Laval, 137 p.
- [71] N. BANTHIA, J. SHENG (1990) *Micro-Reinforced Cementitious Materials*. Materials research society fall meeting, vol. 211, Boston, p. 25-32.
- [72] A. LOUKILI, N. ROUX, D. ARLLOT, A. FEYLESSOUFI (1996) *Effect of a High Reduction in the Initial Water Content in Cement Based Matrices*. Proceeding of the 4<sup>th</sup> International Symposium on utilization of High-Performance Concrete, Paris, p. 1367-1373

- [73] A.LOUKILI, A. KHELIDJ, P. RICHARD (1999) *Hydration Kinetics, Change of Relative Humidity and autogenous Shrinkage of Ultra-high Performance Concrete*. Cement and Concrete Research, vol. 29, p. 577-584.
- [74] V. MATTE, M. MOROVILLE, F. ADNOT, C. RICHET, J. M. TORRENTI (2000) *Simulated microstructure and transport properties of ultra-high performance cement based materials*. Cement and Concrete Research, vol. 30, p. 1947-1954.
- [75] A. BOUMIZ (1995) *Etude comparée des évolutions mécaniques et chimiques des pâtes de ciment à très jeune âge*. Thèse de doctorat, Université Paris VII, 153 p.
- [76] C.VERNET, J.LUKASIK, E.PRAT (1998) *Nanostructure, Porosity, Permeability, and Diffusivity of Ultra-High Performance Concrete (UHPC)*. Symposium International sur les bétons à haute performance et poudres réactives. Sherbrooke, vol. 3, p. 17-35.
- [77] R.M. GUTIEREZ, L.N. DIAZ, S. DELVASTO (2005) *Effect of pozzoulans on the performance of fiber-reinforced mortars*. Cement and Concrete Composites, vol. 27, n° 5, p. 593-598.
- [78] M. LANEZ (2005) *Contribution à l'Étude des Bétons de Poudres Réactives*. Mémoire de Magister, Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene, 130 p.
- [79] J. C. BENEZET, A. BENHASSAINE (2001) *Contribution des populations granulométriques d'une poudre lors de la réaction pouzzolanique en pâte de chaux*. Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées, n° 235, p. 59-67.
- [80] A.DELAGRAVE (1996) *Mécanisme de pénétration des ions clore et de dégradation des systèmes cimentaires normaux et à haute performance*, Thèse de doctorat, Université Laval, Canada, 361 p.

## ANNEXE : Appareillage utilisé



Photos 1 : Cône de MARSH



Photos 2 : Maniabilimètre à mortier LCPC



Photos 3 : Malaxeur utilisé



Photos 4 : Appareil pour le serrage des épreuves pour les BPR moules pour prismatiques de 4X4X16 cm



Photos.5 : Essais de traction par flexion sur des éprouvettes 4x4x16 cm



Photos.6 : Essais de compression sur des éprouvettes 4X4X16 cm

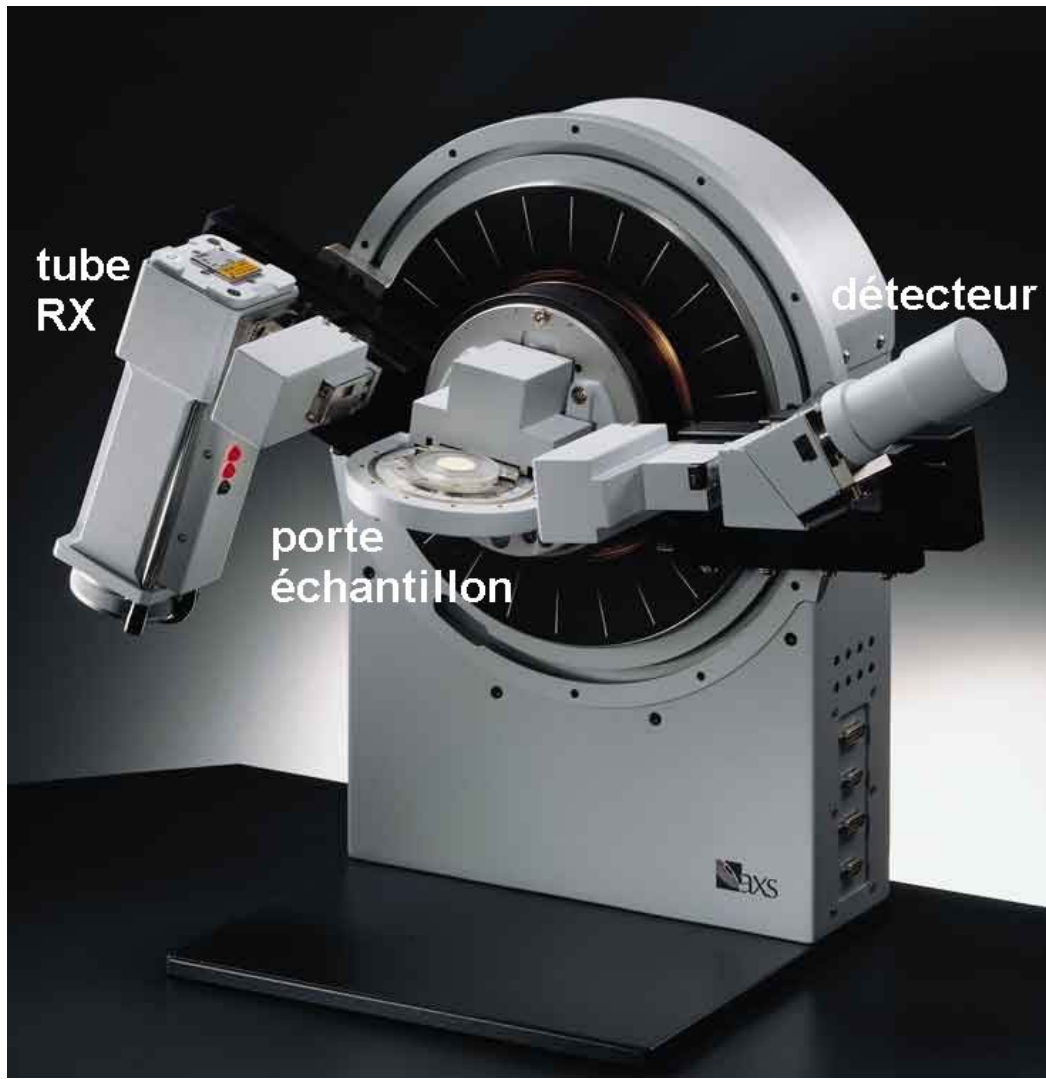


Photo 7 : Diffractomètre aux rayons -X